



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE HERRAMIENTAS DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

POR

Ana Elizabeth Lagos Benítez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Ingeniero mecánico y Doctor en ciencias mecánicas Cristian Cuevas Barraza
Ingeniero mecánico Javier Piedra Fierro

Agosto 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Ana Elizabeth Lagos Benítez

Agradecimientos

Doy gracias por haber tenido la oportunidad de cursar esta carrera universitaria y en esta universidad, agradezco al profesor Javier Piedra Fierro por su confianza y a los profesor Cristian Cuevas y Adelqui Fissore por su apoyo.

Doy gracias por todas las personas que he conocido en este periodo, profesores, amigos, compañeros y conocidos. Todos ayudaron a expandir mis horizontes tanto personal, mental/académico como espiritual.

Doy gracias por siempre contar con el apoyo de mis padres, y su amor incondicional.

Esta memoria está dedicada...

A mi tata, que soñaba con verme titulada, sé que ahora él está apoyándome y viéndome crecer.

A mi lela que de pequeña me incentivó mi independencia, a mis papás que me apoyan en cada etapa que doy. Y finalmente dedico esta memoria a mí misma que muchas veces pensó que no era su camino, pero ahora sé que sí.

Resumen

En vista del contexto medioambiental y energético tanto a nivel nacional como mundial, una de las soluciones más llamativas es la eficiencia energética. En el ámbito de la construcción, existen varias opciones cuando se habla de eficiencia energética, una de las cuales es reducir las pérdidas de calor a través de la envolvente del edificio. Muchas veces para llevar a cabo un proyecto eficiencia energética se realizan simulaciones con softwares para analizar la viabilidad de este. En este trabajo se comparan dos herramientas de simulación energética: BEET, una herramienta de desarrollo, y OpenStudio, un programa certificado. Se estudiaron dos edificios, con los que se realizaron una serie de simulaciones con estos dos programas relacionados con el mejoramiento de aislación y así analizar el comportamiento de BEET con sus posibles mejoras. El análisis revela que el factor que más influye en la diferencia de los cálculos de la demanda de calefacción a lo largo de un año entre las herramientas es la capacidad de OpenStudio para crear modelos 3D detallados de los edificios. Esta función permite representar con mayor precisión la geometría y las características de los edificios, lo que da lugar a simulaciones más fiables. Los resultados indican que, a medida que mejora la envolvente térmica de un edificio, ambas herramientas proyectan ahorros energéticos significativos y de orden cercanos, lo que subraya la importancia de un diseño de envolvente de alta calidad en los edificios energéticamente eficientes. Sin embargo, BEET podría beneficiarse de mejoras, como la posibilidad de introducir las condiciones climáticas específicas de la localidad o ciudad donde se ubican los edificios, así como la orientación real de los mismos. Estas mejoras permitirían realizar simulaciones más localizadas y precisas.

Palabras clave: eficiencia energética, transmitancia térmica, herramientas de simulación, demanda térmica.

Abstract

In view of the environmental and energy context both nationally and globally, one of the most striking solutions is energy efficiency. In the field of construction, there are several options when talking about energy efficiency, one of which is to reduce heat losses through the building envelope. Often, in order to carry out an energy efficiency project, simulations are carried out with software to analyze the feasibility of the project. In this work, two energy simulation tools are compared: BEET, a development tool, and OpenStudio, a certified program. Two buildings were studied and a series of simulations were carried out with these two programs related to insulation improvement in order to analyze the performance of BEET with its possible improvements. The analysis reveals that the most influential factor in the difference in heating demand calculations over a year between the tools is the ability of OpenStudio to create detailed 3D models of the buildings. This feature allows for more accurate representation of building geometry and features, resulting in more reliable simulations. The results indicate that as a building's thermal envelope improves, both tools project significant and near-order energy savings, underscoring the importance of high-quality envelope design in energy-efficient buildings. However, BEET could benefit from improvements, such as the ability to input the specific climatic conditions of the locality or city where the buildings are located, as well as the actual orientation of the buildings. These improvements would allow for more localized and accurate simulations.

Keywords: energy efficiency, thermal transmittance, simulation tools, thermal demand.

Tabla de Contenidos

| | |
|---|-----|
| Tabla de Contenidos | iii |
| Lista de Tablas | iv |
| Lista de Figuras | v |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Contexto energético Mundial | 1 |
| 1.2 Contexto Nacional, legislaciones y Norma Nch 853..... | 2 |
| 1.3 Objetivo general | 4 |
| 1.4 Hipótesis | 4 |
| 2 Metodología | 5 |
| 2.1 Mejoras a simular en la envolvente de los edificios | 8 |
| 2.2 Simulación Open Studio y SketchUp | 9 |
| 2.3 Simulación con herramienta de C2E2 | 13 |
| 3 Estado del Arte | 15 |
| 3.1 Herramientas de simulación energética en la investigación y la práctica profesional | 15 |
| 3.2 Referencia de los cálculos de Energy Plus | 15 |
| 3.3 Referencia de los cálculos de BEET..... | 17 |
| 4 Evaluación y presentación de resultados..... | 19 |
| 4.1 Resultados veterinaria y municipalidad condiciones originales..... | 19 |
| 4.2 Resultados veterinaria al ir mejorando la aislación de la envolvente..... | 22 |
| 4.3 Resultados de la municipalidad al ir mejorando la aislación de la envolvente | 28 |
| 4.4 Influencia de azimut en la simulación | 34 |
| 4.5 Modelación simple de los edificios en Open Studio | 35 |
| 5 Conclusiones | 39 |
| Referencias | 40 |
| Anexo 1: Materiales simulados | 42 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: extraída de BEET | 17 |
| Tabla 2: Resultados Resistencias y transmitancias de los programas utilizados | 19 |
| Tabla 3: Resultados transmitancias y resistencias térmicas del techo de la veterinaria en los programas | 19 |
| Tabla 4: Características de las ventanas simuladas en veterinaria | 19 |
| Tabla 5: Características de las ventanas simuladas en municipalidad | 19 |
| Tabla 6: Consumo en calefacción de los edificios en condiciones iniciales | 20 |
| Tabla 7: Simulación veterinaria igualando transmitancias en los programas | 20 |
| Tabla 8: Simulación municipalidad igualando transmitancias en los programas | 21 |
| Tabla 9: Simulación veterinaria envolvente concreto | 21 |
| Tabla 10: Resultados simulación mejoramiento de transmitancia de techo veterinaria | 22 |
| Tabla 11: Resultados simulación aislación en muros veterinaria | 23 |
| Tabla 12: Resultados simulación cambio de ventanas veterinaria | 25 |
| Tabla 13: Resultados simulación veterinaria con cambio de ventana y aislamiento en muros | 26 |
| Tabla 14: Resultados mejoramiento completo de la envolvente en veterinaria | 28 |
| Tabla 15: Resultados al simular aislación en techo de municipalidad | 28 |
| Tabla 16: Resultados al simular aislación en muros de municipalidad | 30 |
| Tabla 17: Resultados simulación cambio de ventanas en municipalidad | 31 |
| Tabla 18: Resultados de la simulación cambio de ventanas en municipalidad | 32 |
| Tabla 19: Resultados de simulación cambio de envolvente completa municipalidad | 34 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: IDH vs Energía primaria por persona en GJ 2021. Fuente: AnuarioCNE2022 [3]..... | 1 |
| Figura 2: Matriz energética primaria de Chile 2022 Fuente: Elaboración propia con datos del Balance de ministerio de energía 2023 [8]..... | 2 |
| Figura 3: Consumo sectorial año 2022. Fuente: Elaboración propia con datos del Balance del ministerio de energía 2023 [8] | 3 |
| Figura 4: vista de elevación veterinaria..... | 5 |
| Figura 5: Fachada principal veterinaria..... | 6 |
| Figura 6: Fachada principal municipalidad – muro Oeste | 7 |
| Figura 7: Muro Norte Municipalidad | 7 |
| Figura 8: Ubicación Veterinaria y Municipalidad..... | 7 |
| Figura 9: Capas Sistema EIFS. Fuente:[13] | 8 |
| Figura 10: características de la solución térmica para ventanas, pestaña Beet | 9 |
| Figura 11: Vidrio low-e..... | 9 |
| Figura 12: Ventana principal del programa Open Studio | 10 |
| Figura 13: Modelo 3D Veterinaria dibujado en Sketchup | 11 |
| Figura 14: Modelo 3D Municipalidad fachada principal | 11 |
| Figura 15: Veterinaria renderizada según condiciones de contorno | 12 |
| Figura 16: renderización condiciones de contorno Veterinaria interior y exterior | 12 |
| Figura 17: Municipalidad renderizada según materiales de construcción | 13 |
| Figura 18: Primera ventana de entrada de datos BEET | 14 |
| Figura 19: Estructura general de EnergyPlus [15] | 15 |
| Figura 20:Estructura de administrador de soluciones integradas [16] | 17 |
| Figura 21: Cuadro ingreso de datos muros BEET..... | 20 |
| Figura 22: Consumo de GLP respecto a transmitancia térmica del techo de la veterinaria, resultados BEET..... | 22 |
| Figura 23: Consumo de GLP respecto a transmitancia térmica del techo de la veterinaria, resultados Open Studio..... | 23 |
| Figura 24: Comparación del consumo respecto de la disminución de la transmitancia térmica muros en la veterinaria - resultados BEET..... | 24 |
| Figura 25: Comparación del consumo respecto de la disminución de la transmitancia térmica muros en la veterinaria – resultados Open Studio..... | 24 |
| Figura 26: Comparación del consumo al realizar cambio de ventanas en la veterinaria – BEET | 25 |
| Figura 27: Comparación del consumo al realizar cambio de ventanas en la veterinaria - OpenStudio | 26 |
| Figura 28: Consumo GLP respecto a la transmitancia térmica de muros y ventanas – resultados BEET | 27 |
| Figura 29: Consumo de GLP respecto a la transmitancia de muros y ventanas - resultados Open Studio | 27 |
| Figura 30: Comparación de consumos entre programas | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 31: Consumo de GLP respecto de la transmitancia térmica del techo – Municipalidad BEET | 29 |
| Figura 32: Consumo de GLP respecto la transmitancia térmica del techo - Municipalidad - Open Studio | 29 |
| Figura 33: Consumo de GLP respecto a la transmitancia en muros – Municipalidad – BEET | 30 |
| Figura 34: Consumo de GLP respecto a la transmitancia en muros - municipalidad- Open Studio.. | 31 |
| Figura 35: Comparación del consumo al realizar cambio de ventanas en la municipalidad – BEET | 32 |
| Figura 36: Comparación del consumo al realizar cambio de ventanas en la municipalidad – OpenStudio..... | 32 |
| Figura 37: Consumo de GLP respecto a la transmitancia de muros y ventanas - municipalidad – BEET | 33 |
| Figura 38: Consumo de GLP respecto de la transmitancia en muros y ventanas - municipalidad - Open Studio | 33 |
| Figura 39: Comparación consumo entre programas al proyectar cambio completo de la envolvente | 34 |
| Figura 40: Comparación de consumo en calefacción al igualar la orientación en los programas. | 35 |
| Figura 41: Comparación de consumo al igualar orientación en los programas | 35 |
| Figura 42: Veterinaria modelo 3D simplificado | 36 |
| Figura 43: Veterinaria modelo 3D original | 36 |
| Figura 44: Comparación de consumos al simplificar modelo 3D en OpenStudio - veterinaria..... | 37 |
| Figura 45: Municipalidad modelo 3D simplificado | 37 |
| Figura 46: Municipalidad modelo 3D original..... | 38 |
| Figura 47: Comparación de consumos al simplificar modelo 3D en OpenStudio – municipalidad ... | 38 |

