

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DEL VALLE
GRUPO EDUCATIVO

Implementación de sistema de fachada ventilada en un edificio de tres niveles ubicado en la zona 15 de la Ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Alejandro González Haeckel para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Arquitectónica

Guatemala

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

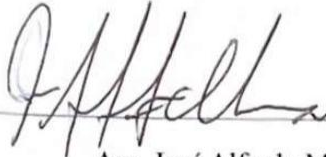
Implementación de sistema de fachada ventilada en un edificio de tres niveles ubicado en la zona 15 de la Ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Alejandro González Haeckel para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Arquitectónica

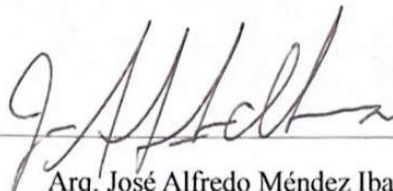
Guatemala

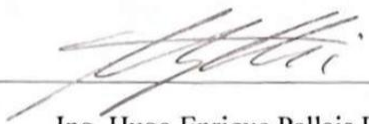
2025


Vo.Bo.:

(f) 
Arq. José Alfredo Méndez Ibarra

Tribunal Examinador:

(f) 
Arq. José Alfredo Méndez Ibarra

(f) 
Ing. Hugo Enrique Pallais Beteta

(f) 
Arq. Ana Valentina Leal Ordoñez

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

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
LISTADO DE ECUACIONES.....	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. IMPORTANCIA.....	4
IV. OBJETIVOS.....	5
A. Objetivo general.....	5
B. Objetivos específicos.....	5
V. MARCO TEÓRICO.....	6
A. Fachada ventilada.....	6
1. Tipos de fachadas.....	6
2. Tipos de envolvente de un edificio.....	6
3. Definición fachada ventilada.....	7
4. Comportamiento de la fachada ventilada.....	7
5. Perspectiva climática de Ciudad de Guatemala.....	8
6. Principios básicos del cálculo del comportamiento térmico.....	9
7. Casos de estudio de fachadas ventiladas.....	10
B. Ciencia de los materiales.....	12
1. Tipos de materiales constructivos.....	12
2. Propiedades de los materiales constructivos.....	13
3. Transmitancia térmica de los materiales.....	13
4. Tecnologías de construcción innovadoras.....	14
C. Sostenibilidad.....	15
1. Definición vivienda sostenible.....	15
2. Importancia vivienda sostenible.....	16
3. Impacto ambiental de la construcción.....	16
4. Reducción de la huella de carbono en la construcción.....	16
5. Alternativas amigables con el medio ambiente en la construcción.....	17

6.	Climatización activa y pasiva	18
7.	Certificaciones verdes.....	19
D.	Software de interés.....	20
1.	CYPETHERM HE PLUS 2019, CYPE.....	20
2.	IFC BUILDER 2019, CYPE	22
VI.	METODOLOGÍA	23
A.	Obtención de datos.....	23
1.	Selección del edificio.....	23
2.	Datos del edificio.....	23
3.	Planos del edificio	26
B.	Generación de documentación inicial.....	28
1.	Generación de planos.....	28
C.	Ingreso de información en software IFC Builder 2019, CYPE	30
1.	Modelado del edificio.....	30
D.	Ingreso de información (condiciones iniciales) en software CYPETHERM HE PLUS 2019, CYPE	35
1.	Condiciones iniciales de muros de cerramiento	36
2.	Condiciones iniciales de muros de tabiquería	37
3.	Condiciones iniciales de suelos en contacto con el terreno	40
4.	Condiciones iniciales de forjados (losas)	40
5.	Condiciones iniciales de cubiertas.....	41
6.	Condiciones iniciales de puertas.....	41
7.	Condiciones iniciales de huecos acristalados (ventanas).....	42
8.	Resolución de puentes térmicos lineales	42
E.	Generación de propuesta fachada ventilada.....	43
1.	Muro soporte	44
2.	Aislamiento térmico	44
3.	Subestructura metálica.....	44
4.	Cámara de aire ventilada	44
5.	Revestimiento exterior.....	44
6.	Ventanería y puertas.....	45
F.	Ingreso de información (propuesta fachada ventilada) en software CYPETHERM HE PLUS 2019, CYPE.....	45
1.	Composición (propuesta fachada ventilada) de muros de cerramiento, ventanería y puertas	45

2.	Composición (propuesta fachada ventilada) de puertas	47
3.	Composición (propuesta fachada ventilada) de huecos acristalados (ventanas)	47
VII.	CÁLCULOS	49
A.	Cálculo de la mejora en confort climático interior tras la implementación de la propuesta de fachada ventilada.....	49
1.	Temperatura interior con las condiciones iniciales de fachada del Edificio A	49
2.	Temperatura interior con la propuesta de fachada ventilada del Edificio A	52
B.	Cálculo de la ganancia de calor sensible en el aire del Edificio A.....	56
1.	Caudal de aire del edificio (CFM).....	56
2.	Ganancia térmica	56
C.	Cálculo de la carga de enfriamiento del Edificio A	57
1.	Conversión de unidades de ganancia térmica	57
2.	Consumo energético	57
D.	Cálculo de la huella de carbono generada anualmente	58
1.	Cálculo de Gases de Efecto Invernadero (GEI) generados anualmente	58
VIII.	RESULTADOS	59
A.	Mejora en confort climático interior tras la implementación de la propuesta de fachada ventilada.....	59
B.	Ganancia de calor sensible en el aire del Edificio A.....	60
C.	Carga de enfriamiento del Edificio A.....	62
D.	Huella de carbono generada anualmente	63
IX.	DISCUSIÓN	64
A.	Mejora en confort climático interior tras la implementación de la propuesta de fachada ventilada.....	64
B.	Ganancia de calor sensible en el aire del Edificio A.....	64
C.	Carga de enfriamiento del Edificio A.....	65
X.	CONCLUSIONES	67
XI.	RECOMENDACIONES.....	68
XII.	BIBLIOGRAFÍA.....	69

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Pronóstico de temperaturas mínima promedio y máxima promedio para los meses de mayo 2024 para Guatemala (INSIVUMEH, s.f.).....	9
Cuadro 2. Datos del edificio: Edificio A Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central..	23
Cuadro 3. Características por capa de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de cerramiento	36
Cuadro 4. Características por capa de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de cerramiento	36
Cuadro 5. Características por capa de los muros de concreto fundido de 0.20 metros de espesor de cerramiento	37
Cuadro 6. Características por capa de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de tabiquería.....	38
Cuadro 7. Características por capa de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de tabiquería.....	38
Cuadro 8. Características por capa de los muros de concreto fundido de 0.15 metros de espesor de tabiquería.....	39
Cuadro 9. Características por capa de los muros de yeso de 0.10 metros de espesor de tabiquería	39
Cuadro 10. Características por capa de la losa fundida de piso de 0.15 metros de espesor.....	40
Cuadro 11. Características por capa de la losa fundida de entepiso de 0.15 metros de espesor.....	40
Cuadro 12. Características por capa de la losa fundida de voladizo de 0.15 metros de espesor.....	41
Cuadro 13. Características por capa de la losa fundida de cubierta de 0.15 metros de espesor.....	41
Cuadro 14. Resumen elementos de cerramiento, condiciones iniciales Edificio A	42
Cuadro 15. Características por capa de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada.....	45
Cuadro 16. Características por capa de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada.....	46
Cuadro 17. Características por capa de los muros de concreto fundido de 0.20 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada	47
Cuadro 18. Resumen elementos de cerramiento, condiciones de propuesta fachada ventilada Edificio A.....	48
Cuadro 19. Temperatura máxima y mínima de confort (Nivel 01) para las condiciones iniciales del Edificio A.....	50
Cuadro 20. Temperatura máxima y mínima de confort (Nivel 02) para las condiciones iniciales del Edificio A.....	51
Cuadro 21. Temperatura máxima y mínima de confort (NIVEL 03) para las condiciones iniciales del Edificio A	52

Cuadro 22. Temperatura máxima y mínima de confort (NIVEL 01) para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A.....	53
Cuadro 23. Temperatura máxima y mínima de confort (NIVEL 02) para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A.....	54
Cuadro 24. Temperatura máxima y mínima de confort (NIVEL 03) para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A.....	55
Cuadro 25. Reducción en la temperatura del aire interior por mes al comparar las condiciones iniciales con la propuesta de fachada ventilada	59
Cuadro 26. Ganancia de calor en condiciones iniciales por nivel según mes en el Edificio A.....	60
Cuadro 27. Ganancia de calor al implementar propuesta de fachada ventilada, por nivel según mes del año en el Edificio A.....	61
Cuadro 28. Ganancia de calor crítica para el Edificio A en condiciones iniciales	62
Cuadro 29. Ganancia de calor crítica para el Edificio A con propuesta de fachada ventilada	63
Cuadro 30. Consumo energético del Edificio A en condiciones iniciales y con propuesta de fachada ventilada	63
Cuadro 31. Reducción en la huella de carbono anual del Edificio A al implementar la propuesta de fachada ventilada	63

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Página

Gráfica 1. Temperatura del aire interior (NIVEL 01) según temperatura exterior del aire a lo largo de los meses del año para las condiciones iniciales del Edificio A.....	49
Gráfica 2. Temperatura del aire interior (NIVEL 02) según temperatura exterior del aire a lo largo de los meses del año para las condiciones iniciales del Edificio A.....	50
Gráfica 3. Temperatura del aire interior (NIVEL 03) según temperatura exterior del aire a lo largo de los meses del año para las condiciones iniciales del Edificio A.....	51
Gráfica 4. Temperatura del aire interior según temperatura exterior del aire (NIVEL 01) a lo largo de los meses del año para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A	53
Gráfica 5. Temperatura del aire interior según temperatura exterior del aire (NIVEL 02) a lo largo de los meses del año para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A	54
Gráfica 6. Temperatura del aire interior según temperatura exterior del aire (NIVEL 03) a lo largo de los meses del año para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A	55
Gráfica 7. Comportamiento de la reducción en temperatura del aire interior al implementar la propuesta de fachada ventilada según el mes del año	60
Gráfica 9. Ganancia de calor con propuesta de fachada ventilada, por nivel según mes del año en el Edificio A	62

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Fenómeno de convección natural (efecto chimenea) en detalle típico de fachada ventilada (Marquez, 2024).....	8
Figura 2. Complejo Parroquial San Manuel González, Madrid, España (García, 2024).....	10
Figura 3. Sunlight House, Pressbaum (DETAIL Green, 2011).....	11
Figura 4. Detalle fachada Sunlight House, Pressbaum (DETAIL Green, 2011).....	11
Figura 5. Larixhaus, Cataluña (García, 2024).....	12
Figura 6. Ingreso de datos del emplazamiento en CYPETHERM (CYPE, 2023).....	21
Figura 7. Vista general, ubicación del edificio.....	24
Figura 8. Fachada norte Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central.....	24
Figura 9. Fachada oeste Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central.....	24
Figura 10. Fachada sur Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central.....	25
Figura 11. Fachada este Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central.....	25
Figura 12. Voladizos sobre ventanas en fachada norte Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central.....	26
Figura 13. Cajetín en planos Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. por R. y P. Cordón Arquitectura e Ing. Civil.....	26
Figura 14. Plano de planta nivel 1 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Por R. y P. Cordón Arquitectura e Ing. Civil (1983).....	27
Figura 15. Plano de planta nivel 2 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala Campus Central. Por R. y P. Cordón Arquitectura e Ing. Civil (1983).....	27
Figura 16. Plano de planta nivel 3 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Por R. y P. Cordón Arquitectura e Ing. Civil (1983).....	28
Figura 17. Plano de planta nivel 1 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Dibujo por Alejandro González Haeckel (2025).....	29
Figura 18. Plano de planta nivel 2 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Dibujo por Alejandro González Haeckel (2025).....	29
Figura 19. Plano de planta nivel 3 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Dibujo por Alejandro González Haeckel (2025).....	30
Figura 20. Creación de nueva obra en software IFC Builder 2019.....	31
Figura 21. Selección de obra vacía (obra nueva) en software IFC Builder 2019.....	31
Figura 22. Introducción de plantas en software IFC Builder 2019.....	31
Figura 23. Introducción de plantillas en software IFC Builder 2019.....	32
Figura 24. Ajuste de orientación (norte del proyecto) en software IFC Builder 2019.....	32
Figura 25. Introducción de muros y particiones en software IFC Builder 2019.....	32

Figura 26. Introducción de forjados (losas) en software IFC Builder 2019.....	33
Figura 27. Introducción de huecos (aberturas) en software IFC Builder 2019.....	33
Figura 28. Introducción de recintos (áreas) en software IFC Builder 2019.....	33
Figura 29. Generación de resultados, aristas e incidencias en software IFC Builder 2019	34
Figura 30. Modelo completado en software IFC Builder 2019.....	34
Figura 31. Vinculación a BIMserver.center en software IFC Builder 2019.....	35
Figura 32. Exportación a BIMserver.center en software IFC Builder 2019.....	35
Figura 33. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de cerramiento	36
Figura 34. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de cerramiento	37
Figura 35. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de concreto fundido de 0.20 metros de espesor de cerramiento	37
Figura 36. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de tabiquería	38
Figura 37. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de tabiquería	38
Figura 38. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de concreto fundido de 0.15 metros de espesor de tabiquería	39
Figura 39. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de yeso de 0.10 metros de espesor de tabiquería.....	39
Figura 40. Vista de sección y transmitancia térmica de la losa fundida de piso de 0.15 metros de espesor.....	40
Figura 41. Vista de sección y transmitancia térmica de la losa fundida de entrepiso de 0.15 metros de espesor.....	40
Figura 42. Vista de sección y transmitancia térmica de la losa fundida de voladizo de 0.15 metros de espesor.....	41
Figura 43. Vista de sección y transmitancia térmica de la losa fundida de cubierta de 0.15 metros de espesor.....	41
Figura 44. Transmitancia térmica y absorptividad de las puertas de ingreso a aulas, oficinas y bodegas	42
Figura 45. Transmitancia térmica, factor solar, fracción opaca y transmitancia total de energía solar del hueco de las ventanas de cristal sencillo	42
Figura 46. Tipos de encuentro en puentes térmicos lineales según normativa CTE DB-HE.....	43
Figura 47. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada	46
Figura 48. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada	46

Figura 49. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de concreto fundido de 0.20 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada.....	47
Figura 50. Transmitancia térmica y absorptividad de las puertas de ingreso a aulas, oficinas y bodegas según características de propuesta de triple acristalamiento con cámaras de argón	47
Figura 51. Transmitancia térmica, factor solar, fracción opaca y transmitancia total de energía solar del hueco de las ventanas de cristal sencillo según características de propuesta de triple acristalamiento con cámaras de argón.....	48

LISTADO DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Cálculo del área de aire	56
Ecuación 2. Cálculo del caudal de aire para el edificio (CFM)	56
Ecuación 3. Ganancia térmica.....	56
Ecuación 4. Conversión tonelada de refrigeración a BTU/h.....	57
Ecuación 5. Conversión tonelada de refrigeración a kW térmicos	57
Ecuación 6. Cálculo consumo energético anual.....	57
Ecuación 7. Cálculo costo consumo energético anual	58
Ecuación 8. Cálculo emisiones de gas de efecto invernadero (GEI)	58

RESUMEN

Las nuevas exigencias de confort climático por parte de los usuarios, así como los cambios en la temperatura mundial, requieren tomar medidas de control climático en regiones en las que no se acostumbraba, como Guatemala. Para el cual, se pueden implementar soluciones activas, que requieren consumo energético para su funcionamiento, o pasivas, utilizando soluciones a nivel de arquitectura y aprovechamiento del entorno. Las fachadas ventiladas se encuentran en el segundo grupo, esta estrategia de diseño arquitectónico consiste en la creación de una capa de aire entre la fachada externa del edificio y la estructura interna.

Las fachadas ventiladas funcionan creando un espacio de ventilación entre la fachada externa del edificio y la pared de cerramiento interna. Dicho espacio permite que el aire circule libremente, eliminando puentes térmicos, lo que permite disipar el calor y reducir la irradiación solar que afecta al interior. Estas fachadas ayudan a regular la temperatura interior de un edificio al reducir la transferencia de calor desde el exterior. Durante la época de verano, el aire caliente se disipa a través del espacio de aire, manteniendo el interior más fresco. Mientras que, durante el invierno, el espacio de aire actúa como un aislante adicional, reteniendo el calor interior. Otra de las propiedades de las fachadas ventiladas es la reducción de la humedad en las paredes internas del edificio al permitir que el aire circule y se seque de manera natural, previniendo la formación de moho y distintos problemas de humedad en el interior.

Gracias a la variedad de materiales que se pueden utilizar en las fachadas ventiladas, este sistema puede aportar a la estética del edificio. Adicional a esto, también aportan significativamente a su sostenibilidad. Esta mejora en la sostenibilidad se alcanza principalmente al reducir la necesidad de sistemas de aire acondicionado, disminuyendo el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas.

Para identificar la mejora alcanzada en términos de transmitancia térmica es necesario calcular el factor de transmitancia térmica “U”. Este es una medida de la cantidad de calor que puede ser transferida a través de un material. El factor se expresa en vatios por metro cuadrado por grado Celsius o en unidades equivalentes. Para poder calcular este valor el primer paso es identificar los materiales que componen la fachada, incluyendo el revestimiento exterior, el aislamiento y cualquier otro material presente. Una vez se cuenta con las propiedades térmicas de cada material, como la conductividad térmica y el espesor, se procede a calcular las resistencias térmicas. Estas resistencias de las capas individuales posteriormente se suman para obtener la resistencia térmica de la fachada. Esta resistencia total se utiliza finalmente para calcular el factor de transmitancia térmica U.

Este trabajo de graduación en modalidad de tesis busca encontrar la mejora energética al implementar una propuesta de fachada ventilada en un edificio que actualmente tiene fachada de mampostería. Al reducir el consumo energético por sistemas de climatización, se persigue reducir la huella de carbono anual de la edificación.

ABSTRACT

The increasing demand for climatic comfort from users, along with global temperature changes, necessitates the implementation of climate control measures in regions where such measures were previously uncommon, such as Guatemala. These measures can involve active solutions, which require energy consumption, or passive solutions that leverage architectural strategies and environmental advantages. Ventilated facades fall into the latter category. This architectural design strategy involves creating an air layer between the external facade of the building and its internal structure.

Ventilated facades function by establishing a ventilation gap between the external facade and the internal enclosure wall. This gap allows air to circulate freely, eliminating thermal bridges, dissipating heat, and reducing solar radiation affecting the interior. These façades help regulate a building's interior temperature by minimizing heat transfer from the exterior. During summer, hot air is dissipated through the ventilation gap, keeping the interior cooler. In winter, the air gap acts as additional insulation, retaining interior heat. Another key feature of ventilated facades is the reduction of humidity in the internal walls by allowing air to circulate and dry naturally, preventing mold growth and other moisture-related issues indoors.

Thanks to the variety of materials that can be used in ventilated facades, this system also contributes to the building's aesthetic appeal. Furthermore, it significantly enhances building sustainability by reducing the reliance on air conditioning systems, thus decreasing energy consumption and associated with greenhouse gas emissions.

To quantify the improvement in thermal transmittance, it is necessary to calculate the thermal transmittance factor "U." This metric measures the amount of heat transferred through a material and is expressed in watts per square meter per degree Celsius or equivalent units. Calculating this value begins with identifying the materials comprising the façade, including the external cladding, insulation, and any additional materials. Once the thermal properties of each material, such as thermal conductivity and thickness, are determined, the thermal resistances are calculated. The individual layer resistances are summed up to obtain the total thermal resistance of the facade. This total resistance is then used to calculate the thermal transmittance factor "U."

This graduation project, in the form of a thesis, aims to identify the energy improvement achieved by implementing a ventilated facade system on a building that currently has a masonry facade. By reducing energy consumption from air conditioning systems, the goal is to lower the building's annual carbon footprint.

I. INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda energética y los cambios en la temperatura mundial han puesto en relieve la necesidad de soluciones sostenibles en la construcción. Los edificios, al ser grandes consumidores de energía, presentan una oportunidad significativa para la reducción del impacto ambiental. En el cuerpo de esta tesis, se aborda el problema de la eficiencia energética mediante la propuesta fachadas ventiladas, al analizar cómo su implementación puede mejorar la sostenibilidad y reducir el consumo energético de los edificios.

Las fachadas ventiladas mejoran la eficiencia térmica de los edificios, lo que implica una reducción en el consumo energético proveniente por sistemas de climatización. El sistema consta de una fachada con varias capas y una cámara de aire entre el cerramiento exterior del edificio y su revestimiento exterior. Dicha cámara de aire al tener una abertura en la parte superior y otra en la parte inferior permite una circulación continua de aire. En verano, las temperaturas calientes provocan que el aire caliente suba y que la cámara de aire se renueve de aire más frío. Mientras que en invierno no se alcanzan las temperaturas necesarias para que el aire ascienda, por lo que este no se renueva, lo que resulta en una capa de aislamiento de calor que proviene del interior. Es decir, que las fachadas ventiladas evitan el sobrecalentamiento en los meses de más calor y conserva mejor la temperatura del interior de las edificaciones en épocas de invierno.

II. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, es común utilizar sistemas de aire acondicionado para mejorar el confort de sus edificaciones. Esto como resultado a los cálidos días de verano y la aislación de las fachadas que reciben sol. Esta irradiación solar, si no es debidamente aislada, se traduce a espacios interiores de edificaciones calientes. Esto obliga a sus residentes a mejorar el confort a través de soluciones de aire acondicionado. Mejorar la sensación térmica de esta manera no se considera sostenible, por la alta demanda de energía requerida por el sistema de aire acondicionado.

Según el INSIVUMEH (s. f.), el clima en Guatemala varía significativamente de una región a otra como resultado a la diversidad geográfica del país, las cuales van desde zonas costeras hasta montañas y selvas. En términos generales, en Guatemala se experimenta un clima tropical, sus condiciones climáticas varían según la altitud y la temporada del año. En la temporada en seca (noviembre a abril) muchas de las regiones del país experimentan un clima más seco y cálido. Especialmente en los departamentos situados en las tierras bajas y en las regiones costeras del sur y del este, como Escuintla, Retalhuleu y Zacapa, las temperaturas pueden superar los 30 °C durante el día. Por otro lado, en la temporada de lluvias (mayo a octubre) las temperaturas pueden disminuir debido a las precipitaciones y a la mayor nubosidad. Sin embargo, en las tierras donde el clima tropical es predominante, como Petén, Izabal y Alta Verapaz, las temperaturas siguen siendo cálidas y húmedas durante todo el año, por lo que su máxima puede rondar los 30 °C incluso en los meses más lluviosos. Para combatir estos fenómenos hay dos acercamientos, el diseño activo y el diseño pasivo.

El diseño activo se basa en la utilización de sistemas mecánicos, como el aire acondicionado y sistemas de ventilación y filtración. Estos sistemas contribuyen significativamente al calentamiento global y al agotamiento de la capa de ozono debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y de refrigerantes químicos. Adicionalmente, los sistemas de aire acondicionado consumen una gran cantidad de energía, lo que contribuye a la demanda de combustibles fósiles, aumentando nuevamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Otro factor para tomar en cuenta es el costo elevado de estos sistemas, se debe considerar la inversión inicial y el costo operativo de los mismos. Finalmente, es importante mencionar que los sistemas de aire acondicionado pueden tener efectos negativos para la salud humana, como sequedad en las vías respiratorias, irritación de los ojos y piel y un aumento en el riesgo de infecciones respiratorias.

Mientras que el diseño pasivo se centra en aprovechar los elementos naturales del entorno, como la ventilación, la sombra y la luz solar para regular la temperatura interior de un edificio sin utilizar sistemas mecánicos. Para llevar a cabo un diseño pasivo que regule la temperatura de una edificación hay que diseñar utilizando la orientación adecuada, elementos de protección solar, sistemas de ventilación cruzada, cerramientos con aislamiento e inercia térmicos, diseñar espacios abiertos, entre otros.

