

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Aplicación de técnicas de diseño pasivo para optimización de habitabilidad
y confort de los usuarios en edificaciones verticales existentes

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Jose Maria
Javier González Mollinedo para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Civil Arquitectónica

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



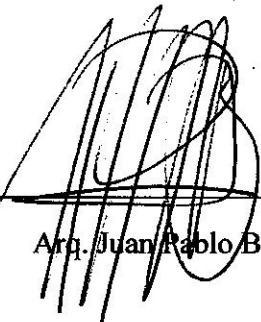
Aplicación de técnicas de diseño pasivo para optimización de habitabilidad
y confort de los usuarios en edificaciones verticales existentes

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Jose Maria
Javier González Mollinedo para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Civil Arquitectónica

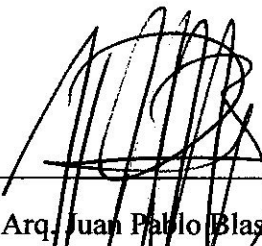
Guatemala,


2025

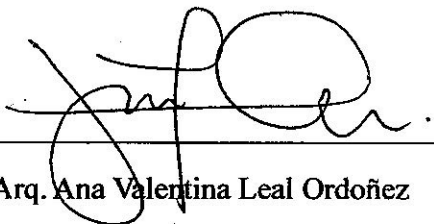
Vo.Bo.:

(f) 
Arq. Juan Pablo Blas Arias

Tribunal Examinador:

(f) 
Arq. Juan Pablo Blas Arias

(f) 
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

(f) 
Arq. Ana Valentina Leal Ordoñez

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de junio de 2025.

ÍNDICE GENERAL

	Página
LISTA DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS	3
A Objetivo general	3
B Objetivos específicos	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
A El clima en Guatemala	4
B Conceptos técnicos	5
1 Confort térmico	5
2 Confort visual	5
3 Arquitectura pasiva	5
4 Beneficio de ahorro energético	6
5 Convección y conducción	6
6 Coeficiente de transferencia de calor (K)	6
7 Humedad	6
8 Condición de diseño exterior	6
9 Usuario	6
10 Aperturas controladas por el usuario	6
11 Movimientos de aire	6
12 Temperatura del aire	6
13 Temperatura radiante media	6
14 Temperatura operativa	7
15 Unidad Clo	7
16 Tasa metabólica	7
17 Escala de sensación térmica	7
18 Temperatura de bulbo humedo	8
19 Aislamiento acústico	8
20 Fuentes de ruido internas en edificaciones	8
21 Tipos de ruido	9
22 Categorización de materiales para aislamiento acústico	9
23 Métodos de cálculo de insonorización	9

24	Acondicionamiento acústico	9
25	Solsticios y equinoccios	10
26	Carta solar	10
27	Quiebrasol	10
28	Voladizo	11
29	Iluminación natural	11
30	Iluminación artificial	11
31	Artefactos ahorradores de agua	11
32	Microclima	11
33	Potencial de luz solar	12
C	Herramientas computacionales o informáticas	12
1	Simuladores computacionales	12
2	<i>Software</i> BIM	12
D	BIM (<i>building information modeling</i>)	13
1	Autodesk Revit	13
2	Autodesk Forma	13
3	DIALux	14
4	CYPETHERM Loads	14
5	Archivo IFC	14
6	Familias de Autodesk Revit	14
E	Normativas aplicables	14
1	ANSI/ASHRAE 55: <i>Thermal enviromental conditions for human occupancy</i>	14
2	ANSI/ASHRAE 90.1: <i>Energy standard for buildings except low-rise residential buildings</i>	14
3	LEED User guide	14
4	<i>Edge certification manual</i>	15
V.	METODOLOGÍA	16
A	Análisis de sitio	16
B	Análisis de materiales de edificación	16
C	Modelado BIM de edificación existente	16
D	Identificación de aspectos a mejorar a partir de simulaciones	16
E	Integración de estrategias de arquitectura pasiva a diseño original	17
F	Someter a simulaciones el nuevo diseño de edificación	17
G	Producción de documentación y conclusiones	17
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
A	Información de edificación y análisis de sitio	18
B	Hipótesis sobre posibles aspectos a mejorar	27
C	Elaboración de modelos arquitectónicos y analíticos	27
D	Cargas térmicas modelo original	31
E	Tiempos de reverberación en modelo original	35
F	Condiciones de iluminación en los recintos del modelo original	36

G	Cargas térmicas en modelo modificado	39
H	Tiempos de reverberación en modelo modificado	43
I	Condiciones de iluminación en los recintos del modelo modificado	43
VII. CONCLUSIONES		54
VIII. RECOMENDACIONES		55
IX. BIBLIOGRAFÍA		56

LISTA DE CUADROS

1	Composición de losa de entrepiso de modelo original	31
2	Composición de muro estructural de 17 cm de espesor de modelo original (Tabique)	32
3	Composición de muro estructural de 20 cm de espesor de modelo original (Fachada)	32
4	Composición de muro de tablayeso 10 cm de espesor de modelo original (Tabique)	33
5	Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Dormitorio 1-2	36
6	Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Dormitorio 3	36
7	Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación para Sala/Comedor .	36
8	Composición gráfica de muro estructural de 20 cm de modelo modificado	40
9	Composición de losa de entrepiso de modelo modificado	41
10	Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Dormitorio 1-2 (modelo modificado)	43
11	Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Dormitorio 3 (modelo modificado)	43
12	Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Sala/Comedor (modelo modificado)	43
13	Comparación de cargas térmicas modelo original y modelo modificado Apto. 608 .	49
14	Comparación de cargas térmicas modelo original y modelo modificado Apto. 605 .	50

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Mapa nacional de regiones climáticas por departamento de Guatemala	4
2	Temperatura por hora en 2024 en Ciudad de Guatemala	5
3	Método gráfico de zona de confort: rangos aceptables de temperatura operativa (t_o) y humedad	8
4	Gráfica representativa de la posición de la Tierra durante solsticios y equinoccios .	10
5	Modelo desarrollado por medio de software BIM	12
6	Planta típica de edificación	19
7	Edificación situada en topografía pertinente al sitio de construcción	19
8	Localización de punto base del proyecto y sitio de estudio	19
9	Camino del sol en el equinoccio de otoño	20
10	Camino del sol en el equinoccio de otoño 2	20
11	Camino del sol en el equinoccio de otoño 15:00 hrs.	21
12	Camino del sol en el equinoccio de otoño 2 15:00 hrs.	21
13	Camino del sol en el equinoccio primavera	21
14	Camino del sol en el equinoccio primavera 2	22
15	Camino del sol en el equinoccio primavera 15 hrs.	22
16	Camino del sol en el equinoccio primavera 2 15 hrs.	22
17	Camino del sol en el equinoccio primavera 2 15 hrs.	23
18	Camino del sol Junio	23
19	Camino del sol Diciembre	23
20	Horas solares fachada suroeste durante el 21 de marzo	24
21	Horas solares fachada noreste durante el 21 de marzo	25
22	Horas solares fachada suroeste durante el 21 de diciembre	25
23	Horas solares fachada noreste durante el 21 de junio	25
24	Arquitectura de edificación original	26
25	Estudio de viento de emplazamiento de Autodesk Forma	26
26	Modelo arquitectónico en el ecosistema de BIMserver center	28
27	Tipologías de apartamento sometidas a simulaciones	29
28	Tipología y recintos de apartamento 608 en IFC Builder	29
29	Tipología y recintos de apartamento 605 en IFC Builder	30
30	Composición gráfica de losa de entepiso de modelo original	31
31	Composición gráfica de muro estructural de 17 cm de modelo original	32
32	Composición gráfica de muro estructural de 20 cm de modelo original	33
33	Composición gráfica de muro tablayeso 10 cm de espesor de modelo original . . .	34
34	Cargas térmicas por recinto de la tipología de apartamento 608 (Carga térmica en conjunto máxima 21 mayo)	35
35	Cargas térmicas por recinto de la tipología de apartamento 605 (Carga térmica en conjunto máxima 21 mayo)	35
36	Distribución de luminarias original en vista de planta	37

37	Tipo de luminaria y altura de instalación	38
38	Resultados y cumplimiento según las características de los espacios	38
39	Tipología de apartamento 605 en el entorno de DIALux (modelo original)	39
40	Carta solar para Ciudad de Guatemala	40
41	Composición gráfica de muro tablayeso 20 cm de espesor de modelo modificado (Fachada)	41
42	Composición gráfica de losa de entepiso de modelo modificado	41
43	Cargas térmicas por recinto de la tipología de apartamento 608 (Carga térmica en conjunto máxima 21 mayo)	42
44	Cargas térmicas por recinto de la tipología de apartamento 605 (Carga térmica en conjunto máxima 21 mayo)	42
45	Guía gráfica para distribución de luminarias	44
46	Distribución de luminarias modificada vista en planta	45
47	Tipo de luminaria utilizada en sala, comedor, lavadora/secadora, y dormitorio 1 y 2	45
48	Tipo de luminaria utilizada en dormitorio 3	46
49	Tipo de luminaria utilizada en baño y cocina	46
50	Resultados y cumplimiento según las características de los espacios modificado	47
51	Tipología de apartamento 605 en el entorno de DIALux (modelo modificado)	47
52	Arquitectura de edificación modificada	48
53	Comparación gráfica de cargas térmicas modelo original y modelo modificado Apto. 608	49
54	Comparación gráfica de cargas térmicas modelo original y modelo modificado Apto. 605	50
55	Comparación gráfica de tiempos de reverberación en el recinto de Sala/Comedor	51
56	Comparación gráfica de tiempos de reverberación en el recinto de Dormitorio 1/2	52
57	Comparación gráfica de tiempos de reverberación en el recinto de Dormitorio 3	52

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo la implementación de estrategias de diseño pasivo en una edificación de vivienda vertical existente respetando el número de apartamentos, con la intención de respetar los metrajes cuadrados planteados por el diseño original. Plantear formas de hacer más eficiente los consumos de servicios existentes implementando aparatos y dispositivos ahorradores que se apeguen al costo de aquellos planteados originalmente. Asimismo modificar los sistemas activos de la edificación con alternativas que sean eficientes en sus tareas y reduzcan el costo monetario que representa. El proyecto se realizará en Ciudad de Guatemala y las simulaciones que determinan los distintos aspectos de habitabilidad se realizarán para definir el punto de partida para un diseño adecuado y versátil para todas las etapas del año y las diferentes condiciones climáticas que estos representan. Las simulaciones a las que se someterá la edificación serán: el camino del sol, comportamiento de las corrientes de aire en el sitio, energía solar a las que se somete las distintas fachadas del edificio, cargas térmicas en las distintas tipologías de apartamentos y espacios según su posicionamiento, entre otras. Estas simulaciones se realizarán en dos modelos de la edificación, un modelo siendo el diseño original y el otro será el modelo realizado para este trabajo de graduación con estrategias de diseño pasivo y con la integración de aparatos y dispositivos ahorradores. Los resultados serán comparados para determinar el confort y condiciones de habitabilidad de cada modelo.

ABSTRACT

The present graduation project aims to implement passive design strategies in an existing vertical housing building, maintaining the same number of apartments in order to respect the square meterage outlined in the original design. The goal is to propose ways to make existing service consumption more efficient by incorporating saving devices and appliances that are comparable in cost to those originally planned. Likewise, the project's objective includes modifying the building's active systems with alternatives that are efficient in their functions and reduce the monetary costs they represent. The project will take place in Guatemala City, and simulations will be carried out to determine various aspects of habitability, serving as a starting point for an appropriate and versatile design suitable for all seasons and the different climatic conditions they entail. The simulations the building will undergo include: sun path analysis, airflow behavior on the site, solar exposure on the different façades of the building, thermal loads in the various apartment typologies and spaces based on their orientation, potential for natural lighting through openings, among others. These simulations will be performed on two models of the building: one representing the original design, and the other representing the version developed for this graduation project, incorporating passive design strategies and energy-saving devices and appliances. The results will be compared to determine the comfort and habitability conditions of each model. Subsequently, a financial analysis will be carried out to determine the execution cost of the proposed changes and the potential savings reflected in utility services.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de graduación tiene como propósito principal evaluar los beneficios alcanzables mediante la implementación de estrategias de arquitectura pasiva en una edificación de vivienda vertical existente en la Ciudad de Guatemala. Se busca respetar el número de apartamentos y metrajes del diseño original, mientras se optimiza el consumo de servicios mediante dispositivos eficientes y se proponen modificaciones en los sistemas activos que mejoren el rendimiento y reduzcan los costos operativos.

Para alcanzar este objetivo, se desarrollaron dos modelos: el primero corresponde a la edificación original, y el segundo incorpora las mejoras propuestas en este estudio. Ambos modelos fueron sometidos a simulaciones utilizando herramientas BIM y software especializado como Autodesk Revit, Forma, DIALux y Cypetherm Loads. Las simulaciones se enfocaron en aspectos clave como el análisis solar, iluminación, cargas térmicas y tiempos de reverberación acústica.

A partir del análisis del sitio y las condiciones originales del diseño, se planteó como hipótesis que la implementación de estrategias de arquitectura pasiva, como el cambio de materiales de fachada con menor conductividad térmica, la incorporación de voladizos y quiebrasoles y la sustitución de luminarias y acabados interiores, permitiría mejorar las condiciones térmicas, visuales y acústicas de los espacios. Los resultados obtenidos validaron estas hipótesis: el modelo modificado presentó una reducción considerable en las cargas térmicas, mejor desempeño en confort acústico con menores tiempos de reverberación, y mayor aprovechamiento de la iluminación, lo que evidencia que es posible optimizar la habitabilidad en edificaciones existentes mediante intervenciones pasivas y eficientes.

II. JUSTIFICACIÓN

La construcción en Guatemala es un campo laboral que ha potenciado su crecimiento en los últimos años. Representa un porcentaje significativo en el producto interno del país y ha evolucionado de la mano de herramientas innovadoras y de metodologías de planificación y ejecución efectivas. Sin embargo, la demanda de vivienda y los entes reguladores de construcción han creado condiciones de habitabilidad que le han dado prioridad a satisfacer características económicas en lugar de la calidad de vida de los usuarios. Cada día más el espacio habitable disponible para aquellos guatemaltecos que buscan una nueva vivienda se reduce y los precios se elevan. ¿Hasta que extremo se debe reducir la calidad de vida para obtener la mayor ganancia monetaria? (PRONACOM, 2022).

Existen maneras de responder estas preguntas, más puntualmente podemos hacerlo de la mano de la rápida evolución de tecnología y la metodología BIM (Building information modeling). Esta metodología y las distintas herramientas pertenecientes a este ecosistema brindan la oportunidad de generar proyectos amigables con el usuario si se implementan de manera correcta y con intención. La arquitectura puede tener impacto positivo y generar sensaciones de bienestar a aquellas personas que habitan proyectos diseñados con esta intención. Los espacios en los que residimos pueden tener distintas consecuencias en nuestro día a día, desde como nos sentimos al despertar hasta la calidad de sueño que experimentamos durante la noche (Revista interior gráfico, 2021).

Este impacto positivo se logra por medio de la implementación de estrategias de diseño pasivas que tienen como objetivo crear espacios eficientes en términos de consumo de servicios como agua y electricidad. Asimismo, la arquitectura pasiva se puede implementar sin sacrificar bienes monetarios y es fácilmente adaptable a proyectos que tienen como objetivo usuarios con limitaciones de financiamiento. Esta metodología de diseño puede ser explotada y mejorada de la mano de las herramientas BIM gracias a su amplia gama de disciplinas que permiten predecir y simular el efecto que tendrán estos diseños ejecutados.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar los beneficios alcanzables por la implementación de estrategias de arquitectura pasiva e implementarlos en conjunto con nuevas maneras de utilización de sistemas activos en una edificación de vivienda vertical existente, documentar y comparar los resultados obtenidos.

B. Objetivos específicos

- Realizar un modelo de la edificación existente y determinar los siguientes aspectos: Cargas térmicas por irradiancia solar através de cerramientos, niveles de iluminación artificial, y tiempo de reverberación acústica.
- Ejecutar simulaciones con la finalidad de determinar las características de habitabilidad en los espacios de la edificación vertical e identificar oportunidades de mejora en el diseño original como cambio de materiales de fachada, orientación de aperturas, implementación de voladizos o parteluces, etc.
- Elaborar un modelo alternativo implementando los cambios identificados con la finalidad del mejoramiento de las condiciones de habitabilidad de los espacios y proceder a realizar las simulaciones nuevamente.
- Recopilar los resultados generados, comparar ambas edificaciones y destacar los aspectos que mejoraron. Las mejoras se identificarán como las cargas térmicas por irradiancia en los espacios, tiempos de reverberación, y eficiencia lumínica en los espacios.

IV. MARCO TEÓRICO

A. El clima en Guatemala

El clima en Guatemala se origina a partir de los fenómenos que se generan por efecto de la circulación general de la atmósfera, la influencia oceánica y este va adquiriendo características particulares por la posición geográfica y la topografía del país.

Dentro del país cada región tiene sus propias características climáticas locales debido al efecto de la topografía regional, vegetación, geología y tipos de suelo, permitiendo definir ocho regiones perfectamente caracterizadas.



Figura 1. Mapa nacional de regiones climáticas por departamento de Guatemala
Fuente: (Universidad Mariano Gálvez, 2017)

La Ciudad de Guatemala es perteneciente a la región del Altiplano Central, comprende parte de los departamentos de Sololá, Chimaltenango, Sacatepequez, Santa Rosa, Alta y Baja Verapaz, El Progreso y Jalapa, es considerada como una región montañosa, lo que favorece al desarrollo de microclimas, sus elevaciones oscilan entre 1000 y 2500 metros sobre el nivel del mar. Existen

climas que varían de templados y semifríos de carácter húmedos y semisecos (Universidad Mariano Gálvez, 2017).

En Ciudad de Guatemala, la temporada de lluvia es nublada, la temperatura seca es mayormente despejada y es caliente durante todo el año. La temperatura generalmente varía de 13°C a 27°C y rara vez baja de 11°C o sube más de 29°C (Weather Spark, 2024).

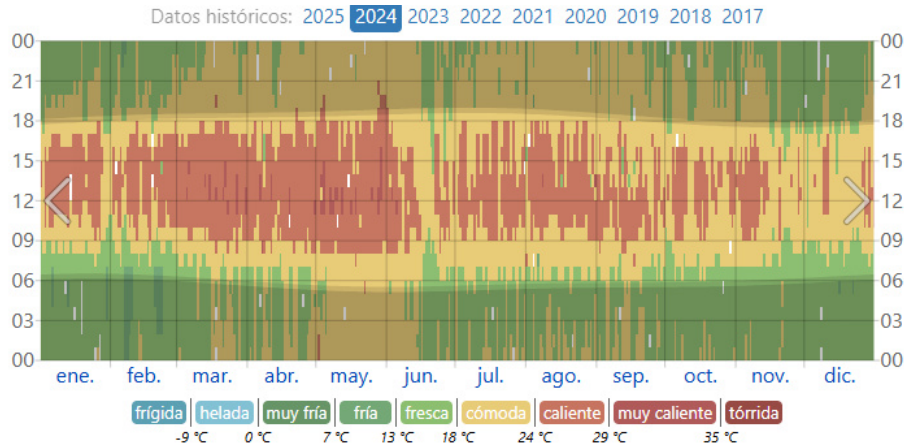


Figura 2. Temperatura por hora en 2024 en Ciudad de Guatemala

Fuente: (Weather Spark, 2024)

B. Conceptos técnicos

1. Confort térmico Se refiere a la sensación de comodidad que experimenta una persona en relación con la temperatura del entorno en el que se encuentra. Durante el proceso de diseño de una edificación se debe tener en cuenta este aspecto para asegurar condiciones agradables en el interior de los espacios habitables. El objetivo es proporcionar condiciones térmicas que sean aceptables para los ocupantes y que les permita realizar sus actividades de forma cómoda y eficiente (Passivhaus architecture, 2017).