1 Introducción

1.1 Contexto energético Mundial

El abuso del ser humano en el uso de los recursos naturales, en especial para sus fuentes de energía, ha tenido importantes repercusiones en el clima, situaciones que han llevado a deterioro acelerado de los recursos naturales y a un estado de desigualdad ambiental prominente [1]. Una sociedad con un crecimiento tecnológico exponencial, junto con un aumento de la población mundial se convierte en una amenaza para un seguro intercambio entre la sostenibilidad y el equilibrio ambiental. En otras palabras, la relación entre el crecimiento demográfico y el suministro necesario energético están muy relacionados con el aumento del consumo energético [2].

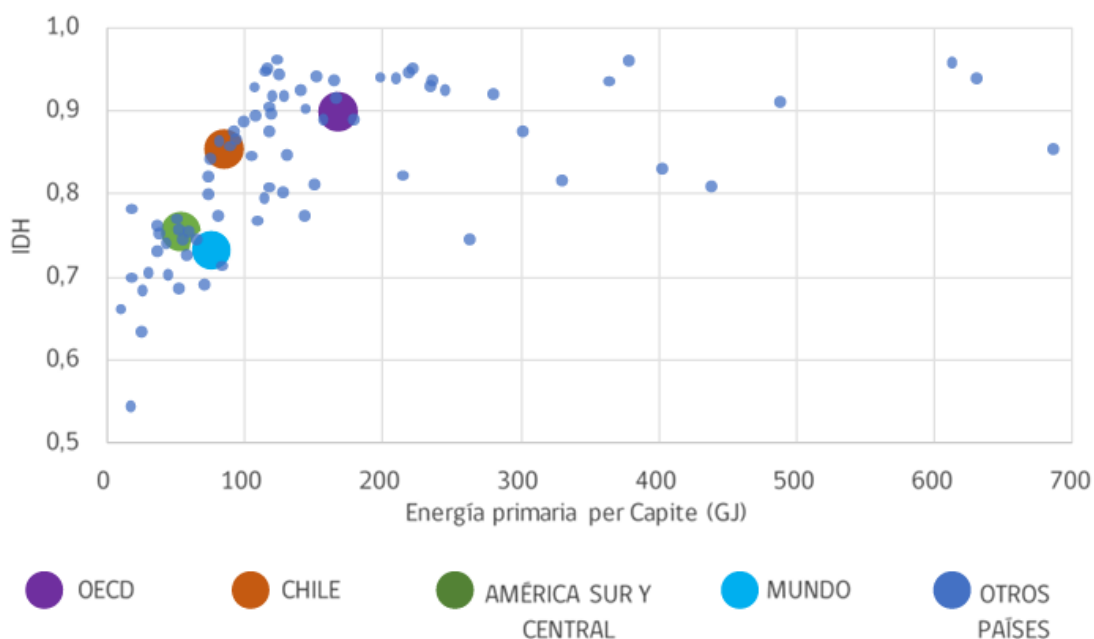


Figura 1: IDH vs Energía primaria por persona en GJ 2021. Fuente: AnuarioCNE2022 [3]

El Índice de Desarrollo Humano (IDH) es elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Este índice estima el progreso de un país, considerando indicadores como la esperanza de vida, el nivel educativo y el estándar de vida. En la Figura 1, se observa cómo a mayor consumo de energía por persona en un mayor IDH.

El Informe Especial IPCC sobre El calentamiento global de 1,5 °C, publicado en 2019, señala que el sector energético es responsable del 35% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial [4]. En 2018, el sector de la energía en Chile contribuyó con el 77% de las emisiones totales del país, de acuerdo con el Ministerio del Medio Ambiente, 2021 [5]. El concepto de eficiencia energética es una tendencia emergente a nivel mundial y nacional, principalmente porque es la opción menos costosa para cumplir con las obligaciones nacionales en relación con el cambio climático. [6]

A nivel mundial, se han logrado acuerdos significativos en relación con la eficiencia energética, destacando el "Compromiso Global sobre Energías Renovables y Eficiencia Energética" establecido

durante la Cumbre Mundial de Acción Climática (COP28). Este compromiso, respaldado por 118 países y liderado por la Comisión Europea, tiene como metas triplicar la capacidad instalada de energía renovable a al menos 11 TW y duplicar las mejoras globales en eficiencia energética de un 2% a un 4% anual para 2030 [7]. Además, se han implementado iniciativas y normativas como la Norma ISO 50001 y el International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP) que establecen estándares para medir y calcular la eficiencia energética. Organismos internacionales como el Banco Mundial y la Unión Europea también desempeñan un papel crucial al promover programas y financiamiento para impulsar la eficiencia energética en diversos sectores, contribuyendo así a un uso más sostenible y responsable de los recursos energéticos a nivel global [6].

1.2 Contexto Nacional, legislaciones y Norma Nch 853

El último balance del ministerio de Energía publicado el 2023, pero cuyos datos corresponden al año anterior (2022), muestra que Chile es un país altamente dependiente de los combustibles fósiles para satisfacer su demanda energética [8]. Esta situación como país nos hace vulnerables a las fluctuaciones de precios y a los impactos del cambio climático.

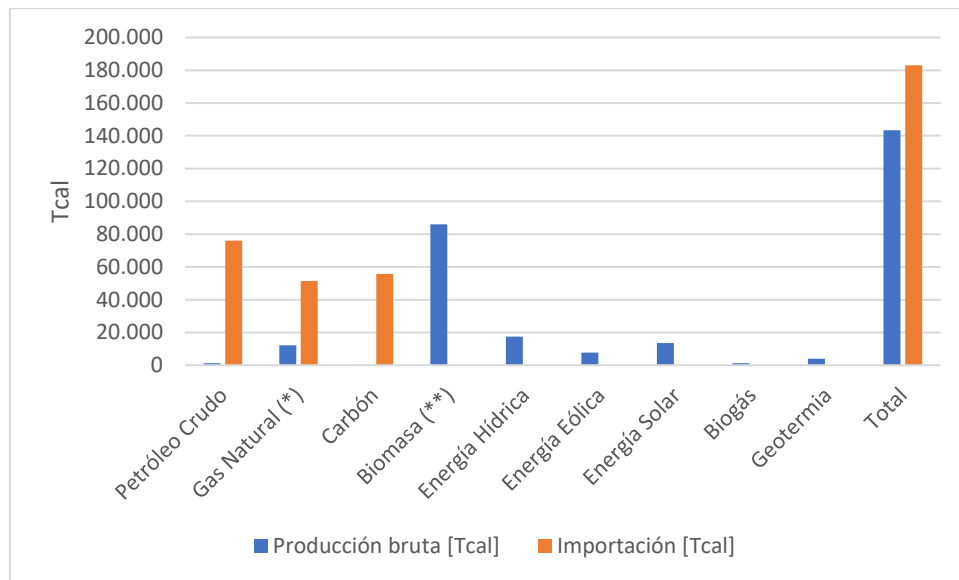


Figura 2: Matriz energética primaria de Chile 2022 Fuente: Elaboración propia con datos del Balance de ministerio de energía 2023 [8]

Es por esto por lo que el gobierno ha asumido el compromiso de avanzar hacia una matriz energética más limpia, diversa y eficiente. Para orientar este proceso, el Gobierno de Chile elaboró y publicó en 2015 la Política Energética 2050, que propone una visión del sector energético al 2050 confiable, sostenible, inclusivo y competitivo; sustentándose en cuatro pilares: seguridad y calidad de suministro, energía como motor de desarrollo, compatibilidad con el medio ambiente, eficiencia y educación energética [4]. Para implementar la Política Energética 2050, el gobierno ha desarrollado diversos instrumentos normativos, regulatorios, económicos e institucionales. Entre estos instrumentos se encuentran la Ley de Generación Distribuida, la Ley de Eficiencia Energética, la Ley de Transmisión Eléctrica, el Plan Nacional de Electromovilidad, el Plan Nacional de Hidrógeno Verde, el Plan

Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Sector Energía, el Plan Nacional de Educación Energética y el Plan Nacional de Descarbonización del Sector Eléctrico.