Bajo la premisa de mejorar la sostenibilidad de los edificios, se busca implementar el diseño pasivo para mejorar el confort. Puesto que la reducción de sistemas mecánicos se traduce en un menor consumo de energía eléctrica resultando en una menor cantidad de dióxido de carbono liberada al ambiente.

III. IMPORTANCIA

Este trabajo de graduación en modalidad de tesis sobra relevancia en el contexto actual de crisis climática, donde el sector de la edificación representa un porcentaje representativo del consumo energético mundial y, por ende, de las emisiones de gases de efecto invernadero. Especialmente, en zonas cálidas como Guatemala, el uso intensivo de sistemas de climatización artificial incrementa de forma considerable la demanda eléctrica, generando impactos económicos y ambientales negativos.

La implementación de estrategias pasivas de diseño, como la fachada ventilada, permite mejorar el comportamiento térmico del edificio sin necesidad de aumentar el consumo energético. Este tipo de soluciones facilitan la regulación de temperatura interior, reduciendo la carga térmica sobre el sistema de climatización, contribuyendo de forma directa a una disminución en el consumo eléctrico.

Como consecuencia, se genera una reducción en la huella de carbono asociada a la operación del edificio. Esto resulta fundamental en la transición hacia edificaciones más sostenibles. Además, el uso de soluciones pasivas es replicable, de bajo mantenimiento y con beneficios a largo plazo.

Este trabajo aporta evidencia cuantificable sobre la eficacia de las fachadas ventiladas en un caso real en la zona 15 de la Ciudad de Guatemala, la cual puede servir como base para futuros proyectos arquitectónicos y remodelaciones de edificaciones existentes.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar el impacto de la implementación de los sistemas de fachadas ventiladas en términos de reducción de la carga térmica y aumento en la eficiencia energética para un edificio con fachada de mampostería ubicado en la Ciudad de Guatemala.

B. Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento térmico del cerramiento de mampostería de un edificio en Ciudad de Guatemala.
- Generar una propuesta de fachada ventilada para reemplazar la fachada de mampostería del edificio.
- Validar a través de software especializado la mejora en la temperatura interior del edificio como resultado de la transferencia térmica de la fachada ventilada del edificio.
- Calcular la reducción de la huella de carbono generada por el consumo energético de los equipos de climatización del edificio.

V. MARCO TEÓRICO

A. Fachada ventilada

1. Tipos de fachadas

El término fachada se define como el paramento exterior de un edificio o vivienda. La fachada es uno de los elementos más importantes de la edificación, puesto que actúa como una barrera frente a los factores climatológicos externos como la lluvia, la nieve y el sol.

Existen diferentes tipos de fachadas (Marquez, 2023):

- a. **Fachada ligera.** Este tipo de fachada se adhiere a la estructura resistente del edificio, sin formar parte de esta. Entre este grupo de fachada existen dos grupos principales: el muro cortina y la fachada panel. El primer tipo, es un sistema de revestimiento en el que principalmente se utiliza vidrio como material. Este material permite que la luz natural penetre al edificio, sin embargo, incrementa el calor solar dentro del mismo. Por otro lado, el sistema de fachada panel utiliza paneles prefabricados de distintos materiales como aluminio, acero, composite o cerámica.
- b. **Fachada pesada.** El tipo de fachada pesada suele estar conformada por elementos constructivos de un peso razonable. Según las necesidades del edificio, pueden ser portantes o autoportantes.
- c. **Fachada tradicional.** Estas fachadas emplean materiales de construcción tradicionales, como el ladrillo, la piedra, el cerámico o la madera. Se caracterizan por tener una menor complejidad en cuanto a su construcción. Estas no disponen de cámara de aire, lo que implica un menor ahorro energético.
- d. **Fachada prefabricada.** Las fachadas prefabricadas son aquellas cuyo cerramiento está formado únicamente por módulos prefabricados que se unen o ensamblan en obra. Estos componentes se fabrican de forma industrializada. Emplear este sistema de fachada puede significar una rapidez y facilidad al momento de la instalación, al igual que un menor coste con respecto a otros sistemas de fachada.
- e. **Fachada ventilada.** Este sistema está compuesto por un muro de soporte, una capa aislante y un revestimiento fijado al edificio mediante una estructura secundaria. Este tipo de fachada suele representar un mayor coste y complejidad al momento de instalar. Sin embargo, gracias a su diseño se produce un efecto chimenea en su cámara de aire lo que provoca que el aire caliente suba y salga por la corona de la fachada. En época de verano esto evita el sobrecalentamiento en el interior, mientras que en época de invierno resguardan el calor en el interior. Esto resulta en una mejora en la eficiencia energética del edificio.

2. Tipos de envoltente de un edificio

La envoltente es la capa que separa el interior y el exterior de un edificio. Su función es la de una barrera física y climática que protege al edificio de los elementos. Aparte de su

función de protección, juega un papel crucial en la eficiencia energética y en la regulación del confort térmico y acústico. Las envolventes se pueden clasificar según su comportamiento térmico (Hormuk, 2023):

- a. Opacas.** Son aquellas con superficies totalmente opacas con un comportamiento térmico bueno, como los muros, suelos y particiones.
- b. Semitransparentes.** Aquellas destinados a dar visibilidad del interior al exterior del edificio. Tienen el peor comportamiento térmico, como lo son las ventanas, puertas y lucernarios.

Adicionalmente según Aelca (2019), las envolventes pueden dividirse en horizontales y verticales. Las primeras comprenden cubiertas y suelos. Las cubiertas son cerramientos superiores en contacto con el aire y presentan una inclinación menor al 60 %. Mientras que los suelos son cerramientos inferiores ligeramente inclinados que se encuentran en contacto con el aire, el terreno o con un espacio no habitable. Por otro lado, las envolventes verticales se dividen en fachadas y en huecos. Las fachadas son cerramientos exteriores que están en contacto con el aire y cuya inclinación respecto de la horizontal es mayor a los 60 %, pueden clasificarse en fachada norte, sur, este, oeste, suroeste y noroeste. Por otro lado, los huecos, puertas y ventanas son complementos que forman parte de la fachada y que comunican el interior con el exterior del edificio.

3. Definición fachada ventilada

La fachada ventilada es un sistema de revestimiento con una cámara ventilada entre una capa de revestimiento y el muro interior, reduciendo los puentes térmicos y problemas de condensación. Gracias a sus características térmicas, las fachadas ventiladas son una alternativa sostenible de cerramiento para las edificaciones, puesto que reducen el consumo energético al mejorar el confort térmico sin la utilización de sistemas de aire acondicionado. A partir de esta premisa, es posible generar distintas propuestas de fachadas ventiladas, utilizando diferentes materiales y sistemas de anclaje. Según los materiales utilizados, variará la capacidad térmica de la propuesta y la temperatura interior del edificio, favoreciendo el ahorro energético.

4. Comportamiento de la fachada ventilada

Según Arquitecturar (2024), la fachada ventilada está compuesta por cuatro capas principales: el revestimiento exterior, una cámara de aire ventilada, un aislamiento térmico en el exterior de la fachada existente y una hoja interior. El revestimiento exterior es soportado mediante una estructura secundaria, lo que permite crear el espacio de la cámara de aire.

El revestimiento exterior de las fachadas ventiladas funciona como una barrera ante la radiación solar, reflejando parte de esta. La cantidad de la radiación solar reflejada dependerá del material utilizado para el revestimiento de la fachada. Posteriormente, la radiación solar que no ha sido reflejada se transmite a la cámara de aire entre el

revestimiento exterior y el aislamiento térmico. El movimiento del aire en la cámara favorece que se expulse parte de este calor, gracias a un efecto chimenea, en el que una corriente de aire caliente asciende y se expulsa de forma constante por la parte alta de la fachada o través de las piezas del revestimiento exterior. Finalmente, el aislamiento térmico limita el paso del calor restante hacia el interior de los edificios. Este proceso se traduce en un mayor confort interior y una disminución del consumo energético en climatización.

En el caso del invierno, la fachada ventilada se comporta de manera inversa, reteniendo el calor en el interior de la vivienda. El aislamiento térmico reduce la pérdida de calor generado en el interior de la edificación hacia el exterior, reduciendo el consumo en calefacción. En el caso de condiciones de lluvia, el revestimiento exterior de la fachada protege el aislamiento térmico y la hoja interior de la fachada, evitando que la mayor parte del agua penetre la fachada. Adicionalmente, la circulación de aire en la cámara evita que se produzcan condensaciones.

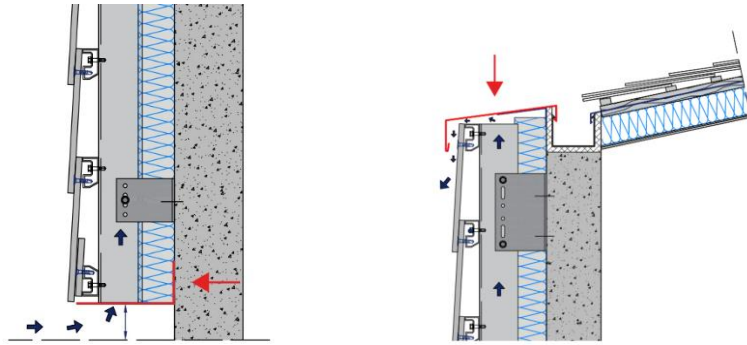
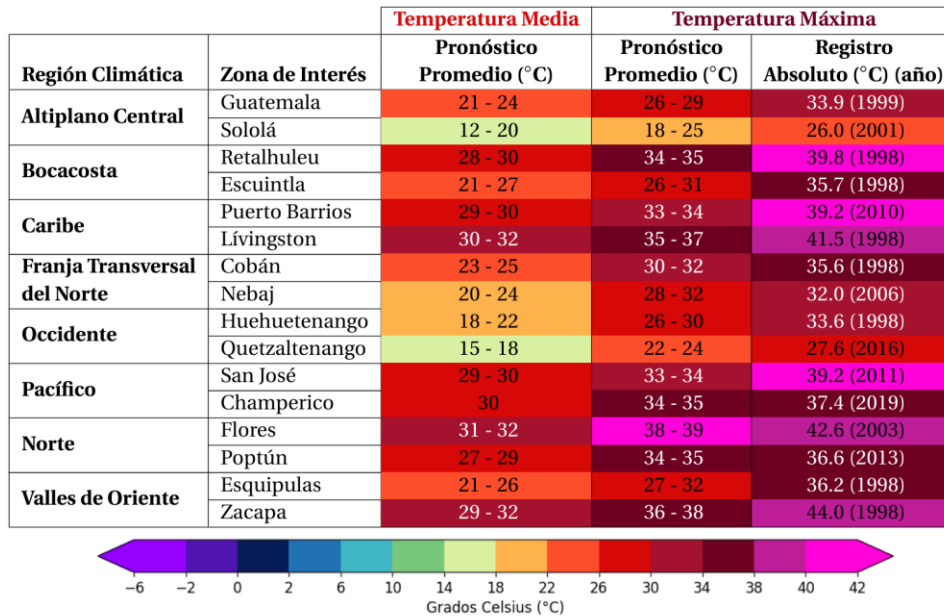


Figura 1. Fenómeno de convección natural (efecto chimenea) en detalle típico de fachada ventilada (Marquez, 2024)

5. Perspectiva climática de Ciudad de Guatemala

La perspectiva climática es una estimación sobre el posible comportamiento de la lluvia y temperatura de un área utilizando herramientas estadísticas, al realizar una comparación con años análogos y análisis de los resultados de modelos globales y regionales en cuanto a las temperaturas de la superficie del mar, los patrones del viento, la presión atmosférica y la precipitación (SICA, s. f.).

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH) brinda una perspectiva climática a partir de la cual se obtiene un pronóstico promedio y un registro absoluto de las temperaturas mínimas y máximas de los departamentos de Guatemala.



Fuente: INSIVUMEH, 2024

Cuadro 1. Pronóstico de temperaturas mínima promedio y máxima promedio para los meses de mayo 2024 para Guatemala (INSIVUMEH, s. f.)

6. Principios básicos del cálculo del comportamiento térmico

a. Transmitancia térmica.

Es una medida de la cantidad de calor que se transfiere a través de un material o estructura en condiciones específicas. Se obtiene al calcular el inverso de la resistencia térmica total de los componentes constructivos. La transmitancia térmica se expresa en términos de vatios dividido metro cuadrado por kelvin.

b. Resistencia térmica.

La resistencia térmica de un componente constituido por capas térmicamente homogéneas se calcula sumando la resistencia individual de cada capa. Esta se obtiene al dividir el espesor de la capa entre la conductividad térmica de diseño del material que compone la capa. La resistencia térmica se expresa en términos de metro cuadrado por kelvin dividido watt (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana (2020).

c. Conductividad térmica.

Esta es la capacidad que tiene un material de conducción de calor o frío. La conductividad térmica de diseño de los materiales que componen cada capa se puede

calcular a partir de los valores térmicos declarados por los fabricantes. Se expresa en términos de vatios dividido metro por kelvin (Cosentino España, 2023).

d. Puentes térmicos.

Puntos en los que, por cambio de geometría en la envolvente o materiales, se transmite con mayor facilidad la temperatura de un ambiente a un ambiente aledaño. Esto genera un problema de aislamiento al transmitir con mayor facilidad el frío y el calor, generando pérdidas de energía (HORMUK, 2022).

e. Irradiación solar

Esta se define como la potencia total procedente del sol que incide por unidad de superficie y por unidad de tiempo. La irradiación solar se expresa en términos de vatios dividido metro cuadrado. Esta característica hace referencia a la energía que incide en una superficie durante un período de tiempo, generalmente una hora (EDP Energía España, 2023).

7. Casos de estudio de fachadas ventiladas

El análisis de casos de estudio y proyectos realizados en diferentes contextos enriquecen la investigación al proporcionar ejemplos concretos y evidencia empírica para respaldar los hallazgos. En este caso, se analizaron proyectos en los que se haya empleado la fachada ventilada como alternativa para mejorar la sostenibilidad de edificios.

a. Complejo Parroquial San Manuel González, en San Sebastián de los Reyes, Madrid.



Figura 2. Complejo Parroquial San Manuel González, Madrid, España (García, 2024)

Ubicado en San Sebastián de los Reyes en Madrid, el complejo Parroquial San Manuel González genera una volumetría compuesta de un acabado exterior de terracota. Esta obra por los arquitectos Ramón Fernández-Alonso, cuenta con una fachada ventilada de terracota, la cual le provee características de eficiencia energética y salubridad. Cabe recalcar que las fachadas de terracota contribuyen con la inercia térmica del edificio. Esta fachada ventilada de cerámicos se alcanzó con correas de perfiles en U, las cuales van apoyadas en las vigas metálicas. Sobre estas, se sujeta toda la perfilería especial de la envolvente del edificio (García, 2024).

b. Residential Building in Pressbaum (Sunlight House).



Figura 3. Sunlight House, Pressbaum (DETAIL Green, 2011)



Figura 4. Detalle fachada Sunlight House, Pressbaum (DETAIL Green, 2011)

La Sunlight House obra de Juri Troy Arquitectos, está ubicada en Pressbaum, Austria. Este proyecto fue condecorado en 2008, donde participaron varios despachos de arquitectura. La Sunlight House combina un alto estándar en energía con un clima de interior saludable optimizado por la luz natural. Mediante la aplicación de una fachada ventilada y ventanería cuidadosamente ubicada, este proyecto logra almacenar el calor del sol en un área fría del país, reduciendo el consumo energético proveniente de calentadores interiores (DETAILGreen, 2011).

c. Larixhaus, Moianes, Cataluña.



Figura 5. Larixhaus, Cataluña (García, 2024)

La Casa Pasiva Larixhaus, de los arquitectos María Molins, Oriol Martí y Nacho Martí, con su estructura de madera y aislamiento de paja, ha conseguido la certificación Passive House. Según los cálculos, el consumo en climatización no sobrepasa los 15 kwh/m²a (García, 2024).

B. Ciencia de los materiales

1. Tipos de materiales constructivos

Los materiales constructivos pueden dividirse según múltiples categorías. La primera es la de los órdenes constructivos. En esta los materiales se clasifican en tres categorías. La primera es la de los resistentes, donde se encuentran los materiales que soportan el peso de la construcción, como ladrillos, blocks, concreto y acero. La segunda categoría es la de los aglomerantes, estos son los materiales que se combinan con los resistentes para unirlos, como el cemento y el yeso. Finalmente, se encuentran los auxiliares, estos tienen la función de dar acabado a la construcción, como la pintura y la madera.

Posteriormente, los materiales pueden ser divididos según la siguiente clasificación (Keobra, s.f.):

- b. Pétreos.** Materiales derivados de piedras y rocas. Son porosos, duros y cambian su aspecto solo cuando se les somete a cambios bruscos de temperatura. Se utilizan en la fabricación de tabiques, recubrimientos, bloques, losetas, etcétera. La arena, arcilla, grava y mármol son algunos ejemplos de estos materiales.
- c. Cerámicas y vidrios.** Estos se derivan de cerámicos obtenidas a partir de la cocción del barro, mientras que el vidrio se obtiene de arena de sílice, álcali y óxidos metálicos. Son resistentes a altas temperaturas, frágiles y no cuentan con elasticidad. El ladrillo, la teja, el azulejo y vidrio son ejemplos de estos materiales.
- d. Metálicos.** Se derivan de minerales de metal y hay dos tipos, los ferros y los no ferrosos. Son materiales resistentes utilizados comúnmente en la construcción para

la fabricación de estribos, marcos de ventanas, puertas etcétera. Algunos ejemplos de estos materiales son el aluminio, acero y hierro.

- e. **Aglutinantes.** Son materiales derivados de pulverizantes. Tienen la capacidad de unir fragmentos de materiales, al mezclarlos con agua se endurecen. La resistencia de estos materiales varía dependiendo la mezcla en la que se incorporen. Cemento, yeso y barro son unos ejemplos de estos materiales.
- f. **Plásticos o sintéticos.** Estos materiales se derivan del petróleo, plásticos o polímeros. Son de alta durabilidad, resistentes y ligeros. Se utilizan en pintura, instalaciones hidrosanitarias, impermeabilizantes, etcétera.

2. Propiedades de los materiales constructivos

Es necesario conocer las características de los materiales constructivos para poder utilizarlos y combinarlos adecuadamente en el ámbito de la construcción. Estas propiedades pueden variar según el fabricante, pero deben cumplir con unos requisitos mínimos. A continuación, se describen algunas propiedades de los materiales importantes en la construcción (Ferrovial, 2021):

- a. **Densidad.** Esta es la relación entre la masa y el volumen.
- b. **Transmitancia térmica.** Es una medida que indica la cantidad de calor que puede transferirse a través de un material.
- c. **Higroscopicidad.** Es la capacidad de un material de absorber o ceder la humedad del ambiente que lo rodea.
- d. **Coefficiente de dilatación.** Mide el cambio relativo de volumen de un cuerpo a medida que se temperatura se eleva.
- e. **Conductividad térmica.** Esta propiedad en los materiales es la habilidad de transferir o conducir calor a través de ellos.
- f. **Resistencia mecánica:** Es la capacidad de los materiales para soportar esfuerzos provocados por las fuerzas que les puedan ser aplicadas.
- g. **Elasticidad.** La capacidad de los materiales de regresar a su forma original al retirarles el esfuerzo aplicado.
- h. **Plasticidad.** Es la deformación permanente de un material debido a una carga o esfuerzo.
- i. **Rigidez.** Capacidad que tienen los materiales de resistir cargas o esfuerzos sin deformarse.

3. Transmitancia térmica de los materiales

La transmitancia térmica es la propiedad de los materiales que mide la cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo y superficie entre un material que separa dos espacios con una diferencia de temperatura mayor a un grado centígrado. Para calcular la transmitancia térmica es necesario calcular el valor U, este describe la pérdida de calor por un área en relación con la diferencia de temperaturas existente entre el interior y el exterior. Dicho valor se obtiene calculando el recíproco de la resultante de las resistencias de cada capa

analizada. Para poder obtener la resistencia térmica individual de cada material, es necesario dividir el espesor de la capa entre la conductividad térmica del material.

En el caso de trabajar con materiales aislantes para la industria de la construcción, estos en algunos casos cuentan con una cámara de aire entre sus tabiques. En este caso, habría que contabilizar la cámara de aire como una capa más de material a la cual realizarle los cálculos. En el caso de una cámara de aire ligeramente ventilada, ya sea de forma horizontal o vertical, se debe dividir entre dos el valor total de dicha capa (Climalit España, 2020).

4. Tecnologías de construcción innovadoras

El ámbito de la construcción está experimentando una transformación sin precedentes, el desarrollo tecnológico está permitiendo una innovación que se espera que cambie la manera tradicional en la que se visualiza la construcción (MAPFRE Global Risks, 2021).

Con el objetivo de mejorar la eficiencia, reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida de los residentes, se desempeñan a diario nuevas tecnologías en las viviendas sostenibles. Debido a su potencial para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero y mitigar el impacto ambiental de la vivienda, las políticas de eficiencia energética han cobrado un impulso significativo a nivel global. Su objetivo es el de mejorar el rendimiento energético de los edificios, disminuyendo así el consumo de energía y gastos en los servicios públicos para los propietarios (Energy5 YourWay, 2023).

A continuación, se destacan algunos de los materiales considerados como innovadores en el ámbito de la construcción sostenible:

- a. **Madera.** Es uno de los materiales más ecológicos y mediante la adición de propiedades de resistencia y durabilidad con la aplicación de tecnologías sin perder los estándares ecológicos, se puede considerar como un material innovador. A nivel mundial, es un método constructivo conocido. Mediante vigas de madera apiladas verticalmente y la tecnología CLT (capas multidireccionales cruzadas de paneles de madera pegadas bajo presión) es posible llevar a cabo construcciones de gran magnitud usando la madera como el material principal.
- b. **Hormigón.** El hormigón es el material más utilizado en la construcción, sin embargo, su proceso de fabricación tiene un fuerte impacto en el medio ambiente. Una empresa canadiense ha descubierto cómo utilizar las emisiones dañinas de dióxido de carbono de las grandes fábricas de hormigón, mediante la absorción del CO₂. Otra de las recientes innovaciones en este material es el hormigón autorreparable, al añadir a la fórmula del hormigón un mineral especial de la concha nácar, el hormigón se vuelve más liviano y su elasticidad aumenta significativamente, haciéndolo ideal para viviendas en zonas sísmicas (Rodríguez, 2023).

- c. **Vidrio.** El uso del vidrio en la construcción a sido más recurrente en los últimos años, esto se debe a que tiene múltiples aplicaciones y propiedades, haciendo de este un material versátil. Utilizar este material permite la entrada de luz al interior de los edificios, aportando un diseño elegante y atractivo. Su transparencia puede regularse a través de distintos grados de translucidez y opacidad. Entre los tipos de vidrio más utilizados resalta el vidrio templado el cual cuenta con una alta resistencia mecánica, el vidrio laminado el cual se compone de distintas láminas, el insulado el cual mejora la climatización, etcétera (Doalco, 2022).
- d. **Fibrocemento.** De acuerdo con Gestión del Amianto (2023), el fibrocemento es un material compuesto por una mezcla de aglomerante inorgánico hidráulico (cemento) y aglomerante de silicato de calcio reforzado mediante fibras orgánicas, minerales o sintéticas. Este material es utilizado en la construcción de elementos de edificios, como techos, cubiertas y revestimiento de fachadas. Esto se debe a su alta durabilidad y resistencia, adicionalmente las placas de fibrocemento son un material ideal para el aislamiento acústico.
- e. **Cerámico.** De acuerdo con Terrapilar (2018), en la construcción, este material se caracteriza por su resistencia, durabilidad, versatilidad y bajo mantenimiento. Caracterizada por su versatilidad, el cerámico es un material utilizado frecuentemente como recubrimiento en obra, tanto para el interior como el exterior.

C. Sostenibilidad

La construcción sostenible es un proceso que busca restaurar y mantener una armonía entre el espacio construido y el ambiente natural. En esta se busca minimizar el impacto que los edificios tienen sobre el medio ambiente durante todo su ciclo de vida.