2. Confort visual Condiciones de espacio en las que el usuario puede realizar sus actividades cotidianas sin recurrir a la utilización de iluminación artificial durante el día y que la luz natural no provoque deslumbramiento debido a la reflejancia de los materiales constructivos y de acabados (Mohd, 2008).

3. Arquitectura pasiva Se refiere a aquella edificación reactiva al clima del sitio que provee condiciones interiores agradables sin la necesidad de la utilización de acondicionamiento de aire mecánico o iluminación artificial. En lugares con climas calientes y húmedos el objetivo de la arquitectura pasiva es evitar la radiación solar, promover la utilización de la ventilación por las características de viento en el sitio y proteger el ingreso de rayos solares directamente a los espacios. El máximo impacto es alcanzable al strategizar características de la edificación, como su orientación, volumetría, aperturas y elementos mitigadores de radiación solar.

La arquitectura vernácula de países con estos rasgos climáticos han demostrado la primera manifestación de arquitectura pasiva en la elevación de la vivienda sobre el suelo, estructuras de techo que permiten la ventilación, aperturas que promueven la entrada de luz natural y bien protegidas de los efectos de la radiación solar (Mohd, 2008).

4. Beneficio de ahorro energético Una consecuencia directa de la arquitectura pasiva se ve reflejada en el consumo de servicios para la operación de la edificación, esto se vuelve tangible al comparar el consumo de servicios en edificaciones de tipología similar. Concretamente, esto es posible al gran aprovechamiento de luz natural en los espacios, buena circulación de viento interior, entre otros (Mohd, 2008).

5. Convección y conducción La convección se refiere al la transmisión de calor que existe entre un fluido, como el aire, y un cuerpo sólido. Para entender mejor este concepto se puede ejemplificar de la siguiente manera: La temperatura del aire es inferior a la de la piel de una persona, resultando en la transmisión de calor desde la piel hacia las moléculas del aire. La conducción se refiere a la transmisión de calor al interior de un cuerpo sólido o entre dos cuerpos sólidos al entrar en contacto (Leal, s. f.).

6. Coeficiente de transferencia de calor (K) Determina la capacidad de un elemento, en este caso constructivo como los materiales de fachada, material de tejado, material del suelo o incluso el material de la ventanería y puertas, de permitir el paso de energía.

7. Humedad Referencia general de presencia de vapor de agua en el aire. Se expresa a partir de diversas variables de termodinámica, incluyendo la presión de vapor, temperatura de punto de rocío, temperatura de bulbo húmedo, relación de humedad y humedad relativa. Es promediada espacial y temporalmente de la misma manera que la temperatura del aire (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013).

8. Condición de diseño exterior Las condiciones del clima exterior específicas del sitio representadas por diversos parámetros como el microclima, utilizadas para el diseño de sistemas de acondicionamiento de aire (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013).

9. Usuario Un individuo o un grupo promedio de diversos individuos representantes de una población que ocupan un espacio por más de 15 minutos (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013).

10. Aperturas controladas por el usuario Aperturas como ventanas o ductos controladas exclusivamente por los usuarios de un espacio, estas pueden ser accionadas de manera manual o por medio de dispositivos de control eléctricos directamente bajo el control del usuario (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013).

11. Movimientos de aire La influencia del movimiento del aire es importante en la pérdida de calor del cuerpo por convección y por evaporación, en general, son agradables y deseables movimientos entre 0.1 y 0.2 m/s (Leal, s. f.).

12. Temperatura del aire La temperatura del aire determina cuanto calor pierde el cuerpo hacia el aire, principalmente por convección. La temperatura del aire basta para calificar el confort térmico siempre y cuando la humedad, la velocidad del aire y el calor radiante no tengan mayor influencia en el clima del interior de los espacios. También es importante considerar el gradiente térmico vertical, se aconseja que entre la cabeza y los pies no debería haber una diferencia mayor de 3 Kelvin (Leal, s. f.).

13. Temperatura radiante media Representa el calor emitido en forma de radiación por los elementos del entorno y se compone de las temperaturas superficiales ponderadas de todos los

cerramientos del espacio. Es deseable que el valor no difiera mucho de la temperatura del aire (Leal, s. f.).

14. Temperatura operativa La temperatura uniforme de un recinto negro imaginario y el aire dentro de este, en el cual un ocupante intercambiaría la misma cantidad de calor por radiación más convección que en el entorno real no uniforme, puntualmente se puede definir como el valor medio entre la temperatura del aire y la temperatura radiante media (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013).

15. Unidad Clo Representa el aislamiento térmico de la ropa, donde 1 Clo equivale a ropa de invierno y 0.5 Clo equivale a ropa de verano (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013).

16. Tasa metabólica La tasa de transformación de la energía química en calor y trabajo mecánico mediante actividades metabólicas dentro de un organismo, se expresa generalmente en la unidad Met. Esta unidad equivale a la actividad personal de los ocupantes, donde 1 Met es una persona en reposo (Leal, s. f.).

17. Escala de sensación térmica Representa de manera gráfica los rangos aceptables de temperatura operativa y humedad para personas en ropa típica de verano y de invierno durante la realización de actividades ligeras y principalmente sedentarias. Las condiciones de zona de confort son las siguientes:

- Invierno: temperatura operativa $t_o=20$ a 23.5 °C a 18 °C de bulbo húmedo y $t_o=20.5$ a 24.5 °C, con punto de rocío a 2 °C. Los límites laterales de inclinación de la zona de invierno corresponden a las líneas 20 a 23.5 °C de temperatura efectiva y son sitios de confort o de sensaciones térmicas constantes.

- Verano: temperatura operativa $t_o=22.5$ a 26 °C a 20 °C de bulbo húmedo y $t_o=23.5$ a 27 °C con punto de rocío a 2 °C de temperatura efectiva. Las líneas de bulbo húmedo están basadas en una humedad de aproximadamente 0.2 (McQuiston, 2007).

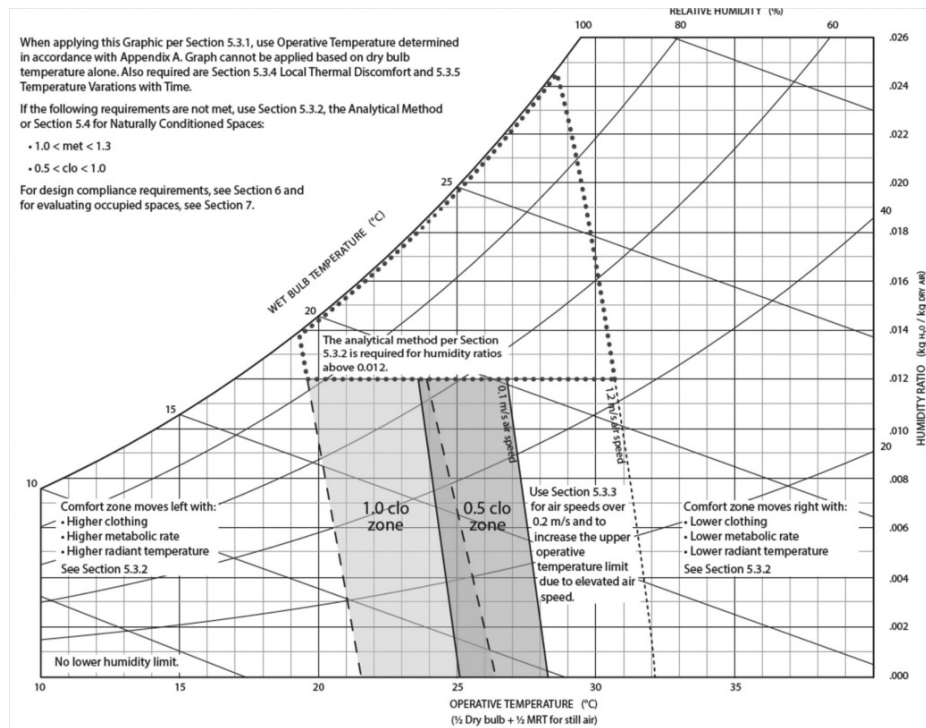


Figura 3. Método gráfico de zona de confort: rangos aceptables de temperatura operativa (t_o) y humedad Fuente: (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013)

18. Temperatura de bulbo húmedo La temperatura de bulbo húmedo es un indicador que mide la temperatura teniendo en cuenta la humedad del entorno, de forma contraria a un termómetro seco común de uso doméstico que miden el calor sin considerar la humedad (El Kanfoundi, 2023).

19. Aislamiento acústico Garantiza la protección de los recintos contra el ruido aéreo, de impactos y vibraciones procedentes del interior y/o exterior de la edificación a través de aislamiento en las fachadas, tabiques y elementos de separación horizontal que garanticen el confort de los ambientes. Este enfoque se basa en minimizar los efectos de las fuentes de ruido y dificultar la propagación de los diferentes tipos de ruidos, es decir, disminuir la energía de las ondas sonoras (Bernhard, s. f.).

20. Fuentes de ruido internas en edificaciones

- Electrodomésticos.
- Elevadores.
- Instalaciones hidrosanitarias.
- Conversaciones entre ocupantes.
- Sonido emitido por distinto calzado al caminar.
- Equipos de sonido.
- Máquinas de acondicionamiento de aire.

21. Tipos de ruido

- Ruido aéreo: transmitido a través del aire que al encontrarse con un cerramiento, se transmite a otras salas.
- Ruido de impacto: producido por la vibración de una estructura como consecuencia de un impacto.
- Ruido de vibración: producido por la vibración de una estructura como consecuencia de oscilaciones producidas por máquinas y/o motores (Bernhard, s. f.).

22. Categorización de materiales para aislamiento acústico

- Capas impermeables: la pérdida de transmisión (transmission loss TL) se caracteriza por la masa del elemento, algunos ejemplos de este tipo de material son: elementos de mampostería, concreto y estructura metálica.
- Materiales absorbentes: materiales porosos formados por entramados de poros o canales conectados entre sí. Las pérdidas de energía se dan por la viscosidad que transforman y disipan la energía acústica en calor. Algunos de estos elementos pueden ser: lana de roca, fibra de vidrio, celulosa, poliéster, resina de melamina, etc.
- Materiales viscoelásticos (Bernhard, s. f.).

23. Métodos de cálculo de insonorización Para este trabajo de graduación se contemplaron métodos de cálculo de insonorización como la ley de masa para particiones simples, unión elástica entre elementos para particiones dobles, y trasdosados para particiones heterogéneas (Bernhard, s. f.).

24. Acondicionamiento acústico Se pretende controlar las reflexiones del sonido dentro de un mismo espacio para mejorar el confort de las personas que lo habitan. Las estrategias de acondicionamiento acústico tienden a ser imperativas en cuartos de máquinas, recintos ruidosos y recintos voluminosos. Existe fenomenología de la propagación del sonido:

- Persistencia: sonido tarda en desaparecer después de que se apaga la fuente. Se parametriza con el tiempo de reverberación (RT).
- Refuerzo pasivo: sonido se amplifica por la acción de la sala. Se parametriza mediante la sonoridad (G_{mid}).
- Reverberación: tiempo que tarda la energía en decaer en un factor 10^{-6} , es decir, -60 dB.
- Ecos flotantes
- Focalizaciones
- Coloración

(Bernhard, s. f.)

25. Solsticios y equinoccios Los solsticios acontecen cuando el sol se ubica en el punto máximo hacia el norte o el sur y suceden dos veces en el año. El solsticio de verano ocurre cuando el sol se encuentra sobre el Trópico de Cáncer a un ángulo de 23.5° en el hemisferio norte, en este momento la inclinación de la Tierra hacia el sol alcanza su valor máximo. Por otra parte, el solsticio de invierno se produce cuando el sol se ubica sobre el trópico de Capricornio a un ángulo de 23.5° al sur del ecuador. Pero en este caso, los países ubicados en el hemisferio sur experimentan el día más corto y la noche más extensa.

Los equinoccios, al igual que los solsticios, ocurren dos veces durante el año cuando el sol se ubica justo sobre el ecuador. Por lo tanto, en estos eventos, el día y la noche tienen la misma duración. El equinoccio de primavera ocurre entre el 20 y 21 de marzo de cada año, mientras que el equinoccio de otoño, tiene lugar entre el 20 y 23 de septiembre.

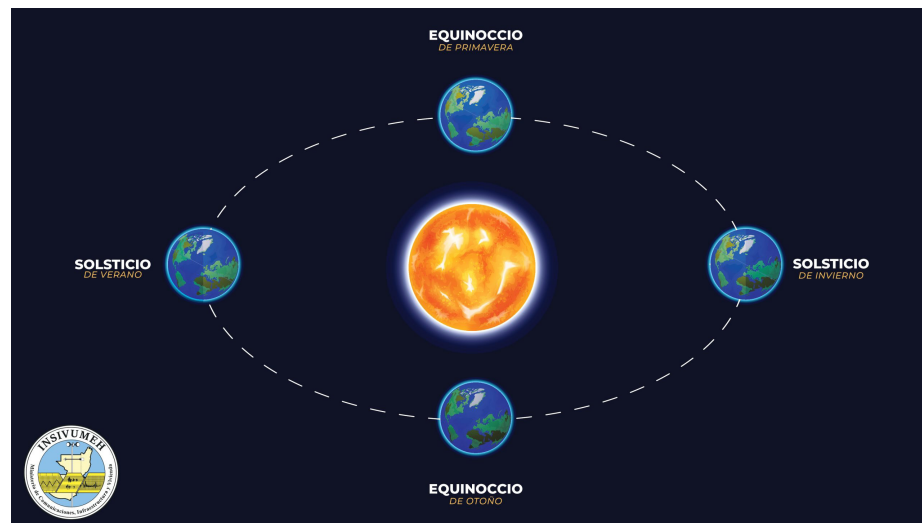


Figura 4. Gráfica representativa de la posición de la Tierra durante solsticios y equinoccios
Fuente: (García, 2025)

Las fechas pronosticadas en 2025 para el primer equinoccio es el 20 de marzo, el primer solsticio será el 21 de junio, el segundo equinoccio será el 22 de septiembre y el segundo solsticio será el 21 de diciembre (García, 2025).

26. Carta solar Las salidas y puestas de sol y la luna están definidas como el momento en que, en determinada localización de la tierra se visualiza la parte superior del disco solar o lunar pasando por el horizonte ideal bajo condiciones atmosféricas promedio. El horizonte ideal es aquel que no se ve obstruido. Las cartas solares son gráficas que representan la posición del sol a lo largo de las distintas horas del día desde su salida hasta su puesta en las cinco diferentes latitudes en las que se encuentra Guatemala, de 13°N hasta los 17°N (García, 2025).

27. Quebrasol Es un elemento arquitectónico diseñado para controlar la entrada de luz solar directa en un edificio, reduciendo el deslumbramiento y el sobrecalentamiento. Generalmente, son dispositivos instalados en el exterior de las fachadas, paneles o rejillas, que bloquean o filtran los rayos solares, permitiendo al mismo tiempo la ventilación y el paso de luz natural. Los quebrasoles pueden ser fijos o móviles, dependiendo de si tienen la capacidad de ajustarse según la posición del sol, y suelen estar fabricados de materiales como metal, madera, concreto o vidrio. Además de su función práctica, también pueden aportar un valor estético al diseño de una edificación (ACIMCO,

2024).

28. Voladizo Un voladizo es un elemento arquitectónico o estructural que sobresale de un muro, columna o soporte sin necesidad de apoyos adicionales en su extremo libre. Este tipo de estructura se utiliza para crear espacios cubiertos, salientes o balcones sin interrumpir el área debajo de ellos (Central interactiva, 2024).

29. Iluminación natural La luz natural es la porción de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra y produce una sensación visual en el ser humano. La luz natural no sólo nos brinda información sobre la hora del día, la estación del año y las condiciones atmosféricas del sitio, sino que permite ver y reconocer el entorno.

La radiación luminosa que llega a la superficie de la Tierra esta compuesta por tres flujos: difuso, directo y global. El difuso proviene de toda la bóveda celeste, a excepción de la corona solar, y es resultado de la dispersión, absorción y reflexión de los rayos solares sobre diferentes componentes atmosféricos, como las moléculas de air, partículas suspendidas, humedad y gases. La disponibilidad de este flujo en diferentes períodos de tiempo depende de las características temporales de la atmósfera de cada sitio. Los rayos que logran atravesar la atmósfera y no fueron dispersados, absorbidos o reflejados llegan a la superficie de la Tierra como flujo directo. La incidencia de estos rayos solares varía durante el día, el año, y la latitud de cada sitio. El flujo global es la suma del flujo difuso y directo. La variabilidad del flujo luminoso se clasifica en dos: la espacial, definida por el sitio geográfico, y la temporal, según el momento (Guadarrama, 2021).

30. Iluminación artificial La dirección de flujo luminoso y las sombras que se crean afectan la forma en que percibimos la volumetría y formas de los espacios que habitamos, existen diferentes tipos de este tipo de iluminación:

- Luz general: es el método de distribución uniforme de la luz que produce en todos los lugares de un interior idénticas condiciones de visión. El flujo luminoso que sale de las luminarias incide directamente y sin que se interponga ningún elemento entre ellas y el objeto, no se generan reflexiones.
- Luz direccional: manifiesta un espectro de luz estrecho y llega directamente a un objeto. Crea grandes contrastes y un marcado efecto de modelado debido a su capacidad de generación de sombras.
- Luz difusa: tiene la capacidad de alcanzar un objeto por varias direcciones sin la producción de sombras. La impresión de un espacio con iluminación totalmente difusa es monótona, y se hace difícil identificar objetos y calcular distancias.
- Luz indirecta: la iluminación indirecta se consigue con la luz reflejada en una pared o un techo de color cuando llega al objeto que pretende iluminar (Hong, 2021).

31. Artefactos ahorradores de agua Todos aquellos artefactos hidrosanitarios que efficientizan el consumo del recurso hídrico por medio de diseños innovadores o accesorios, como inodoros con consumo reducido por descarga, aereadores para grifos, entre otros (Martín, 2020).

32. Microclima Se refiere a las condiciones climáticas de un área de escala pequeña, como un parque, un jardín, o la zona de una ciudad. Las variables de un microclima, como la temperatura, precipitación, viento o humedad, pueden resultar pueden diferir de manera sutil a las condiciones prevalecientes del área en general (Royal meteorological society, s. f.).

33. Potencial de luz solar Es una herramienta crucial para evaluar cuanta luz natural recibirán distintas áreas de fachada de una edificación. El análisis evalúa la disponibilidad de luz natural en diferentes áreas de fachadas. Las ventajas de tomar en cuenta esta herramienta son las siguientes: Mejorar la calidad de habitabilidad interior, eficiencia energética y cumplir con distintas regulaciones imperativas de niveles de iluminación (Bouwer, 2024).

C. Herramientas computacionales o informáticas

Las herramientas informáticas son el conjunto de instrumentos, digitales o físicos, que son utilizados para manejar información con el uso de computadoras, tales como el procesador de texto, la base de datos, las hojas de cálculo, el correo electrónico, buscadores, programas de diseño, redes de telecomunicaciones, entre otros (EUROINNOVA, s. f.).

1. Simuladores computacionales Las simulaciones computacionales son modelos matemáticos y algoritmos implementados en computadoras para imitar el comportamiento de sistemas y procesos en el mundo real. Estas simulaciones se utilizan en una variedad de campos, como la física, la biología, la ingeniería, la economía y muchas otras disciplinas científicas y de ingeniería (ESSS, 2023).