Estas medidas ya están dando frutos, el balance de la Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento ACERA, mostró que se produjo un aumento de generación eléctrica a partir de energía renovables reconocida para el cumplimiento de la Ley ERNC, aumento que correspondió a un 36,3% del total de la generación eléctrica, con una disminución de la generación térmica de un 6,5% [9]. Por otra parte, el Anuario Estadístico correspondiente al año 2023 mostró un aumento de la capacidad instalada de generación en el Sistema Eléctrico Nacional, en el que se incorporó un total de 1.058 MW entre 2022 y 2023, donde la energía solar fotovoltaica subió su participación de 24% a 26%, mientras que el aporte de las centrales a carbón bajó de 13% a 11% en el mismo periodo. [10]

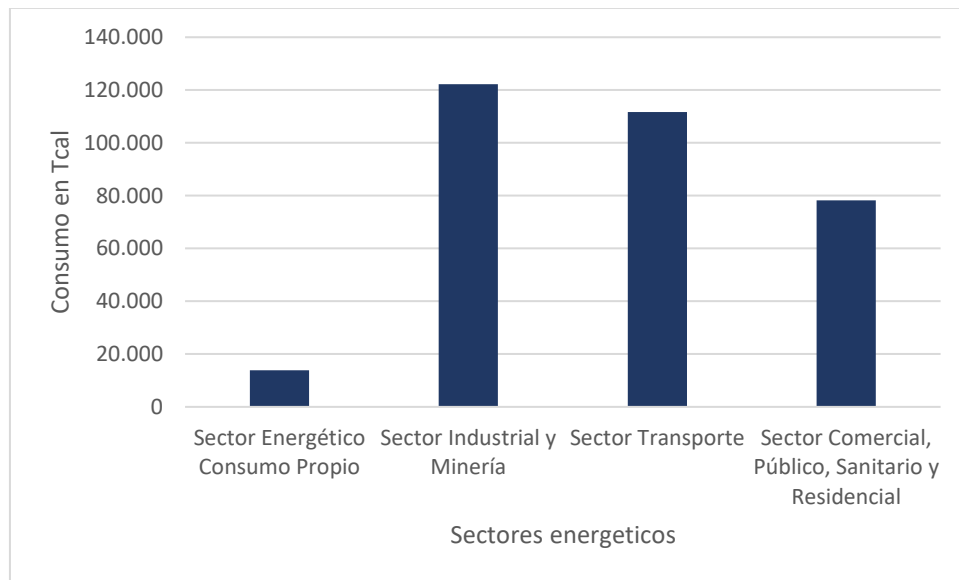


Figura 3: Consumo sectorial año 2022. Fuente: Elaboración propia con datos del Balance del ministerio de energía 2023 [8]

En la figura 3, podemos ver el consumo energético por sector en el año 2022 en Chile, para este trabajo es relevante el sector comercial, público, sanitario y residencial, que representan un 23,8% del consumo energético a nivel nacional según el BNE 2022 [8]; ya que se enfoca en la eficiencia energética de los edificios públicos. El mayor consumo energético en una construcción suele ser térmico, sobre todo para calefaccionar, aunque en edificios públicos como hospitales el consumo eléctrico puede superar el térmico. Dentro de las medidas tomadas en esta área se encuentra la Norma Nch 853. Esta norma, basada en la Norma ISO 6946 y con dos modificaciones desde su publicación, la última en 2021, se refiere a las pérdidas de calor de los edificios a través de su envolvente [11]. Además, la Ley de Eficiencia Energética (Ley 21.305) establece la obligatoriedad de que las edificaciones cuenten con una Calificación Energética (Etiquetado) para obtener la recepción final o definitiva. Por último, el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción establece las exigencias de acondicionamiento térmico para cada zona térmica del país.

1.3 Objetivo general

El objetivo general del trabajo es comparar dos herramientas de análisis energético, específicamente en la demanda térmica para calefacción.

1.3.1 Objetivos específicos

- Analizar las diferencias encontradas entre los softwares relacionadas con el cálculo de la demanda térmica para calefacción.
- Evaluar el comportamiento energético (térmico) de los edificios a medida que se va mejorando la aislación de las envolventes.
- Calcular las diferencias entre los resultados de demanda térmica entre Building Energy Efficiency Tool (BEET) y el Open Studio.

1.4 Hipótesis

El Centro de Eficiencia Energética de Copenhague (Copenhagen Centre on Energy Efficiency) es una entidad internacional dedicada a promover la eficiencia energética a nivel global, como una medida clave para abordar los desafíos energéticos y climáticos a nivel mundial. Busca fomentar la implementación de políticas y prácticas que mejoren la eficiencia energética en diversos sectores, como la industria, los edificios, el transporte y la energía.

UNEP CCC (Centro Climático de Copenhague del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) institución que es parte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y se centra en temas más amplios relacionados con el cambio climático y el medio ambiente en general. Su objetivo principal es proporcionar investigación, asesoramiento y apoyo técnico a nivel internacional para abordar los desafíos del cambio climático y promover el desarrollo sostenible. El UNEP CCC ofrece servicios de asesoramiento para ayudar a los países a cumplir con los compromisos internacionales, como el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en áreas como la mitigación y adaptación al cambio climático [12].

Estos dos centros desarrollaron la herramienta BEET, esta herramienta de autoevaluación de eficiencia energética de edificios está diseñada para proporcionar a los usuarios individuales una plataforma preliminar de evaluación rápida donde pueden evaluar el rendimiento energético de sus edificios. BEET actualmente se encuentra en fase de evaluación, donde este proyecto busca aportar en la validación de la herramienta, específicamente cálculo de transmitancias térmicas y el consumo de energía utilizada en calefacción.

Se analizará las diferencias entre las herramientas y como estas influyen en los resultados. Acercando BEET a la viabilidad para su implementación en la evaluación energética de edificios.

2 Metodología

Para poder realizar el cálculo de las resistencias térmicas y sus consumos para los edificios en estudio es necesario primero identificar las características de las envolventes.

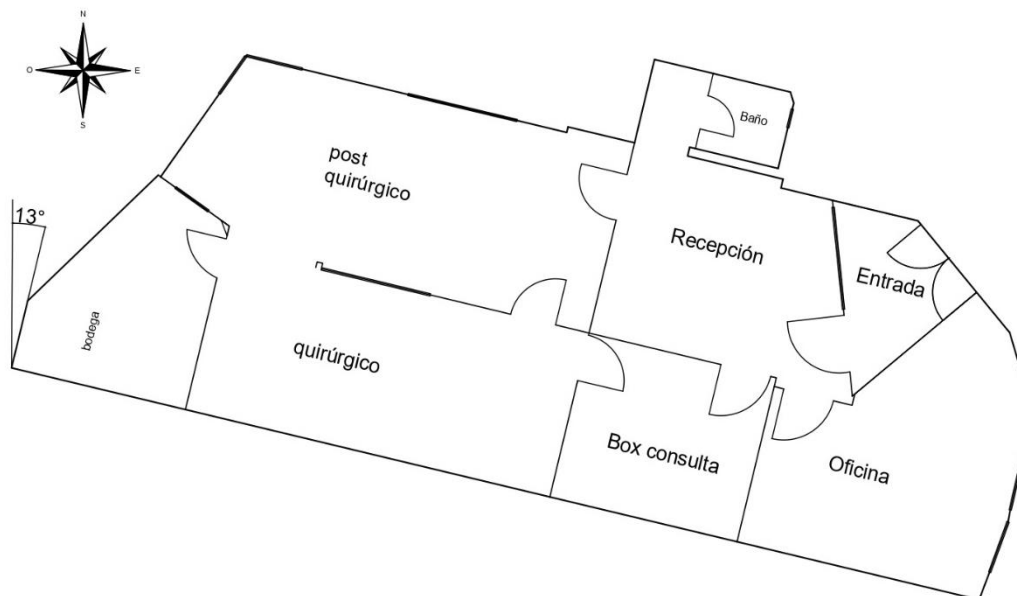


Figura 4: vista de elevación veterinaria

El edificio veterinario, es una edificación antigua de 99 m^2 aproximadamente, correspondiente a un solo piso. El lado norte del edificio se encuentra pareado a un gimnasio que actualmente está en desuso. Este edificio no posee ningún tipo de aislación.