“Las edificaciones sostenibles se consideran construcciones civiles diseñadas y construidas de manera segura, que incorporan componentes y materiales con bajos niveles de energía, materiales reciclables y renovables, hacen uso eficiente de la energía y el recurso hídrico, utilizan diseños de bioarquitectura y técnicas de construcción más eficientes, son flexibles y fácilmente adaptables ante los efectos del cambio climático, tienen una vida útil mayor a la del promedio de edificaciones, se adaptan fácilmente a un rango amplio de necesidades sociales presentes y futuras, y promueven hábitos sostenibles entre sus usuarios.” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible República de Colombia, 2022).

1. Definición vivienda sostenible

Las viviendas sostenibles buscan minimizar su impacto sobre el medio ambiente. Para esto deben ser diseñadas y construidas de una manera segura, en la que se incorporen componentes y materiales con bajos niveles de energía. Incluyendo materiales reciclables y renovables, acompañados del uso eficiente de la energía y recurso hídrico, utilizando diseños de bioarquitectura y técnicas constructivas eficientes.

2. Importancia vivienda sostenible

Según datos de las Naciones Unidas, el sector de la construcción es responsable de más del 34 % de la demanda energética y 37 % de las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial. Durante el año 2021 las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la energía en las operaciones del sector alcanzaron un equivalente a diez gigatoneladas de dióxido de carbono. Inger Andersen (2022), la directora ejecutiva del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente declaró “La solución podría estar en que los gobiernos destinen ayudas a las inversiones en edificios de baja y nula emisión de carbono a través de incentivos de carácter financiero y no financiero” (Noticias ONU, 2022).

3. Impacto ambiental de la construcción

De acuerdo con el U.S. Green Building Council (USGBC), el sector de la construcción contribuye el 23% de la contaminación atmosférica, el 40% de la contaminación al agua potable y el 50% de la contaminación de residuos en vertederos. Adicionalmente, la industria de la construcción representa el 40% del uso mundial de energía.

4. Reducción de la huella de carbono en la construcción

La huella de carbono de los edificios se puede definir como el total de gases de efecto invernadero que estos generan de manera directa o indirecta. Hoy en día, mediante la tecnología es posible calcular la huella de carbono que los edificios generan durante su ciclo de vida. Para reducir esta huella hay 5 alternativas principales:

a. Rehabilitar edificios en lugar de construcciones de obra nueva

Mediante la rehabilitación sostenible de edificios es posible ahorrar entre el 50% y 75% de las emisiones de carbono, al mantener los cimientos y la estructura. Puesto que un gran porcentaje del carbono incorporado se encuentra en estos elementos, por la energía consumida en su fabricación y las reacciones químicas implicadas.

b. Utilizar materiales menos contaminantes

Es en las fases de extracción de materia prima, la producción del material y el transporte de este que se consumen grandes cantidades de energía y carbono. Es por esto por lo que la elección de los materiales en un edificio puede tener un efecto sustancial en cuanto al efecto que el mismo tendrá en el medio ambiente.

c. Optar por materiales locales

No solo la extracción y producción de los materiales tiene un fuerte impacto en la huella de carbono, factores como la transportación de estos pueden tener un impacto relevante. Al trabajar con materiales locales o con vehículo que consuman menores cantidades de combustible es posible tener una reducción notable en los gases de efecto invernadero.

d. Gestionar los residuos

El proceso de la gestión de los materiales sobrantes durante los procesos de demolición es importante poder separar los residuos para su posterior reutilización o reciclaje. Es por esto por lo que desde un principio es necesario optar por materiales reciclables, reduciendo la cantidad de materiales que se van a vertederos. Del mismo modo, es importante que en los proyectos se lleven a cabo estimaciones precisas de materiales para evitar residuos procedentes de sobrante, reduciendo también costos (Econova, 2023).

5. Alternativas amigables con el medio ambiente en la construcción

De acuerdo con Gaya (s.f.), el concepto de la construcción sustentable tuvo apogeo en la década de los 70s, a medida que los problemas ambientales han ido en aumento, hoy en día los edificios a nivel mundial se han vuelto más sofisticados en términos de eficiencia energética, uso de materiales y comodidad del usuario. En Latinoamérica, países como México y Brasil se han destacado por implementar iniciativas sustentables, en el año 2019 ambos lograron posicionarse en el *top 10* de países con el mayor número de certificaciones LEED a nivel global. A continuación, se exponen 4 tendencias constructivas que buscan la construcción sustentable:

a. Edificios *Net Zero Energy*

Estos edificios nacieron bajo el concepto de que los propios edificios deben producir la energía que consumen, evitando la generación de emisiones de carbono. Combinando diseños y tecnología de punta busca producir su energía a través de sistemas de energías renovables. Otra característica importante que distingue a este tipo de edificios es que los recursos y variables del diseño arquitectónico son utilizados a favor para minimizar el consumo de energía eléctrica.

b. Techos verdes

Este concepto hace referencia a instalaciones verticales u horizontales que están parcial o totalmente cubiertas de vegetación y que, además, integran tecnologías que cumplen con la función ecológica. Estos son sistemas de filtración, captación de agua pluvial, ahorradores de consumo energético, etcétera.

c. Construcción modular

La construcción modular es una solución que consta de un sistema de creación y ensamble de módulos estandarizados habitables. Estos a través de una reducción en tiempos de ejecución de obra reducen el impacto ambiental de esta.

d. Fachadas ventiladas

Las fachadas ventiladas son un tipo de revestimiento para edificios, caracterizado por tener un espacio de aire entre la pared exterior del edificio y el revestimiento de este. Esto permite circulación de aire entre la capa exterior y la pared del edificio, lo que representa beneficios de aislamiento térmico, control de humedad y eficiencia energética.

Las fachadas ventiladas se componen de tres partes: el aislamiento, la cámara de aire ventilada y la piel exterior. En las fachadas de los edificios expuestas al sol, la piel exterior hace sombra a la hoja principal del edificio. Esto evita que se caliente, ya que el calor que incide en la piel exterior se disipa a través de la cámara ventilada. La única desventaja de este sistema es el incremento en el costo, sin embargo, puede reducir costo de energía por unidades de aire acondicionado.

(Moreras, 2023).

6. Climatización activa y pasiva

La climatización es el proceso mediante el que se hace que una estancia interior tenga las condiciones de calidad del aire, humedad relativa y temperatura adecuada para el bienestar de las personas. La climatización engloba tres procesos principales: calefacción, ventilación y aire acondicionado. El proceso de calefacción se refiere a calentar un espacio o un edificio con fines de comodidad o control ambiental. La ventilación hace referencia al proceso de renovación del aire de un espacio cerrado, con el objetivo de mejorar la calidad del aire y mantener un ambiente seguro y saludable. Finalmente, el aire acondicionado es un sistema utilizado para controlar y regular la temperatura, humedad y calidad del aire en un espacio cerrado.

(COPROVEN, 2023).

a. Climatización activa

Los sistemas de climatización activa consisten en un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos que se instalan en un edificio para proporcionar un control ambiental en los espacios interiores. La desventaja principal de este sistema de climatización es que los sistemas empleados para mejorar el confort térmico de los espacios interiores consumen energía eléctrica o combustible para funcionar. Dicho consumo tiene una repercusión negativa en cuanto a la sostenibilidad.

b. Climatización pasiva

Las técnicas de climatización pasiva se basan en un enfoque de diseño y construcción que utiliza tecnologías con muy poco o ningún consumo de energía para generar

condiciones de temperatura y humedad agradables en los espacios interiores de una edificación. Estas técnicas pasivas aprovechan los elementos naturales y pasivos del entorno para regular y mantener las condiciones térmicas de un espacio dependiendo lo menos posible de sistemas mecánicos activos. Mediante la utilización de tecnologías y materiales innovadores con propiedades térmicas avanzadas para mejorar la eficiencia energética. (Lustig, 2023).

7. Certificaciones verdes

A nivel internacional existen múltiples certificaciones verdes, las cuales pueden ser tomadas como referencia para proyectos nacionales. Entre las certificaciones más utilizadas a nivel mundial destacan las siguientes:

a. **BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*)**

Este método de evaluación y certificación es de los más longevos, la entidad británica Building Research Establishment (BRE) publicó la primera versión del certificado en el año 1990, desde entonces ha sido inspiración para certificados más recientes. El certificado evalúa impactos en 10 categorías (Gestión, Salud y Bienestar, Energía, Transporte, Agua, Materiales, Residuos, Uso ecológico del suelo, Contaminación, Innovación). Del mismo modo que la certificación CASA en Guatemala, BREEAM otorga una puntuación final que sirve de referencia para un proyecto más sostenible tanto en la fase de diseño como en las fases de ejecución y mantenimiento (BREEAM ES, 2023).

b. **EDGE (*Excellence in Design for Greater Efficiencies*)**

Este es un sistema de certificación de construcción sostenible, el cual le permite a los desarrolladores de proyectos identificar de forma rápida los costos de incorporar opciones de ahorro en energía, agua y materiales a sus edificios. A través de un auditor son verificadas e integradas en el diseño de un proyecto. El estándar global de esta certificación requiere una reducción mínima del 20% en el uso de energía, agua y carbono incorporado en los materiales, en comparación con el estándar local de los edificios. Para llevar a cabo el proceso de la certificación es necesario crear el proyecto en el software de la compañía, registrarlo, seleccionar un auditor, presentar la solicitud y esperar aprobación. Posteriormente, luego de haber obtenido la certificación EDGE, es posible optar por la certificación EDGE Advanced, lo que implicaría que el proyecto es neutro en cuanto a las emisiones de carbono mediante energías renovables in situ o compensaciones de carbono. (EDGE, s. f.).

c. **LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*)**

El Sistema de calificación de edificios Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED) es el más utilizado en el mundo. Dicha certificación proporciona un marco para edificios ecológicos saludables, altamente eficientes y ahorradores en cuanto a costos. Esta certificación es un símbolo mundialmente reconocido de sostenibilidad respaldado por una

industria de organizaciones. LEED fue desarrollada por *el United States Green Building Council (USGBC)*, quienes invierten más de US\$30 millones anualmente para mantener, operar y mejorar la certificación. Actualmente la versión No.5 es la vigente (USGBC, s. f.).

De acuerdo con Certicalia (s. f.), la certificación LEED evalúa los edificios según 6 criterios:

- **Sostenibilidad.** Analizada en cuanto a los materiales y a los recursos de construcción.
- **Eficiencia y aprovechamiento del agua.** Tanto durante el proceso constructivo como el periodo de uso del edificio.
- **Eficiencia energética.** Estudiado desde el inicio de la construcción, midiendo el impacto atmosférico.
- **Materiales y recursos.** Ciencia de los materiales que verifique su impacto en el medio ambiente.
- **Calidad del ambiente interior.** Buscando la óptima habitabilidad y confort de este, sin tener que recurrir a más energía de la necesaria para calentar o enfriarlo.
- **Innovación en el proceso de diseño.** Se presenta la necesidad de darle protagonismo a los recursos ecoeficientes.
- **Eficiencia energética.** El criterio con más valoración en la certificación, buscando el ahorro.

Los beneficios para un edificio bajo la certificación LEED son los siguientes:

- Menores costos de operación e incremento en el valor del inmueble.
- Reducción de los residuos enviados a vertederos, generando un ahorro en transportes.
- Mejor conservación de energía y agua.
- Edificios saludables y seguros para sus ocupantes.
- Reducción en la emisión a la atmósfera de gases nocivos.
- Propietarios pueden beneficiarse de desgravaciones fiscales, en algunos municipios mejoran los permisos de zonificación y se obtienen otro tipo de incentivos.

D. Software de interés

1. Cypetherm He Plus 2019, CYPE

Esta herramienta informática de la empresa CYPE permite el cálculo de instalaciones térmicas en edificaciones. Su diseño está dirigido principalmente para calcular aspectos relacionados con la eficiencia energética. El software se puede utilizar para calcular una variedad de resultados relacionados con el comportamiento térmico y la eficiencia energética, como lo son la demanda de refrigeración, un análisis del confort térmico o una optimización de la envolvente del edificio. Además de análisis estáticos, esta herramienta puede realizar simulaciones dinámicas que tomen en cuenta el comportamiento térmico del

edificio a lo largo del tiempo. El programa ofrece una herramienta de gestión de aristas para los edificios procedentes de modelos BIM, la cual detecta los puentes térmicos lineales y propone valores de transmitancia térmica lineal para cada uno de ellos (CYPE, 2023).

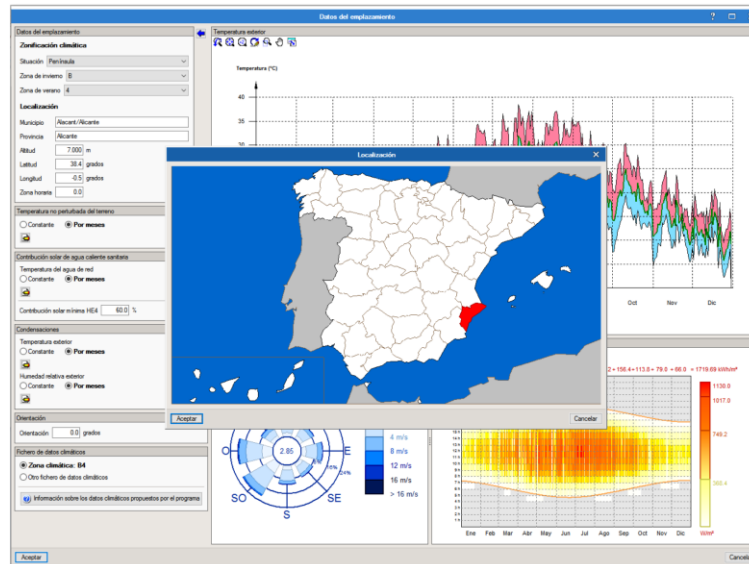


Figura 6. Ingreso de datos del emplazamiento en Cypetherm He Plus (CYPE, 2023)

De acuerdo con De Belza (2025), Cypetherm He Plus es una herramienta reconocida por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y por el Ministerio de Fomento en España, para obtener la certificación de eficiencia energética de cualquier tipo de edificio, tanto en su fase de proyecto como una vez terminado. La metodología de cálculo utilizada por el programa cumple con los requisitos impuestos en el CTE DB HE y en el documento reconocido “Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios”. El software se integra en el flujo de trabajo Open BIM a través del estándar IFC. Cypetherm He Plus tiene implementadas las siguientes normativas:

Materiales constructivos

- a. UNE-EN ISO 10456. Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados de diseño.
- b. Catálogo de Elementos Constructivos, CEC (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja).
- c. Resistencia y coeficiente de transmisión térmica de elementos constructivos
- d. UNE-EN ISO 6946. Elementos y componentes para la edificación. Resistencia y transmitancia térmica. Método de cálculo.
- e. UNE-EN ISO 13370. Prestaciones térmicas de edificios. Transmisión del calor por el terreno. Método de cálculo.

- f. UNE-EN ISO 10077-1. Características térmicas de ventanas, puertas y contraventanas. Cálculo del coeficiente de transmisión térmica. Método simplificado.

Puentes térmicos lineales

- a. UNE-EN ISO 14683. Puentes térmicos en la edificación. Transmitancia térmica lineal. Métodos simplificados y valores por defecto.
- b. UNE-EN ISO 10211. Puentes térmicos en la edificación. Flujos de calor y temperaturas superficiales. Cálculos detallados.
- c. DA- DB-HE/3. Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE (CTE). Atlas de puentes térmicos.

Rendimiento energético

- a. Código Técnico de la Edificación. Documento básico HE. Ahorro de energía:
 - Sección HE 1. Condiciones para el control de demanda energética.
 - Sección HE 0. Limitación del consumo energético.
 - Sección HE 4. Contribución mínima de energía renovable para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria.
- b. EN ISO 52000-1:2017. Eficiencia energética de los edificios. Evaluación global. Parte 1: Marco general y procedimientos.

Calificación energética

- a. Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios.
- b. Calificación de la eficiencia energética de los edificios.
- c. Informe de evaluación energética del edificio en formato electrónico (XML).

(De Belza, 2025).

2. IFC BUILDER 2019, CYPE

IFC Builder es una aplicación gratuita de CYPE diseñada para el mantenimiento de modelos en formato .ifc de edificios. Llevar a cabo diseños en esta plataforma permite que puedan ser importados por una gran variedad de aplicaciones de simulación acústica, energética, de instalaciones o estructural de la casa CYPE a través de BIMserverver.center. Se seleccionó este programa para llevar a cabo el modelo del Edificio A para posteriormente importarlo en Cypetherm He Plus. La interfaz de IFC Builder presenta un entorno de trabajo que permite realizar el modelado de los edificios de forma rápida y sencilla.

(De Belza, 2025).

VI. METODOLOGÍA

A. Obtención de datos

1. Selección del edificio

Como punto de partida, fue necesario seleccionar una edificación existente en la Ciudad de Guatemala, Guatemala. La misma debía tener una fachada tradicional de mampostería y actualmente alcanzar el confort térmico en su interior mediante un sistema de aire acondicionado.

El Edificio A, ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala Campus Central, está conformado por un sistema de fachada de mampostería. En los meses de calor en Guatemala, requiere el uso de un sistema de aire acondicionado para alcanzar el confort térmico en su interior. Es por esto que se seleccionó dicho edificio para este trabajo.

2. Datos del edificio

Datos del edificio	
Nombre	Edificio A Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central
Coordenadas UTM (grados, minutos, segundos)	Latitud: 14°36'16.80" Norte Longitud: 90°29'19.65" Oeste
Material de fachada	Mampostería recubierta con fachaleta de ladrillo
Material de cubierta	Losa de concreto fundido
Niveles	3
Área nivel 1 (m ²)	500.00
Área nivel 2 (m ²)	535.00
Área nivel 3 (m ²)	535.00
Área de construcción (m ²)	1,565.00
Uso destinado	Aulas, oficinas administrativas, baños y bodegas

Cuadro 2. Datos del edificio: Edificio A Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central

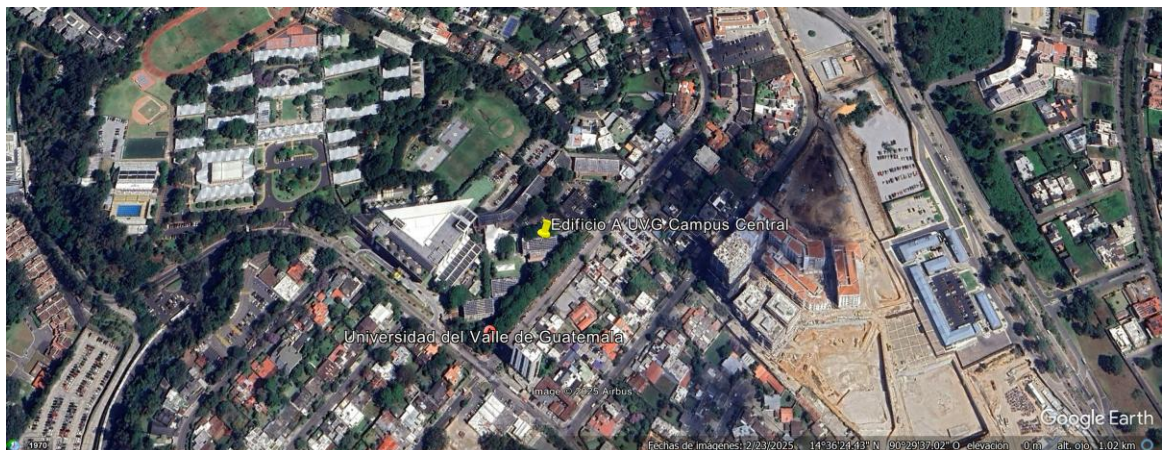


Figura 7. Vista general, ubicación del edificio



Figura 8. Fachada norte Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central



Figura 9. Fachada oeste Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central



Figura 10. Fachada sur Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central



Figura 11. Fachada este Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central



Figura 12. Voladizos sobre ventanas en fachada norte Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central

3. Planos del edificio

Los planos originales del Edificio A fueron realizados por R. y P. Córdón Arquitectura e Ing. Civil. Los mismos están firmados específicamente por P. Cardón y tienen fecha de mayo 1983.

UNIVERSIDAD DEL VALLE			A-3	
EDIFICIO DE:		AULAS		P. Cardón
R. y P. CORDON.		ARQUITECTURA e ING. CIVIL		
DISEÑO:	P. CORDON	ESCALA:		INDICADA
CALCULO:	P. CORDON	FECHA:		mayo 1983
DISEÑO:	L. GIL	PLANTA ACOTADA		
PLANTA - NIVEL 3 + 6.60		HOJA No. 3	DE 26	

Figura 13. Cajetín en planos Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. por R. y P. Córdón Arquitectura e Ing. Civil

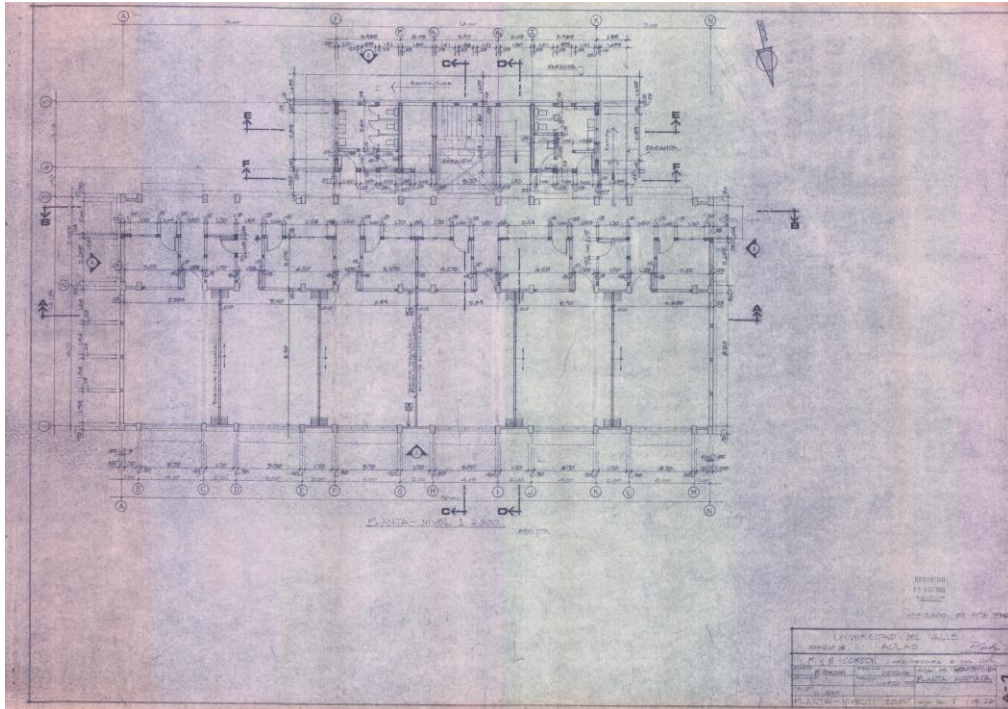


Figura 14. Plano de planta nivel 1 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Por R. y P. Córdón Arquitectura e Ing. Civil (1983)

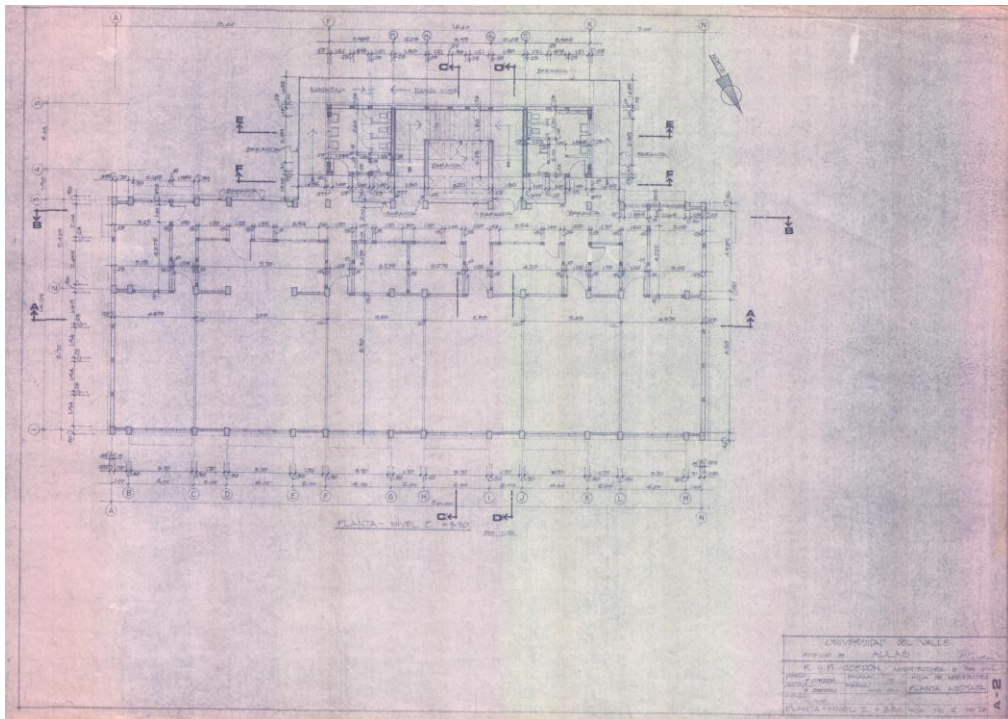


Figura 15. Plano de planta nivel 2 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala Campus Central. Por R. y P. Córdón Arquitectura e Ing. Civil (1983)