2. Software BIM El Modelado de información para la construcción (BIM) es la base de la transformación digital en la industria de la arquitectura, la ingeniería y la construcción. La metodología BIM es el proceso holístico de creación y administración de la información de un activo construido. Basado en un modelo inteligente e impulsado por una plataforma en la nube, BIM integra datos estructurados y multidisciplinares para generar una representación digital de un activo durante todo su ciclo de vida, desde la planificación y el diseño hasta la construcción y las operaciones (Autodesk, 2023).

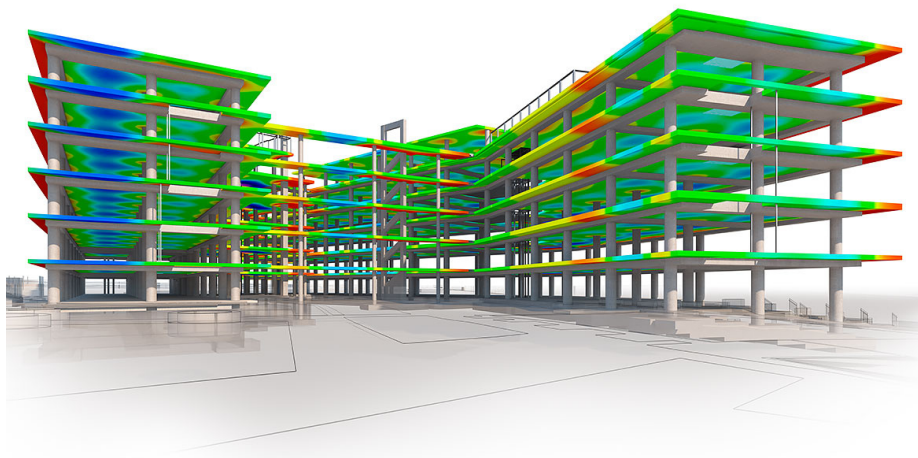


Figura 5. Modelo desarrollado por medio de software BIM
Fuente: (Autodesk, 2023)

D. BIM (*building information modeling*)

Como se menciona, la metodología BIM genera un ecosistema de información alrededor de un proyecto, en este caso de una edificación de vivienda vertical existente. Este ecosistema permite la interoperabilidad alrededor de las distintas disciplinas involucradas en el proceso de planificación y diseño de un proyecto permitiendo a los especialistas generar modelos anticipados a todos aquellos contratiempos que se presenten durante la etapa de ejecución como la colisión entre instalaciones, problemas en la ejecución de ciertas volumetrías, funcionamiento ineficiente de los espacios, entre otros. Durante este trabajo de graduación se implementarán distintas herramientas para generar simulaciones, modelos e información que predigan los efectos de la implementación de estrategias de la arquitectura pasiva. Algunas de las herramientas que se utilizarán están listadas a continuación.

1. Autodesk Revit Autodesk Revit es un software de diseño inteligente de modelado BIM para arquitectura e ingeniería, que facilita las tareas de diseño de proyecto y los procesos de trabajo. Lo más característico de este software es que todo lo que se modela es mediante objetos inteligentes (familias paramétricas) y en las vistas de planta, se generan simultáneamente en 3D. Revit tiene la capacidad de coordinarse automáticamente para mostrar la última versión trabajada, sin que los cambios influyan en todo el proceso, lo que agiliza el tiempo de trabajo, y minimizando el riesgo de cometer errores durante la ejecución del proyecto. Las principales funciones que puede hacer el software son las siguientes:

- Análisis: optimiza el rendimiento del edificio en la fase inicial de diseño, realiza estimaciones de costos y supervisa el desempeño durante la vida útil del proyecto y del edificio.
- Coordinación multidisciplinaria.
- Diseño y documentación.
- Visualización realista.

(Vitorino, 2021)

2. Autodesk Forma Autodesk Forma ofrece herramientas de diseño conceptual y modelado en 3D, así como análisis predictivos y automatizaciones para mejorar los resultados de los proyectos. Ayuda a los equipos de planificación y diseño a tomar decisiones inteligentes basadas en datos en tiempo real, que reducen el riesgo y mejoran los resultados empresariales y de sostenibilidad. Autodesk Forma puede realizar los siguientes análisis:

- Horas solares: Determina el tiempo al que estará expuesta un área de la edificación a la influencia de la radiación solar.
- Potencial de luz solar.
- Análisis de viento.
- Microclima.
- Sonido.
- Carbono producido por utilización de materiales de construcción.

(Melero, 2023)

3. DIALux Diseña, calcula y visualiza la luz para espacios interiores y exteriores. Con DIALux se puede crear habitaciones individuales, edificios de varias plantas, caminos, aparcamientos y calles. Permite generar una atmósfera única con luminarias reales de distinto proveedores y genera documentación completa relacionada con el diseño de iluminación (DIALux, 2025).

4. CYPETHERM Loads Permite el cálculo de cargas térmicas de edificaciones conforme el método de Radiant Time Series propuesto por la normativa ASHRAE, y se integra al flujo de trabajo BIM.

5. Archivo IFC Un archivo IFC es un formato de archivo estándar para el intercambio de información de modelos de edificios entre profesionales especialistas que utilizan diferentes software (Editorial Team, 2021).

6. Familias de Autodesk Revit Las familias de sistema crean elementos básicos que normalmente se ensamblan en un emplazamiento de construcción, como muros, cubiertas y suelos. Los parámetros de sistema, que afectan al entorno del proyecto e incluyen tipos para niveles, rejillas, planos de dibujo y ventanas gráficas, también son familias de sistema. Las familias cargables son componentes de edificación que normalmente se adquieren e instalan en un edificio y sus inmediaciones, como ventanas, puertas, muebles e instalaciones (Autodesk, 2025).

E. Normativas aplicables

Este trabajo de graduación utiliza como material de apoyo distintas normativas y manuales que determinan los parámetros aceptables de habitabilidad descritos en los objetivos específicos. Con la información generada a partir del diverso software BIM se parametrizarán los parámetros objetivos que se desean alcanzar por medio de los cambios generados por la implementación de arquitectura pasiva. Cabe mencionar que este trabajo de graduación no pretende crear condiciones aptas para obtener certificaciones verdes como Edge o LEED pero se utilizarán de la manera descrita anteriormente.

1. ANSI/ASHRAE 55: *Thermal environmental conditions for human occupancy* Factores ambientales combinados de manera compleja con el objetivo de crear condiciones climáticas en los espacios que generen confort en la mayoría de ocupantes (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2025b).

2. ANSI/ASHRAE 90.1: *Energy standard for buildings except low-rise residential buildings* Ofrece, en detalle, los requisitos mínimos de eficiencia energética para el diseño y la construcción de nuevos sitios, edificios y sus sistemas, Asimismo, para edificaciones existentes, y los criterios para determinar el cumplimiento de estos requisitos (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2025a).

3. LEED User guide LEED (*Leadership in energy and environmental design*) es el sistema de certificación de edificios sostenibles más utilizado en el mundo. La certificación LEED proporciona un marco para construir edificios ecológicos que sean saludables, altamente eficientes y rentables, ofreciendo beneficios ambientales, sociales y de gobernanza. La certificación LEED es un símbolo reconocido a nivel mundial de logro en sostenibilidad y está respaldada por toda una industria de organizaciones e individuos comprometidos que están liderando el camino hacia la transformación del mercado (U.S. Green Building Council, 2025b).

4. *Edge certification manual* EDGE permite a los desarrolladores y constructores identificar rápidamente las estrategias más rentables para reducir el uso de energía, el consumo de agua y el carbono incorporado en los materiales (U.S. Green Building Council, 2025a).

V. METODOLOGÍA

A. Análisis de sitio

Como primer paso para el desarrollo de este trabajo de graduación se debe realizar un detallado análisis de sitio donde se encuentra la edificación de vivienda vertical existente. Se deben determinar distintas características como el camino del sol, el microclima, la posición geográfica del proyecto, volumen de tráfico en las vías colindantes al proyecto, actividades o locales comerciales cercanos, entre otras. Esto con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos acerca del entorno de la edificación para realizar las simulaciones de manera precisa y eficiente. Esto brindará una base sólida de datos para iniciar la alimentación de información para las simulaciones.

B. Análisis de materiales de edificación

Posteriormente se deben analizar los materiales utilizados en la edificación para obtener las propiedades y características para determinar como se comportan a los fenómenos de su entorno y parametrizar con más detalle ciertos campos necesarios para la realización de las simulaciones y determinar cuáles pueden cambiar. Se deben tomar en cuenta desde los materiales constructivos de obra gris, hasta los materiales de acabados finales.

C. Modelado BIM de edificación existente

Luego de tener toda la información relacionada a la composición de la edificación se generará un modelo a partir de Revit para generar la volumetría exacta del diseño original y se parametrizarán todas las familias utilizadas para la realización del modelo con las características encontradas en el análisis de materiales. Posteriormente se generará un archivo IFC para permitir la interoperabilidad entre el software de simulación.

D. Identificación de aspectos a mejorar a partir de simulaciones

El modelo de la edificación existente será sometido a los distintos software de simulación con el objetivo de entender su comportamiento al entorno con su diseño original e identificar los aspectos a mejorar. Tendrán mayor énfasis las siguientes características:

- Cargas térmicas en los espacios de la edificación.
- Comportamiento de iluminación natural y artificial.
- Condiciones acústicas en el interior de los recintos.
- Consecuencias del diseño y posicionamiento de aperturas controladas por ocupantes.

E. Integración de estrategias de arquitectura pasiva a diseño original

Después de la obtención de la información de las simulaciones y la identificación de elementos de diseño que pueden cambiar se implementarán estrategias de arquitectura pasiva para mejorar las condiciones de habitabilidad de los espacios en la edificación. Se modificará el diseño original del proyecto, proponiendo materiales con mejores propiedades térmicas y acústicas, implementando quebresoles y voladizos, cambiando orientación y diseño de aperturas, implementando aparatos ahorradores eficientes o de mayor eficiencia, etc.

F. Someter a simulaciones el nuevo diseño de edificación

Luego de terminar de la integración de estrategias de arquitectura pasiva y de explotar los aspectos de mejora se realizarán las mismas simulaciones a las que se sometió el diseño original y se evaluarán que aspectos de habitabilidad presentaron mejora y comparar.

G. Producción de documentación y conclusiones

Por último, se realizarán todos los entregables correspondientes al trabajo realizado:

- Documentación de juego de planos de edificación con arquitectura pasiva integrada.
- Informes y resultados de simulaciones de ambos modelos.
- Cuadro comparativo global que demuestre claramente aspectos de habitabilidad mejorados.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Información de edificación y análisis de sitio

Con la finalidad de demostrar las ventajas de aplicar arquitectura pasiva en el diseño de edificaciones se replicó la tipología y arquitectura de planta del proyecto Ancona situado en la zona 1 de Mixco, Guatemala. El modelo original en el cual se realizaron las simulaciones utiliza los materiales que se plantearon originalmente por arquitectos, posteriormente se profundizará en la tipología de los elementos constructivos y las capas que lo conforma. El punto base del proyecto se definió en las coordenadas $14^{\circ}36'36''N$ $90^{\circ}36'42''W$, el norte se encuentra girado 27° respecto al eje horizontal de la edificación. La edificación cuenta con una tipología de apartamento única, la planta de la edificación presenta una planta de 596.7 m^2 , totalizando un área techada de 7164.4 m^2 . Los espacios y recintos de la edificación presentan acabados típicos en todos los espacios con índices de absorción de sonido pobres para las diferentes octavas de frecuencia que se deben validar, entre 0.01 y 0.06, también cuentan con luminarias típicas que no satisfacen las necesidades de los usuarios ya que son luminarias tipo plafonera con bombillos de una temperatura de color poco adecuada alrededor de 3000K, presentando desbalance en el ciclo circadiano.

La tipología única de cada apartamento totaliza un área de 63.82 m^2 , dividido en los siguientes espacios:

- Sala/Comedor.
- Lavadora/Secadora.
- Dormitorio 1.
- Dormitorio 2.
- Dormitorio 3.
- Baño completo.

El sistema estructural de la edificación es de muros portantes, minimizando la utilización de columnas y vigas estructurales. Todos los muros están compuestos de hormigón armado. Existen dos tipologías de muros estructurales en el proyecto, muros de 17 cm y 20 cm de espesor.

La topografía del terreno muestra alta adaptabilidad para la construcción de edificaciones de este tipo debido a la cimentación. La cimentación comúnmente de este sistema constructivo es una gran losa de cimentación sin pilotes o columnas, también elimina la oportunidad de construir sótanos. Normalmente con este tipo de sistema estructural el estacionamiento se sitúa alrededor a la huella de la edificación.

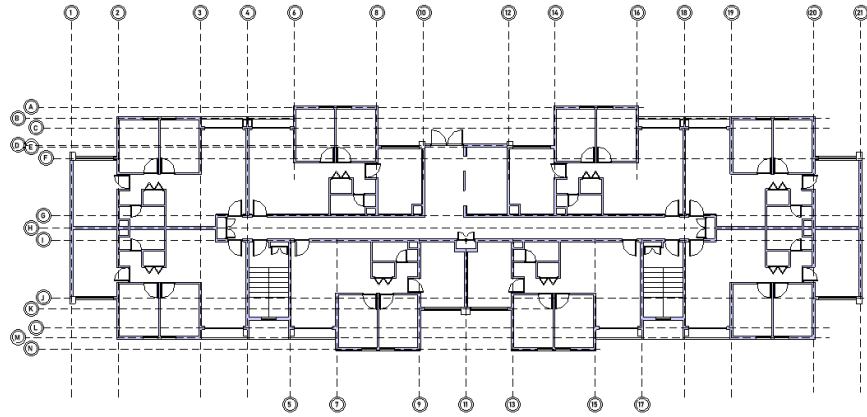


Figura 6. Planta típica de edificación
Fuente: Elaboración propia

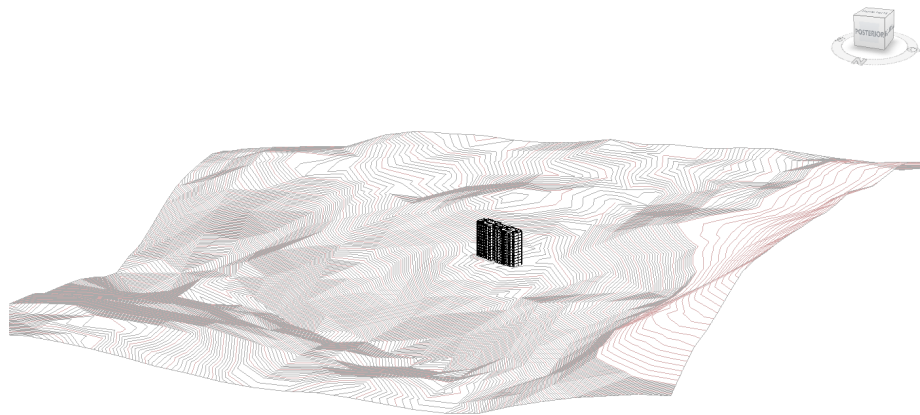


Figura 7. Edificación situada en topografía pertinente al sitio de construcción
Fuente: Elaboración propia

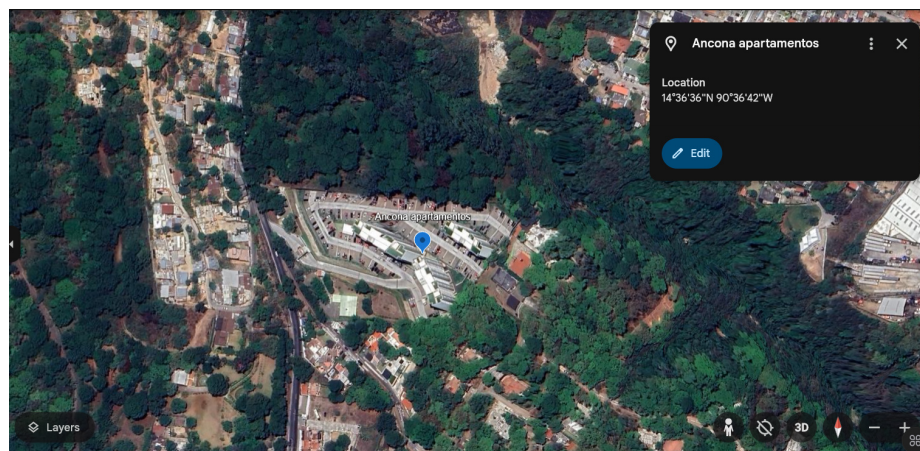


Figura 8. Localización de punto base del proyecto y sitio de estudio
Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta el emplazamiento de la edificación se pueden generar ciertas conclusiones, la fachada de la edificación que está orientada frente al suroeste puede ser la más crítica debido a la naturaleza del camino del sol, tomando en cuenta que este sale en el este y se esconde en el oeste. Los apartamentos situados en esta fachada de la edificación serán los más críticos a analizar debido a que serán los más susceptibles a experimentar elevada ganancia térmica debido al elevado valor de horas solares a la que se exponen.

Para validar esto, se sometió el modelo a diversos estudios de camino del sol en las fechas críticas abarcadas en el marco teórico, los solsticios y los equinoccios pertinentes a Guatemala. Estas fechas fueron evaluadas debido a la duración en la que el sol permanece visible en el cielo y los efectos que puede generar sobre la edificación a estudiar. A continuación se puede observar cómo el camino del sol varía respecto a estas fechas.