Figura 5: Fachada principal veterinaria

La envolvente es de terciado ranurado de 18mm de espesor, seguida por una capa compuesta de aire y estructura de madera, con una capa interior de terciado ranurado de 12mm de espesor, con 153,91 m² de pared exterior. Posee 7 ventas externas que corresponden a 10,7 m², de marco de madera y cristal simple. El techo compuesto desde el exterior, con plancha de acero galvanizado, plancha de OSB y estructura y tablonos de madera.

El edificio municipal, erigido en 1956 y previamente destinado como liceo durante un período, consta de tres niveles además del zócalo. Su estructura principal está compuesta principalmente de concreto, existen habitaciones con pisos de madera y otras de baldosas. Los muros poseen una estructura de hierro, mientras que el techo posee estructura de madera. El edificio tiene un muro mediador con la compañía de bomberos. Tiene 392,15 m² de ventanas exteriores y 2620,67 m² de muro exterior, con una superficie de 6097 m² de construcción aproximadamente.



Figura 6: Fachada principal municipalidad – muro Oeste



Figura 7: Muro Norte Municipalidad



Figura 8: Ubicación Veterinaria y Municipalidad

2.1 Mejoras a simular en la envolvente de los edificios

2.1.1 EIFS

El sistema EIFS (Exterior Insulation Finish System) es una solución de aislamiento térmico compuesta por varias capas que se adhieren por el exterior del muro, en este caso específico las simulaciones se realizaron con las características y propiedades del aislante térmico, poliestireno expandido densidad de 20 kg/m³. La decisión de obviar las otras capas fue netamente, porque en el software BEET, viene con una biblioteca incorporada de materiales, donde no se encontraban el resto de las capas.

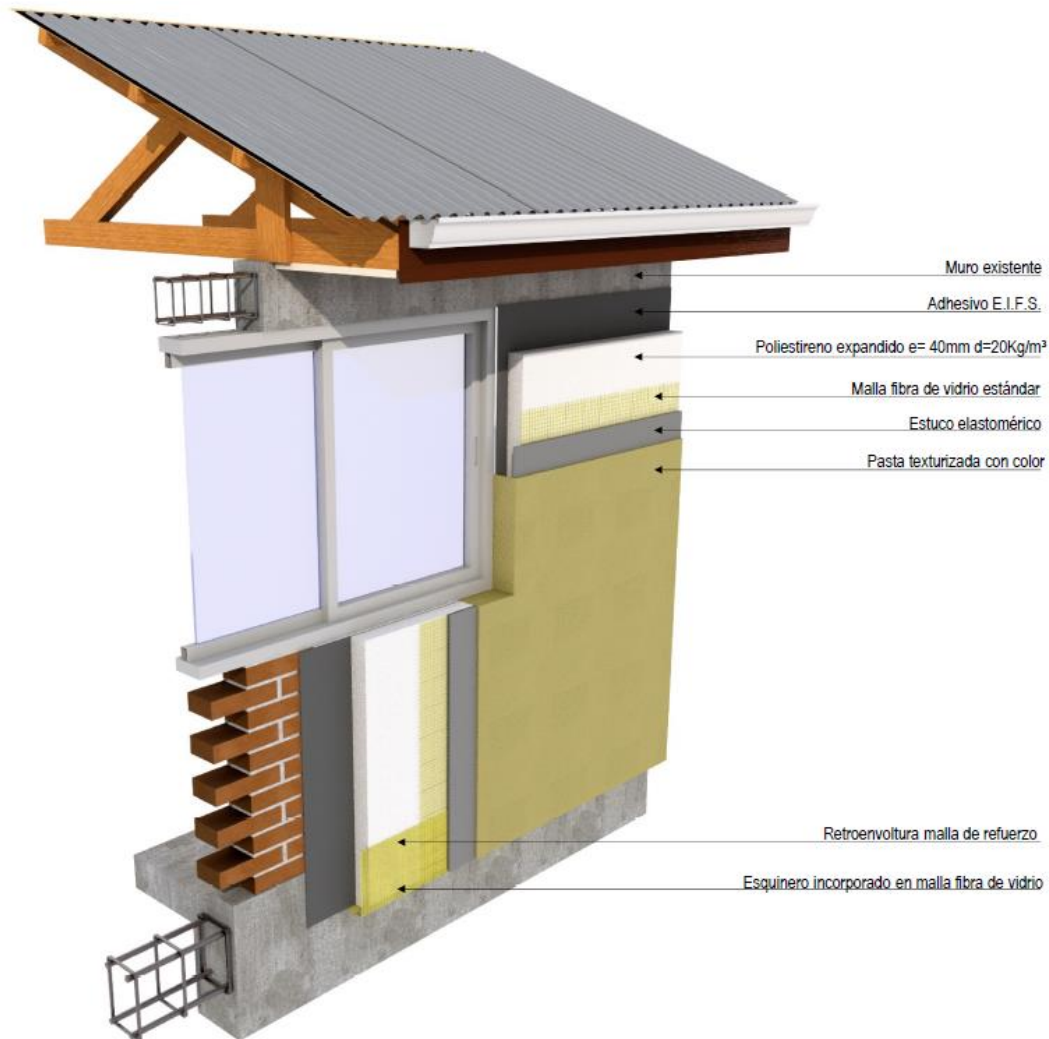
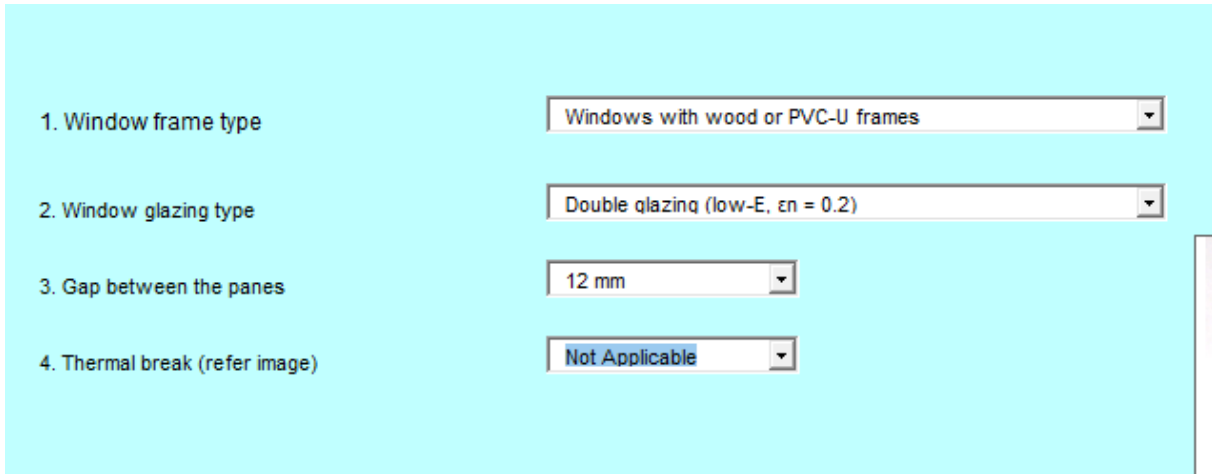


Figura 9: Capas Sistema EIFS. Fuente:[13]

Se realizaron dos simulaciones con EIFS, variando el grosor del poliestireno expandido, primero se hicieron con 40 mm de espesor y luego con 100 mm de espesor.

2.1.2 Cambio de ventanas

El cambio de ventanas en BEET se realiza desde el vidrio común a termo panel low-e, y en Open Studio se modifican parámetros basado en lo mostrado por BEET para acercar las características a las de este tipo de ventana.



The screenshot shows a configuration panel for window properties with four settings:

- 1. Window frame type: Windows with wood or PVC-U frames
- 2. Window glazing type: Double glazing (low-E, $\epsilon_n = 0.2$)
- 3. Gap between the panes: 12 mm
- 4. Thermal break (refer image): Not Applicable

Figura 10: características de la solución térmica para ventanas, pestaña Beet



Figura 11: Vidrio low-e

2.1.3 Techo

El techo se modificó según las características de cada edificio y la lista de materiales del programa BEET, para poder tener resultados en las transmitancias entre programas lo más cercanos posible, aislándose el techo según la lista de materiales de Beet. Revisar anexo 1 para ver los materiales y sus características.

2.2 Simulación Open Studio y SketchUp

La simulación energética a través de software es una herramienta útil para calcular la demanda de energía de un sistema, especialmente en edificios. Una simulación energética simula el comportamiento relacionado con la obtención y uso de energía en edificios, donde se necesita definir

varios parámetros para realizar la simulación, como el diseño de la estructura y materiales de la envolvente, la ubicación geográfica, el uso del edificio, los sistemas de calefacción y refrigeración, y una estimación de infiltraciones en la envolvente.

Para realizar el análisis energético de edificios, se utilizó el software Open Studio, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Open Studio es una plataforma de código abierto que permite a los profesionales de la construcción y la arquitectura realizar evaluaciones detalladas del rendimiento energético de los edificios, con capacidades avanzadas para el modelado detallado de edificios y simulaciones energéticas precisas.