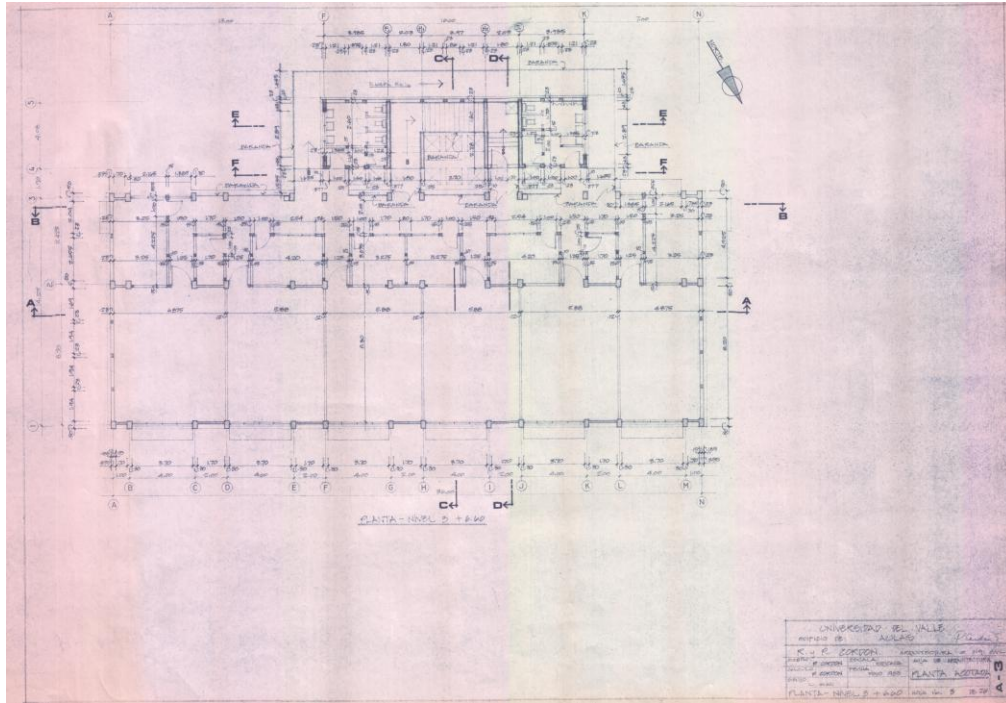


Figura 16. Plano de planta nivel 3 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Por R. y P. Córdón Arquitectura e Ing. Civil (1983)

B. Generación de documentación inicial

1. Generación de planos

A partir de los planos del Edificio A de R. y P. Córdón Arquitectura e Ing. Civil presentados en mayo de 1983, se generaron planos de las 3 plantas en CAD.

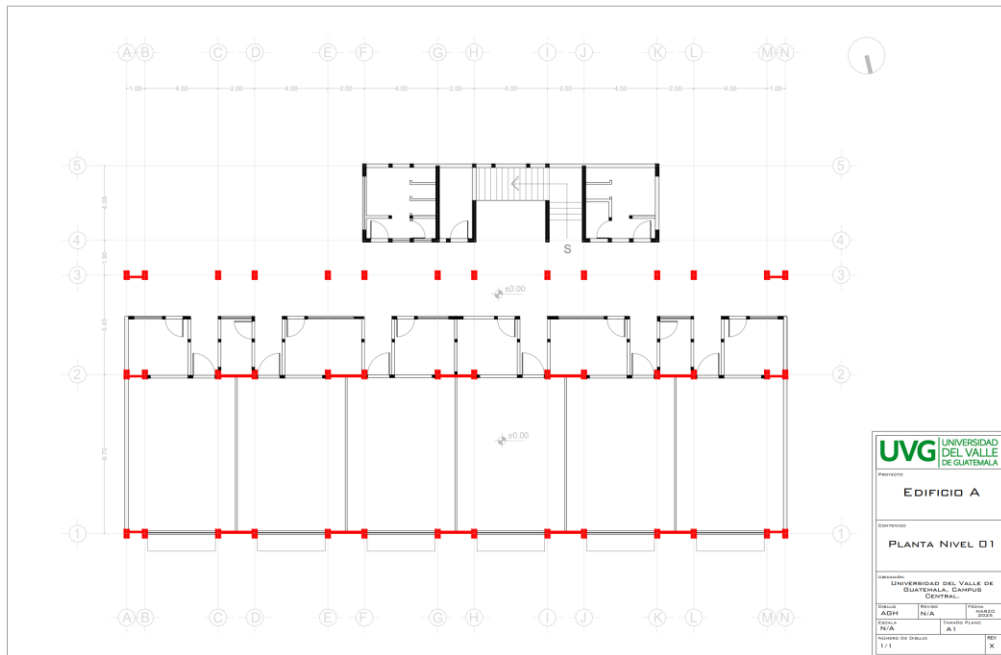


Figura 17. Plano de planta nivel 1 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Dibujo por Alejandro González Haeckel (2025)

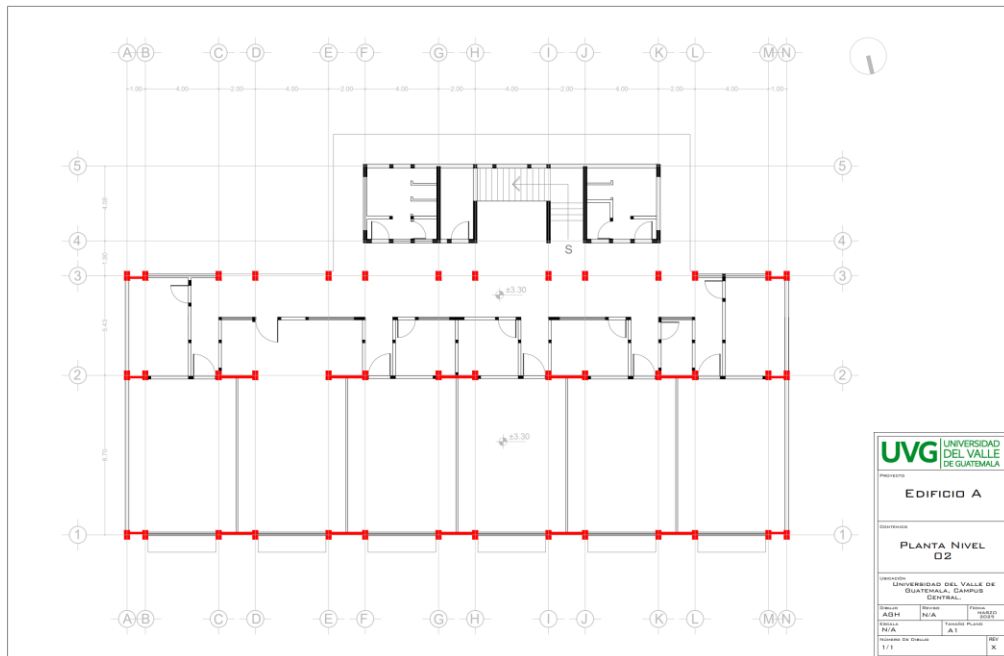


Figura 18. Plano de planta nivel 2 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Dibujo por Alejandro González Haeckel (2025)

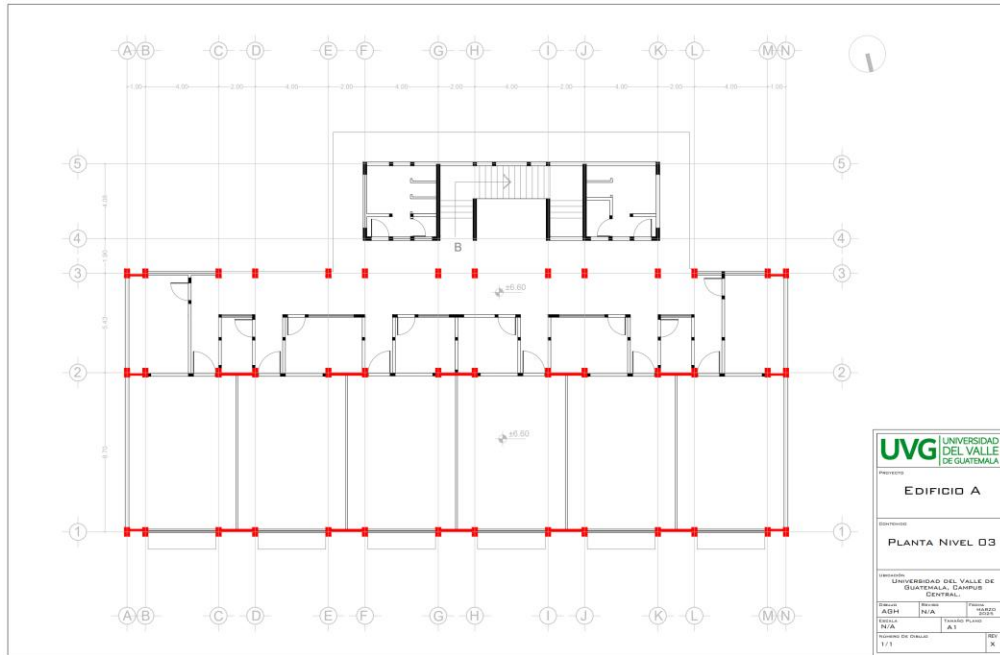


Figura 19. Plano de planta nivel 3 Edificio A en Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central. Dibujo por Alejandro González Haeckel (2025)

C. Ingreso de información en software IFC Builder 2019, CYPE

1. Modelado del edificio

De acuerdo con De Belza (2025), para llevar a cabo el modelo en IFC Builder se siguieron los siguientes pasos:

1. Creación de obra nueva (desde “Archivo”, “Nuevo”)

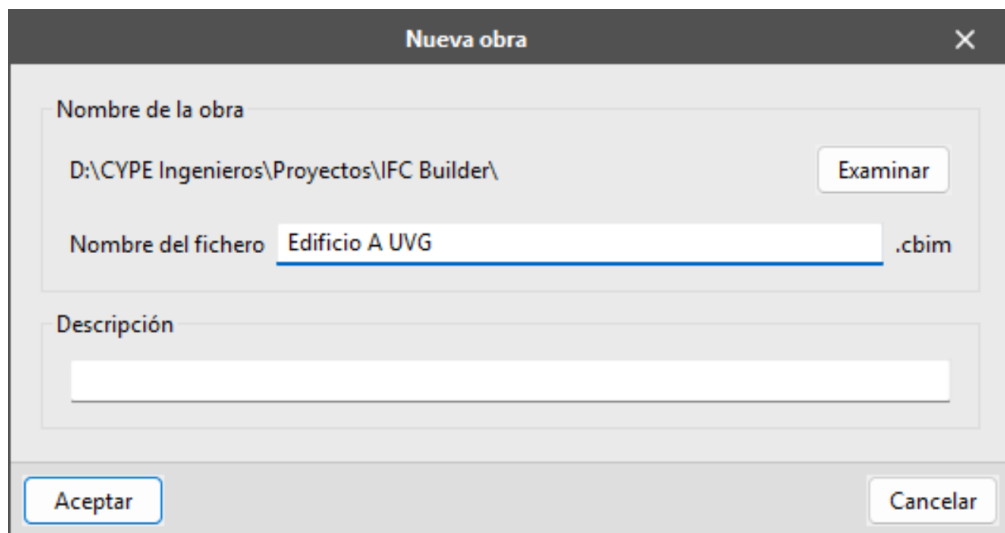


Figura 20. Creación de nueva obra en software IFC Builder 2019

2. Selección de obra vacía (obra nueva)



Figura 21. Selección de obra vacía (obra nueva) en software IFC Builder 2019

3. Introducción de plantas

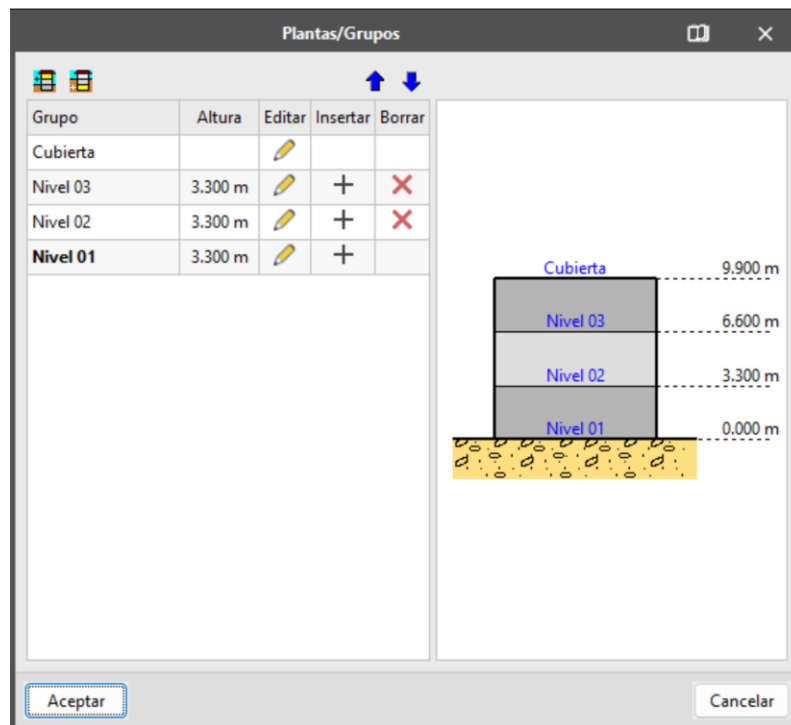


Figura 22. Introducción de plantas en software IFC Builder 2019

4. Introducción de plantillas de trabajo (planos CAD)

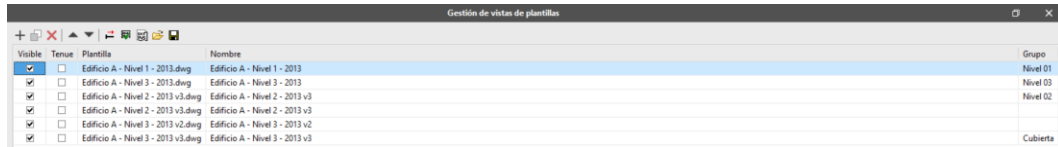


Figura 23. Introducción de plantillas en software IFC Builder 2019.

5. Ajuste de la orientación (desde “Proyecto”, “Orientación”)



Figura 24. Ajuste de orientación (norte del proyecto) en software IFC Builder 2019

6. Introducción de muros y particiones (desde “Elementos constructivos”, “Muros y particiones”)

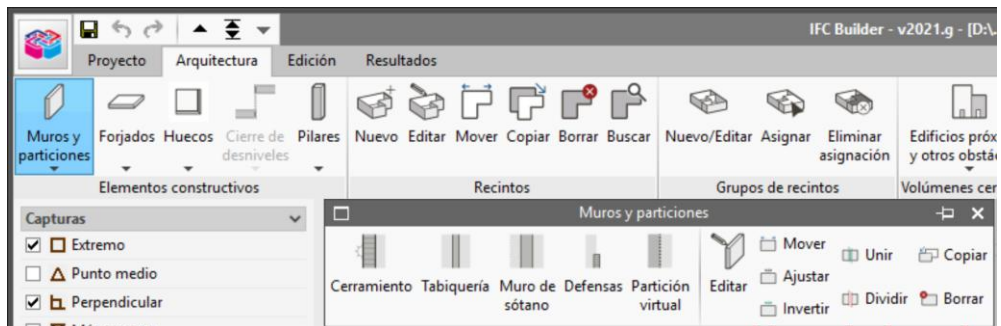


Figura 25. Introducción de muros y particiones en software IFC Builder 2019

7. Introducción de forjados (losas) (desde “Elementos constructivos”, “Forjados”)



Figura 26. Introducción de forjados (losas) en software IFC Builder 2019

8. Introducción de huecos (aberturas) (desde “Elementos constructivos”, “Huecos”)

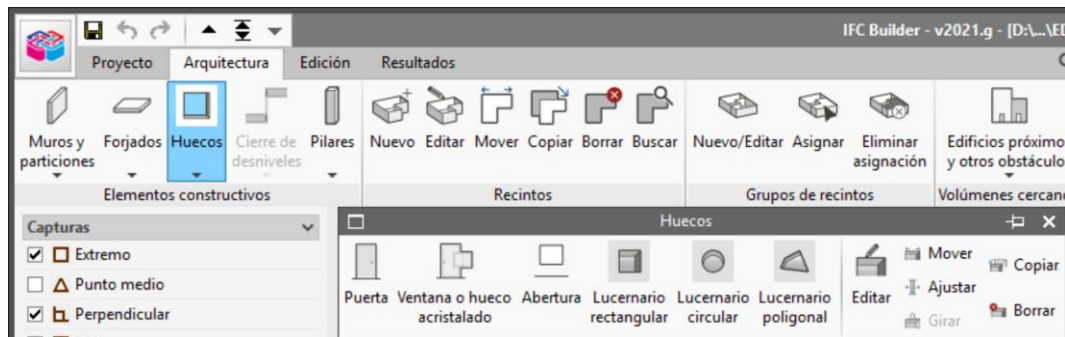


Figura 27. Introducción de huecos (aberturas) en software IFC Builder 2019

9. Introducción de recintos (áreas) (desde “Recintos”, “Nuevo”)



Figura 28. Introducción de recintos (áreas) en software IFC Builder 2019

10. Generación de resultados, aristas e incidencias (desde “Resultados”, “Calcular”)

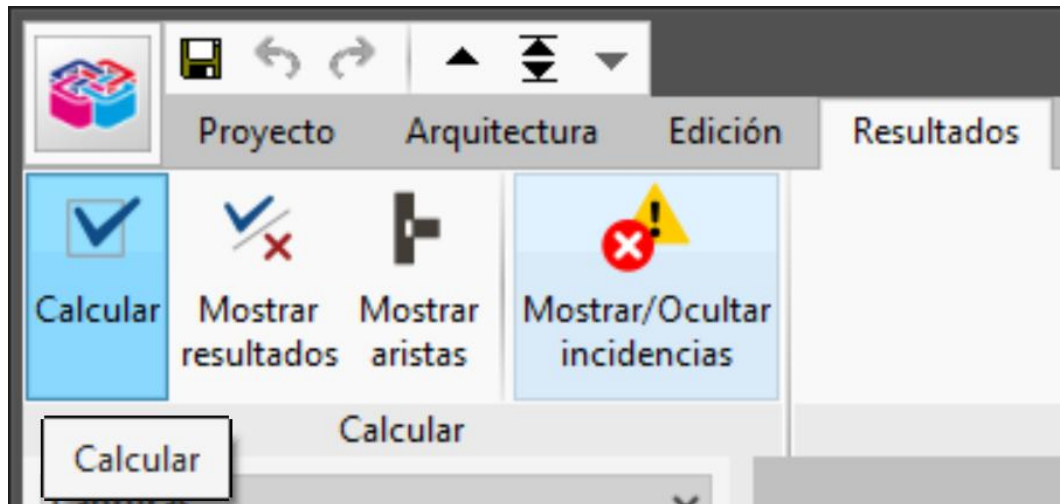


Figura 29. Generación de resultados, aristas e incidencias en software IFC Builder 2019

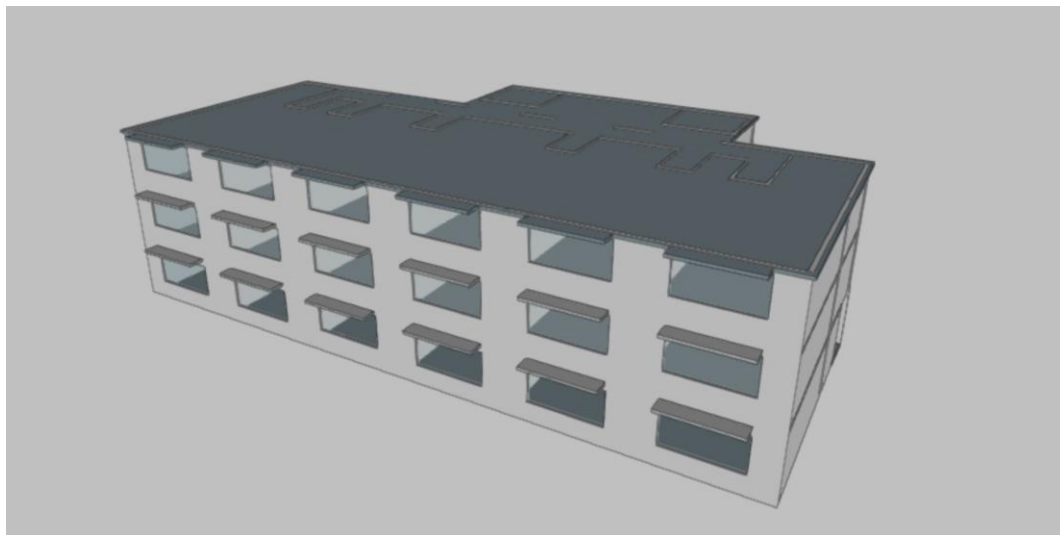


Figura 30. Modelo completado en software IFC Builder 2019

11. Vinculación a BIMserver.center (desde “BIMserver.center”, “Actualizar”)

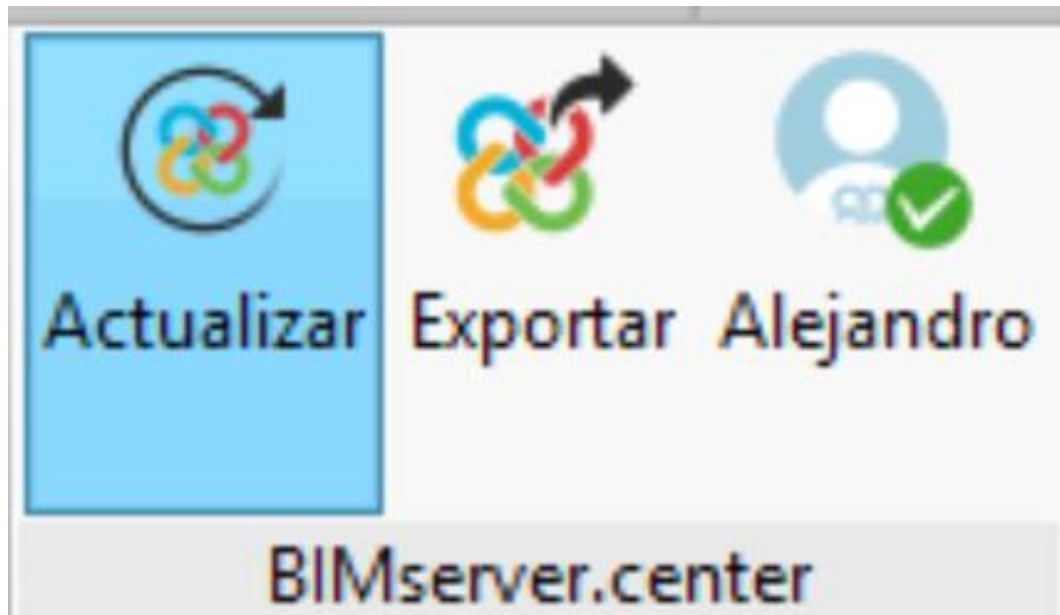


Figura 31. Vinculación a BIMserver.center en software IFC Builder 2019

12. Exportación a BIMserver.center (desde “BIMserver.center”, “Compartir”)



Figura 32. Exportación a BIMserver.center en software IFC Builder 2019

D. Ingreso de información (condiciones iniciales) en software Cypetherm he Plus 2019, CYPE

En el software Cypetherm He Plus 2019, de la casa CYPE, el primer paso fue abrir el proyecto a partir del archivo creado en IFC Builder 2019, el mismo se actualiza a través de BIMserver.center. Una vez abierto, se detallaron las características de los elementos que conforman el edificio A.