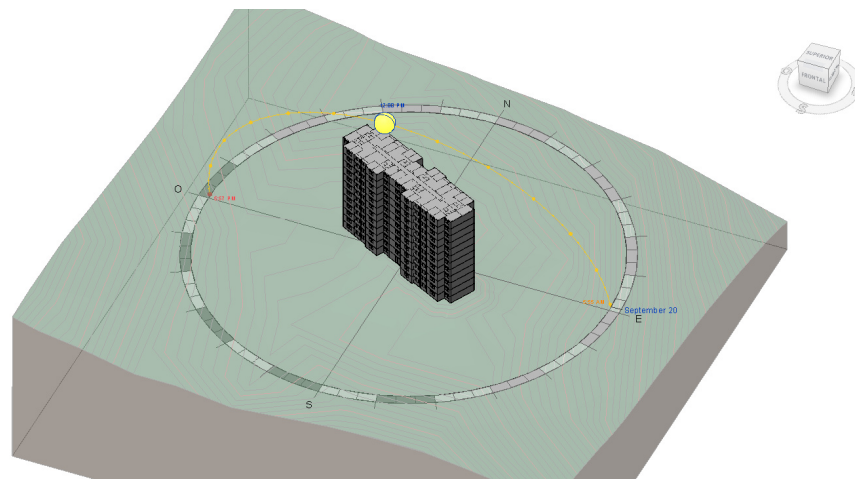


Figura 9. Camino del sol en el equinoccio de otoño
Fuente: elaboración propia

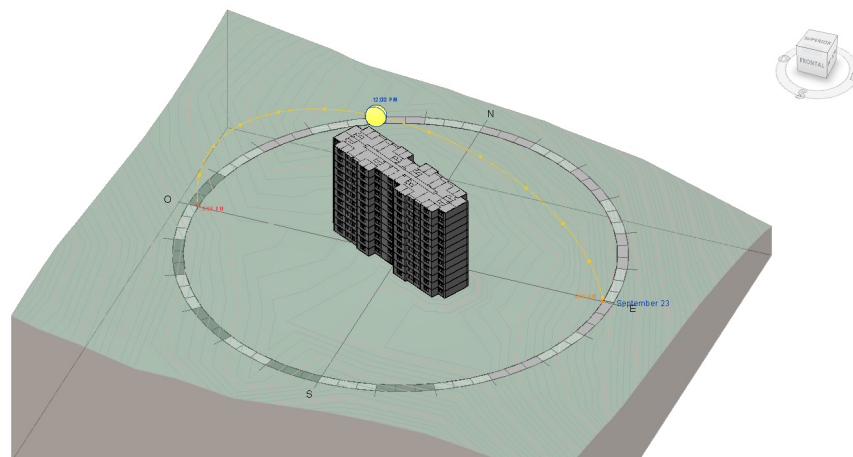


Figura 10. Camino del sol en el equinoccio de otoño 2
Fuente: elaboración propia

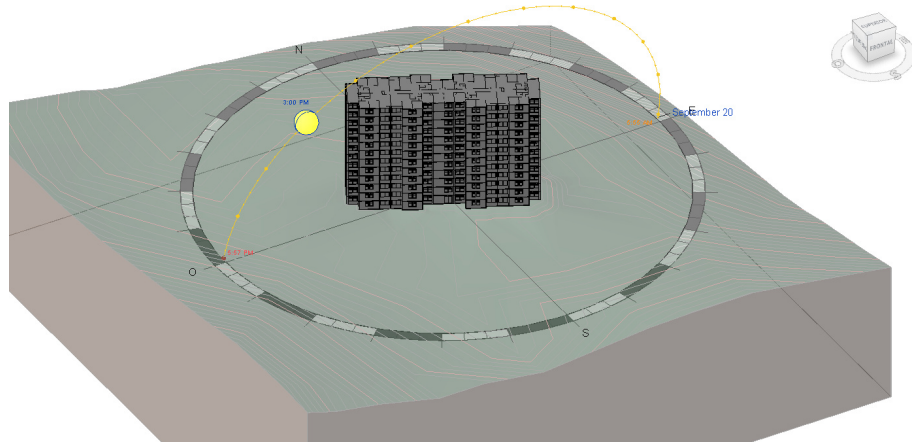


Figura 11. Camino del sol en el equinoccio de otoño 15:00 hrs.
Fuente: elaboración propia

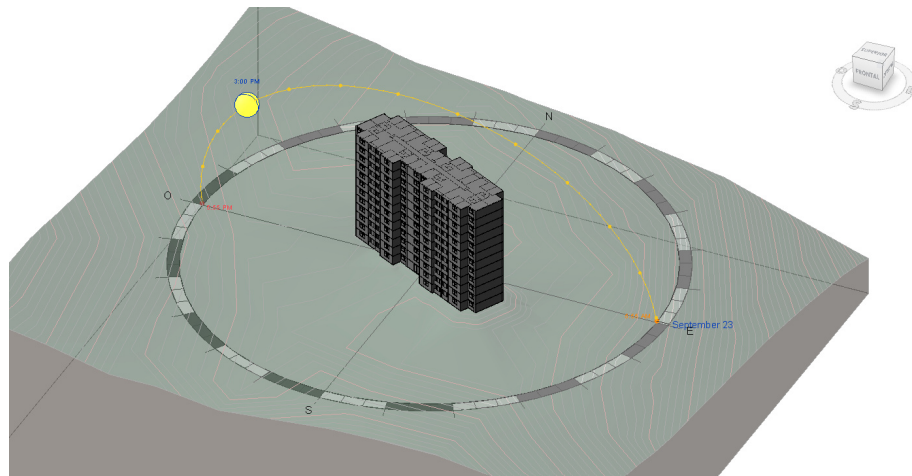


Figura 12. Camino del sol en el equinoccio de otoño 2 15:00 hrs.
Fuente: elaboración propia

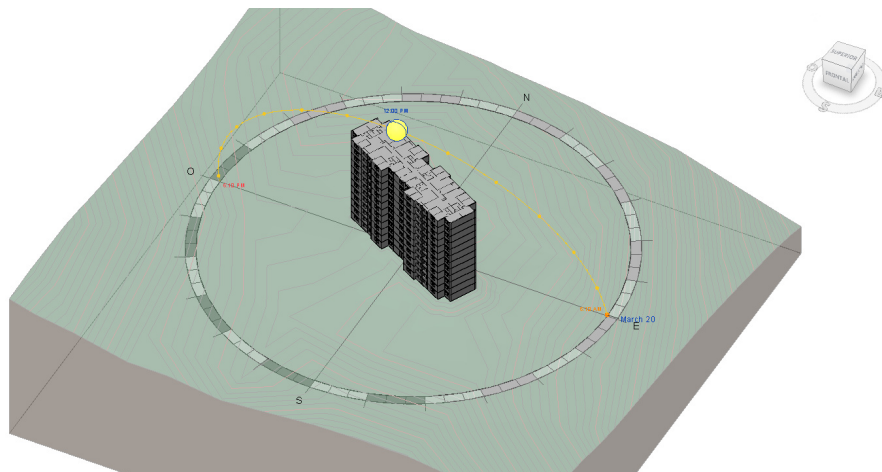


Figura 13. Camino del sol en el equinoccio primavera
Fuente: elaboración propia

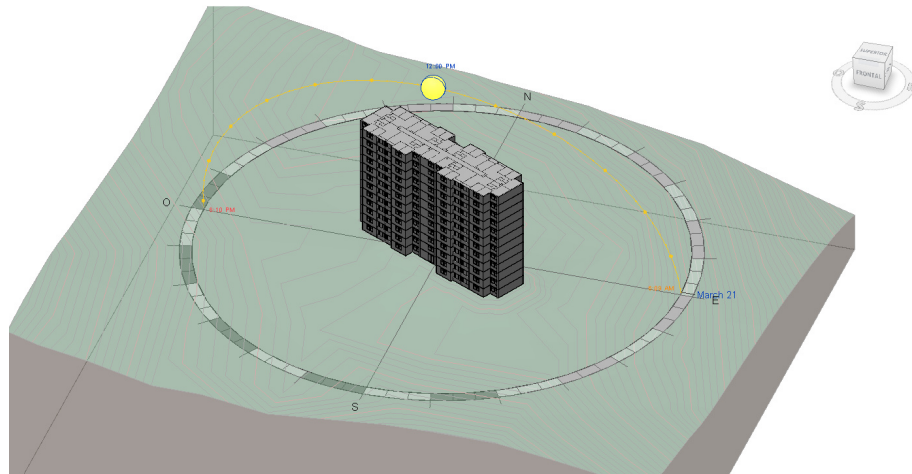


Figura 14. Camino del sol en el equinoccio primavera 2
Fuente: elaboración propia

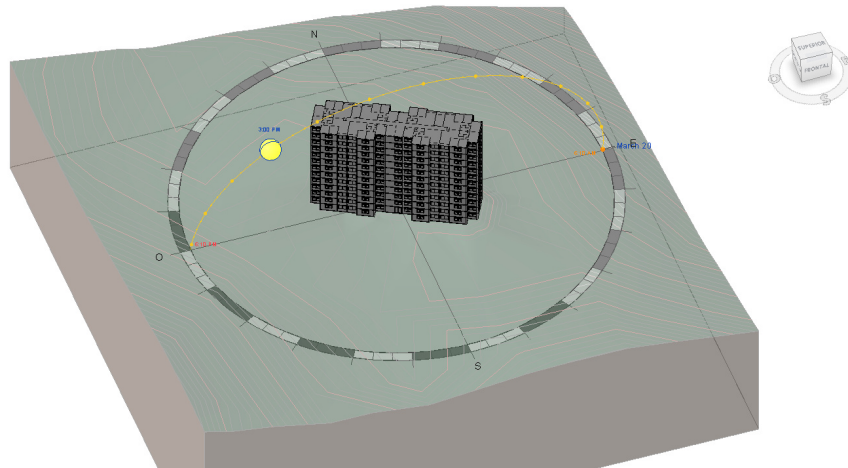


Figura 15. Camino del sol en el equinoccio primavera 15 hrs.
Fuente: elaboración propia

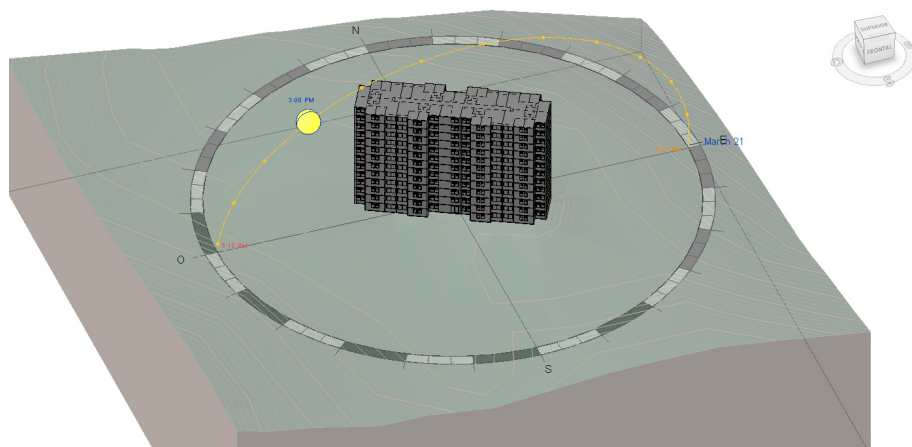


Figura 16. Camino del sol en el equinoccio primavera 2 15 hrs.
Fuente: elaboración propia

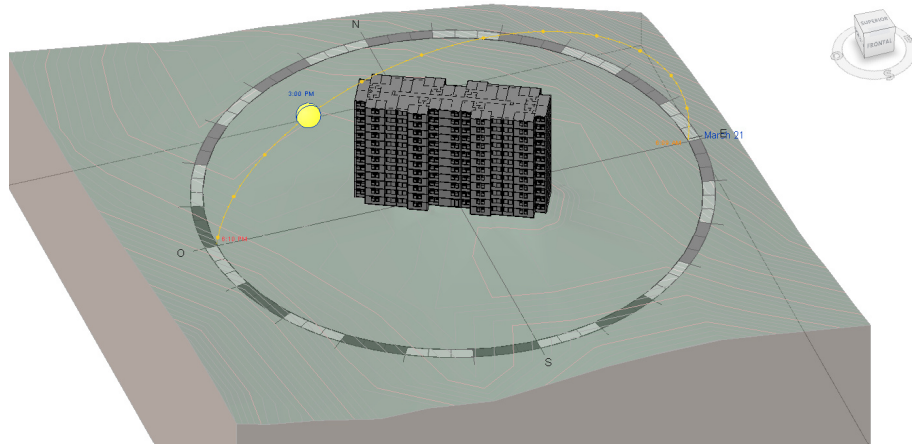


Figura 17. Camino del sol en el equinoccio primavera 2 15 hrs.
Fuente: elaboración propia

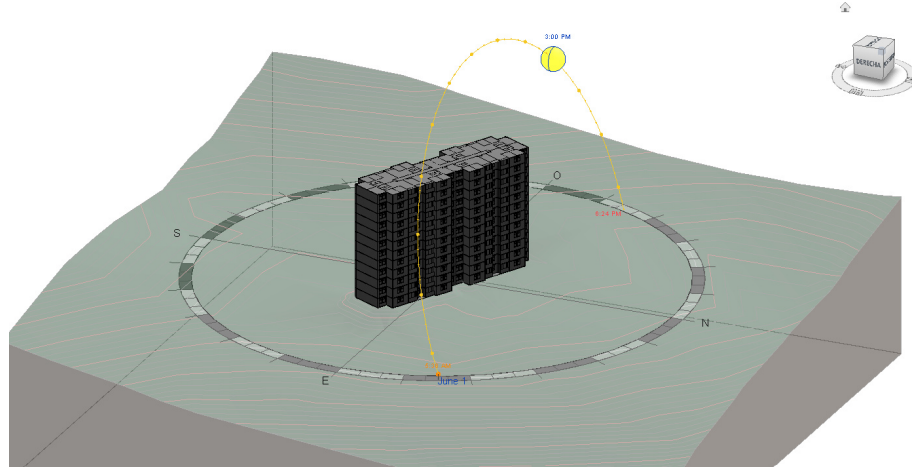


Figura 18. Camino del sol Junio
Fuente: elaboración propia

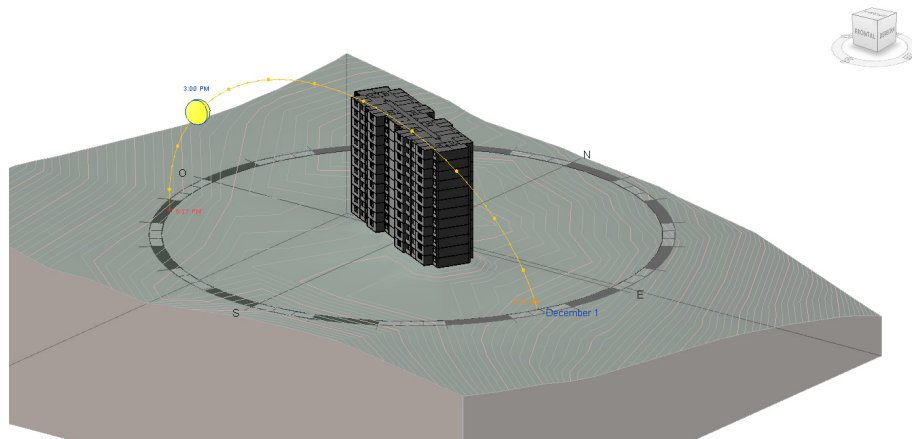


Figura 19. Camino del sol Diciembre
Fuente: elaboración propia

Luego de la realización de este análisis se puede observar que la fachada más crítica es aquella en dirección al suroeste, sin embargo, también se puede observar que durante los últimos meses del año e inició del mismo, se puede observar que el sol también afecta considerablemente la fachada del noreste. Esta información es valiosa ya que permite la toma de decisiones respecto a la orientación de la edificación, que materiales pueden reemplazarse en la fachada de la edificación, y determinar la necesidad y el tamaño de voladizos para generar sombra a las aperturas de la edificación.

Otra herramienta de apoyo para determinar la exposición solar de las fachadas fue Autodesk Forma. Esta brinda análisis detallado de las horas solares sobre la fachada, para que esto funcione correctamente la edificación se posicionó en la ubicación geográfica que se determinó con el sistema de coordenadas de Google Earth, permitiendo resultados precisos y realistas para el emplazamiento del proyecto.

Se determinó que la fachada crítica es, efectivamente, aquella en dirección al suroeste promediando 7 horas de exposición solar, mientras que la fachada del noreste estando expuesta al sol durante 4 horas. Estos datos son aquellos generados durante los equinoccios del años. En retrospectiva, durante el solsticio del 21 de diciembre la fachada suroeste promedia 10 horas de exposición solar, mientras que la fachada noreste no experimenta exposición solar durante el día. Los valores producidos de exposición solar durante el solsticio del 21 de junio la fachada crítica ahora se convierte aquella posicionada hacia el noreste promediando una exposición solar de alrededor de 7 horas.

Esto determina que se deben aplicar soluciones de arquitectura pasiva en ambas fachadas de la edificación debido a que estas están expuestas al sol durante períodos de tiempo extensos, permitiendo alta absorción de los materiales de radiación solar, y posteriormente elevadas cargas térmicas en los espacios de la edificación.



Figura 20. Horas solares fachada suroeste durante el 21 de marzo

Fuente: elaboración propia



Figura 21. Horas solares fachada noreste durante el 21 de marzo
Fuente: elaboración propia



Figura 22. Horas solares fachada suroeste durante el 21 de diciembre
Fuente: elaboración propia

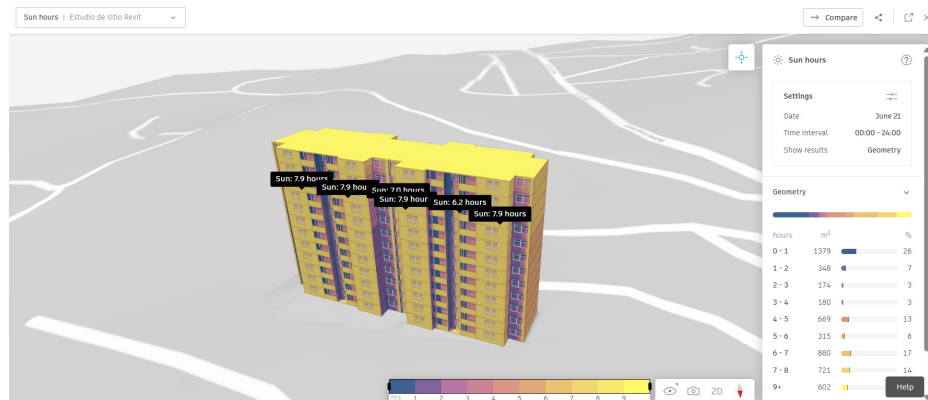


Figura 23. Horas solares fachada noreste durante el 21 de junio
Fuente: elaboración propia

Es importante mencionar las horas de exposición solar en ambas fachadas debido a que los recintos pertenecientes a estos cerramientos son dormitorios y la sala/comedor, siendo recintos de suma importancia en la cuál se debe tener carga térmicas adecuadas y confort debido a que los usuarios pasan la mayor parte del día en estos recintos habitables.

Los acabados propuestos originalmente en el diseño de la edificación son acabados de obra gris, es decir alisado gris o alisado de yeso y adicional a esta capa, la pintura que demuestra una oportunidad de mejora. Otra oportunidad de mejora a considerar es la implementación de voladizos en aperturas como se mencionó anteriormente. Como punto de partida la arquitectura de la edificación demuestra la siguiente volumetría y acabados.



Figura 24. Arquitectura de edificación original

Fuente: elaboración propia

El emplazamiento de la edificación y su orientación demuestra gran potencial para el aprovechamiento de ventilación cruzada, una solución relacionada a la arquitectura pasiva que tiene como consecuencia la mejora de la habitabilidad de los espacios para los usuarios, reduciendo las cargas térmicas en los recintos y creando un entorno más amigable.

El mayor volumen de viento es proveniente del norte, el comportamiento de la ráfaga de viento presenta la oportunidad de aprovechamiento de las aperturas controladas por usuario de la fachada noreste. La velocidad máxima que alcanza el viento en este punto es de 5 m/s.