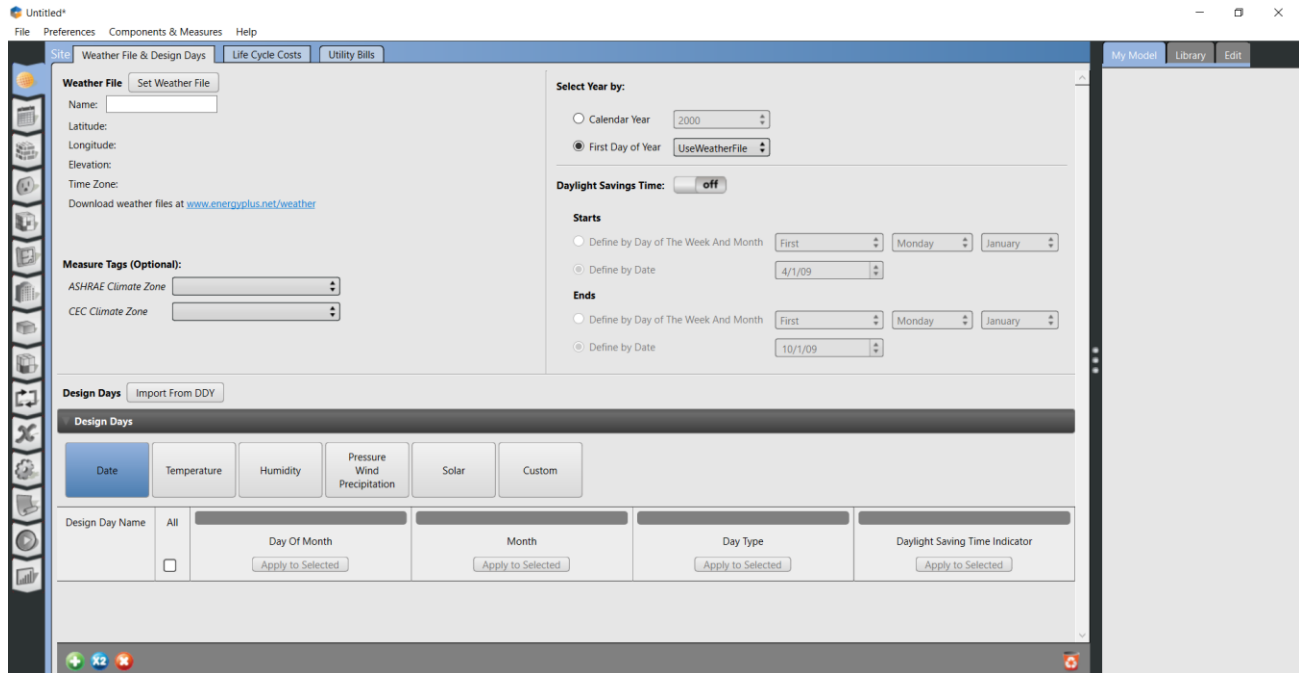


Figura 12: Ventana principal del programa Open Studio

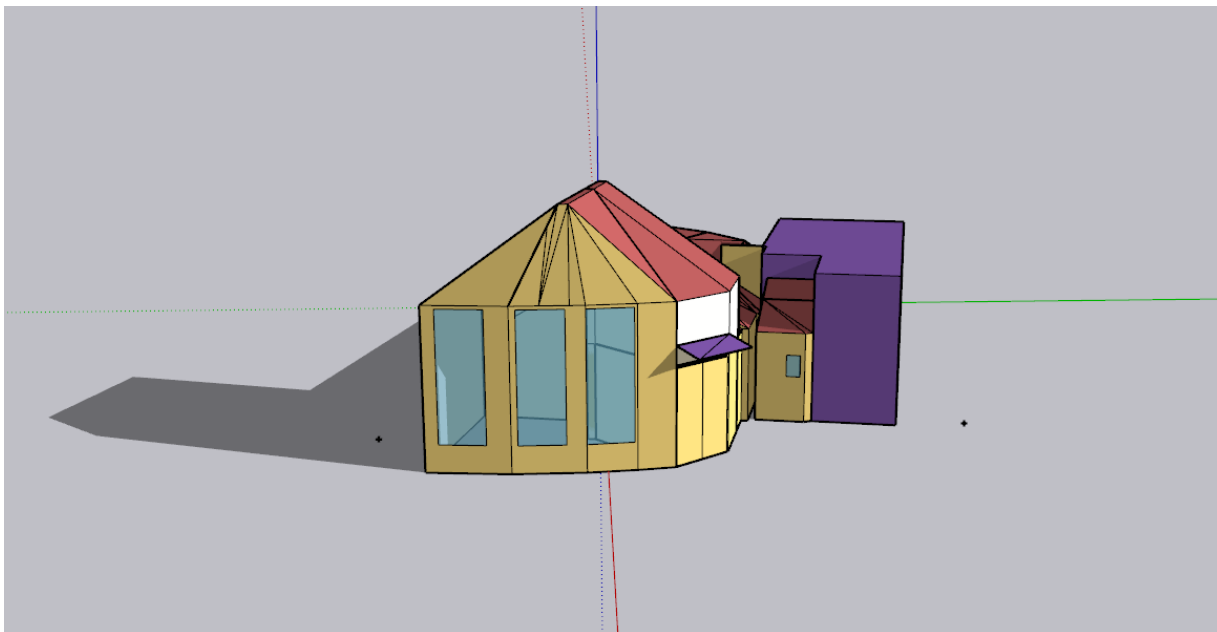


Figura 13: Modelo 3D Veterinaria dibujado en Sketchup

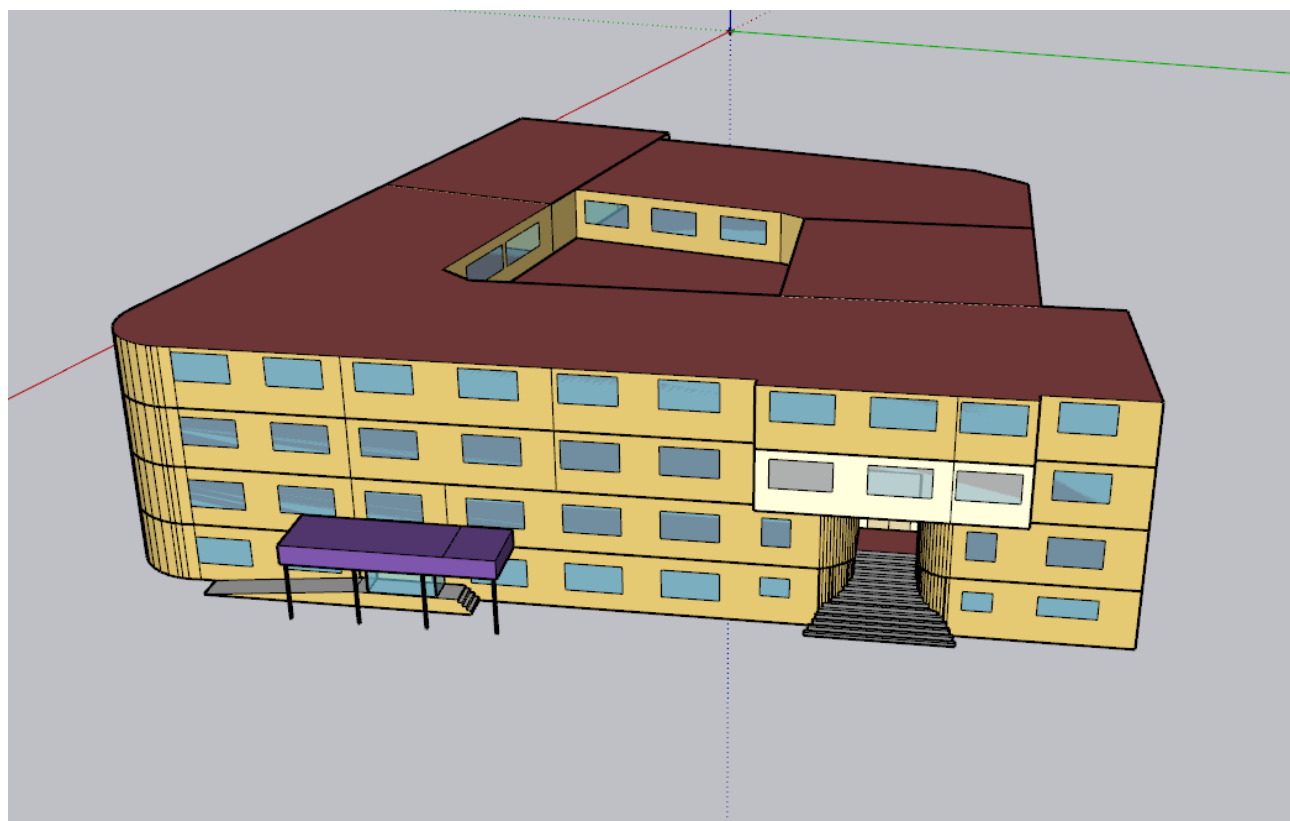


Figura 14: Modelo 3D Municipalidad fachada principal

El proceso de simulación en Open Studio comienza dibujando en el programa Sketchup el modelo 3D, donde se renderizó según condiciones de contorno y zona térmica.