1. Condiciones iniciales de muros de cerramiento

a. Muro de mampostería de 0.15 metros de espesor

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Plaqueta o baldosa cerámica	2.00	1.000	0.02	2000.00	800.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00	0.550	0.02	1125.00	1000.00
BH hueco con áridos densos 110 mm	14.00	0.647	0.22	1300.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.50	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 3. Características por capa de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de cerramiento

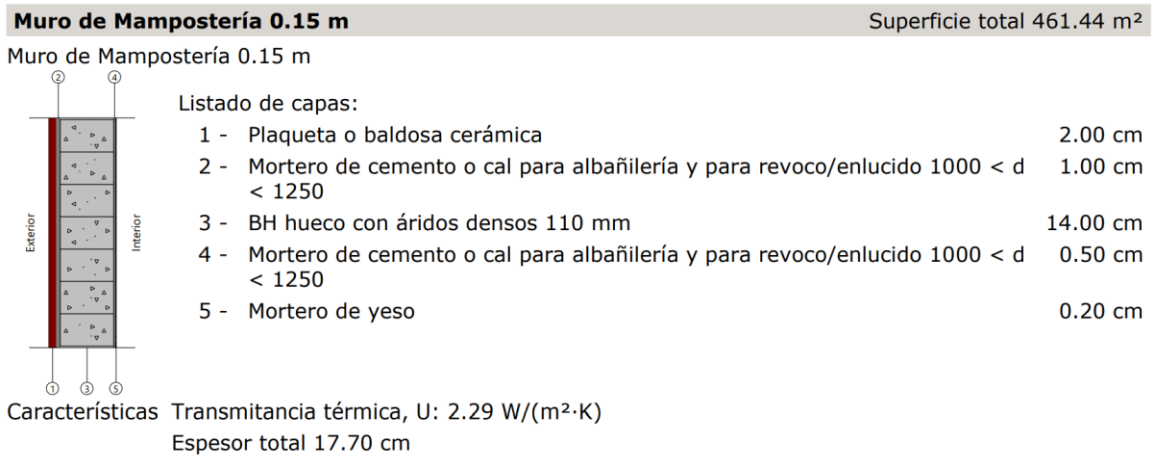


Figura 33. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de cerramiento

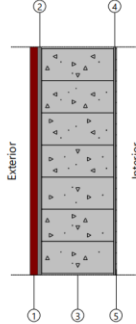
b. Muro de mampostería de 0.20 metros de espesor

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Plaqueta o baldosa cerámica	2.00	1.000	0.02	2000.00	800.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00	0.550	0.02	1125.00	1000.00
BH hueco con áridos densos 110 mm	19.00	0.647	0.29	1300.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.50	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 4. Características por capa de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de cerramiento

Muro de Mampostería 0.20 mSuperficie total 570.64 m²

Muro de Mampostería 0.20 m



Listado de capas:

- | | |
|--|----------|
| 1 - Plaqueta o baldosa cerámica | 2.00 cm |
| 2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 1.00 cm |
| 3 - BH hueco con áridos densos 110 mm | 19.00 cm |
| 4 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 0.50 cm |
| 5 - Mortero de yeso | 0.20 cm |

Características Transmitancia térmica, U: 1.95 W/(m²·K)
Espesor total 22.70 cm

Figura 34. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de cerramiento

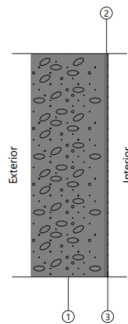
c. Muro de concreto fundido de 0.20 metros de espesor

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Hormigón armado d > 2500	20.00	2.500	0.08	2600.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.50	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 5. Características por capa de los muros de concreto fundido de 0.20 metros de espesor de cerramiento

Muro de Concreto Fundido 20 cmSuperficie total 163.39 m²

Muro de Concreto Fundido 20 cm



Listado de capas:

- | | |
|--|----------|
| 1 - Hormigón armado d > 2500 | 20.00 cm |
| 2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 0.50 cm |
| 3 - Mortero de yeso | 0.20 cm |

Características Transmitancia térmica, U: 3.82 W/(m²·K)
Espesor total 20.70 cm

Figura 35. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de concreto fundido de 0.20 metros de espesor de cerramiento

2. Condiciones iniciales de muros de tabiquería**a. Muro de mampostería 0.15 metros de espesor**

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.30	0.550	0.01	1125.00	1000.00
BH hueco con áridos densos 110 mm	14.00	0.647	0.22	1300.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.30	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 6. Características por capa de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de tabiquería

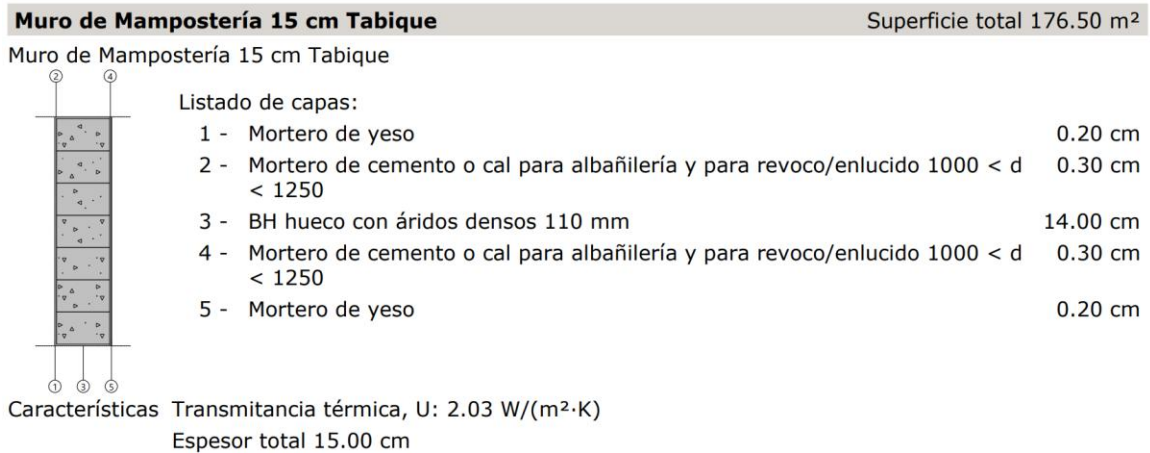


Figura 36. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de tabiquería

b. Muro de mampostería 0.20 metros de espesor

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.30	0.550	0.01	1125.00	1000.00
BH hueco con áridos densos 110 mm	19.00	0.647	0.29	1300.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.30	0.550	0.01	1125.00	1000.00

Cuadro 7. Características por capa de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de tabiquería

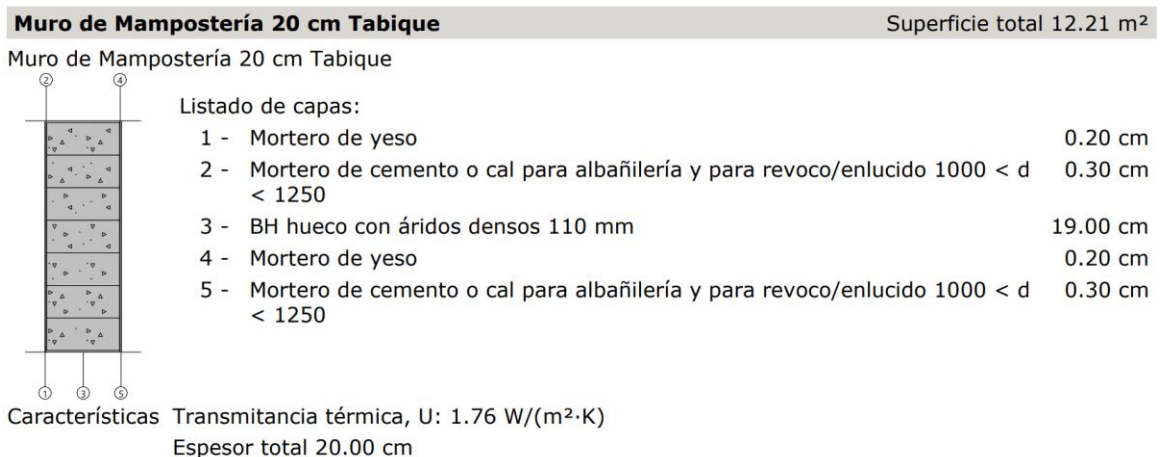


Figura 37. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de tabiquería

c. Muro de concreto fundido 0.15 metros de espesor

Capas	Esesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.30	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Hormigón armado d > 2500	15.00	2.500	0.06	2600.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.30	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 8. Características por capa de los muros de concreto fundido de 0.15 metros de espesor de tabiquería

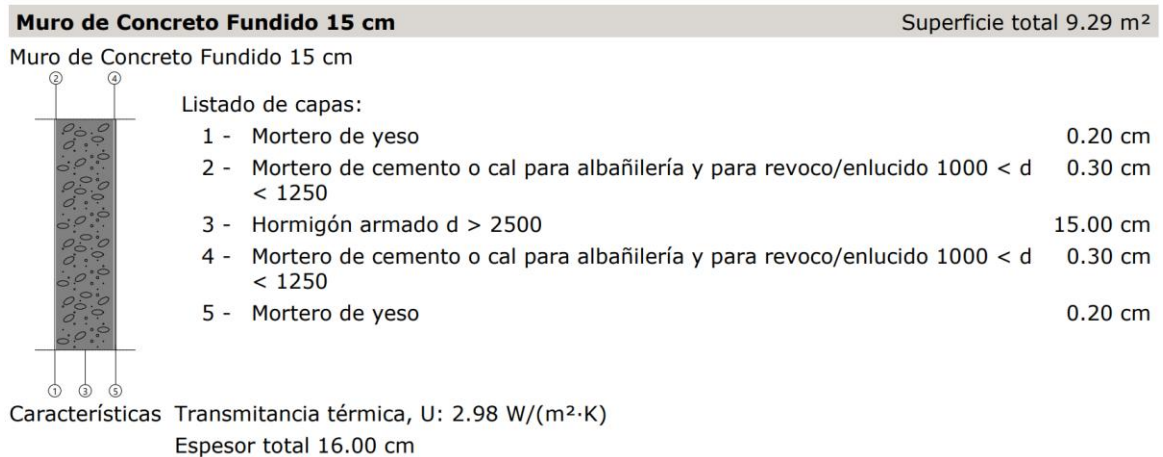


Figura 38. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de concreto fundido de 0.15 metros de espesor de tabiquería

d. Muro de yeso 0.10 metros de espesor

Capas	Esesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00
Placas de yeso armado con fibras minerales 800 < d < 1000	1.30	0.250	0.05	900.00	1000.00
Cámara de aire	7.40	0.411	0.18	1.00	1008.00
Placas de yeso armado con fibras minerales 800 < d < 1000	1.30	0.250	0.05	900.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 9. Características por capa de los muros de yeso de 0.10 metros de espesor de tabiquería

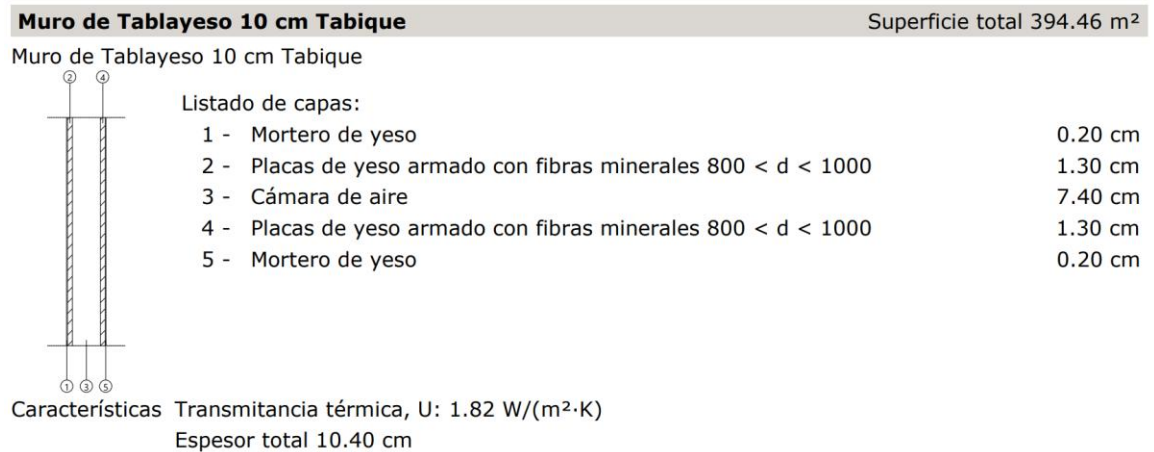


Figura 39. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de yeso de 0.10 metros de espesor de tabiquería

3. Condiciones iniciales de suelos en contacto con el terreno

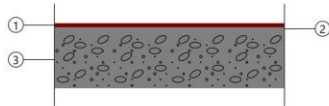
a. Losa fundida de piso

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Azulejo cerámico	1.00	1.300	0.01	2300.00	840.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00	0.550	0.02	1125.00	1000.00
Hormigón armado d > 2500	15.00	2.500	0.06	2600.00	1000.00

Cuadro 10. Características por capa de la losa fundida de piso de 0.15 metros de espesor

Losa de Piso 15 cm Superficie total 390.33 m²

Losa de Piso 15 cm

	Listado de capas:	
	1 - Azulejo cerámico	1.00 cm
	2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00 cm
	3 - Hormigón armado d > 2500	15.00 cm

Características

Transmitancia térmica, U: 0.45 W/(m²·K)
 Espesor total 17.00 cm
 Longitud característica, B': 10.692 m
 Resistencia térmica del forjado, Rf: 0.09 (m²·K)/W
 Superficie del forjado, A: 601.76 m²
 Perímetro del forjado, P: 112.561 m
 Conductividad térmica, λ: 2.000 W/(m·K)

Figura 40. Vista de sección y transmitancia térmica de la losa fundida de piso de 0.15 metros de espesor

4. Condiciones iniciales de forjados (losas)

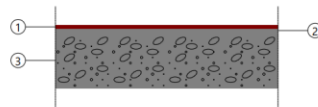
a. Losa fundida de entre piso

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Azulejo cerámico	1.00	1.300	0.01	2300.00	840.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00	0.550	0.02	1125.00	1000.00
Hormigón armado d > 2500	15.00	2.500	0.06	2600.00	1000.00

Cuadro 11. Características por capa de la losa fundida de entrepiso de 0.15 metros de espesor

Losa de concreto 15 cm Superficie total 767.54 m²

Losa de concreto 15 cm

	Listado de capas:	
	1 - Azulejo cerámico	1.00 cm
	2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00 cm
	3 - Hormigón armado d > 2500	15.00 cm

Características

Transmitancia térmica, U: 3.50 W/(m²·K)
 Espesor total 17.00 cm

Figura 41. Vista de sección y transmitancia térmica de la losa fundida de entrepiso de 0.15 metros de espesor

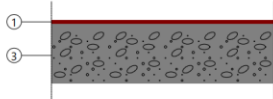
b. Losa fundida de voladizo

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Azulejo cerámico	1.00	1.300	0.01	2300.00	840.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00	0.550	0.02	1125.00	1000.00
Hormigón armado d > 2500	15.00	2.500	0.06	2600.00	1000.00

Cuadro 12. Características por capa de la losa fundida de voladizo de 0.15 metros de espesor

Losa de concreto 15 cm Superficie total 767.54 m²

Losa de concreto 15 cm

	Listado de capas: 1 - Azulejo cerámico 1.00 cm 2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 1.00 cm 3 - Hormigón armado d > 2500 15.00 cm
---	--

Características Transmitancia térmica, U: 3.50 W/(m²·K)
Espesor total 17.00 cm

Figura 42. Vista de sección y transmitancia térmica de la losa fundida de voladizo de 0.15 metros de espesor

5. Condiciones iniciales de cubiertas

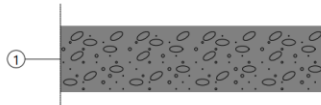
a. Losa fundida de cubierta

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Hormigón armado d > 2500	2.00	2.500	0.01	2600.00	1000.00

Cuadro 13. Características por capa de la losa fundida de cubierta de 0.15 metros de espesor

Cubierta Losa Fundida 15 cm Superficie total 420.57 m²

Cubierta Losa Fundida 15 cm

	Listado de capas: 1 - Hormigón armado d > 2500 15.00 cm
---	--

Características Transmitancia térmica, U: 5.00 W/(m²·K)
Espesor total 15.00 cm

Figura 43. Vista de sección y transmitancia térmica de la losa fundida de cubierta de 0.15 metros de espesor

6. Condiciones iniciales de puertas

a. Puerta de ingreso a aulas, oficinas y bodegas

Puerta de cristal sencillo

Puerta de cristal sencillo

Características Transmitancia térmica, U: 5.70 W/(m²·K)
Absortividad, α_s : 0.600 (color intermedio)

Figura 44. Transmitancia térmica y absorptividad de las puertas de ingreso a aulas, oficinas y bodegas

7. Condiciones iniciales de huecos acristalados (ventanas)

a. Ventana

Ventana cristal sencillo

Ventana cristal sencillo

Características Transmitancia térmica, U: 5.70 W/(m²·K)

Factor solar, g: 0.700

Fracción opaca, Ff: 0

Transmitancia total de energía solar del hueco, con los dispositivos de sombra móviles activados, $g_{gl;sh,wi}$: 0.63

Figura 45. Transmitancia térmica, factor solar, fracción opaca y transmitancia total de energía solar del hueco de las ventanas de cristal sencillo

Muros de cerramiento			
No.	Elemento	Espesor (m)	Transmitancia térmica U (W/(m ² *K))
01	Muro de mampostería	0.18	2.29
02	Muro de mampostería	0.23	1.95
03	Muro de concreto fundido	0.21	3.82

Cuadro 14. Resumen elementos de cerramiento, condiciones iniciales Edificio A

Una vez se llenaron las características iniciales de los elementos constructivos del Edificio A, se procedió a completar los datos del emplazamiento.

8. Resolución de puentes térmicos lineales

Posteriormente, se procedió a resolver los puentes térmicos lineales identificados por el software. Se identificaron 180 puentes térmicos los cuales fueron resueltos según el Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE DB-HE).

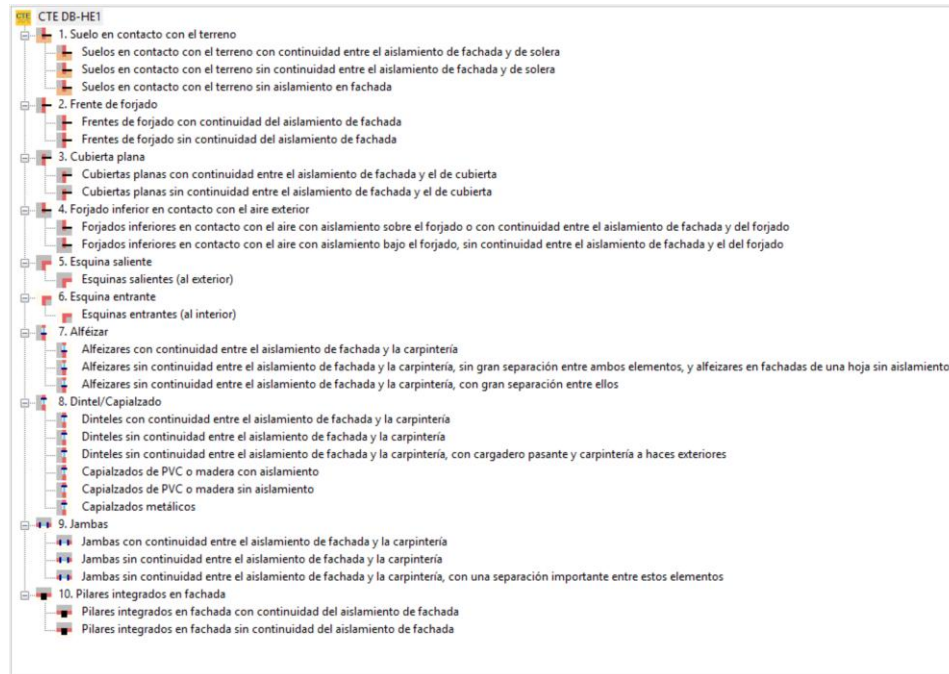


Figura 46. Tipos de encuentro en puentes térmicos lineales según normativa CTE DB-HE

Para cada incidencia se seleccionó el tipo de encuentro que aplique según la CTE DB-HE. El seleccionar cada caso modifica el valor del coeficiente lineal de transmisión térmica (PSI) de cada puente térmico, el mismo se expresa en unidades de vatios por metro cuadrado y grado Kelvin.

Posteriormente se corrió el software para generar los informes energéticos y de confort. Estos fueron tomados como las condiciones iniciales del edificio. Una vez realizadas las mejoras propuestas a la fachada del edificio, estos datos servirán como puntos de partida y serán empleados para determinar la mejora alcanzada mediante la aplicación de la fachada ventilada.

E. Generación de propuesta fachada ventilada

Para generar la propuesta de fachada ventilada, se utilizó el manual de diseño y colocación de fachadas ventiladas de Lapitec. Se seleccionó dicho manual puesto que proporciona una guía técnica clara y detallada, basada en soluciones constructivas aplicadas en Europa y alineadas con los estándares del Código Técnico de la Edificación (CTE). Dicho manual tiene validez técnica porque ha sido desarrollado por un fabricante especializado en sistemas de fachada, así como también está respaldado por ensayos, certificaciones y experiencia en obra real. Aunque existen otros manuales, se seleccionó el de Lapitec por su enfoque específico en fachadas ventiladas de alta eficiencia. Además, es compatible con sistemas de aislamiento como los de la empresa Isover y tiene una clara

adaptabilidad a diferentes tipos de soporte, incluyendo mampostería. Esta es una fuente confiable para trasladar buenas prácticas internacionales a contextos locales con condiciones climáticas similares. La fachada ventilada se compone de los siguientes elementos: muro soporte, aislamiento térmico, subestructura metálica, cámara de aire ventilada y revestimiento exterior. A continuación, se detalla la propuesta generada de dichos elementos:

1. Muro soporte

Este elemento es la estructura principal de cerramiento, soporta las cargas del edificio y actúa como barrera física ante el exterior. Adicionalmente sirve de base para fijar la subestructura metálica que sostiene el sistema de fachada ventilada. Este elemento está compuesto por el cerramiento actual del Edificio A, se compone por muros de mampostería y muros de concreto fundido con espesor variable.

2. Aislamiento térmico

Para el segundo elemento que compone la fachada ventilada se seleccionó lana mineral Ecovent VN 035, de Isover. Dicho producto se seleccionó como aislamiento térmico para la fachada ventilada por ser una solución específicamente diseñada para sistemas de fachada ventilada. La lana mineral Ecovent VN 035 tiene un bajo coeficiente de conductividad térmica, no absorbe agua, reduce la transmisión del ruido y es incombustible. La lana mineral Ecovent VN 035 puede instalarse de 40 milímetros de espesor hasta 160 milímetros. En el caso del Edificio A, se utilizó de 100 milímetros, buscando eficientizar el ancho de la fachada propuesta.

3. Subestructura metálica

Para efectos de los cálculos térmicos no es necesario definir la subestructura metálica, puesto que la misma únicamente sirve de soporte para el revestimiento exterior y crear la cámara de aire ventilada.