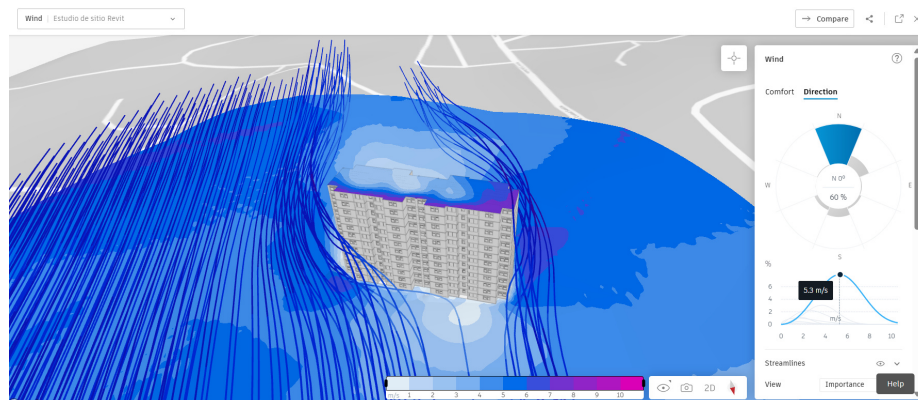


Figura 25. Estudio de viento de emplazamiento de Autodesk Forma

Fuente: elaboración propia

B. Hipótesis sobre posibles aspectos a mejorar

Luego del análisis de sitio se pueden identificar las zonas críticas afectadas por las características del entorno. Resalta la alta exposición solar de ambas fachadas de la edificación a lo largo de los meses de año, afectando específicamente recintos de importancia, donde los usuarios pasan la mayor parte del día y descansan. Resalta también la posibilidad del aprovechamiento de ventilación cruzada. Asimismo, los acabados interiores propuestos originalmente por arquitectura muestran coeficientes de absorción bajos resultando en tiempos de reverberación elevados, resultando en otro factor a mejorar por medio de arquitectura pasiva para mejorar la habitabilidad de los recintos. Adicional a esto la iluminación de los recintos también tiene aspectos de mejora para generar espacios más amigables y eficientes con el usuario, respetando una temperatura de color de las luminarias para no afectar el ciclo circadiano de los usuarios y cumplir su función respectivamente al recinto que pertenezca la luminaria. Las posibles soluciones a estos problemas se pueden resolver de una manera poco invasiva al diseño original y validando las siguientes hipótesis:

- Cambio de materiales de fachada y acabados interiores: al elegir materiales para fachada con valores de conductividad más favorables se puede reducir la carga térmica de los recintos y cambiar los acabados interiores representa una mejora en el tiempo de reverberación generado en el interior de los espacios.
- Implementación de voladizos: estos voladizos pueden generar sombra y mitigar el castigo de la radiación solar sobre las aperturas específicamente en los recintos de dormitorio que se encuentran delimitados por cerramientos de fachada.
- Cambio de luminarias y su posicionamiento

C. Elaboración de modelos arquitectónicos y analíticos

Posteriormente a la autorización para utilizar Ancona apartamentos, su tipología de huella y espacios, se procedió a realizar un levantamiento de modelo en Autodesk Revit, generando las familias de muros, ventanas, puertas, losas y gradas con las especificaciones planteadas en los planos, resultando en el volumen que se puede apreciar en la figura 24. Con ayuda de la identificación de la edificación en su emplazamiento y la ubicación en Google Earth se determinó la orientación del norte del proyecto, lo cuál es de suma importancia para realizar los cálculos y análisis de sitio eficientemente, el norte determina un camino del sol realista para tomar decisiones acertadas. Posteriormente, se exportó el modelo de Autodesk Revit en un formato IFC para interoperabilidad con los distintos software que se utilizaron a lo largo de este trabajo de graduación. El formato IFC permitió la agilización del flujo de trabajo eliminando la necesidad de generar modelos desde cero nuevamente. Este formato IFC se importó en Autodesk Forma para realizar el primer modelo analítico. Autodesk Forma brinda la oportunidad de identificar el IFC en las dimensiones que se generó en Autodesk Revit y permite colocarlo en el emplazamiento real identificado con gran facilidad, solo se debe de identificar la zona de estudio del emplazamiento en el sistema de geolocalización del software e insertar el modelo IFC en este espacio virtual. Permite generar simulaciones como la exposición solar de las distintas fachadas de la edificación, estudio de viento en el emplazamiento, etc. Para este trabajo de graduación solamente fue necesario realizar las simulaciones mencionadas. Para el modelo analítico del camino del sol en el sitio se importó el modelo de Autodesk Forma nuevamente a Autodesk Revit resultando en un ecosistema virtual como el que se aprecia en la

figura 7. De esta manera la edificación ya está referenciada de forma correcta y el terreno se genera de manera precisa.

El mismo modelo en formato IFC se importó en el software DIALux para realizar las simulaciones de iluminación. Dentro del software se pueden definir los recintos manualmente, la altura de trabajo que determina cumplimiento con la norma pertinente a utilizar y determinar la distribución y tipos de luminarias.

Adicionalmente para la determinación de las cargas térmicas en los espacios se utilizó el software CYPETHERM Loads, para realizar este modelo analítico se realizaron diversos pasos debido a la naturaleza del entorno colaborativo que presenta este software conocido como BIMserver center. Primero se importó el IFC exportado del levantamiento del modelo arquitectónico en Autodesk Revit, a un software llamado IFC Builder, donde se determina las características de los elementos constructivos, por ejemplo, determinar si los elementos son muros de fachada, muros intermedios, losa de piso, losa de entrepiso, entre otros. Se corrigen las incidencias que marca el software, estas pueden variar desde resolver uniones de muro, hasta la especificación correcta de los recintos. Los recintos o espacios son de suma importancia ya que el software analítico de cargas térmicas tomará estos espacios como referencia de volumen para realizar sus cálculos.

Para efectos de simplificación de este trabajo de graduación se realizarán las simulaciones en dos tipologías de apartamento típicas dentro de la edificación, siendo estas la del apartamento 608 que se encuentra orientada en la fachada suroeste y la del apartamento 605 que se encuentra orientada a la fachada noreste del proyecto.

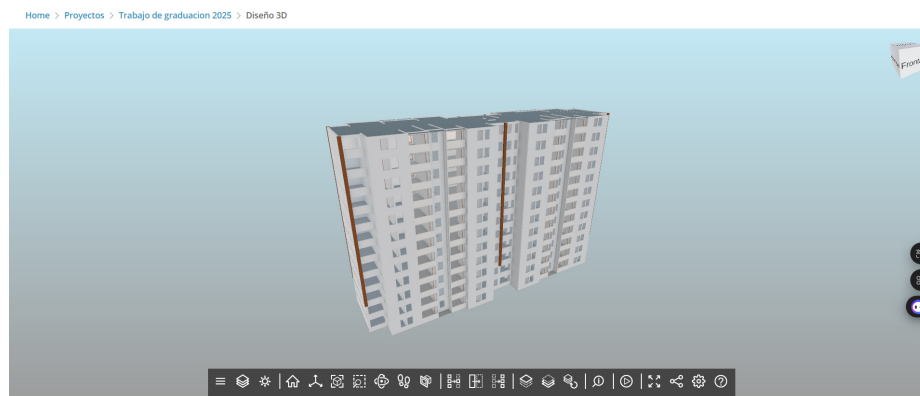


Figura 26. Modelo arquitectónico en el ecosistema de BIMserver center

Fuente: elaboración propia

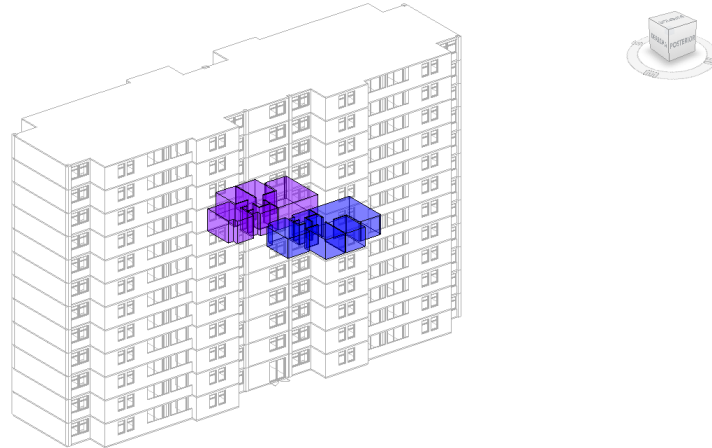


Figura 27. Tipologías de apartamento sometidas a simulaciones
Fuente: elaboración propia

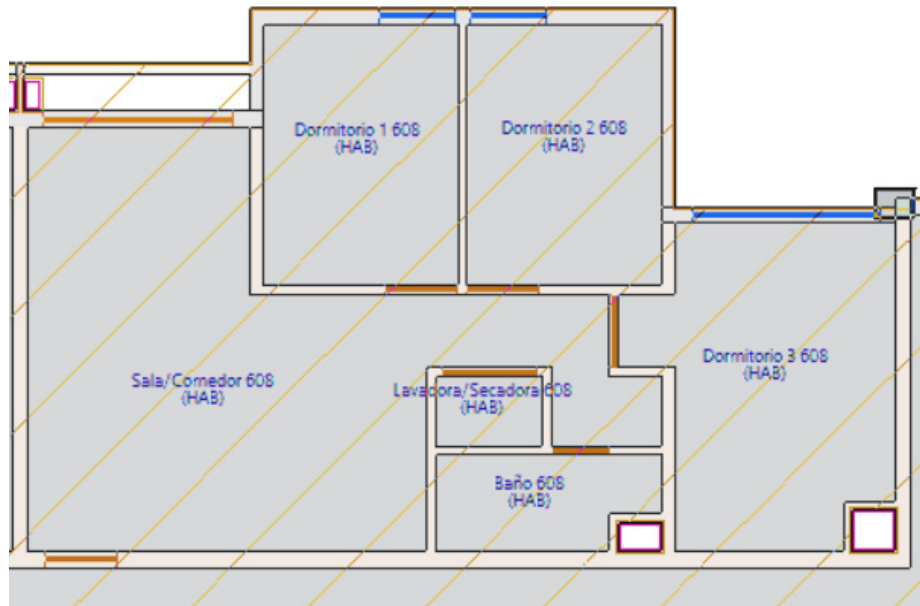


Figura 28. Tipología y recintos de apartamento 608 en IFC Builder
Fuente: elaboración propia

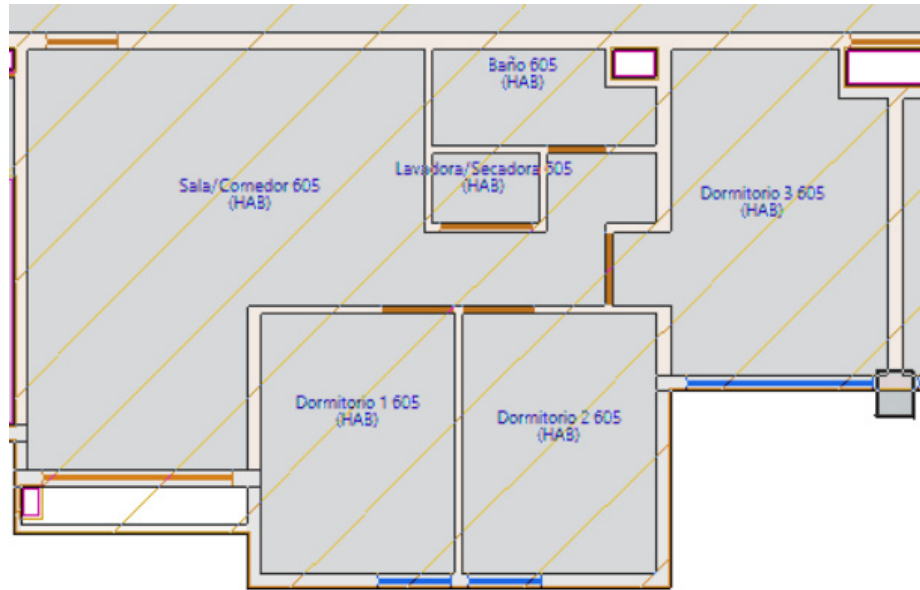


Figura 29. Tipología y recintos de apartamento 605 en IFC Builder
Fuente: elaboración propia

Durante este trabajo de graduación los cálculos se dividieron en dos secciones, aquellos cálculos realizados para determinar factores de habitabilidad en la edificación original, respetando su tipología y acabados, y posteriormente se realizaron los cálculos aplicando las mejoras de arquitectura pasiva enfatizando solventar los problemas planteado en el apartado de hipótesis. Se desarrolla de manera detallada el paso a paso que se utilizó para realizar los cálculos y simulaciones y posteriormente se muestran los resultados de cada modelo.

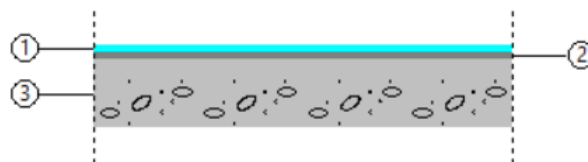
D. Cargas térmicas modelo original

Como primer punto, luego de importar el modelo arquitectónico de IFC Builder a CYPETHERM Loads se deben definir ciertos parámetros para resolver incidencias dentro del modelo analítico para poder realizar las simulaciones de manera eficiente. Primero se deben definir la composición de los elementos dentro del modelo, es decir, las capas y sus materiales que componen los elementos constructivos, CYPETHERM Loads cuenta con su propia biblioteca para definir los materiales.

El programa está certificado por ASHRAE haciendo la siguiente afirmación: "Este programa está basado en el Método de las Series Temporales Radiantes (RTSM) propuesto y recomendado por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) para el cálculo de las cargas térmicas de refrigeración y el procedimiento para el cálculo de las cargas de calefacción, ambos detallados en el Load Calculation Applications Manual de 2010." (Spitler, 2010)

Cuadro 1
Composición de losa de entrepiso de modelo original
Fuente: elaboración propia

Capas	Espesor (cm)	Conductividad ($W/(m \cdot K)$)	Resistencia térmica ($(m^2 \cdot K)/W$)
Plaqueta o baldosa cerámica	1.00	1.000	0.010
Mortero de cemento para revoco/enlucido	1.00	0.550	0.018
Hormigón armado	10.00	2.500	0.040



Capas
1 - Plaqueta o baldosa cerámica: 1 cm
2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido $1000 < d < 1250$: 1 cm
3 - Hormigón armado $d > 2500$: 10 cm
Espesor total: 12.0 cm
Caracterización térmica
Resistencia térmica: $0.07 \text{ m}^2 \cdot K/W$

Figura 30. Composición gráfica de losa de entrepiso de modelo original
Fuente: elaboración propia

Cuadro 2
 Composición de muro estructural de 17 cm de espesor de modelo original (Tabique)
 Fuente: elaboración propia

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m · K))	Resistencia térmica ((m ² · K)/W)
Mortero de yeso	0.50	0.800	0.006
Hormigón armado	16.00	2.500	0.064
Mortero de yeso	0.50	0.800	0.006

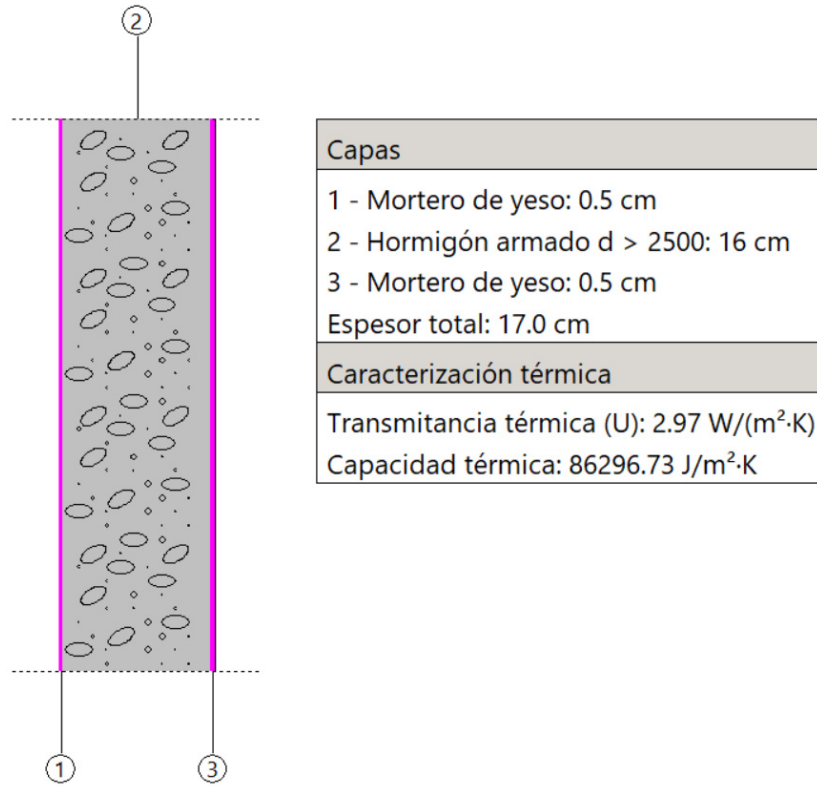


Figura 31. Composición gráfica de muro estructural de 17 cm de modelo original
 Fuente: elaboración propia

Cuadro 3
 Composición de muro estructural de 20 cm de espesor de modelo original (Fachada)
 Fuente: elaboración propia

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m · K))	Resistencia térmica ((m ² · K)/W)
Mortero de cemento para revoco/enlucido	0.50	0.550	0.009
Hormigón armado	19.00	2.500	0.076
Mortero de yeso	0.50	0.800	0.006

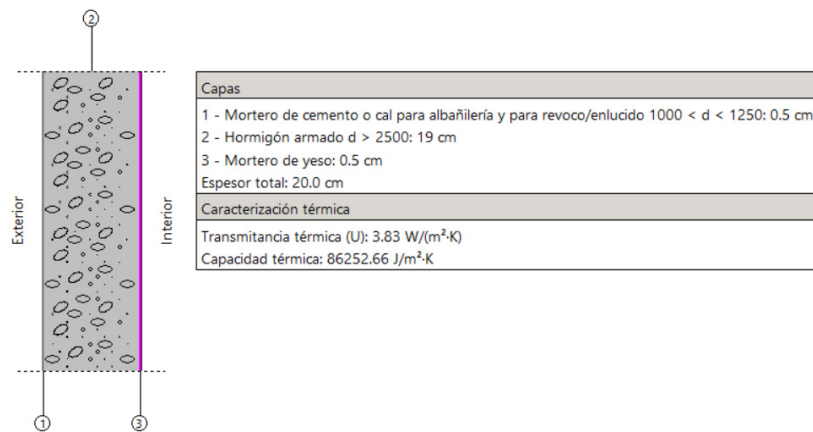


Figura 32. Composición gráfica de muro estructural de 20 cm de modelo original
Fuente: elaboración propia

Cuadro 4
Composición de muro de tablayeso 10 cm de espesor de modelo original (Tabique)
Fuente: elaboración propia

Capas	Espesor (cm)	Consuctividad (W/(m · K))	Resistencia térmica ((m ² · K)/W)
Placa de yeso	1.30	0.250	0.052
Cámara de aire	7.50	0.417	0.180
Placa de yeso	1.3	0.250	0.052

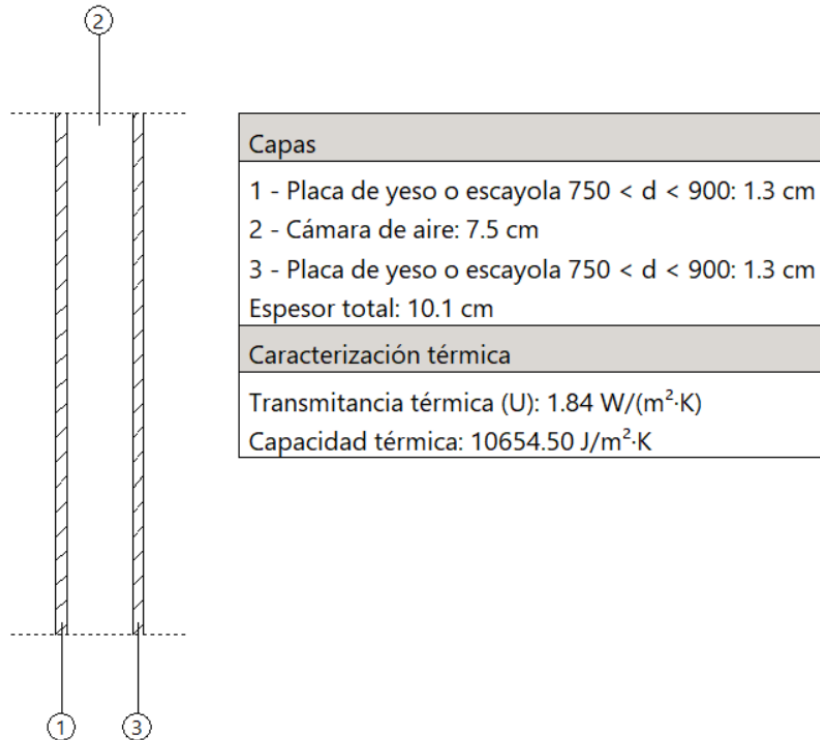


Figura 33. Composición gráfica de muro tablayeso 10 cm de espesor de modelo original
Fuente: elaboración propia

Posteriormente para la definición de los parámetros del recinto fueron los siguientes:

- Clasificación del recinto: Habitable.
- Ventilación según la normativa ANSI/ASHRAE Standard 62.1: 6 (l/s)/persona.
- Ocupación: 10 m²/persona.
- Ganancia de calor sensible >: 70 W/persona.
- Ganancia de calor latente 45 W/persona.
- Ganancia de calor sensible por equipamiento interno: 5.40 W/m².