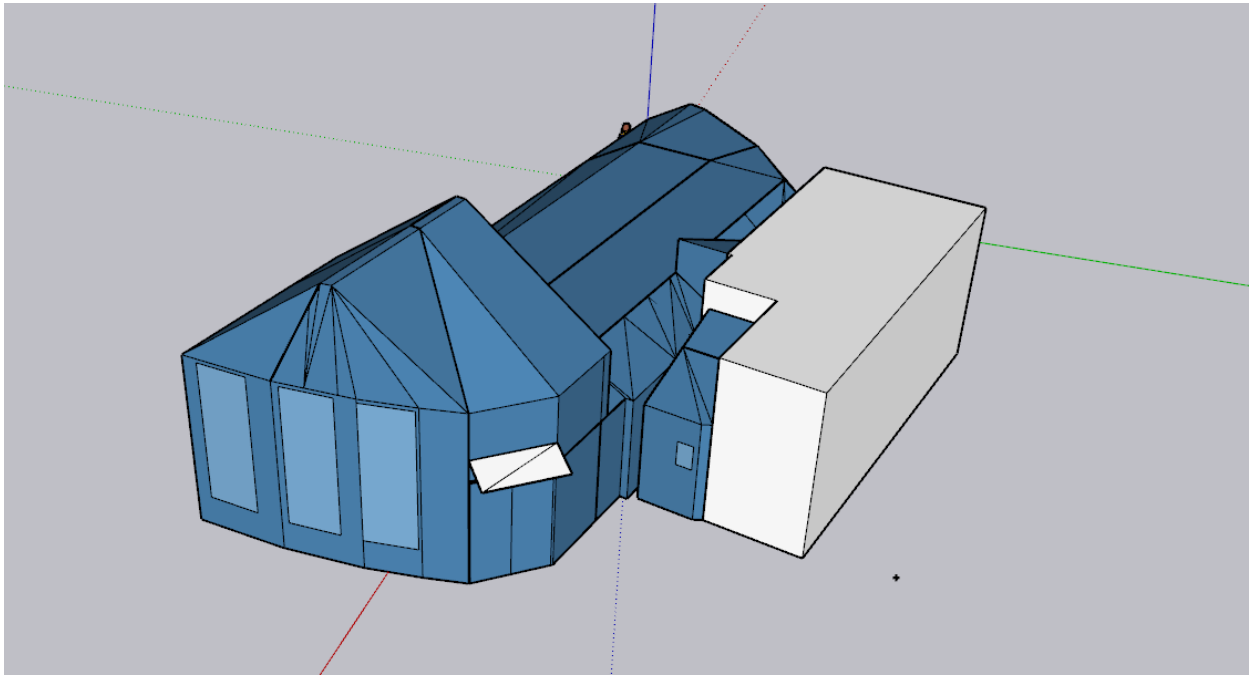


Figura 15: Veterinaria renderizada según condiciones de contorno

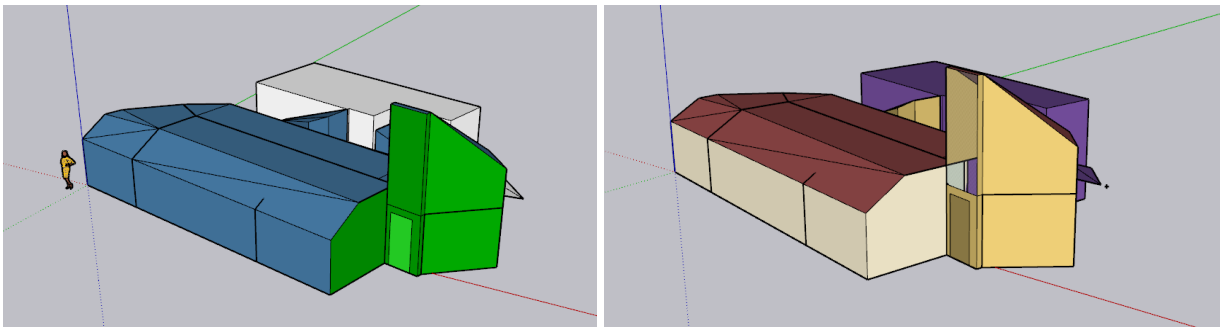


Figura 16: renderización condiciones de contorno Veterinaria interior y exterior

Luego transfiriendo el modelo a Open Studio a través de un archivo IDF, generado por el programa de dibujo. Se ingresan los datos climáticos, materiales, horarios de ocupación del edificio, cargas, sistemas de HVAC, y definir zonas térmicas dentro del edificio. Con estos datos, el programa genera un informe que muestra la cantidad de metros cuadrados construidos, áreas de ventanas, áreas de muros externos e internos y sus respectivas resistencias térmicas, resumen de los datos meteorológicos ingresados en formato EPW, y gráficos relacionados con el consumo de energía, ya sea eléctrica o de combustibles.

Open Studio cuenta con una biblioteca de materiales, aunque todo puede ser modificado o creado según las necesidades del proyecto. La herramienta proporciona capacidades avanzadas para el

modelado detallado de edificios, simulaciones energéticas precisas y optimización de diseño, lo que la convierte en una herramienta fundamental en la evaluación y mejora de la eficiencia energética en edificaciones.

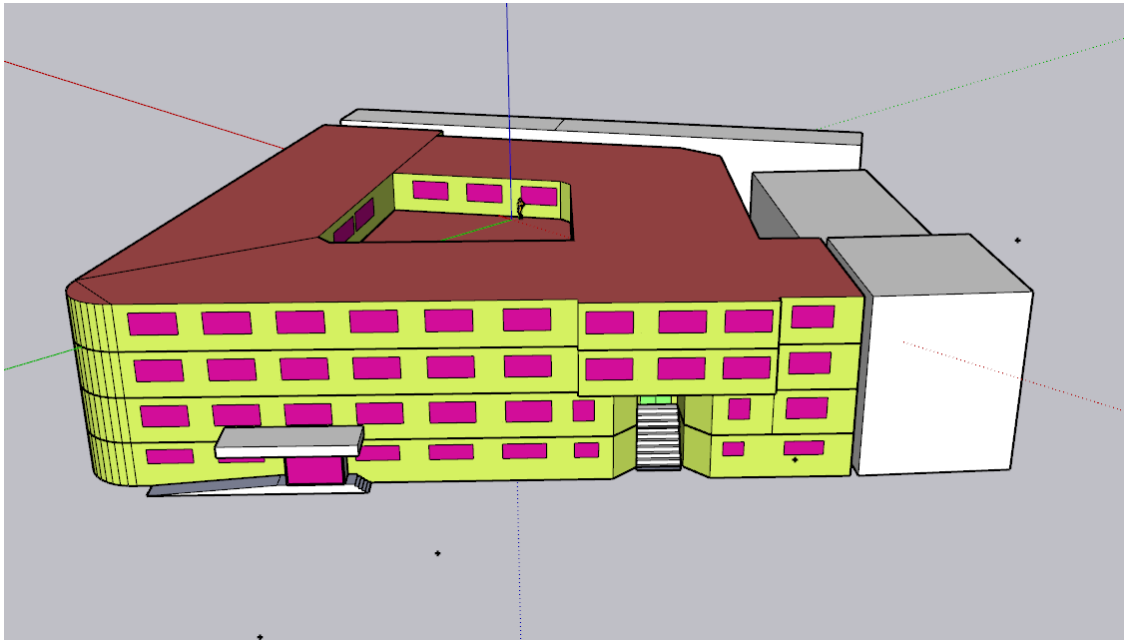


Figura 17: Municipalidad renderizada según materiales de construcción

2.3 Simulación con herramienta de C2E2

BEET, presentada en forma de formulario en Excel, cuenta con una interfaz de fácil uso. Cada pestaña incluye instrucciones detalladas para facilitar el correcto manejo de la herramienta. Dispone de su propia biblioteca de datos climáticos y materiales constructivos. El proceso de ingreso de datos comienza con la información general del edificio, que incluye la ubicación, área de construcción en metros cuadrados, cantidad de pisos, tipos de espacios dentro del edificio, ocupación y el costo actual de la energía eléctrica. Posteriormente, se procede a introducir las características de la envolvente térmica. Aquí, es posible ingresar directamente la resistencia térmica o seleccionar las distintas capas constructivas desde la librería del programa para muros exteriores, techos y ventanas. Aunque la librería ofrece una amplia variedad de materiales, algunos elementos como membranas para techos no están incluidos. Además, no se brinda la opción de detallar el espacio del entretecho ni especificar la cantidad de área estructural ni su tipo (madera o metálica). Se requiere ingresar las ganancias térmicas provenientes de las ventanas. En caso de desconocer este valor, el programa ofrece uno estándar según el uso del edificio. Asimismo, se solicita ingresar la relación de área entre muros y ventanas. Una vez completadas las características constructivas, se procede con el ingreso de datos relacionados con las cargas, que abarcan iluminación, equipos eléctricos, sistemas HVAC, tasa de infiltración y coeficiente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Self Assessment Building Energy Efficiency Tool (BEET)

1. General Details

1.1 Location details

Please select and share building location details

Note:
It is important to select Province first and then Location before clicking and loading the climate data.
If exact location is not available, please select the nearest / most suitable location (or) reach out to us.

| | | |
|---------------------|--|--|
| User name | <input type="text" value="Toy"/> | <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> Click here to load selected location Climate Data </div> <p style="font-size: 8px; color: #8B4513; margin-top: 5px;"><i>IF YOU DO NOT HAVE THE CLIMATE DATA, PLEASE GO TO THE SAME LOCATION AS THE TOOL TO LOAD THE CLIMATE DATA</i></p> |
| Project name | <input type="text" value="test"/> | |
| Country | <input type="text" value="Chile"/> | |
| Region | <input type="text" value="VIII Región del Bío-Bío"/> | |
| Commune | <input type="text" value="Concepción"/> | |

1.2 Type of building

Please select the main building type.