4. Cámara de aire ventilada

La cámara de aire ventilada es la responsable por facilitar la circulación del aire por convección naturales entre el aislamiento y el revestimiento. Ayudando a eliminar la humedad, evitar condensaciones, reducir el calentamiento por radiación solar y mejorar el rendimiento térmico general del sistema. Para la propuesta de fachada ventilada se consideró un espesor de 10 centímetros.

5. Revestimiento exterior

El revestimiento exterior es el encargado de proteger el sistema contra la intemperie y proporcionar una terminación estética de alta durabilidad. Tomando esto en consideración, se propuso el uso de paneles de cerámica gres, por su resistencia a la absorción de agua y resistencia a cambios de temperatura.

6. Ventanería y puertas

Adicional a los 5 elementos propuestos, se contempló la mejora de las ventanas y puertas del Edificio A. Actualmente las estas están conformadas por un cristal sencillo, ofreciendo una baja resistencia térmica. Para acompañar las mejoras propuestas en la fachada ventilada, se consideró ventanería de triple acristalamiento, un sistema que trabaja mediante cámaras de aire. Se seleccionó el modelo Triple Acristalamiento MS SUPERtermo Premium 2 de la marca MS Ventanas. Dicho elemento es una solución de triple acristalamiento. Compuesto por tres hojas de vidrio de 4 milímetros de espesor, separadas por capas de 18 milímetros con gas argón. Su transmitancia térmica es de 0.5 W/m²K, tiene una transmisión de luz de 74% y un factor solar de 0.53. La ventana seleccionada cumple con los requisitos del Código Técnico de la Edificación (CTE).

F. Ingreso de información (propuesta fachada ventilada) en software Cypetherm He Plus 2019, CYPE

1. Composición (propuesta fachada ventilada) de muros de cerramiento, ventanería y puertas

a. Muro de mampostería de 0.15 metros de espesor

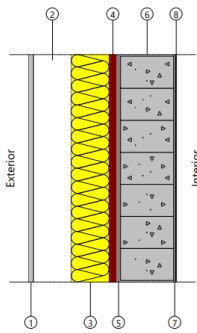
Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Gres calcáreo 2000 < d < 2700	1.20	1.900	0.01	2350.00	1000.00
Cámara de aire ventilada	10.00			1.00	1008.00
MW Lana mineral [0.031 W/[mK]]	10.00	0.031	3.23	40.00	1000.00
Plaqueta o baldosa cerámica	2.00	1.000	0.02	2000.00	800.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00	0.550	0.02	1125.00	1000.00
BH hueco con áridos densos 110 mm	14.00	0.647	0.22	1300.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.50	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 15. Características por capa de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada

Muro de Mampostería 0.15 m + Fachada Ventilada

Superficie total 461.44 m²

Muro de Mampostería 0.15 m + Fachada Ventilada



Listado de capas:

- | | |
|--|----------|
| 1 - Gres calcáreo 2000 < d < 2700 | 1.20 cm |
| 2 - Cámara de aire ventilada | 10.00 cm |
| 3 - MW Lana mineral [0.031 W/[mK]] | 10.00 cm |
| 4 - Plaqueta o baldosa cerámica | 2.00 cm |
| 5 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 1.00 cm |
| 6 - BH hueco con áridos densos 110 mm | 14.00 cm |
| 7 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 0.50 cm |
| 8 - Mortero de yeso | 0.20 cm |

Características Transmitancia térmica, U: 0.27 W/(m²·K)
Espesor total 38.90 cm

Figura 47. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.15 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada

b. Muro de mampostería de 0.20 metros de espesor

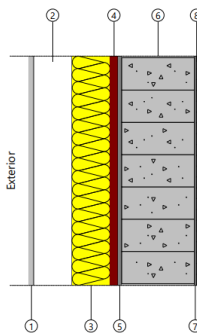
Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Gres calcáreo 2000 < d < 2700	1.20	1.900	0.01	2350.00	1000.00
Cámara de aire ventilada	10.00			1.00	1008.00
MW Lana mineral [0.031 W/[mK]]	10.00	0.031	3.23	40.00	1000.00
Plaqueta o baldosa cerámica	2.00	1.000	0.02	2000.00	800.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	1.00	0.550	0.02	1125.00	1000.00
BH hueco con áridos densos 110 mm	19.00	0.647	0.29	1300.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.50	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 16. Características por capa de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada

Muro de Mampostería 0.20 m + Fachada ventilada

Superficie total 570.64 m²

Muro de Mampostería 0.20 m + Fachada ventilada



Listado de capas:

- | | |
|--|----------|
| 1 - Gres calcáreo 2000 < d < 2700 | 1.20 cm |
| 2 - Cámara de aire ventilada | 10.00 cm |
| 3 - MW Lana mineral [0.031 W/[mK]] | 10.00 cm |
| 4 - Plaqueta o baldosa cerámica | 2.00 cm |
| 5 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 1.00 cm |
| 6 - BH hueco con áridos densos 110 mm | 19.00 cm |
| 7 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250 | 0.50 cm |
| 8 - Mortero de yeso | 0.20 cm |

Características Transmitancia térmica, U: 0.26 W/(m²·K)
Espesor total 43.90 cm

Figura 48. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de mampostería de 0.20 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada

c. Muro de concreto fundido de 0.20 metros de espesor

Capas	Espesor (cm)	Conductividad (W/(m·K))	Resistencia térmica ((m ² ·K)/W)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))
Gres calcáreo 2000 < d < 2700	1.20	1.900	0.01	2350.00	1000.00
Cámara de aire ventilada	10.00			1.00	1008.00
MW Lana mineral [0.031 W/[mK]]	10.00	0.031	3.23	40.00	1000.00
Hormigón armado d > 2500	20.00	2.500	0.08	2600.00	1000.00
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0.50	0.550	0.01	1125.00	1000.00
Mortero de yeso	0.20	0.800		1600.00	1000.00

Cuadro 17. Características por capa de los muros de concreto fundido de 0.20 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada

Muro de Concreto Fundido 20 cm + Fachada ventilada Superficie total 163.39 m²

Muro de Concreto Fundido 20 cm + Fachada ventilada

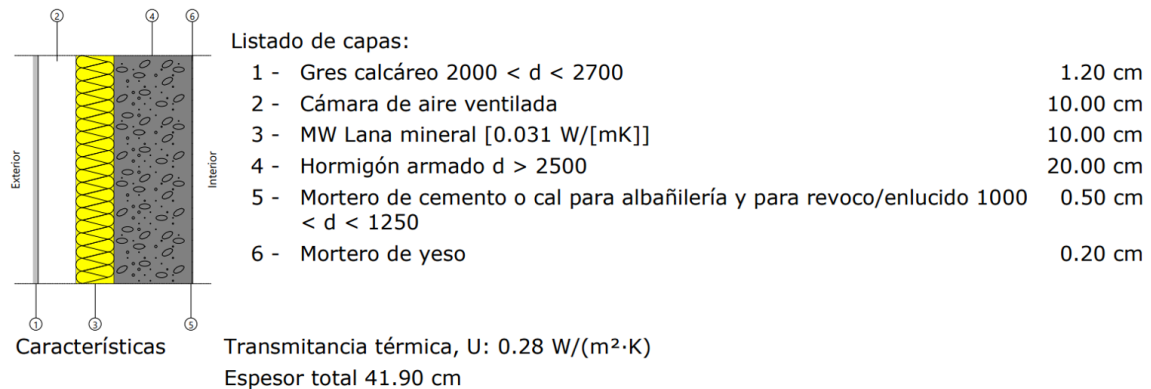


Figura 49. Vista de sección y transmitancia térmica de los muros de concreto fundido de 0.20 metros de espesor de cerramiento con los elementos propuestos de fachada ventilada

2. Composición (propuesta fachada ventilada) de puertas

a. Puerta de ingreso a aulas, oficinas y bodegas

Puerta de triple acristalamiento

Puerta de triple acristalamiento

Características Transmitancia térmica, U: 0.50 W/(m²·K)
Absortividad, α_S: 0.400 (color intermedio)

Figura 50. Transmitancia térmica y absortividad de las puertas de ingreso a aulas, oficinas y bodegas según características de propuesta de triple acristalamiento con cámaras de argon

3. Composición (propuesta fachada ventilada) de huecos acristalados (ventanas)

▪ Ventana

Ventana con triple acristalamiento

Ventana con triple acristalamiento

Características Transmitancia térmica, U: 0.50 W/(m²·K)

Factor solar, g: 0.530

Fracción opaca, Ff: 0

Transmitancia total de energía solar del hueco, con los dispositivos de sombra móviles activados, $g_{gl;sh,wi}$: 0.53

Figura 51. Transmitancia térmica, factor solar, fracción opaca y transmitancia total de energía solar del hueco de las ventanas de cristal sencillo según características de propuesta de triple acristalamiento con cámaras de argón

Muros de cerramiento			
No.	Elemento	Espesor (m)	Transmitancia térmica U (W/(m ² *K))
01	Muro de mampostería	0.44	0.26
02	Muro de mampostería	0.39	0.27
03	Muro de concreto fundido	0.42	0.28

Cuadro 18. Resumen elementos de cerramiento, condiciones de propuesta fachada ventilada Edificio A

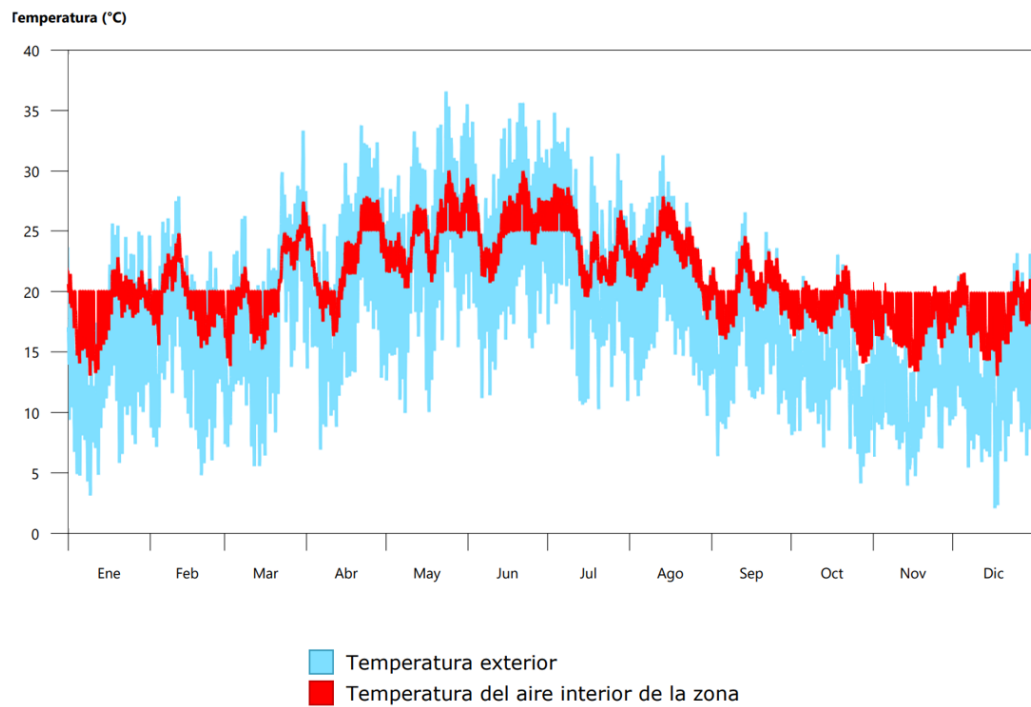
El haber realizado este proceso en Cypetherm He Plus permitió generar informes de confort térmico en el software, cuya información fue utilizada para los cálculos.

VII. CÁLCULOS

A. Cálculo de la mejora en confort climático interior tras la implementación de la propuesta de fachada ventilada

1. Temperatura interior con las condiciones iniciales de fachada del Edificio A

a. Nivel 01:



Gráfica 1. Temperatura del aire interior (NIVEL 01) según temperatura exterior del aire a lo largo de los meses del año para las condiciones iniciales del Edificio A

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima de confort (-)													
$T_{int,max}$ (°C)	22.8	24.8	27.4	27.9	30.0	30.0	28.6	27.9	24.5	22.1	22.0	21.8	30.0
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Temperatura mínima de confort (-)													
$T_{int,min}$ (°C)	13.0	14.4	13.8	16.3	20.2	20.7	19.5	17.6	16.0	14.0	13.5	13.1	13.0
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Horas fuera de consigna*													
Calefacción (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Calefacción (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0

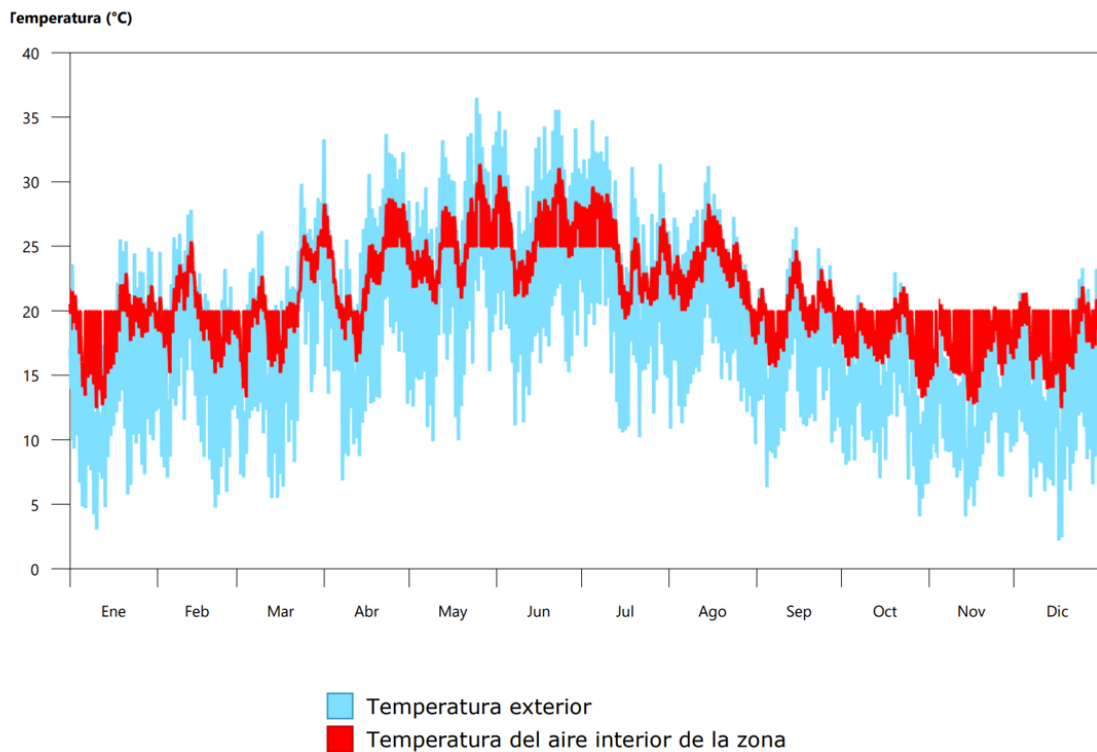
*Número de horas en las que la temperatura del aire de los espacios de la zona se sitúa fuera del rango de las temperaturas de consigna de calefacción o de refrigeración, con un margen superior a 1 °C para calefacción y 1 °C para refrigeración.

donde:

- T_{int} : Temperatura del aire interior de la zona, °C.
- $T_{int,max}$: Temperatura máxima del aire interior de la zona, °C.
- $T_{int,min}$: Temperatura mínima del aire interior de la zona, °C.
- $T_{max,conf}$: Temperatura máxima de confort, °C.
- $T_{min,conf}$: Temperatura mínima de confort, °C.

Cuadro 19. Temperatura máxima y mínima de confort (Nivel 01) para las condiciones iniciales del Edificio A

b. Nivel 02:



Gráfica 2. Temperatura del aire interior (NIVEL 02) según temperatura exterior del aire a lo largo de los meses del año para las condiciones iniciales del Edificio A

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima de confort (-)													
$T_{int,max}$ (°C)	22.9	25.4	28.3	28.7	31.4	31.1	29.2	28.3	24.7	21.9	21.7	21.8	31.4
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Temperatura mínima de confort (-)													
$T_{int,min}$ (°C)	12.5	14.0	13.3	16.1	20.5	21.1	19.4	17.4	15.6	13.3	12.7	12.4	12.4
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Horas fuera de consigna*													
Calefacción (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Calefacción (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0

*Número de horas en las que la temperatura del aire de los espacios de la zona se sitúa fuera del rango de las temperaturas de consigna de calefacción o de refrigeración, con un margen superior a 1 °C para calefacción y 1 °C para refrigeración.

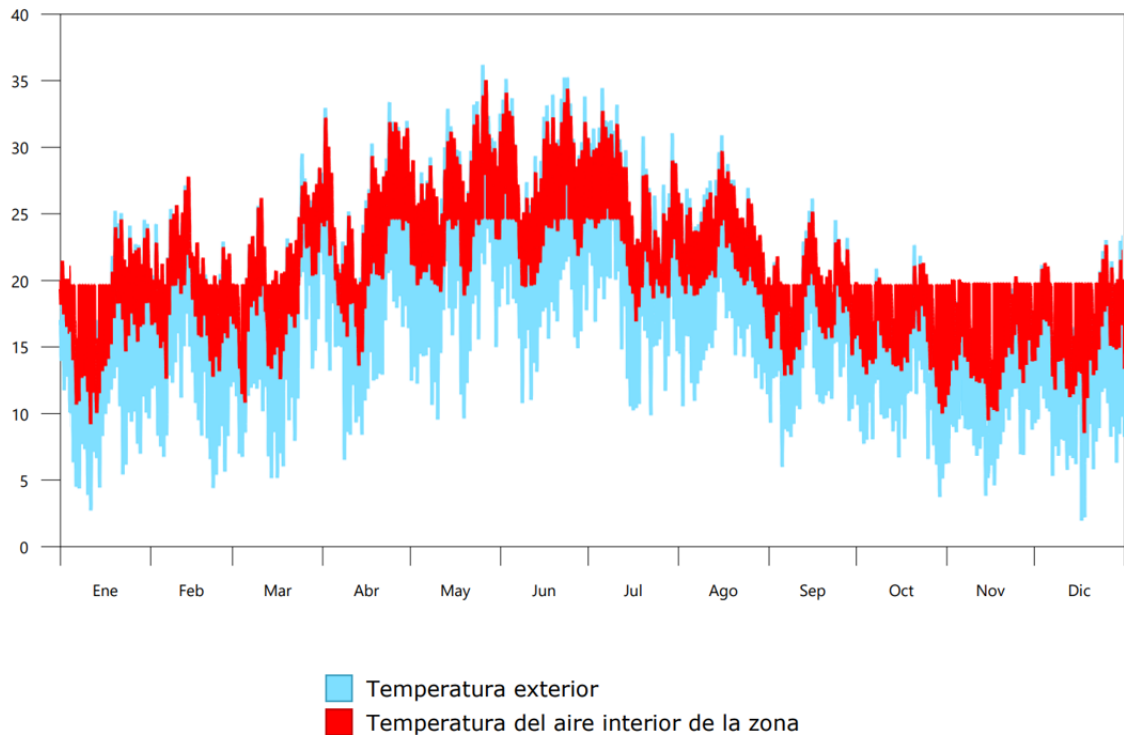
donde:

- T_{int} : Temperatura del aire interior de la zona, °C.
- $T_{int,max}$: Temperatura máxima del aire interior de la zona, °C.
- $T_{int,min}$: Temperatura mínima del aire interior de la zona, °C.
- $T_{max,conf}$: Temperatura máxima de confort, °C.
- $T_{min,conf}$: Temperatura mínima de confort, °C.

Cuadro 20. Temperatura máxima y mínima de confort (Nivel 02) para las condiciones iniciales del Edificio A

c. Nivel 03:

temperatura (°C)



Gráfica 3. Temperatura del aire interior (NIVEL 03) según temperatura exterior del aire a lo largo de los meses del año para las condiciones iniciales del Edificio A

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima de confort (-)													
$T_{int,max}$ (°C)	24.9	28.1	32.6	32.2	35.4	34.7	32.1	30.1	25.5	21.6	21.5	22.9	35.4
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Temperatura mínima de confort (-)													
$T_{int,min}$ (°C)	9.6	11.8	11.2	13.9	19.2	19.9	17.3	15.2	13.2	10.4	9.7	8.8	8.8
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Horas fuera de consigna*													
Calefacción (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Calefacción (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0

*Número de horas en las que la temperatura del aire de los espacios de la zona se sitúa fuera del rango de las temperaturas de consigna de calefacción o de refrigeración, con un margen superior a 1 °C para calefacción y 1 °C para refrigeración.

donde:

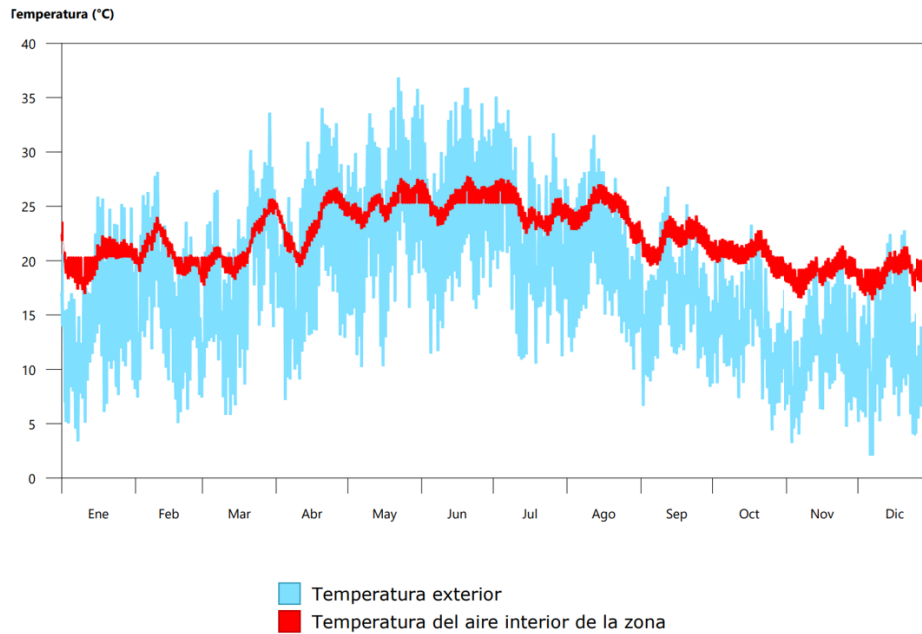
- T_{int} : Temperatura del aire interior de la zona, °C.
- $T_{int,max}$: Temperatura máxima del aire interior de la zona, °C.
- $T_{int,min}$: Temperatura mínima del aire interior de la zona, °C.
- $T_{max,conf}$: Temperatura máxima de confort, °C.
- $T_{min,conf}$: Temperatura mínima de confort, °C.

Cuadro 21. Temperatura máxima y mínima de confort (NIVEL 03) para las condiciones iniciales del Edificio A

Al correr los cálculos en el modelo de Cypetherm He Plus con las características iniciales de la fachada del Edificio A, fue posible generar un informe de las condiciones de confort climático. En la gráfica del comportamiento de la temperatura del aire interior respecto a la exterior a lo largo del año (Gráfica 1-3.) y la tabla de temperaturas mínima y máxima de confort interior a lo largo del año (Cuadros 19-21.) se pudo apreciar como la temperatura dentro del Edificio A alcanzó picos de calor en los meses de marzo, abril, mayo y junio.

2. Temperatura interior con la propuesta de fachada ventilada del Edificio A

a. Nivel 01:



Gráfica 4. Temperatura del aire interior según temperatura exterior del aire (NIVEL 01) a lo largo de los meses del año para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima de confort (-)													
$T_{int,max}$ (°C)	22.1	23.7	25.4	26.4	27.3	27.5	27.3	26.7	23.8	22.5	23.6	22.2	27.5
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Temperatura mínima de confort (-)													
$T_{int,min}$ (°C)	16.6	17.7	17.4	19.1	22.6	22.9	22.0	21.2	19.2	18.0	17.4	17.2	16.6
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Horas fuera de consigna*													
Calefacción (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Calefacción (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0

*Número de horas en las que la temperatura del aire de los espacios de la zona se sitúa fuera del rango de las temperaturas de consigna de calefacción o de refrigeración, con un margen superior a 1 °C para calefacción y 1 °C para refrigeración.

donde:

T_{int} : Temperatura del aire interior de la zona, °C.