Los puentes térmicos deben ingresarse manualmente dependiendo de la geometría de la unión entre los elementos. La configuración de estos parámetros dan como resultado las siguientes cargas térmicas:

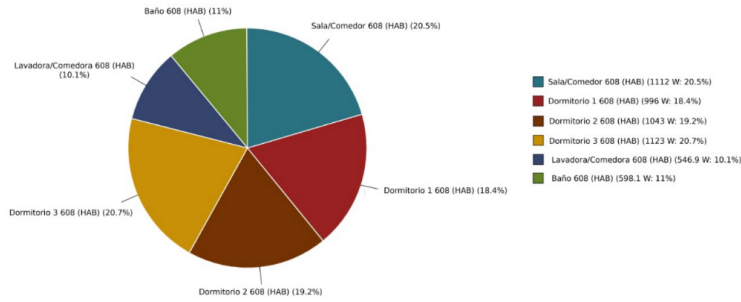


Figura 34. Cargas térmicas por recinto de la tipología de apartamento 608 (Carga térmica en conjunto máxima 21 mayo)

Fuente: elaboración propia

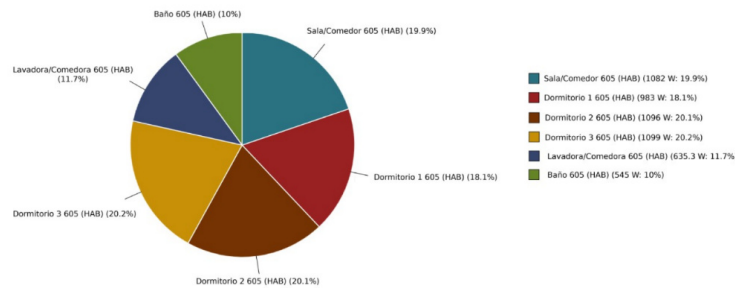


Figura 35. Cargas térmicas por recinto de la tipología de apartamento 605 (Carga térmica en conjunto máxima 21 mayo)

Fuente: elaboración propia

E. Tiempos de reverberación en modelo original

Para estos cálculos se utilizó la ecuación de Sabine para calcular los tiempos de reverberación, utilizando las dimensiones de cada recinto habitable y determinar los materiales de sus cerramientos, cada valor de coeficiente de absorción se obtuvo de la tabla de Acoustic Project Company Absortion Coefficients La ecuación de Sabine es la siguiente:

$$T = \frac{0.161 \cdot V}{A} \quad (1)$$

donde:

- T : Tiempo de reverberación en segundos (s)
- V : Volumen del recinto en metros cúbicos (m^3)
- A : Absorción total equivalente en metros cuadrados sabin (m^2)

Cuadro 5
Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Dormitorio 1-2
 Fuente: elaboración propia

	Área (m ²)	Material	α_{125}	α_{250}	α_{500}	α_{1000}	α_{2000}	α_{4000}
Piso A	7.40	Piso Porcelanato	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Muro 1	5.64	Tablero de yeso	0.30	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05
Muro 2	7.56	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 3	5.64	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 4	7.56	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Cielo	7.40	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Tiempo de reverberación (s)			1.41	2.79	2.64	2.95	2.74	1.57

Cuadro 6
Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Dormitorio 3
 Fuente: elaboración propia

	Área (m ²)	Material	α_{125}	α_{250}	α_{500}	α_{1000}	α_{2000}	α_{4000}
Piso A	10.47	Piso Porcelanato	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Muro 1	6.36	Vidrio sencillo de 6mm	0.10	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Muro 2	9.48	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 3	6.36	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 4	9.48	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Cielo	10.47	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Tiempo de reverberación (s)			3.70	4.82	3.79	4.02	3.87	1.91

Cuadro 7
Coefficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación para Sala/Comedor
 Fuente: elaboración propia

	Area (m ²)	Material	α_{125}	α_{250}	α_{500}	α_{1000}	α_{2000}	α_{4000}
Piso A	13.67	Piso Porcelanato	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Muro 1	6.432	Vidrio sencillo de 6mm	0.1	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Muro 2	12.24	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 3	6.432	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 4	12.24	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Cielo	13.67	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Tiempo de reverberación (s)			4.25	5.35	4.02	4.22	3.96	1.96

F. Condiciones de iluminación en los recintos del modelo original

Se utilizó la distribución típica para proyectos de esta tipología, la tendencia es situar una luminaria por espacio, es decir, una luminaria en la sala, una luminaria en la cocina, una luminaria en el comedor, etc. Las luminarias planteadas originalmente son tipo plafonera, la espera se deja fundida adentro de la losa durante el proceso constructivo. A continuación se puede observar la distribución de luminarias en la planta del apartamento y el tipo de luminaria.

Calculation objects

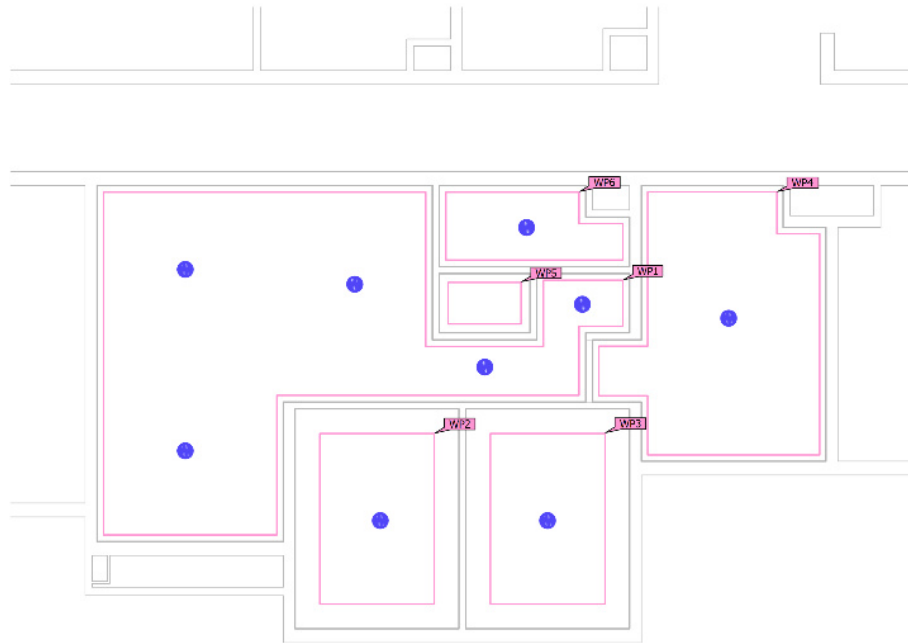


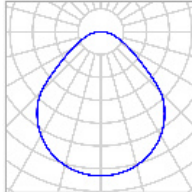


Figura 36. Distribución de luminarias original en vista de planta

Fuente: elaboración propia

			
Manufacturer	Glamox	P	12.0 W
Article name	D35-S230 LED 1400 840 MP	$\Phi_{\text{Luminaire}}$	1427 lm
Fitting	1x D35-230 1400 840 MP		

Individual luminaires

X	Y	Mounting height	Luminaire
1.252 m	0.560 m	2.400 m	1

Figura 37. Tipo de luminaria y altura de instalación
Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos a partir de esta distribución y tipo de luminarias es la siguiente:

Working planes

Properties	\bar{E} (Target)	E_{\min}	E_{\max}	$U_o (g_1)$ (Target)	g_2	Index
Working plane (Sala/Comedor 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.094 m	176 lx (≥ 300 lx) ✗	57.8 lx	338 lx	0.33 (≥ 0.00) ✓	0.17	WP1
Working plane (Dormitorio 1 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.352 m	149 lx (≥ 500 lx) ✗	70.9 lx	227 lx	0.48 (≥ 0.60) ✗	0.31	WP2
Working plane (Dormitorio 2 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.352 m	149 lx (≥ 500 lx) ✗	73.1 lx	227 lx	0.49 (≥ 0.60) ✗	0.32	WP3
Working plane (Dormitorio 3 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.090 m	95.9 lx (≥ 500 lx) ✗	21.2 lx	222 lx	0.22 (≥ 0.60) ✗	0.095	WP4
Working plane (Lavadora/Secadora 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.127 m	0.00 lx (≥ 500 lx) ✗	0.00 lx	0.00 lx	- (≥ 0.60)	-	WP5
Working plane (Baño 206) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.094 m	200 lx (≥ 500 lx) ✗	95.5 lx	273 lx	0.48 (≥ 0.60) ✗	0.35	WP6

Figura 38. Resultados y cumplimiento según las características de los espacios
Fuente: elaboración propia

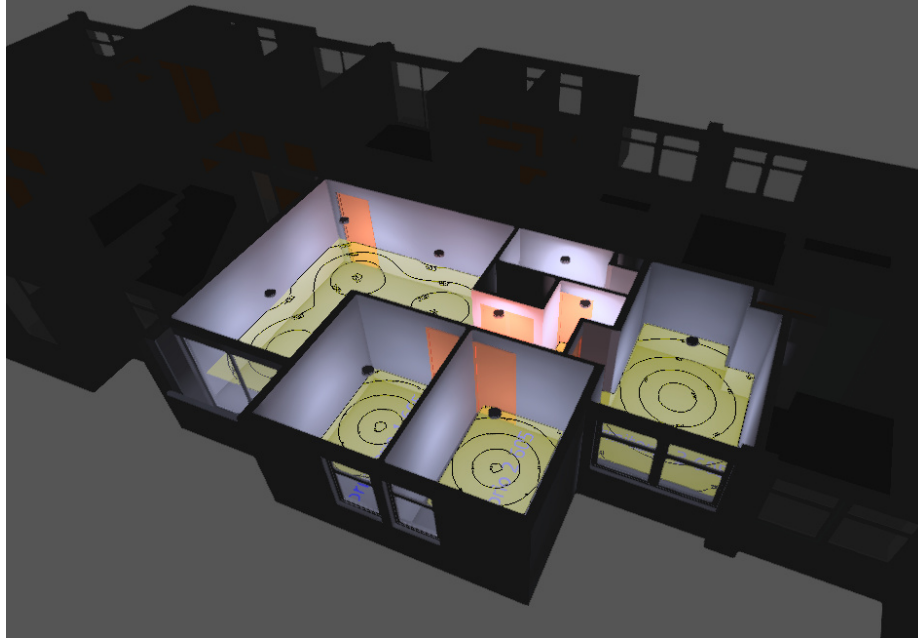


Figura 39. Tipología de apartamento 605 en el entorno de DIALux (modelo original)
Fuente: elaboración propia

G. Cargas térmicas en modelo modificado

Como primer punto para solucionar las cargas térmicas en los espacios es implementar voladizos sobre las aperturas de la edificación, estos voladizos serán implementados sobre las ventanas existentes en los dormitorios ya que son las fachadas más críticas. Este cálculo se realizó durante la fecha crítica de carga máxima térmica el 21 de mayo. Se utilizará la siguiente fórmula para este cálculo:

$$L = \frac{h}{\tan(\theta)} \quad (2)$$

Donde:

- L : Longitud del voladizo (m)
- h : Altura a sombrear = 1.4 m
- θ : Ángulo de elevación solar = 75°

Sustituyendo en la fórmula:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1.4}{\tan(85^\circ)} \\ &= \frac{1.4}{11.43} \\ &\approx 0.13 \text{ m} \end{aligned}$$

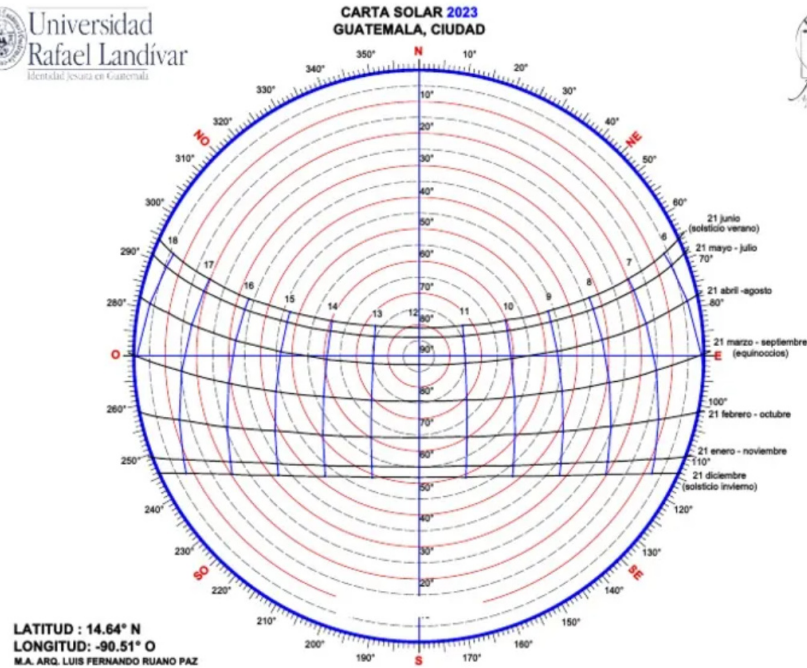


Figura 40. Carta solar para Ciudad de Guatemala
 Fuente: Universidad Rafael Landívar

Como se puede observar en la carta solar, la intersección con el ángulo de la fecha del 21 de mayo se puede observar que brinda un valor aproximado de 85° . Teniendo en cuenta este dato se puede realizar el cálculo para la longitud del voladizo para las aperturas en los dormitorios.

Otro cambio significativo que se realizó fue el cambio de materiales de muros de fachada, y se cambió la composición del forjado de losa de entrepiso, estos cambios de material también serán tomados en cuenta para el cálculo de tiempo de reverberación en los recintos, a continuación está la definición de la nueva composición de los elementos constructivos. Estos cambios se realizaron tomando en cuenta materiales y composiciones del elemento para favorecer sus propiedades térmicas.

Cuadro 8
 Composición gráfica de muro estructural de 20 cm de modelo modificado
 Fuente: elaboración propia

Capas	Espesor (cm)	Conductividad ($W/(m \cdot K)$)	Resistencia térmica ($(m^2 \cdot K)/W$)
Baldosa de ladrillo	2.00	1.000	0.020
Mortero de cemento para revoco/enlucido	0.5	0.550	0.009
Hormigón armado	19.00	2.500	0.076
Mortero de yeso	0.5	0.800	0.006

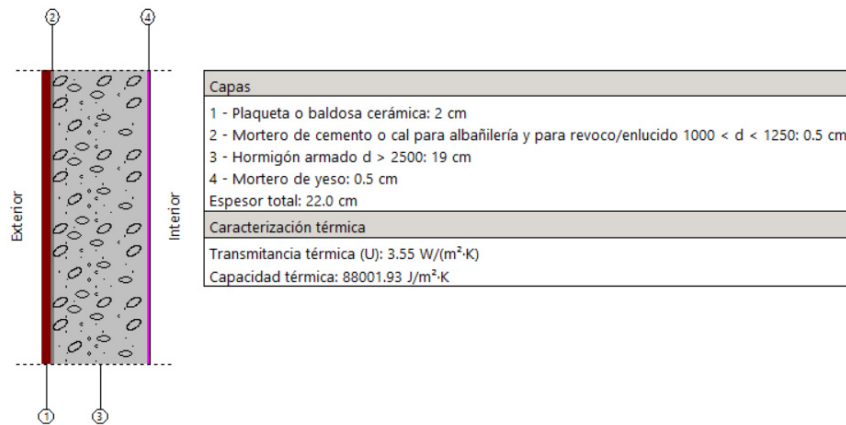


Figura 41. Composición gráfica de muro tablayeso 20 cm de espesor de modelo modificado (Fachada)
Fuente: elaboración propia

Cuadro 9
Composición de losa de entrepiso de modelo modificado
Fuente: elaboración propia

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/m·K)	Resistencia térmica (m ² ·K/W)
Plaqueta o baldosa cerámica	1.00	1.000	0.010
Mortero de cemento para revoco/enlucido	1.00	0.550	0.018
Hormigón armado	10	2.500	0.040
Cámara de aire	18.73	0.835	0.224
Placa de yeso	1.3	0.250	0.052

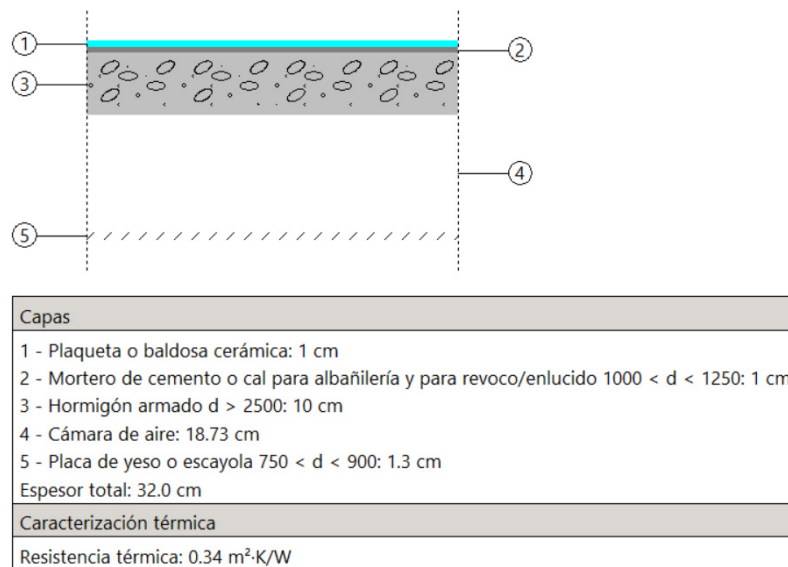


Figura 42. Composición gráfica de losa de entrepiso de modelo modificado
Fuente: elaboración propia

La definición de parámetros de recinto y puentes térmicos se mantuvieron del modelo analítico original, como se puede observar a continuación las cargas térmicas en los dormitorios presentaron

disminución debido a que las modificaciones afectaban principalmente a estos recintos.

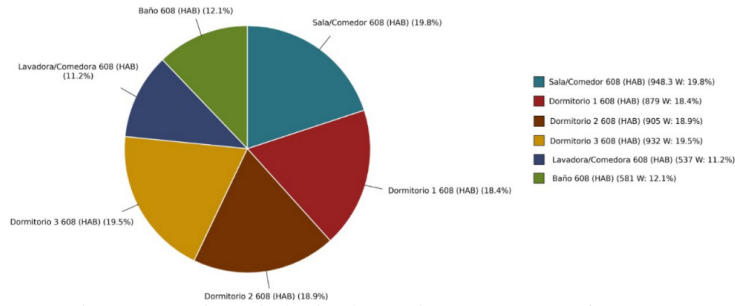


Figura 43. Cargas térmicas por recinto de la tipología de apartamento 608 (Carga térmica en conjunto máxima 21 mayo)

Fuente: elaboración propia

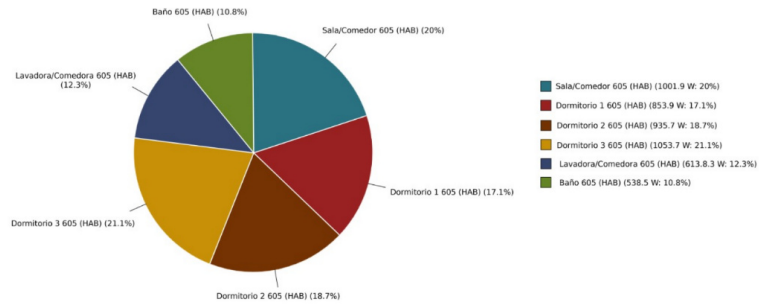


Figura 44. Cargas térmicas por recinto de la tipología de apartamento 605 (Carga térmica en conjunto máxima 21 mayo)

Fuente: elaboración propia

Cabe mencionar que la fórmula utilizada para los cálculos de ganancia térmica por medio del Método de las Series Temporales Radiantes es la siguiente:

$$q_{\text{total}}(t) = q_{\text{conv}}(t) + \sum_{n=1}^{24} Q_n \cdot RTS_n \quad (3)$$

Donde:

- $q_{\text{total}}(t)$: Carga térmica total sensible en el instante t (W).
- $q_{\text{conv}}(t)$: Ganancia convectiva directa a la hora t (W) (por ejemplo, parte convectiva de iluminación o personas).
- Q_n : Componente radiante generada hace n horas (W) (radiación solar, iluminación, equipos, etc.).
- RTS_n : Coeficiente de la serie temporal radiante para n horas atrás (valor tabulado según ASHRAE).