Note:
Please first select the building type from drop down list and then click the button to select building spaces.
If your building type is not available in the list, please select the most representative building type.

| | | |
|-----------------------------------|---|---|
| Building type | <input type="text" value="Office Building"/> | ▼ |
| Categories/Space | <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> Click here to select building spaces </div> | |
| Building categories/Spaces | <div style="display: flex; justify-content: space-around; padding: 5px;"> <div style="text-align: center;">Breakroom</div> <div style="text-align: center;">Main entry lobbies</div> <div style="text-align: center;">Office space</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; padding: 5px; margin-top: 5px;"> <div style="text-align: center;">Reception area</div> </div> | |

< Previous

Next >

Figura 18: Primera ventana de entrada de datos BEET

Con la información ingresada, BEET genera un informe detallado que incluye las resistencias térmicas obtenidas y recomendadas, los indicadores energéticos en kWh/m² y CLP/año tanto para calefacción como para refrigeración, así como para las cargas introducidas. El informe también presenta los valores en W/m² para iluminación y cargas, tanto los obtenidos como los recomendados, y finalmente, muestra la eficiencia del sistema HVAC, tanto la obtenida como la recomendada.

Cabe destacar para las simulaciones en BEET y Open, se calculó el consumo energético en función de la eficiencia de una caldera tipo, seleccionando un 80% de eficiencia.

3 Estado del Arte

3.1 Herramientas de simulación energética en la investigación y la práctica profesional

Una herramienta de simulación energética es un software que permite representar y analizar el comportamiento energético de un sistema, tomando en cuenta todas las variables que afectan a este. Con el objetivo de poder proyectar o predecir su desempeño en el futuro; además de esto, los softwares de simulación energética son un valioso recurso tanto en la investigación como en la práctica profesional, pudiendo optimizar diseños, evaluar estrategias de eficiencia energética, analizar el impacto ambiental en consumo y en emisiones [14].

3.2 Referencia de los cálculos de Energy Plus

Open Studio es uno de los muchos programas que funcionan con la computadora de cálculo de EnergyPlus. El programa EnergyPlus es una colección de muchos módulos de programa que trabajan juntos para calcular la energía necesaria para calentar y enfriar un edificio utilizando una variedad de sistemas y fuentes de energía. Lo hace simulando el edificio y los sistemas energéticos asociados cuando están expuestos a diferentes condiciones ambientales y operativas.

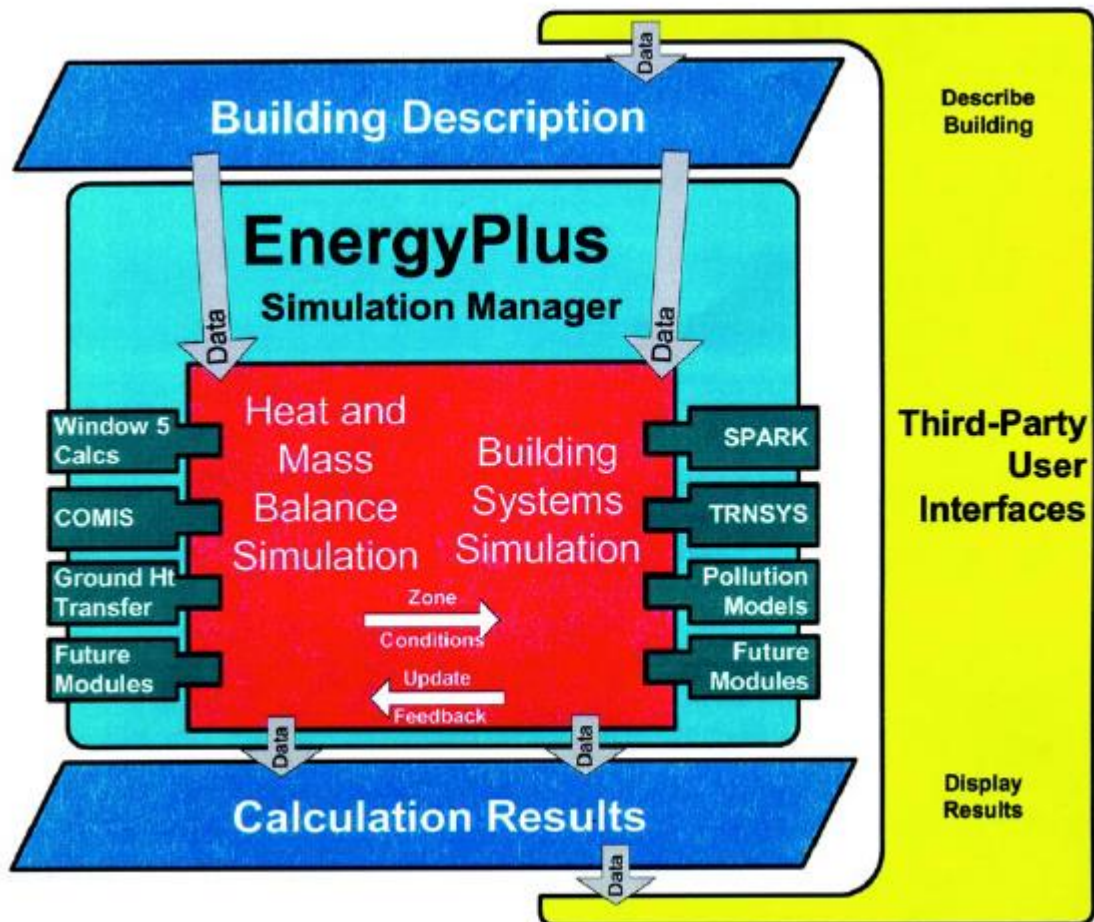


Figura 19: Estructura general de EnergyPlus [15]

En la figura 19 muestra la estructura general del programa y sus tres componentes básicos: administrador o gestor de simulaciones, el administrador de simulaciones de balance térmico y el administrador de simulaciones de los sistemas del edificio. El administrador de simulaciones controla todo el proceso de simulación, es decir, dirige los módulos de simulación para que realicen acciones específicas, como simular, registrar y reportar los resultados. El administrador de simulación de balance de calor calcula las cargas térmicas y de masa, y el administrador de simulación de sistemas del edificio maneja la comunicación entre el motor de balance de calor y los circuitos de agua, aire de HVAC y sus componentes adjuntos (serpentines, calderas, enfriadores, bombas, ventiladores, etc.) con la descripción del edificio (datos de entrada) y los resultados de los cálculos (datos de salida) [16].

El balance térmico se realiza en el aire de la zona térmica asumiendo una temperatura uniforme en el aire de la habitación para luego ir agregando más detalles, también se asume que las superficies de una habitación tienen: temperaturas uniformes, irradiación uniforme de ondas largas (calor) y ondas cortas (luz de una ampolleta), superficies que reflejan e irradian y que existe conducción de calor interna.

EnergyPlus posee un administrador de soluciones integradas como centro de control para administrar el calor y aire del edificio, actuando como interfaz entre el equilibrio térmico y el gestor de simulaciones. Este administrador de soluciones integradas está compuesto por [15]:

- Gestor de balance térmico de superficies: analizando el calor que entra y sale de las superficies, la inercia térmica y los efectos de la conducción, convección, radiación y transferencia de masa (vapor de agua/humedad).
- Gestor de balance de térmico del aire: analiza la entrada y salida de aire, a través de la ventilación e infiltraciones, además calcula la cantidad de calor que puede retener el aire de una habitación y las ganancias directas de calor por convección.
- Gestor de simulación de sistemas de construcciones: cuando los gestores anteriores terminan su trabajo, este es activado. Este administrador controla el funcionamiento en conjunto de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), así como los sistemas eléctricos.