$T_{int,max}$: Temperatura máxima del aire interior de la zona, °C.

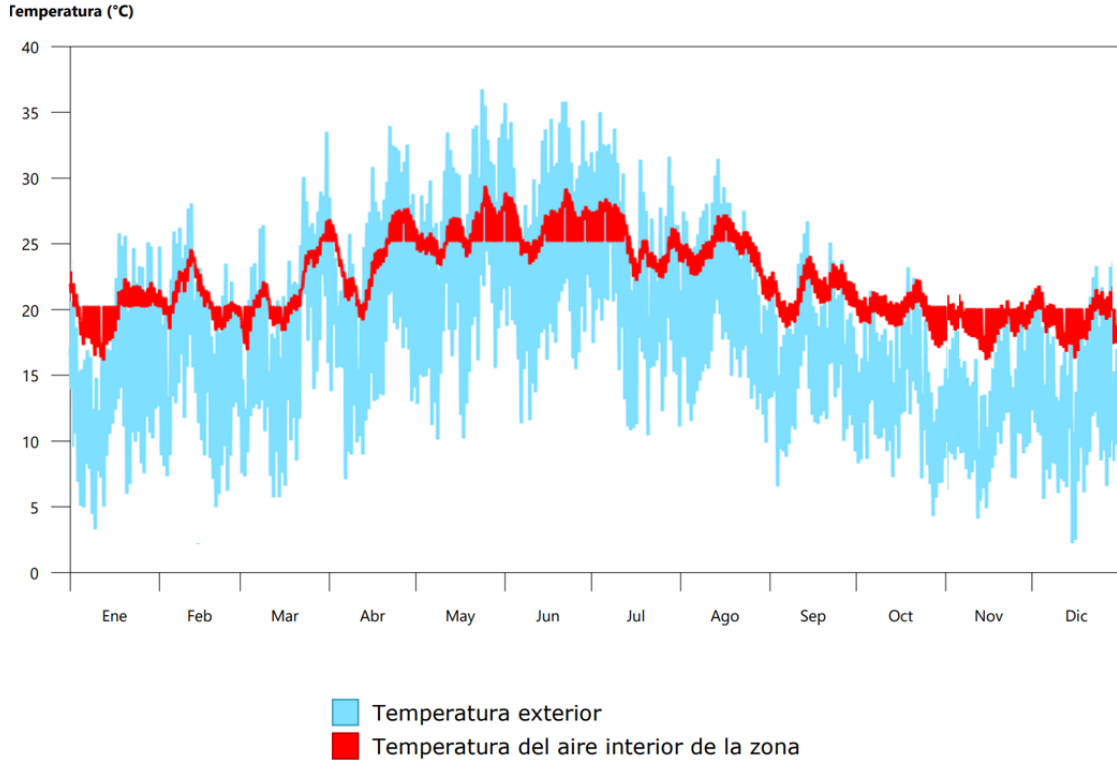
$T_{int,min}$: Temperatura mínima del aire interior de la zona, °C.

$T_{max,conf}$: Temperatura máxima de confort, °C.

$T_{min,conf}$: Temperatura mínima de confort, °C.

Cuadro 22. Temperatura máxima y mínima de confort (NIVEL 01) para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A

b. Nivel 02:



Gráfica 5. Temperatura del aire interior según temperatura exterior del aire (NIVEL 02) a lo largo de los meses del año para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima de confort (-)													
$T_{int,max}$ (°C)	22.2	24.3	26.7	27.5	29.2	29.0	28.2	27.0	23.8	22.1	22.9	21.8	29.2
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Temperatura mínima de confort (-)													
$T_{int,min}$ (°C)	15.9	17.2	16.7	19.0	23.1	23.2	22.0	20.5	18.4	16.9	16.1	16.2	15.9
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Horas fuera de consigna*													
Calefacción (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Calefacción (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0

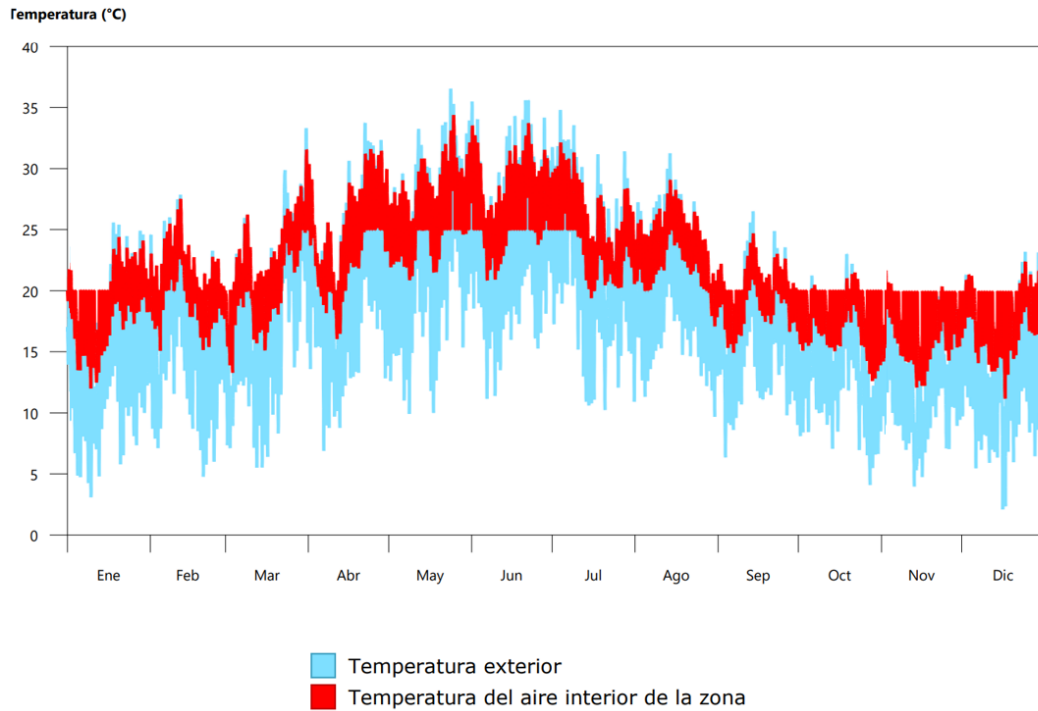
*Número de horas en las que la temperatura del aire de los espacios de la zona se sitúa fuera del rango de las temperaturas de consigna de calefacción o de refrigeración, con un margen superior a 1 °C para calefacción y 1 °C para refrigeración.

donde:

- T_{int} : Temperatura del aire interior de la zona, °C.
- $T_{int,max}$: Temperatura máxima del aire interior de la zona, °C.
- $T_{int,min}$: Temperatura mínima del aire interior de la zona, °C.
- $T_{max,conf}$: Temperatura máxima de confort, °C.
- $T_{min,conf}$: Temperatura mínima de confort, °C.

Cuadro 23. Temperatura máxima y mínima de confort (NIVEL 02) para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A

c. Nivel 03:



Gráfica 6. Temperatura del aire interior según temperatura exterior del aire (NIVEL 03) a lo largo de los meses del año para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima de confort (-)													
$T_{int,max}$ (°C)	24.4	27.5	31.5	31.6	34.4	33.7	31.3	29.1	24.7	21.5	21.7	22.4	34.4
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} > T_{max,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Temperatura mínima de confort (-)													
$T_{int,min}$ (°C)	12.0	13.9	13.3	16.0	20.8	20.8	19.4	17.1	14.9	12.6	12.1	11.3	11.3
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
$T_{int} < T_{min,conf}$ (Horas/Ocupación)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Horas fuera de consigna*													
Calefacción (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Calefacción (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0
Refrigeración (Horas/Ocupación)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0

*Número de horas en las que la temperatura del aire de los espacios de la zona se sitúa fuera del rango de las temperaturas de consigna de calefacción o de refrigeración, con un margen superior a 1 °C para calefacción y 1 °C para refrigeración.

donde:

T_{int} : Temperatura del aire interior de la zona, °C.

$T_{int,max}$: Temperatura máxima del aire interior de la zona, °C.

$T_{int,min}$: Temperatura mínima del aire interior de la zona, °C.

$T_{max,conf}$: Temperatura máxima de confort, °C.

$T_{min,conf}$: Temperatura mínima de confort, °C.

Cuadro 24. Temperatura máxima y mínima de confort (NIVEL 03) para la propuesta de fachada ventilada del Edificio A

Al correr por segunda vez los cálculos en el modelo de Cypetherm He Plus ahora con las características de la fachada ventilada propuesta del Edificio A, fue posible generar nuevamente un informe con las condiciones de confort climático. En esta segunda corrida se pudo apreciar una disminución en la temperatura del aire interior del edificio respecto a la primera corrida.

B. Cálculo de la ganancia de calor sensible en el aire del Edificio A

1. Caudal de aire del edificio (CFM)

El primer paso para calcular el CFM fue calcular el volumen del edificio a partir del área habitable.

$$V = A * h = 1,170.47m^2 * 3m = 3,511.41 m^3 = 53,374.94 ft^3$$

Donde:

A = área habitable del edificio (m^2)

h = altura entre pisos del edificio (m)

Ecuación 1. Cálculo del área de aire

A partir del ASHRAE 62.1 se determinó un número de renovaciones por hora (ACH) de 3, dado el uso del edificio. Conociendo que ACH es igual al volumen de aire renovado por hora dividido el volumen del espacio, se determinó la siguiente ecuación para calcular el caudal del aire del edificio (CFM):

$$CFM = \frac{ACH * V}{60 \text{ min}} = \frac{3 * 53,374.94 \text{ ft}^3}{60 \text{ min}} = 2,668.75 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

Donde:

ACH = Número de renovaciones por hora

V = volumen del edificio (ft^3)

Ecuación 2. Cálculo del caudal de aire para el edificio (CFM)

2. Ganancia térmica

Una vez se contó con el valor de caudal de aire del edificio (CFM) para el Edificio A ubicado en el Campus Central de la Universidad del Valle de Guatemala, se pudo proceder al cálculo de ganancia térmica.

$$Q = 1.08 * CFM * \Delta T = 1.08 * 2,668.75 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} * \Delta T$$

Donde:

Q = ganancia térmica (BTU/h)

CFM = caudal de aire del edificio ($\frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$)

ΔT = Diferencia entre la temperatura interior y la temperatura deseada ($^{\circ}C$)

Ecuación 3. Ganancia térmica

De acuerdo con la ASHRAE 55, el rango para la temperatura de consigna en el verano es de 23 °C a 26 °. A partir de esto, se calculó el promedio y se definió la temperatura de consigna en 24.5 °C. Dicho dato permitió calcular la ganancia térmica (Q) para la condición inicial y la de propuesta térmica del edificio para cada mes del año.

C. Cálculo de la carga de enfriamiento del Edificio A

1. Conversión de unidades de ganancia térmica

Para iniciar con el cálculo de la carga de enfriamiento para el Edificio A bajo las dos condiciones el primer paso fue convertir la ganancia térmica de BTU/h.

$$1 \text{ tonelada de refrigeración} = 12,000 \text{ BTU/h}$$

Ecuación 4. Conversión tonelada de refrigeración a BTU/h

2. Consumo energético

Al conocer la ganancia térmica máxima por nivel en condiciones iniciales y con la propuesta de fachada ventilada, se procedió a determinar el consumo energético de ambas condiciones. Para esto se hizo la conversión de toneladas de refrigeración a kilovatios térmicos.

$$1 \text{ tonelada de refrigeración} = 3.517 \text{ kW térmicos}$$

Ecuación 5. Conversión tonelada de refrigeración a kW térmicos

Conociendo la cantidad de kilovatios térmicos total del Edificio A en ambas condiciones, se determinó el consumo energético anual al multiplicar los kilovatios térmicos por la cantidad de horas al día por la cantidad de días de funcionamiento anuales.

$$E = Q * h * d$$

Donde:

E = consumo energético anual (kWh/año)

Q = ganancia térmica (kW térmicos)

h = cantidad de horas al día que se utilizan los equipos de climatización (h)

d = cantidad de días al año que se utilizan los equipos de climatización (d)

Ecuación 6. Cálculo consumo energético anual

Para la cantidad de horas al día y días al año que se utilizan los equipos de climatización en el Edificio A en el Campus Central de la Universidad del Valle de Guatemala, se tomó en cuenta la jornada matutina y vespertina (12 horas) durante seis días a la semana.

$$\text{Costo} = E * t$$

Donde:

Costo = Costo económico (Q/año)

E = consumo energético anual (kWh/año)

t = tarifa de energía eléctrica vigente (Q/kWh)

Ecuación 7. Cálculo costo consumo energético anual

Para cuantificar la reducción en el costo económico que representa el consumo energético se multiplicó el monto que se redujo en el consumo energético por la tarifa vigente según el proveedor del área.

D. Cálculo de la huella de carbono generada anualmente

1. Cálculo de Gases de Efecto Invernadero (GEI) generados anualmente

Al contar con el consumo energético anual para las condiciones iniciales y para la propuesta de fachada ventilada, se procedió a calcular las emisiones de dióxido de carbono emitidas en ambos casos.

$$Emisiones\ GEI = E * Fe$$

Donde:

Emisiones GEI = emisiones de gas efecto invernadero ($kg\ CO_2$)

E = consumo energético anual (kWh/año)

Fe = factor de emisión de gases de efecto invernadero para Guatemala ($kg\ CO_2/kWh$)

Ecuación 8. Cálculo emisiones de gas de efecto invernadero (GEI)

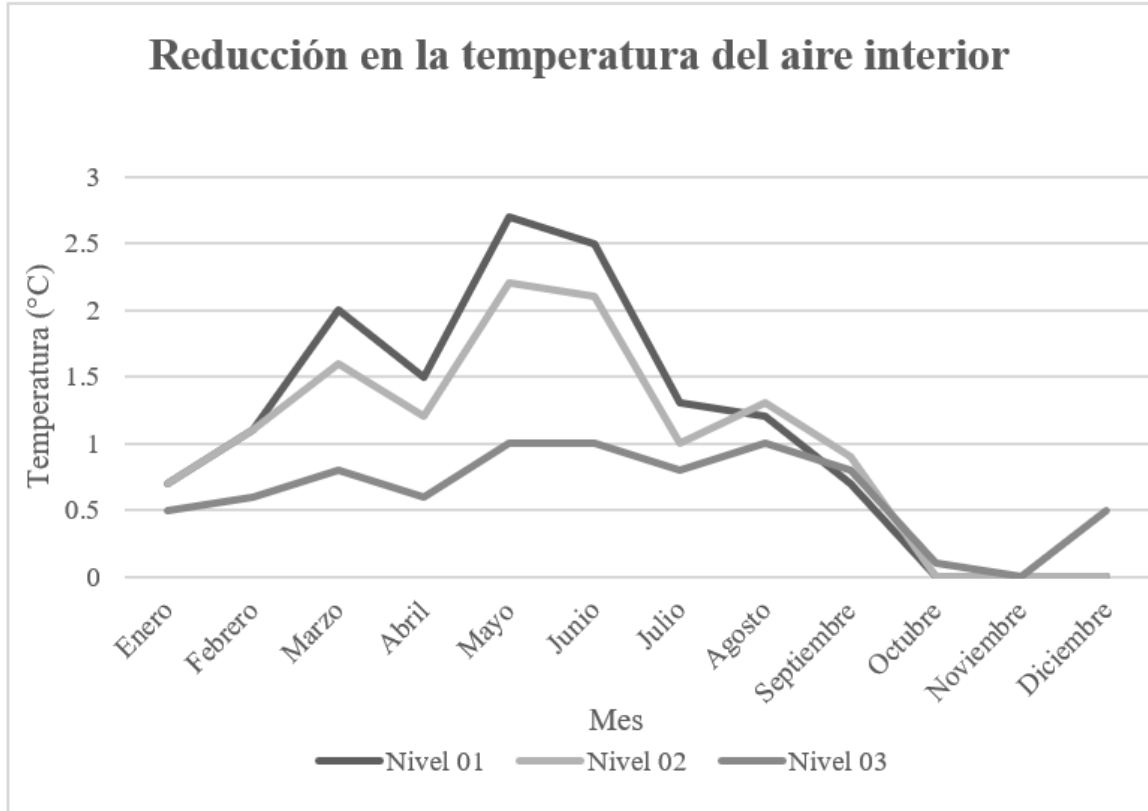
De acuerdo con el Balance Energético 2019 del Ministerio de Energía y Minas (MEM), el factor de emisión de gases efecto invernadero para la red eléctrica de Guatemala es de $0.3913\ kg\ CO_2e/kWh$.

VIII. RESULTADOS

A. Mejora en confort climático interior tras la implementación de la propuesta de fachada ventilada

Temperatura del aire interior (°C) según mes del año												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
T (°C) en condiciones iniciales Nivel 01	22.80	24.80	27.40	27.90	30.00	30.00	28.60	27.90	24.50	22.10	22.00	21.80
T (°C) con fachada ventilada Nivel 01	22.10	23.70	25.40	26.40	27.30	27.50	27.30	26.70	23.80	22.50	23.60	22.20
Reducción en T (°C) en Nivel 01	0.70	1.10	2.00	1.50	2.70	2.50	1.30	1.20	0.70	0.00	0.00	0.00
T (°C) en condiciones iniciales Nivel 02	22.90	25.40	28.30	28.70	31.40	31.10	29.20	28.30	24.70	21.90	21.70	21.80
T (°C) con fachada ventilada Nivel 02	22.20	24.30	26.70	27.50	29.20	29.00	28.20	27.00	23.80	22.10	22.90	21.80
Reducción en T (°C) en Nivel 02	0.70	1.10	1.60	1.20	2.20	2.10	1.00	1.30	0.90	0.00	0.00	0.00
T (°C) en condiciones iniciales Nivel 03	24.90	28.10	32.60	32.20	35.40	34.70	32.10	30.10	25.50	21.60	21.50	22.90
T (°C) con fachada ventilada Nivel 03	24.40	27.50	31.50	31.60	34.40	33.70	31.30	29.10	24.70	21.50	21.70	22.40
Reducción en T (°C) en Nivel 03	0.50	0.60	0.80	0.60	1.10	1.00	0.80	1.00	0.80	0.10	0.00	0.50
Reducción en T (°C) Promedio	0.63	0.93	1.47	1.10	1.97	1.87	1.03	1.17	0.80	0.03	0.00	0.17

Cuadro 25. Reducción en la temperatura del aire interior por mes al comparar las condiciones iniciales con la propuesta de fachada ventilada

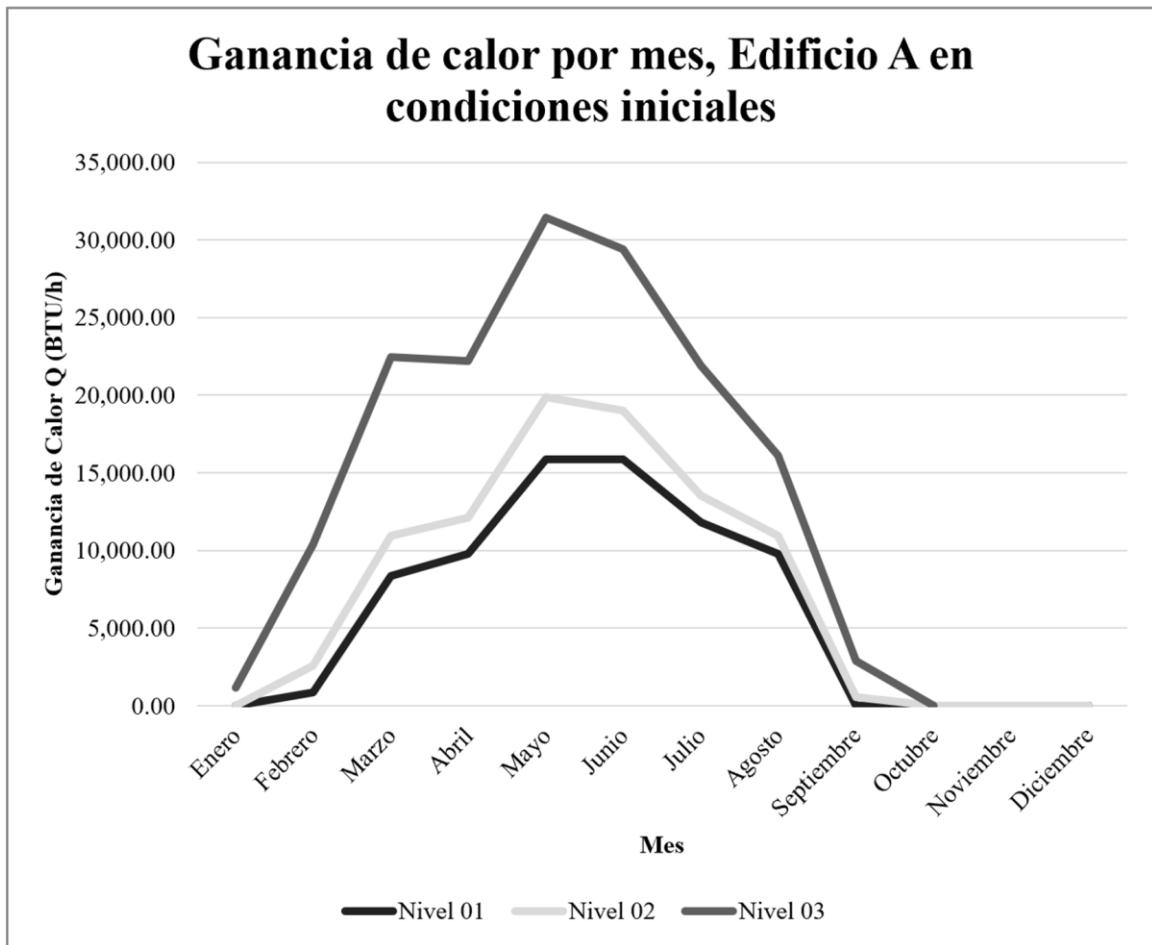


Gráfica 7. Comportamiento de la reducción en temperatura del aire interior al implementar la propuesta de fachada ventilada según el mes del año

B. Ganancia de calor sensible en el aire del Edificio A

Ganancia de calor en condiciones iniciales por nivel según mes del año en Edificio A												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
ΔT Nivel 01 (°C)	0.00	0.30	2.90	3.40	5.50	5.50	4.10	3.40	0.00	0.00	0.00	0.00
ΔT Nivel 02 (°C)	0.00	0.90	3.80	4.20	6.90	6.60	4.70	3.80	0.20	0.00	0.00	0.00
ΔT Nivel 03 (°C)	0.40	3.60	7.80	7.70	10.90	10.20	7.60	5.60	1.00	0.00	0.00	0.00
Ganancia de calor Nivel 01 (BTU/h)	0.00	864.68	8,358.53	9,799.65	15,852.38	15,852.38	11,817.23	9,799.65	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganancia de calor Nivel 02 (BTU/h)	0.00	2,594.03	10,952.55	12,105.45	19,887.53	19,022.85	13,546.58	10,952.55	576.45	0.00	0.00	0.00
Ganancia de calor Nivel 03 (BTU/h)	1,152.90	10,376.10	22,481.55	22,193.33	31,416.53	29,398.95	21,905.10	16,140.60	2,882.25	0.00	0.00	0.00