H. Tiempos de reverberación en modelo modificado

Tomando en cuenta la integración de cielo falso con fibra de lana mineral adentro de los recintos resultando en una altura de 2.2 m se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro 10
Coeficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Dormitorio 1-2 (modelo modificado)
Fuente: elaboración propia

	Área (m ²)	Material	α 125	α 250	α 500	α 1000	α 2000	α 4000
Piso A	7.40	Piso Porcelanato	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Muro 1	5.17	Tablero de yeso	0.30	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05
Muro 2	6.93	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 3	5.17	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 4	6.93	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Cielo	7.4	Cielo falso con lana mineral	0.42	0.72	0.83	0.88	0.89	0.80
Tiempo de reverberación (s)			0.54	0.42	0.38	0.36	0.36	0.36

Cuadro 11
Coeficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Dormitorio 3 (modelo modificado)
Fuente: elaboración propia

	Área (m ²)	Material	α 125	α 250	α 500	α 1000	α 2000	α 4000
Piso A	10.47	Piso Porcelanato	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Muro 1	5.17	Tablero de yeso	0.30	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05
Muro 2	6.93	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 3	5.17	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 4	6.93	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Cielo	10.47	Cielo falso con lana mineral	0.42	0.72	0.83	0.88	0.89	0.80
Tiempo de reverberación (s)			0.75	0.49	0.43	0.41	0.40	0.41

Cuadro 12
Coeficientes de absorción acústica y tiempo de reverberación Sala/Comedor (modelo modificado)
Fuente: elaboración propia

	Área (m ²)	Material	α 125	α 250	α 500	α 1000	α 2000	α 4000
Piso A	13.67	Piso Porcelanato	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Muro 1	5.896	Vidrio sencillo de 6mm	0.10	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Muro 2	11.22	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 3	5.896	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Muro 4	11.22	Concreto	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
Cielo	13.67	Cielo falso con lana mineral	0.42	0.72	0.83	0.88	0.89	0.80
Tiempo de reverberación (s)			0.09	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04

I. Condiciones de iluminación en los recintos del modelo modificado

Luego de observar los resultados deficientes de las condiciones de iluminación en el modelo original se planteó otra propuesta para escenarios de iluminación en los distintos recintos de la

tipología de apartamento. Para su distribución se utilizó un método gráfico que genera líneas guías para definir la distribución de luminarias.

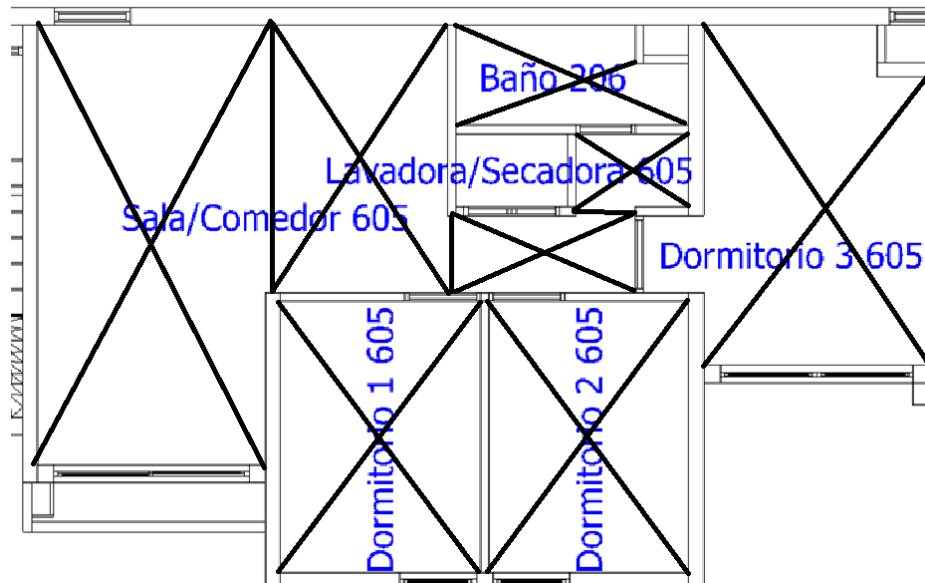


Figura 45. Guía gráfica para distribución de luminarias
Fuente: elaboración propia

Al seguir este patrón para la distribución de luminarias se puede concretar una distribución eficiente, delimitando zonas con necesidades específicas. En el baño y en la cocina se utilizaron luminarias con temperatura de color 5000 K, para el resto de recintos donde el usuario está realizando actividades más ligeras se propusieron luminarias de temperatura de color 3000 K. Este estudio lumínico cumple los estándares de la normativa integrada en el software, permitiendo el correcto valor de lúmenes según el espacio. Asimismo cuidando que el usuario no sufra de deslumbramiento. Estos cálculos se realizaron respetando la nueva altura de recinto consecuencia de la implementación del cielo falso.

Building 1 · Nivel 6 (Light scene 1)

Calculation objects

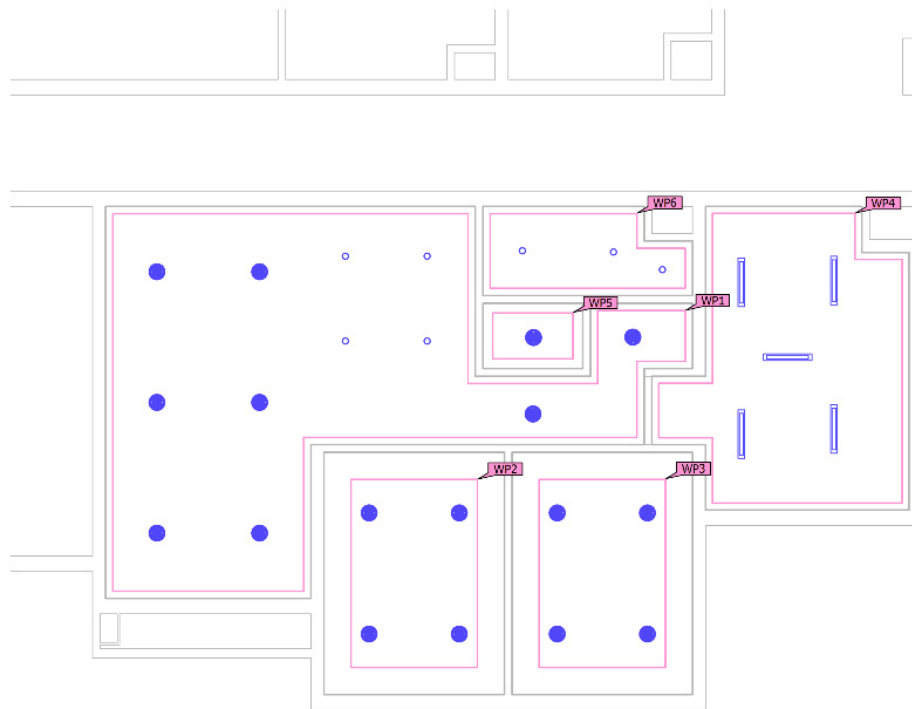


Figura 46. Distribución de luminarias modificada vista en planta
Fuente: elaboración propia

Building 1 · Nivel 6 · Dormitorio 1 605

Luminaire layout plan



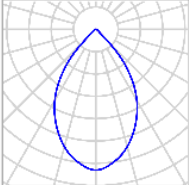
			
Manufacturer	Glamox	P	10.0 W
Article name	D70-R195 G2 1400 830 SM	$\Phi_{\text{Luminaire}}$	1352 lm
Fitting	1x PIM334752		

Figura 47. Tipo de luminaria utilizada en sala, comedor, lavadora/secadora, y dormitorio 1 y 2
Fuente: elaboración propia

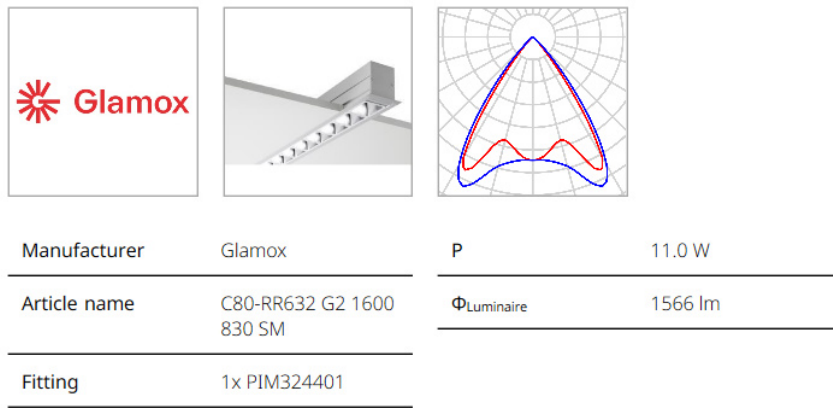


Figura 48. Tipo de luminaria utilizada en dormitorio 3
Fuente: elaboración propia

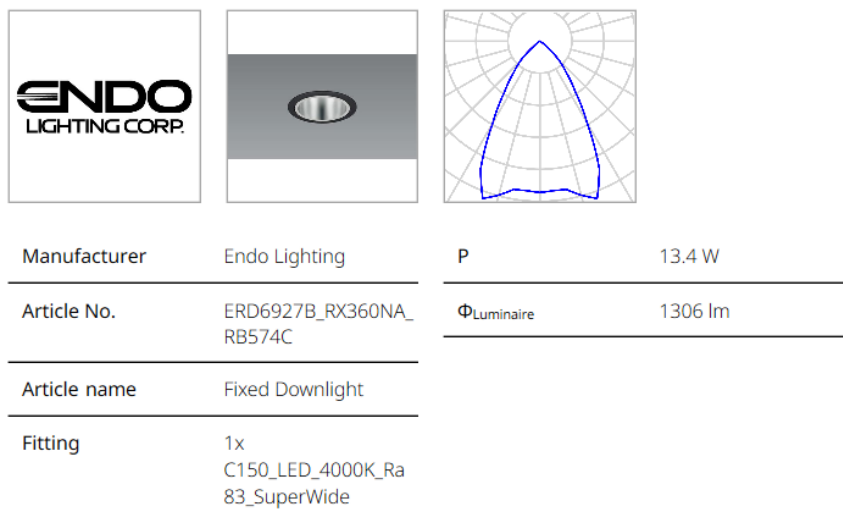


Figura 49. Tipo de luminaria utilizada en baño y cocina
Fuente: elaboración propia

Properties	\bar{E} (Target)	E_{min}	E_{max}	U_o (g _r) (Target)	g_z	Index
Working plane (Sala/Comedor 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.094 m	529 lx (≥ 300 lx) ✓	112 lx	1019 lx	0.21 (≥ 0.00) ✓	0.11	WP1
Working plane (Dormitorio 1 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.352 m	589 lx (≥ 500 lx) ✓	455 lx	674 lx	0.77 (≥ 0.60) ✓	0.68	WP2
Working plane (Dormitorio 2 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.352 m	588 lx (≥ 500 lx) ✓	455 lx	669 lx	0.77 (≥ 0.60) ✓	0.68	WP3
Working plane (Dormitorio 3 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.090 m	608 lx (≥ 500 lx) ✓	76.2 lx	1276 lx	0.13 (≥ 0.60) ✗	0.060	WP4
Working plane (Lavadora/Secadora 605) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.127 m	540 lx (≥ 500 lx) ✓	415 lx	630 lx	0.77 (≥ 0.60) ✓	0.66	WP5
Working plane (Baño 206) Perpendicular illuminance (adaptive) Height: 0.800 m, Wall zone: 0.094 m	645 lx (≥ 500 lx) ✓	416 lx	823 lx	0.64 (≥ 0.60) ✓	0.51	WP6

Figura 50. Resultados y cumplimiento según las características de los espacios modificado
Fuente: elaboración propia

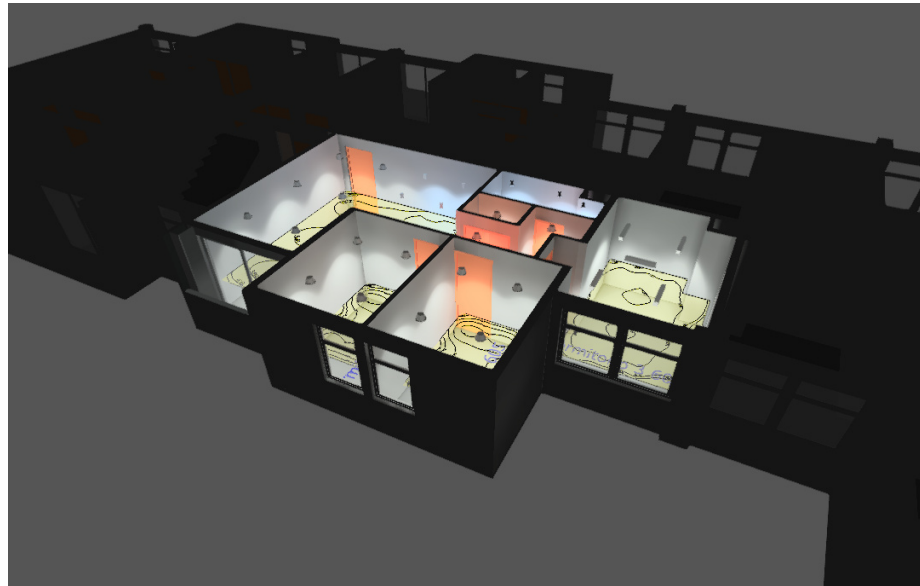


Figura 51. Tipología de apartamento 605 en el entorno de DIALux (modelo modificado)
Fuente: elaboración propia

En el transcurso de este trabajo de graduación se aplicaron conocimientos de diversas áreas de diseño relacionadas con la sostenibilidad y el mejoramiento de calidad de vida de sus usuarios, este trabajo de graduación no busca una certificación constructiva, solamente demostrar los efectos que tiene un diseño más consciente y enfocado en el consumidor final. En algunas ocasiones este alcance se puede ver limitado por factores como grupo demográfico objetivo, presupuesto, tiempo de entrega o indicaciones del cliente, sin embargo, estas modificaciones muestran las grandes ventajas de aplicar criterios de arquitectura pasiva durante el proceso de diseño de una edificación eliminando la necesidad de utilizar sistemas activos para confort reduciendo costos de mantenimiento y de servicios.



Figura 52. Arquitectura de edificación modificada

Fuente: elaboración propia

Uno de los principales factores que se abarcó durante este trabajo fue identificar las cargas térmicas en los espacios donde habita la mayor parte del día el usuario, distintos factores afectan este valor, pueden ser factores naturales como la irradiancia térmica de los materiales de los elementos constructivos, el camino del sol o pueden ser factores artificiales como iluminación y equipamiento. Es imperativo la elección de materiales con propiedades térmicas adecuadas y mitigar la exposición directa de aperturas a la energía solar. En este caso de estudio, solamente la implementación de voladizos correctamente calculados según la posición más crítica del sol en el cielo demostró un gran impacto en la carga térmica resultante en los recintos. Asimismo, el cambio de materiales expuestos al exterior pueden tener un impacto significativo como lo fue en este caso. El cambio de pintura en fachada a fachaleta de ladrillo que cuenta con un espesor mayor a la capa de pintura y mejores propiedades térmicas lograron mitigar los valores de carga térmica ganada por irradiancia solar. Esto fue más evidente en los dormitorios debido a su apertura expuesta directamente al exterior. A continuación se pueden observar la comparación de resultados en las dos tipologías de apartamentos sometidas a este estudio.

Cuadro 13
 Comparación de cargas térmicas modelo original y modelo modificado Apto. 608
 Fuente: elaboración propia

Modelo original		Modelo modificado		
Recinto	Carga térmica(W)	Recinto	Carga térmica (W)	Reducción de carga térmica
Sala/Comedor Apto. 608	1112.00	Sala/Comedor Apto. 608	948.73	14.68 %
Dormitorio 1 Apto. 608	996.00	Dormitorio 1 Apto. 608	879	11.75 %
Dormitorio 2 Apto. 608	1043.00	Dormitorio 2 Apto. 608	905	13.23 %
Dormitorio 3 Apto. 608	1123.00	Dormitorio 3 Apto. 608	932	17.01 %
Lavadora/Secadora Apto. 608	546.85	Lavadora/Secadora Apto. 608	537	1.80 %
Baño 608	598.13	Baño 608	581	2.86 %

Cargas térmicas por recinto en Apto. 608

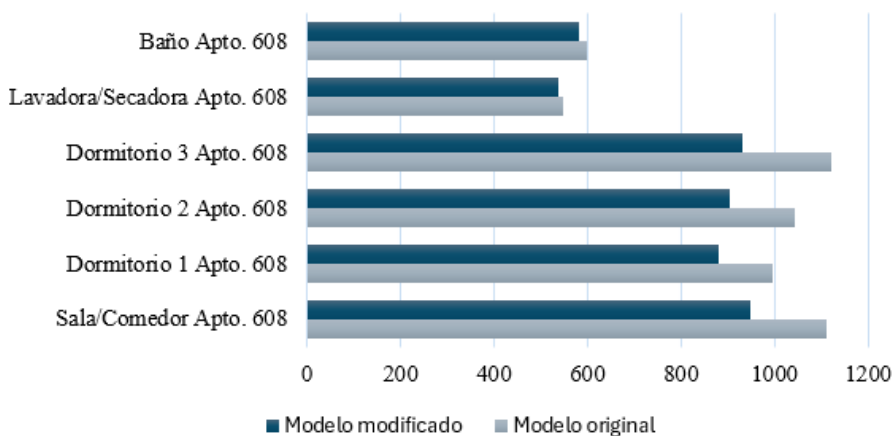


Figura 53. Comparación gráfica de cargas térmicas modelo original y modelo modificado Apto. 608
 Fuente: elaboración propia

Cuadro 14
 Comparación de cargas térmicas modelo original y modelo modificado Apto. 605
 Fuente: elaboración propia

Modelo original		Modelo modificado		
Recinto	Carga térmica(W)	Recinto	Carga térmica (W)	Reducción de carga térmica
Sala/Comedor Apto. 605	1082.00	Sala/Comedor Apto. 605	1001.85	7.41 %
Dormitorio 1 Apto. 605	983.00	Dormitorio 1 Apto. 605	853.82	13.14 %
Dormitorio 2 Apto. 605	1096.00	Dormitorio 2 Apto. 605	935.71	14.63 %
Dormitorio 3 Apto. 605	1099.00	Dormitorio 3 Apto. 605	1053.69	4.12 %
Lavadora/Secadora Apto. 605	635.25	Lavadora/Secadora Apto. 605	613.76	3.38 %
Baño 608	545	Baño 605	538.54	1.19 %

Cargas térmicas por recinto en Apto. 605

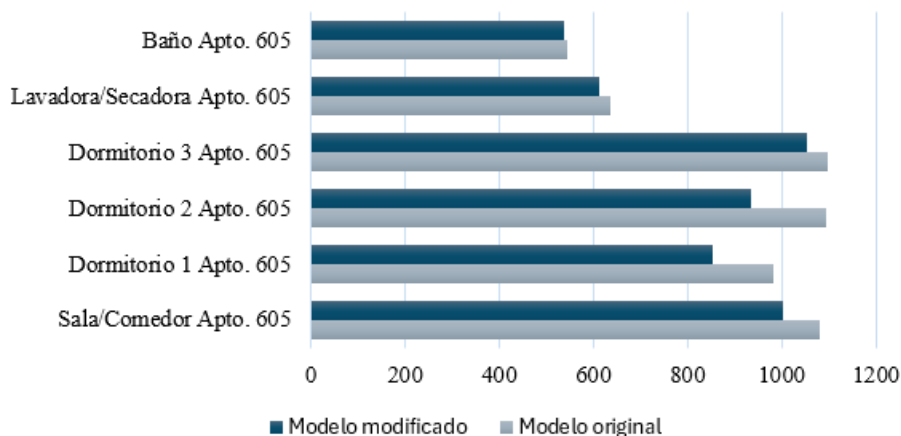


Figura 54. Comparación gráfica de cargas térmicas modelo original y modelo modificado Apto. 605
 Fuente: elaboración propia

Como se puede observar las cargas térmicas redujeron de manera favorable, demostró de ser gran beneficio implementar voladizos de 0.38 m proyectados sobre las aperturas para generar sombra y añadir un capa de fachaleta de ladrillo de 2 cm a la composición del muro de fachada con propiedades térmicas mostraron resultados positivos. Asimismo, la capa de aire creada por la nueva composición de losa con cielo falso benefician los recintos. Se deben utilizar materiales que respecto el alcance del proyecto para generar situaciones más favorables para la edificación.

Debido a ciertos factores del proyecto no fue necesario realizar cálculos de aislamiento de sonido exterior por medio de los diferentes métodos existentes ya que los muros estructurales de fachada eran bastante gruesos debido a su sistema constructivo y la ubicación es bastante reservada. Respecto a las aperturas se sugiere hacer modificaciones si se busca mejores propiedades de aislamiento de

sonido como incrementar el espesor del vidrio de las ventanas, en este estudio todas las aperturas y puertas de vidrio utilizaban vidrio de 6 mm.

La propiedad acústica en la que se concentró en este trabajo de graduación fue en el tiempo de reverberación en el interior de los recintos debido a que los materiales presentaban propiedades de absorción acústica pobres, haciendo que la reverberación se volviera incómoda para el usuario. Esto se puede mitigar al instalar mobiliario, sin embargo, para crear condiciones de confort y habitabilidad eficientes se modificó la tipología de las losas de entepiso. La instalación de cielo falso reduce la altura de los espacios a 2.20 m, siendo esta altura la mínima para recintos habitables según normativas guatemaltecas pero favorece de manera excepcional la mitigación de la reverberación. Se eligió un cielo falso de yeso con fibras minerales reduciendo significativamente los tiempos de reverberación. Este cambio drástico fue gracias a su coeficiente de absorción elevado para la totalidad del espectro de octavas de ondas de sonido. El dormitorio 1 y dormitorio 2 se realizó una vez la comparación debido a que su tipología es igual.

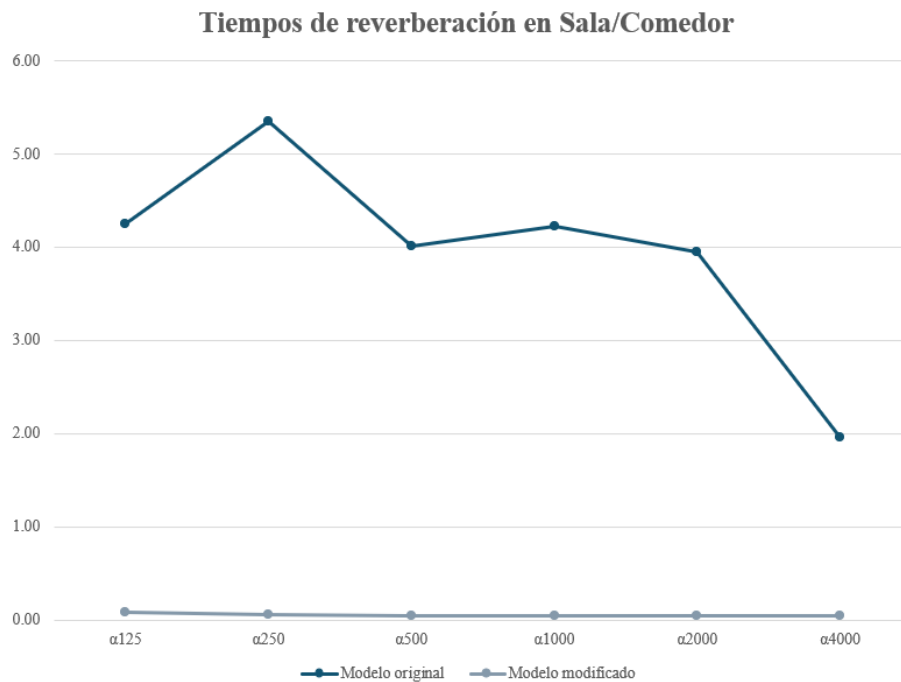


Figura 55. Comparación gráfica de tiempos de reverberación en el recinto de Sala/Comedor
Fuente: elaboración propia

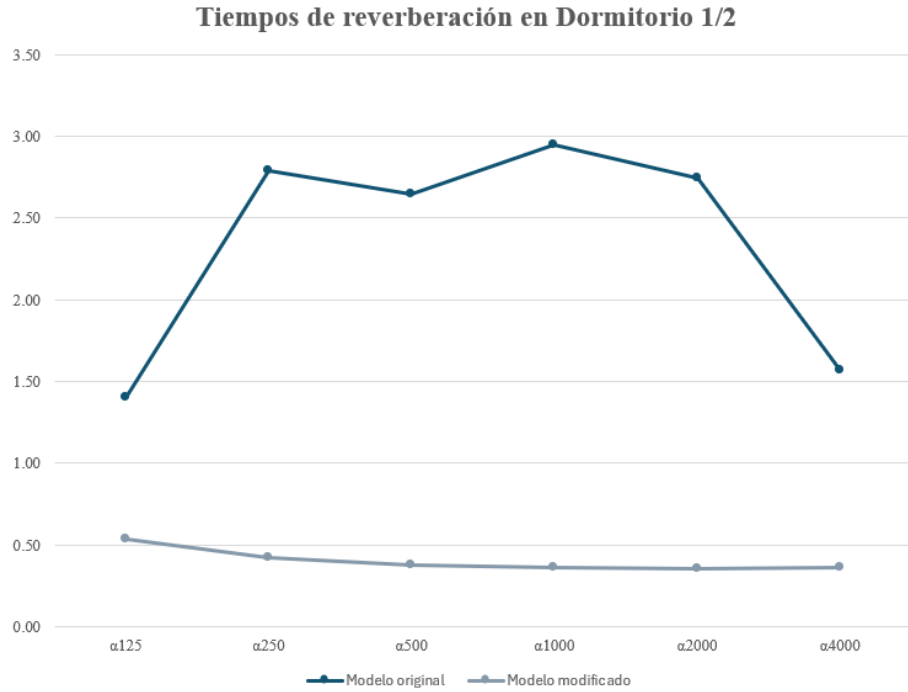


Figura 56. Comparación gráfica de tiempos de reverberación en el recinto de Dormitorio 1/2
Fuente: elaboración propia

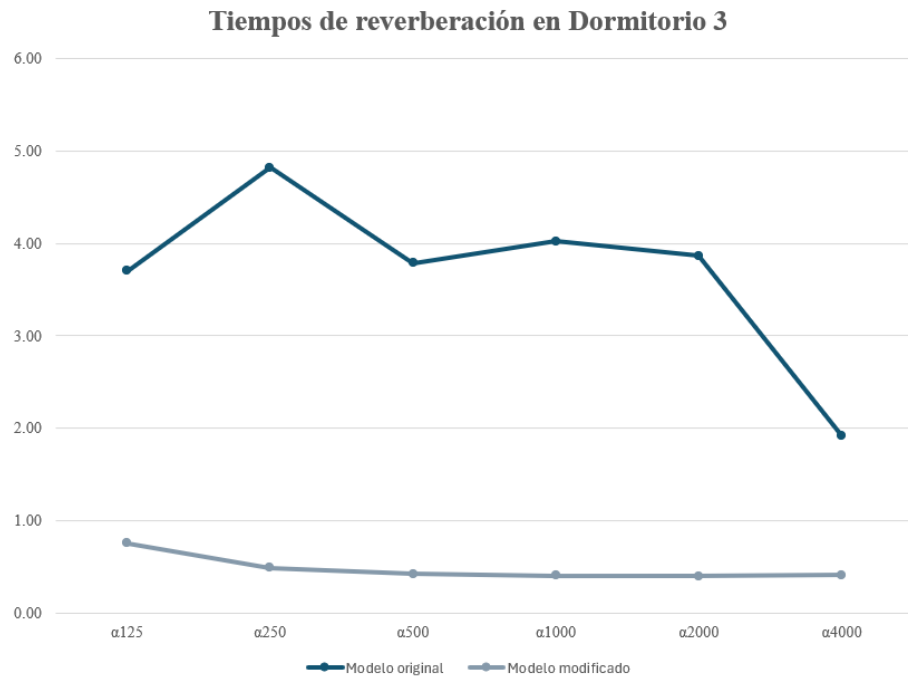


Figura 57. Comparación gráfica de tiempos de reverberación en el recinto de Dormitorio 3
Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en las comparaciones gráficas los valores de las tablas para dormitorio 3 son bastante parecidas debido a los materiales que conforman los cerramientos de estos recintos. Se

puede observar que 3 muros de cerramiento de concreto y 1 un muro en su totalidad o parcialmente en su totalidad, esto debido a que la ventana del dormitorio 3 abarca gran área de un muro, presentan facilidad para absorber ondas de sonido agudas, es decir, su longitud de onda es extensa. En contraste los dormitorios 1 y 2, que cuentan con un tabique de cerramiento de tablayeso con cámara de aire son más eficientes en absorber sonidos graves. Claramente todo esto se balancea luego de la implementación del cielo falso en el recinto reduciendo los tiempos de reverberación a valores menores de un segundo.

El último factor de confort que se utilizó para el mejoramiento de habitabilidad de los usuarios fue el efecto de las luminarias en los recintos. Elegir cuidadosamente la luminaria correcta para las distintas actividades que realiza el usuario en los diferentes espacios es importante, en efectos de este trabajo de graduación se utilizó luminarias con una temperatura de color en el rango de 4000 K a 5000 K para espacios como la cocina, el baño y la lavadora/secadora, siendo espacios no habitables. En contraste, para espacios habitables como la sala/comedor y dormitorios se utilizó luminarias con temperatura de color de 3500 K, esto es ideal para no alterar el ciclo circadiano del usuario. Esta temperatura de color reduce el cortisol y aumenta la producción de melatonina en los usuarios simulando los colores de un atardecer y preparar el cuerpo para ir a descansar.

El Software DIALux utiliza normativas como la EN 12464-1:2021 que establece los requisitos de iluminación para lugares de trabajo en interiores, incluyendo niveles mínimos de iluminancia, índice de deslumbramiento unificado (UGR), uniformidad y reproducción cromática, generando confiabilidad de los resultados generados. Las luminarias utilizadas en este proyecto se importaron desde la biblioteca del software intentando acercarse lo más posible a las propiedades presentes en luminarias en el mercado guatemalteco. El resultado es un estudio lumínico con resultados eficientes para cada espacio.

La implementación de arquitectura pasiva demostró resultados positivos en todos los aspectos estudiados durante este trabajo de graduación, la sensación térmica mejoró hasta un 17 % en recintos importantes gracias a una buena elección de materiales y un estudio de sitio eficiente. Los tiempos de reverberación en los recintos del apartamento se eliminaron casi en su totalidad ofreciendo entornos cómodos y de comunicación efectiva y la nueva distribución y tipos de luminarias crearon recintos ideales para realizar actividades del día a día de manera eficiente respetando las necesidades humanas.

Ciertas modificaciones pueden presentar sobre costo significativo pero se logró demostrar que el diseño pensado para el humano ofrece ventajas a largo plazo. Consumidor final más saludable, ahorro en servicios como iluminación y acondicionamiento de aire, en general diseñar con soluciones pasivas tiene sus ventajas y sus limitaciones.

VII. CONCLUSIONES

Luego de los resultados obtenidos durante los distintos cálculos y simulaciones de este trabajo de graduación realizando cambios e implementando elementos de arquitectura pasiva se puede realizar las siguientes conclusiones a partir de las hipótesis planteadas:

- Se realizó de manera satisfactoria el modelo de la edificación existente y se realizaron simulaciones y cálculos pertinentes para encontrar aspectos como las cargas térmicas, calidad de iluminación artificial y tiempos de reverberación acústica en apartamentos como prueba representativa.
- Posteriormente a estas simulaciones sobre el modelo de edificación existente se identificaron exitosamente ciertos aspectos de posible mejora para ofrecer características de habitabilidad más eficientes.
- Los cambios de materiales en fachada, implementación de cielo falso e implementación de voladizo generó un impacto positivo respecto a fenómenos como el tiempo de reverberación y ganancia térmica. Se redujo hasta en un 17 % el valor de las cargas térmicas para los recintos. Los tiempos de reverberación fueron eliminados casi en su totalidad.
- Se ejecutó de manera satisfactoria gráficas y tablas que representan de manera eficiente el impacto de los cambios realizados a la edificación existente y su efectividad.

VIII. RECOMENDACIONES

La implementación de diseño a través de arquitectura pasiva debe de ser contemplado desde las etapas tempranas de un proyecto de esta manera la etapa de diseño se puede llevar a cabo alrededor de este concepto.

Gestionar de manera correcta los materiales a utilizar en el proyecto ya que estos pueden presentar costos elevados y estar fuera del alcance del mismo, buscar alternativas con propiedades similares para obtener resultados eficientes.

Realizar estudios y análisis del sitio robustos para tener la mayor información posible, especialmente las condiciones climáticas del emplazamiento para tomar decisiones cruciales durante la etapa de diseño e implementar soluciones pasivas alcanzables, como la implementación de voladizos que se demostró tener un gran impacto positivo en el proyecto.

Crear espacios pensando en las actividades diarias de los usuarios con la finalidad de generar la mejor calidad de vida.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- ACIMCO. (2024). *5 razones para elegir quiebrasoles o louvers*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde https://www.acimco.com/quiebrasoles-louvers-a/?srsltid=AfmBOorRXw3xKScjNGjH8McY5IaUiCogRqdRi0aR6cN8G_-bCaCDzHPG
- Autodesk. (2023). *¿Cuáles son las ventajas de BIM?* Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.autodesk.com/es/solutions/bim/benefits-of-bim>
- Autodesk. (2025). *Acerca de los diferentes tipos de familia*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://help.autodesk.com/view/RVTLT/2024/ESP/?guid=GUID-88BD5F18-5660-4BDB-BCBF-1976D99BE982>
- Bernhard. (s. f.). *Aislamiento acústico* [Material de apoyo durante clase de licenciatura Acústica e iluminación, Universidad del Valle de Guatemala].
- Bouwer. (2024). *Understanding and utilizing daylight potential analysis in Autodesk Forma*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://mgfx.co.za/blog/building-architectural-design/understanding-and-utilizing-daylight-potential-analysis-in-autodesk-forma/#:~:text=What%20is%20Daylight%20Potential%20Analysis,daylight%20availability%20on%20building%20facades>.
- Central interactiva. (2024). *Construcción de volados arquitectónicos: materiales, tipos y errores que se comenten a la hora de hacerlos*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.expocihachub.com/nota/construccion-360/contruccion-de-volados-arquitectonicos>
- DIALux. (2025). *DIALux evo es el potente software para su diseño de iluminación*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.dialux.com/es-ES/dialux>
- Editorial Team. (2021). *Archivo IFC: qué es y cómo abrirlo*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://biblus.accasoftware.com/es/archivos-ifc-que-es-y-como-abrirlo/>
- El Kanfoundi. (2023). *¿Qué es la temperatura de bulbo húmedo?* Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://elordenmundial.com/que-es-temperatura-bulbo-humedo/#:~:text=La%20temperatura%20de%20bulbo%20h%C3%BAmedo%20es%20un%20indicador%20que%20mide,calor%20sin%20considerar%20la%20humedad>.
- ESSS. (2023). *4 ejemplos de aplicación de simulación computacional en equipos industriales*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.esss.com/es/blog/aplicacion-de-simulacion-computacional-en-equipos-industriales/#:~:text=La%20simulaci%C3%B3n%20computacional%20se%20aplica,y%20potenciando%20los%20procesos%20simulados>.
- EUROINNOVA. (s. f.). *Que son las herramientas informáticas y para que sirven*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.euroinnova.com/blog/que-son-las-herramientas-informaticas-y-para-que-sirven>
- García. (2025). *Efemérides solares y lunares*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://insivumeh.gob.gt/?p=7887>
- Guadarrama. (2021). *Luz natural en la arquitectura*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://arquine.com/luz-natural-en-la-arquitectura/>
- Hong. (2021). *Luz artificial en la arquitectura*.
- Leal. (s. f.). *Ganancias termicas* [Material de apoyo durante clase de licenciatura Eficiencia energética en edificaciones, Universidad del Valle de Guatemala].

- Martín. (2020). *Las 10 mejores tecnologías para ahorrar agua, a revisión*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.hidrologiasostenible.com/las-10-mejores-tecnologias-para-ahorrar-agua-en-una-vivienda-a-revision/>
- McQuiston. (2007). *Calefacción, ventilación y aire acondicionado: Análisis y diseño*. Limusa Wiley.
- Melero. (2023). *¿Qué es Autodesk Forma y para qué se utiliza?* Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://editeca.com/que-es-autodesk-forma-y-para-que-se-utiliza/>
- Mohd. (2008). *Energy savings benefits from passive architecture*. *Journal of sustainable development*.
- Passivhaus architecture. (2017). *¿Qué es el confort térmico?* Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://sgarq.com/que-es-el-confort-termico/>
- PRONACOM. (2022). *Construcción*. Consultado el 30 de enero de 2025, desde <https://www.pronacom.org/wp-content/uploads/2024/02/Construccion.pdf>
- Revista interior gráfico. (2021). *Habitabilidad: Importancia de adaptación de parámetros psicosociales en el proceso de diseño arquitectónico*. Consultado el 30 de enero de 2025, desde <https://interiorgrafico.com/edicion/vigesima-edicion-agosto-2020/habitabilidad-importancia-de-adaptacion-de-parametros-psicosociales-en-el-proceso-de-dise-no-arquitectonico>
- Royal meteorological society. (s. f.). *Microclimates*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.metlink.org/fieldwork-resource/microclimates/>
- Spitler. (2010). *Load Calculation Applications Manual*. ASHRAE.
- The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2013). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ANSI/ASHRAE Standard 55-2013.
- The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2025a). *Energy Standard for Sites and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>
- The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2025b). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- Universidad Mariano Gálvez. (2017). *Regionalización climática de Guatemala*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.smg.gt/regionalizacion/>
- U.S. Green Building Council. (2025a). *EDGE is a green building certification system focused on making buildings more resource-efficient*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://edge.gbci.org/>
- U.S. Green Building Council. (2025b). *LEED Rating system*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://www.usgbc.org/leed>
- Vitorino. (2021). *¿Qué es y para qué sirve Revit Arquitectura?* Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://konstruedu.com/es/blog/que-es-y-para-que-sirve-revit-arquitectura-2>
- Weather Spark. (2024). *Datos históricos meteorológicos de 2024 en ciudad de Guatemala*. Consultado el 17 de enero de 2025, desde <https://es.weatherspark.com/h/y/11693/2024/>

Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2024-en-Ciudad-de-Guatemala-Guatemala#Figures-ColorTemperature