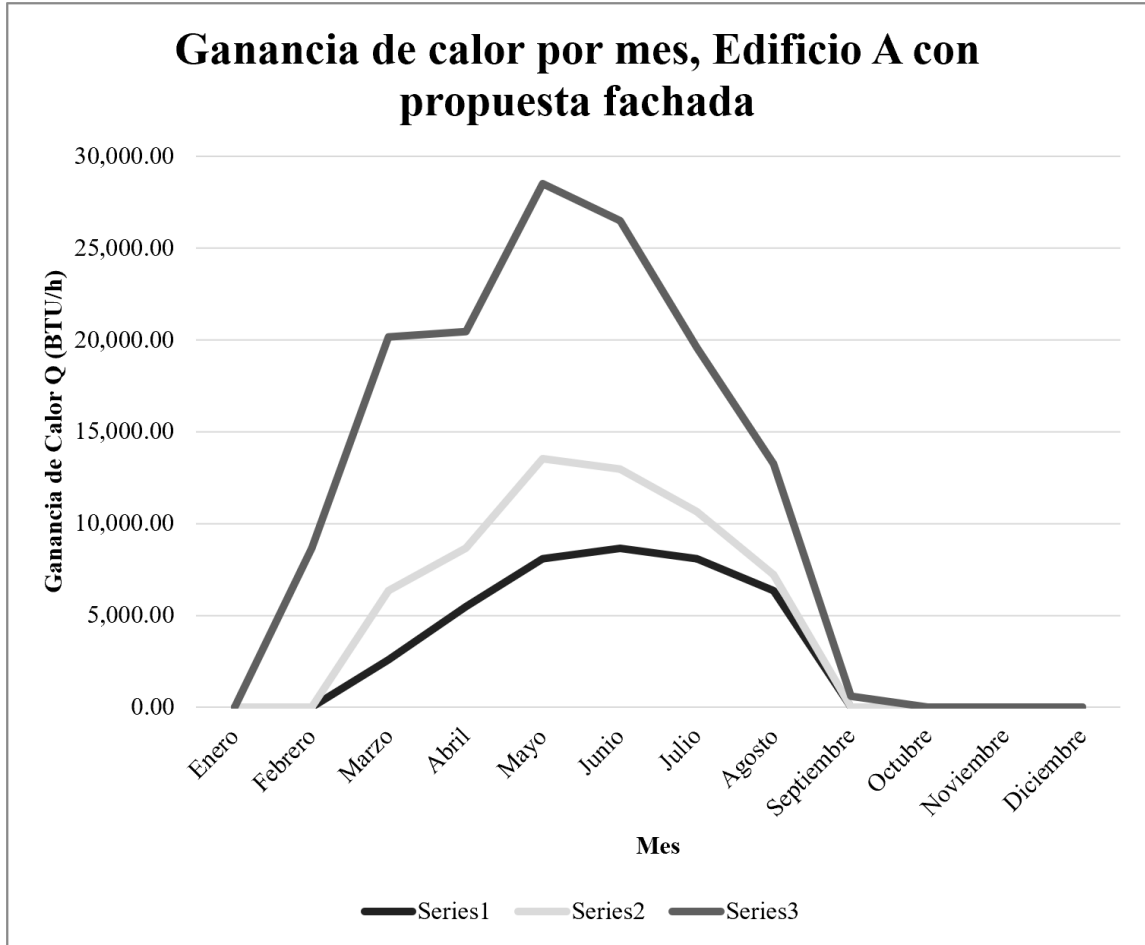
Cuadro 26. Ganancia de calor en condiciones iniciales por nivel según mes en el Edificio A



Gráfica 8. Ganancia de calor en condiciones iniciales por nivel según mes del año en el Edificio A

Ganancia de calor con propuesta de fachada ventilada por nivel según mes del año en Edificio A												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
ΔT Nivel 01 (°C)	0.00	0.00	0.90	1.90	2.80	3.00	2.80	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00
ΔT Nivel 02 (°C)	0.00	0.00	2.20	3.00	4.70	4.50	3.70	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
ΔT Nivel 03 (°C)	0.00	3.00	7.00	7.10	9.90	9.20	6.80	4.60	0.20	0.00	0.00	0.00
Ganancia de calor Nivel 01 (BTU/h)	0.00	0.00	2,594.03	5,476.28	8,070.30	8,646.75	8,070.30	6,340.95	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganancia de calor Nivel 02 (BTU/h)	0.00	0.00	6,340.95	8,646.75	13,546.58	12,970.13	10,664.33	7,205.63	0.00	0.00	0.00	0.00
Ganancia de calor Nivel 03 (BTU/h)	0.00	8,646.75	20,175.75	20,463.98	28,534.28	26,516.70	19,599.30	13,258.35	576.45	0.00	0.00	0.00

Cuadro 27. Ganancia de calor al implementar propuesta de fachada ventilada, por nivel según mes del año en el Edificio A



Gráfica 9. Ganancia de calor con propuesta de fachada ventilada, por nivel según mes del año en el Edificio A

C. Carga de enfriamiento del Edificio A

Ganancia térmica para condiciones iniciales Edificio A			
	Ganancia de calor en promedio anual (BTU/h)	Ganancia de calor crítica (toneladas de refrigeración)	Ganancia de calor crítica (kilovatios térmicos)
Nivel 01	6,028.71	0.50	1.77
Nivel 02	7,469.83	0.62	2.19
Nivel 03	13,162.28	1.10	3.86
	Total		7.81

Cuadro 28. Ganancia de calor crítica para el Edificio A en condiciones iniciales

Ganancia térmica para propuesta de fachada ventilada Edificio A			
	Ganancia de calor en promedio anual (BTU/h)	Ganancia de calor crítica (toneladas de refrigeración)	Ganancia de calor crítica (kilovatios térmicos)
Nivel 01	3,266.55	0.27	0.96
Nivel 02	4,947.86	0.41	1.45
Nivel 03	11,480.96	0.96	3.36
		Total	5.77

Cuadro 29. Ganancia de calor crítica para el Edificio A con propuesta de fachada ventilada

Consumo energético en condiciones iniciales y con propuesta de fachada ventilada para Edificio A			
Condiciones iniciales (kWh/año)	Propuesta fachada ventilada (kWh/año)	Reducción (kWh/año)	Reducción costo (Q/año)
29,347.53	21,680.16	7,667.37	11,194.36

Cuadro 30. Consumo energético del Edificio A en condiciones iniciales y con propuesta de fachada ventilada

D. Huella de carbono generada anualmente

Huella de carbono anual del Edificio A en condiciones iniciales y con propuesta de fachada ventilada			
Emisiones de Gas de Efecto Invernadero (GEI) (kg CO2)		Reducción (kg CO2/año)	Reducción (%)
Condiciones iniciales	Propuesta fachada ventilada		
11,483.69	8,483.45	3,000.24	26%

Cuadro 31. Reducción en la huella de carbono anual del Edificio A al implementar la propuesta de fachada ventilada

IX. DISCUSIÓN

A. Mejora en confort climático interior tras la implementación de la propuesta de fachada ventilada

El análisis mensual revela que la reducción de temperatura interior varía a lo largo del año, siendo más notoria en los meses con mayores cargas térmicas. Las reducciones más altas se observaron en mayo (1.97 °C), junio (1.87 °C) y abril (1.47 °C), lo cual evidencia la efectividad del sistema pasivo propuesto en momentos de mayor ganancia térmica por radiación solar. Por otro lado, durante los meses de menor exigencia térmica, como noviembre (0.00 °C) y octubre (0.03 °C), el impacto es prácticamente nulo.

Se demostró que el sistema de fachada ventilada propuesto actúa como una barrera térmica efectiva, disminuyendo la transferencia de calor hacia el interior del edificio y reduciendo así la temperatura del aire interior en los momentos más críticos del año. Aunque los valores de reducción oscilen entre 0 y 2 °C, incluso reducciones de 1.00 °C pueden representar mejoras significativas en la percepción del confort térmico, especialmente en climas cálidos.

Un aspecto relevante del análisis es que la mejora no fue uniforme en todos los niveles del edificio. Se evidenció una mayor reducción de temperatura en el primer nivel, seguida por el segundo nivel y, con un menor efecto en el tercero. Esto sugiere que la ganancia térmica en el tercer nivel está dominada por la radiación y conducción de calor a través de la cubierta de concreto, la cual no fue intervenida en este estudio con un sistema pasivo adicional. Este comportamiento resalta la importancia de considerar de forma integral todos los elementos envolventes del edificio (fachadas y cubiertas) cuando se busca mejorar el comportamiento térmico general.

B. Ganancia de calor sensible en el aire del Edificio A

A partir del análisis de temperatura interior, se evaluó la ganancia de calor sensible en el edificio como indicador directo de la carga térmica que deben compensar los sistemas de climatización. Bajo las condiciones iniciales del edificio, se observó que a mayor ganancia térmica se presentó durante el mes de mayo. En dicho mes, el primer nivel alcanzó una ganancia térmica de 15,852.38 BTU/h, el segundo nivel llegó a 19,887.53 BTU/h y el tercer nivel 31,416.53 BTU/h. Estos resultados reflejan una clara distribución vertical de la carga térmica, con un incremento desde el primer nivel hacia el tercero. Este comportamiento se puede atribuir principalmente a la exposición directa del tercer nivel a la radiación solar sobre la cubierta, la cual no fue intervenida con estrategias pasivas como lo fueron los cerramientos, esto la convierte en una fuente importante de transmisión de calor.

Con la implementación de la propuesta de fachada ventilada, se identificaron reducciones considerables en la ganancia de calor sensible. El primer nivel alcanzó una

ganancia térmica de 8,646.75 BTU/h, el segundo 13,546.58 BTU/h y el tercer nivel 28,534.28 BTU/h. Esto representa una reducción del 44.5 % en el primer nivel 31.9 % en el segundo nivel y 9.2 % en el tercer nivel. Este comportamiento evidencia que la fachada ventilada es más eficaz en los niveles donde las superficies de muro expuestas al exterior representan la mayor fuente de ganancia térmica como en el primer nivel. De forma contraria, en niveles donde la mayor incidencia térmica proviene de la cubierta, como en el tercero, su impacto es considerablemente menor.

C. Carga de enfriamiento del Edificio A

En la última etapa del análisis, se evaluó la carga de enfriamiento del Edificio A con el objetivo de cuantificar el impacto energético y ambiental de la implementación de la fachada ventilada. Se calculó que la ganancia de calor promedio en condiciones iniciales era de 7.81 kilovatios térmicos, mientras que luego de incorporar la fachada ventilada, esta se redujo a 5.77 kilovatios térmicos. Esta reducción representa una disminución significativa del 26% en la carga térmica máxima que el sistema de climatización debe compensar, lo que evidencia el aporte de la estrategia pasiva en la mejora del comportamiento térmico del edificio.

A partir de estos valores de carga, se estimó el consumo energético anual para la climatización. Bajo las condiciones iniciales, el consumo ascendía a 29,347.53 kWh/año, mientras que con la implementación de la propuesta de fachada ventilada, el valor disminuyó a 21,680.16 kWh/año. Esta diferencia se traduce a un ahorro de 7,667.37 kWh/año, lo cual representa una mejora significativa en el desempeño energético del edificio. Desde el punto de vista económico, esto implica un ahorro anual de Q11,194.36, lo que refuerza la viabilidad financiera de aplicar soluciones pasivas como lo son las fachadas ventiladas, en especial en edificaciones existentes con altos niveles de consumo energético por climatización.

Además del impacto energético y económico, se cuantificó el efecto ambiental de la intervención a través de la reducción de emisiones de dióxido de carbono. En las condiciones iniciales, el edificio generaba de forma anual 11,483.69 kg de CO₂, mientras que al implementar el sistema de fachada ventilada propuesto, esta cifra se redujo a 8,483.45 kg de CO₂, logrando una disminución de 3,000.24 kg de CO₂ anualmente, equivalente a una reducción del 26 %. Un valor especialmente relevante en el contexto actual de crisis climática, ya que las edificaciones representan una fracción considerable de las emisiones globales y locales de gases de efecto invernadero.

En conclusión, los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de una fachada ventilada permite reducir considerablemente la carga térmica, el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la climatización en edificios existentes. Esta estrategia pasiva no solo contribuye al confort térmico interior, sino que también ofrece beneficios económicos y ambientales, convirtiéndose en una herramienta

efectiva para avanzar hacia construcciones más sostenibles y resilientes en climas cálidos como el de la Ciudad de Guatemala.

X. CONCLUSIONES

- La implementación de la propuesta de fachada ventilada para el Edificio A genera una mejora térmica significativa, logrando reducir la temperatura interior promedio hasta en 1.97 °C durante los meses más cálidos del año.
- La estrategia de fachada ventilada permite reducir la ganancia de calor sensible que el Edificio A experimenta en los meses críticos. La ganancia máxima, que en condiciones iniciales alcanzaba los 31,416.53 BTU/h en el nivel 3, se redujo a 28,534.28 BTU/h, en el nivel 2 pasó de 19,887.53 BTU/h a 13,546.58 BTU/h y en el primer nivel de 15,852.38 BTU/h a 8,646.75 BTU/h. Esto representa una disminución tangible en la demanda térmica del edificio.
- La reducción en la carga térmica del Edificio A se traduce a un menor requerimiento de energía para climatización. Se estimó que el consumo energético anual por enfriamiento disminuyó de 29,347.53 kWh/año a 21,680.16 kWh/año al implementar la propuesta de fachada ventilada. Esto representa un ahorro del 26.1 %. Esta mejora se traduce a un beneficio económico directo, con un ahorro estimado de Q11,194.36 al año, mejorando la rentabilidad del sistema implementado a largo plazo.
- En términos ambientales, la intervención al Edificio A representa una contribución a la mitigación del cambio climático. Las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la climatización pasaron de 11,483.69 kg de CO₂/año a 8,483.45 kg de CO₂/año, alcanzando una reducción de 3,000.24 kg de CO₂/año (26 %).
- El uso de soluciones pasivas como el sistema de fachada ventilada propuesto, representa una alternativa efectiva y replicable en climas cálidos como el de la Ciudad de Guatemala, permitiendo alcanzar el confort térmico interior sin recurrir exclusivamente a sistemas activos de climatización.

XI. RECOMENDACIONES

- Considerar el uso de materiales locales para la construcción de fachadas ventiladas, para reducir el impacto ambiental asociado al transporte y fabricación de los elementos. Seleccionar materiales con bajo contenido energético y huella de carbono para contribuir a la sostenibilidad del proyecto.
- Implementar estrategias pasivas como la propuesta de fachada ventilada desde la etapa de diseño arquitectónico, especialmente en climas cálidos como en el Ciudad de Guatemala.
- Realizar análisis energéticos antes de intervenir edificaciones existentes, utilizando herramientas de simulación.
- Para alcanzar una edificación con mayor sostenibilidad, considerar combinar múltiples soluciones de climatización pasiva, además del sistema de fachada ventilada.
- Realizar un seguimiento posterior a la intervención para evaluar el desempeño real de la fachada ventilada en condiciones de uso, al comparar los resultados medidos con las simulaciones realizadas. A partir de esta retroalimentación, se pueden validar modelos y ajustar futuras estrategias de diseño.

XII. BIBLIOGRAFÍA

- Aelca. (2019, 13 agosto). *Envolventes arquitectónicas de los edificios*. AELCA. <https://www.aelca.es/es/nuestro-blog/envolventes-arquitectonicas/>
- Arquitecturar. (2024, 2 febrero). *¿Cómo funciona una fachada ventilada?* Arquitecturar. <https://www.arquitecturar.com/funcionamiento-fachada-ventilada/?cn-reloaded=1>
- ASHRAE. (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55>
- ASHRAE. (2017). *2017 ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI ed.)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Banco Mundial. (2023, 4 abril). *Guatemala Panorama general*. World Bank. Recuperado 28 de septiembre de 2023, de <https://www.bancomundial.org/es/country/guatemala/overview>
- Bin, H. (2021). “¡El que compró casa se rayó!”: *Suben los precios de la vivienda por inflación*. Con Criterio. <https://concritorio.gt/el-que-compro-casa-se-rayo-suben-los-precios-de-la-vivienda-por-inflacion/>
- Bolaños, R. M. (2025, 1 febrero). *Estas son las nuevas tarifas de energía eléctrica a partir del 1 de febrero del 2025, aprobadas por la CNEE*. Prensa Libre. <https://www.prensalibre.com/economia/estas-son-las-nuevas-tarifas-de-energia-electrica-a-partir-del-1-de-febrero-del-2025-aprobadas-por-la-cnee/#:~:text=la%20tarifa%20de%20eegsa%20sube,0.9%25%2C%20que%20representan%20q0.>
- BREEAM ES. (2023, 19 enero). *BREEAM España. desde 2010 certificando la construcción sostenible*. BREEAM® ES. [https://breeam.es/breeam-espana/#:~:text=BREEAM%20AE%20\(Building%20Research%20Establishment,desde%20su%20creaci%C3%B3n%20en%201990.](https://breeam.es/breeam-espana/#:~:text=BREEAM%20AE%20(Building%20Research%20Establishment,desde%20su%20creaci%C3%B3n%20en%201990.)
- Certicalia. (s. f.). *¿Qué es la certificación LEED?*. Recuperado 10 de octubre de 2023, de <https://www.certicalia.com/certificacion-leed/que-es-la-certificacion-leed>
- Climalit España. (2020, 23 enero). *Transmitancia térmica: ¿Cómo se calcula*. Blog Climalit. <https://climalit.es/blog/transmitancia-termica-se-calcula/>
- COPROVEN. (2023, 15 marzo). *Procesos de un sistema de climatización*. COPROVEN. [https://coproven.com/procesos-de-un-sistema-de-climatizacion/#:~:text=La%20climatizaci%C3%B3n%20es%20el%20proceso,y%20aire%20acondicionado%20\(HVAC\).](https://coproven.com/procesos-de-un-sistema-de-climatizacion/#:~:text=La%20climatizaci%C3%B3n%20es%20el%20proceso,y%20aire%20acondicionado%20(HVAC).)
- Cosentino España. (2023, 31 mayo). *Conductividad térmica: qué es y materiales*. <https://www.cosentino.com/es/blog/conductividad-termica-que-es-y-materiales/#:~:text=El%20valor%20de%20conductividad%20t%C3%A9r>

[mica,el%20material%20ser%C3%A1%20m%C3%A1s%20aislante.condiciones](#)

- CYPE. (2023, 13 diciembre). *CYPETHERM HE Plus*.
<https://info.cype.com/es/producto/cypetherm-he-plus/#documento-reconocido-para-la-certificacion-de-eficiencia-energetica-6fc79f61-fc2f-4be1-94b8-6d7cbce41f69>
- De Belza, R. C. (2025, 31 enero). *IFC Builder*.
CYPE. <https://info.cype.com/es/producto/ifc-builder/>
- De Belza, R. C. (2025, febrero 10). *CYPETHERM HE Plus*. CYPE.
<https://info.cype.com/es/producto/cypetherm-he-plus/>
- DETAILGreen. (2011). *Sustainability in the desert / The window of the future / Air-conditioning systems: a comparison*. DETAIL Green.
- Doalco. (2022, 8 agosto). *¿Para qué se utiliza el vidrio en la construcción?* Claves.
<https://www.doalco.com/innovacion/para-que-se-utiliza-el-vidrio-en-construccion/#:~:text=El%20uso%20del%20vidrio%20permite,grados%20de%20traslucidez%20y%20opacidad.>
- EDGE. (s. f.). *Certificación EDGE*. <https://edge.gbci.org/certification>
- EDP Energía España. (2023, 14 noviembre). *Todo sobre la Irradiación Solar*. EDP Blog.
<https://www.edpenergia.es/es/blog/energia-fotovoltaica/irradiacion-solar/>
- Ferrovial. (2021, 29 junio). *Materiales de construcción: propiedades y tipos*.
<https://www.ferrovial.com/es/recursos/materiales-construccion/>
- García, Á. S. (2024, 14 febrero). *Tipos de fachadas ventiladas y tendencias*. Reto KÖMMERLING. <https://retokommerling.com/fachadas-ventiladas-tipos-tendencias/>
- Gaya. (s. f.). *5 Tendencias de construcción sustentable*. <https://blog.gaya.mx/5-tendencias-de-construccion-sustentable>
- Gestión Del Amianto. (2023, 16 mayo). *Fibrocemento | Características y usos de las placas* | GDA. La Plataforma del Amianto de España.
<https://gestiondelamianto.com/placas-fibrocemento/>
- Hormuk. (2023, 24 mayo). *¿Qué es y como mejorar la envolvente térmica de un edificio?* - Hormuk. <https://www.aislamientodefachadas.com/envolvente-termica/>
- HORMUK SL. (2022, 8 abril). *¿Qué son los puentes térmicos y cómo evitarlos?* Hormuk Aislamiento de Fachadas. <https://www.aislamientodefachadas.com/puentes-termicos/>
- INSIVUMEH. (s. f.). *PERSPECTIVA CLIMÁTICA*. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología E Hidrología).
<https://insivumeh.gob.gt/?p=13162/>
- Keobra. (s. f.). *Clasificación de los materiales de construcción*.
<https://keobra.com/construye/planea/materiales/clasificacion-de-los-materiales-de-construccion>

- Lapitec S.p.A. (s.f.). *Fachadas ventiladas: Manual de diseño y colocación*. Recuperado de <https://www.lapitec.com/ContentsFiles/ES-Fachadas-Ventiladas-Manual-de-diseno-y-colocacion-Vers-02020-ES.pdf>
- Lustig, A. (2023, 8 agosto). *¿Sabes qué es una técnica pasiva en climatización?* *Climaideal*. MAPFRE Global Risks. (2021). Doce innovaciones tecnológicas en construcción. MAPFRE Global Risks. <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/doce-innovaciones-tecnologicas-en-construccion/>
- Marquez, D. (2023, 21 noviembre). *Tipos de fachadas: comparativa y características*. Cupa Pizarras. <https://www.cupapizarras.com/es/actualidad/tipos-de-fachadas/>
- Marquez, D. (2024, 23 febrero). *Qué es una fachada ventilada y cuáles son sus ventajas*. Cupa Pizarras. https://www.cupapizarras.com/es/actualidad/fachada-ventilada-funcionamiento-ventajas/#Muro_soporte
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible República de Colombia. (2022, 6 octubre). *Construcción Sostenible - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado 10 de octubre de 2023, de <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible/#:~:text=Las%20edificaciones%20sostenibles%20se%20consideran,dis e%C3%B1os%20de%20bioarquitectura%20y%20t%C3%A9cnicas>
- Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. (2020). *Balance energético 2019*. <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/11/BALANCE-ENERGETICO-2019-1.pdf>
- Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. (2020, enero). *Cálculo de parámetros característicos de la envolvente*. Documento de Apoyo Al Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía.
- Moreras, N. (2022, 27 diciembre). *Qué son las fachadas ventiladas y por qué ahorran energía en los hogares*. hola.com. <https://www.hola.com/decoracion/galeria/20221227223598/fachadas-ventiladas-que-son-ventajas-nu/2/>
- MS Ventanas. (s.f.). *Acristalamiento doble*. <https://msventanas.es/acristalamiento-doble>
- Noticias ONU. (2022, 9 noviembre). *Las emisiones históricas del sector de la construcción, lo alejan de los objetivos de descarbonización*. Recuperado 11 de octubre de 2023, de <https://news.un.org/es/story/2022/11/1516722>
<https://climaideal.es/blogs/noticias/sabes-que-es-una-tecnica-pasiva-en-climatizacion>
- Rodríguez, M. (2023). *Nuevos materiales de construcción sostenibles*. PlanRadar. <https://www.planradar.com/es/materiales-construccion-sostenibles/>
- Sistema de la Integración Centroamericana (SICA). (s. f.). *Perspectiva climática regional*. Sistema de la Integración Centroamericana. <https://www.sica.int/clima/perspectiva#:~:text=La%20Perspectiva%20del%20Clima%20es,los%20patrones%20de%20viento%2C%20presi%C3%B3n>

- Sikra, S. (2020, 22 julio). *How does construction impact the environment?* .GoContractor. GoContractor. <https://gocontractor.com/blog/how-does-construction-impact-the-environment/>
- Terrapilar. (2018, 18 julio). *Material de construcción estrella: la cerámica.* <https://www.terrapilar.com/blog/material-de-construccion-ceramica/>
- USGC. (s. f.). *LEED Rating System | U.S. Green Building Council.* Recuperado 7 de octubre de 2023, de <https://www.usgbc.org/leed#:~:text=LEED%20certification%20is%20a%20global,lower%20our%20exposure%20to%20toxins.>
- VEKA Ibérica. (2023, 3 enero). *Ventanas de PVC con perfiles VEKA: aislamiento y calidad.* VEKA Iberica. <https://www.veka.es/ventanas-de-pvc-con-perfiles-veka-aislamiento-y-calidad/>