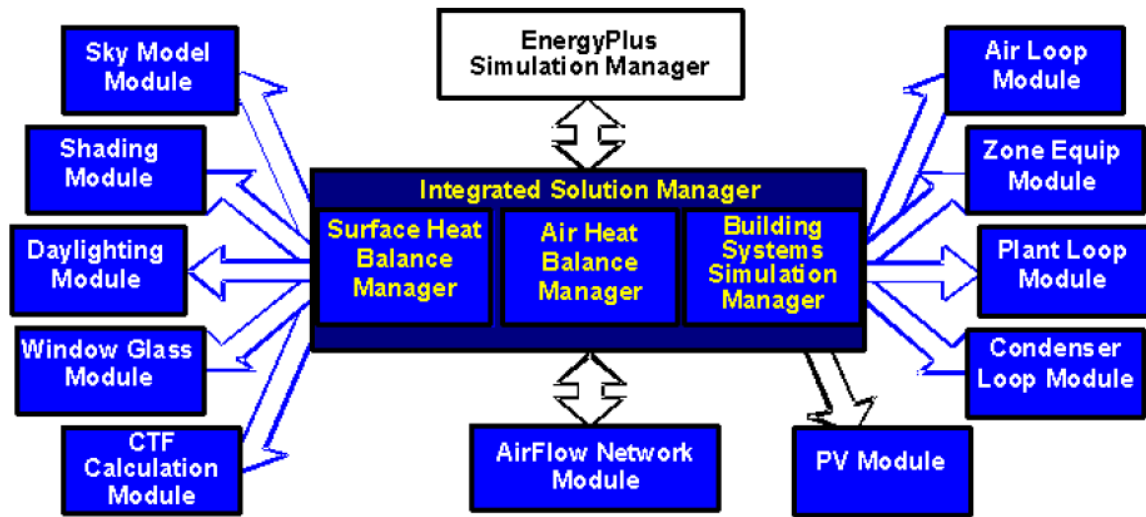


Figura 20: Estructura de administrador de soluciones integradas [16]

3.3 Referencia de los cálculos de BEET

En el desarrollo del presente estado del arte, se desea presentar la fundamentación teórica de los programas utilizados para el proyecto. En el caso de BEET el creador de este formulario Excel no proporcionó una memoria de cálculo detallada, por lo que se ha adoptado por extraer las ecuaciones directamente del archivo Excel. Este enfoque permite reconstruir y validar los métodos empleados, asegurando la transparencia y la reproducibilidad de los resultados.

BEET utiliza el modelo dinámico para los cálculos, aunque mucho más sencillo es EnergyPlus, ya que crea una línea base de un año teniendo en cuenta la variabilidad de las condiciones climáticas cada una hora [17], pero posee algunas desventajas con respecto al software en comparación, ya que asume algunos datos como el azimut de la construcción, el cual es fijo para cualquier caso.

Tabla 1: extraída de BEET

| Surface Azimuth | |
|-----------------|-------|
| -180 | North |
| 0 | South |
| -90 | East |

Otra desventaja de BEET es que divide a Chile en solo 7 zonas climáticas predefinidas. Esto significa que no es posible seleccionar el clima específico de una ciudad en particular, lo que puede limitar la precisión de los resultados de la simulación.

El programa crea una línea base con los datos de entradas, explicados en el capítulo anterior, calculando la carga neta del espacio por cada hora del año como se muestra a continuación:

$$Carga_{espacio} = \dot{Q}_{cond} + Cargas_{infiltración} + Cargas_{personas} + Cargas_{luces} + Cargas_{enchufes} + Cargas_{solar_ventanas}$$

Luego el programa calcula la carga total neta que debe entregar el equipo de calefacción sumando la carga neta del espacio más las pérdidas por ventilación, para luego sumar todas las cargas totales netas de cada hora del año. Con este último valor el programa calcula la energía necesaria, dividiendo la por la eficiencia del equipo.

$$E_{anual} = \frac{\sum E_{calefacción}}{eficiencia_{equipo}} [kWh]$$

Para finalmente calcular la energía necesaria para calefacción por m^2

$$E_t = \frac{E_{anual}}{A_{ed}} \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$$

4 Evaluación y presentación de resultados

4.1 Resultados veterinaria y municipalidad condiciones originales

A continuación, se muestran las resistencias térmicas y transmitancias para las condiciones originales de ambos programas.

Tabla 2: Resultados Resistencias y transmitancias de los programas utilizados

| Transmitancias paredes casos Bases | | | |
|--|--|--|--|
| Veterinaria | | Municipalidad | |
| Transmitancia Beet [W/m ² * K] | Transmitancia Open [W/m ² * K] | Transmitancia Beet [W/m ² * K] | Transmitancia Open [W/m ² * K] |
| 1,28 | 1,31 | 2,70 | 2,88 |

Tabla 3: Resultados transmitancias y resistencias térmicas del techo de la veterinaria en los programas

| Transmitancia techo caso base | | | |
|--|--|--|--|
| Veterinaria | | Municipalidad | |
| Transmitancia Beet [W/m ² * K] | Transmitancia Open [W/m ² * K] | Transmitancia Beet [W/m ² * K] | Transmitancia Open [W/m ² * K] |
| 2,94 | 3,27 | 2,08 | 2,24 |

Tabla 4: Características de las ventanas simuladas en veterinaria

| Ventanas | | | | | |
|----------|--|--|--------|----------------------------|------|
| Vidrio | Transmitancia Beet [W/m ² * K] | Transmitancia Open [W/m ² * K] | Marco | Window to Wall Ratio (WWR) | SHGC |
| Simple | 5,88 | 5,9 | madera | 6,5% | 1 |

Tabla 5: Características de las ventanas simuladas en municipalidad

| Ventanas Municipalidad | | | | | |
|------------------------|--|--|-------|----------------------------|------|
| Vidrio | Transmitancia Beet [W/m ² * K] | Transmitancia Open [W/m ² * K] | Marco | Window to Wall Ratio (WWR) | SHGC |
| Simple | 5,88 | 5,89 | metal | 16% | 1 |

Las herramientas en comparación poseen una pequeña diferencia entre las transmitancias, esto se debe a que en EnergyPlus calcula las resistencias superficiales según las condiciones ambientales, mientras que en BEET se presentan valores predeterminados y fijos.

Paras estas simulaciones los materiales en BEET se eligieron de la librería que tiene integrada, y se colocaron en Open los espesores, calores específicos y densidades de la librería de la herramienta Excel.

Tabla 6: Consumo en calefacción de los edificios en condiciones iniciales

| Programa | Veterinaria consumo de energía térmica kWh/m ² | Municipalidad consumo de energía térmica kWh/m ² |
|----------------------------|---|---|
| BEET | 865 | 549,1 |
| Open Studio /EnergyPlus | 632 | 229,1 |

Los programas tuvieron una diferencia en el cálculo del consumo de un 26,9% para la veterinaria y 58,3% para la municipalidad.

Para saber como influye estas diferencias en el consumo térmico, se hace una simulación donde se ingresó en BEET las transmitancias obtenidas en EnergyPlus.

2.1 R Value (Thermal resistance) - Outer Wall

Do you know the R value ?

Note: You may select any of the options to provide details on R value of the wall.

| Option | Select |
|---|-----------------------|
| A. Yes, I know | <input type="radio"/> |
| B. Calculate the R value by adding custom layers from prelisted materials | <input type="radio"/> |

User custom built layer

R Value **[m².°K/W]** **0,78**

Figura 21: Cuadro ingreso de datos muros BEET

Por ejemplo, en la figura 21 se muestra el cuadro de ingreso de datos, donde en vez de seleccionar la opción B (para acceder a la biblioteca de materiales y crear las capas constructivas) como en las simulaciones anteriores, se seleccionó la opción A donde se ingresó la resistencia térmica que dio Open.

Tabla 7: Simulación veterinaria igualando transmitancias en los programas

| Veterinaria | | | | |
|-------------|----------|--|--|--|
| Caso | Software | Transmitancia paredes [W/m ² * K] | Transmitancia techo [W/m ² * K] | Consumo de energía térmica kWh/m ² |
| original | Beet | 1,31 | 3,27 | 925,2 |
| | Open | | | 632 |

Tabla 8: Simulación municipalidad igualando transmitancias en los programas

| Municipalidad | | | | |
|---------------|----------|---|---|--|
| Caso | Software | Transmitancia paredes [W/m ² * K] | Transmitancia techo [W/m ² * K] | Consumo de energía térmica kWh/m ² |
| original | Beet | 2,88 | 2,24 | 563,4 |
| | Open | | | 229,0 |

Se vuelven a obtener diferencias en el consumo a pesar de haber igualado las transmitancias en ambos programas. Como las transmitancias de Open eran mayores que las del BEET, la demanda aumentó en este. Obteniéndose una diferencia de consumo en la veterinaria y la municipalidad respectivamente 31,6% y 59,3% entre los programas. Para profundizar en este análisis, se realizaron simulaciones variando el material de la veterinaria, cambiando de terciado a concreto. Este cambio permitirá evaluar cómo influye la inercia térmica en el comportamiento energético del edificio. Al utilizar concreto, que presenta una mayor capacidad de almacenamiento de calor en comparación con el terciado, se espera observar un efecto significativo en la estabilidad de la temperatura interior y, por ende, en el consumo energético.

Tabla 9: Simulación veterinaria envolvente concreto

| Veterinaria | | | | |
|---------------------|----------|---|---|--|
| Caso | Software | Transmitancia a paredes [W/m ² * K] | Transmitancia térmica techo [W/m ² * K] | Consumo de energía térmica kWh/m ² |
| Paredes de concreto | Beet | 4,43 | 2,01 | 1269,8 |
| | Open | | | 854,2 |
| | Beet | 5,56 | 2,94 | 1618,6 |
| | Open | 4,52 | 2,01 | 853,7 |

Para los valores de la tabla 9 las simulaciones fueron realizadas con los valores obtenidos en las transmitancias de Open e ingresadas a BEET y también al revés, es decir, se simuló con las características de los materiales de la biblioteca de BEET en Open ingresándose en este: espesor, calor específico y densidad del concreto.

Se puede observar cómo OpenStudio calculo una transmitancia distinta para el techo, además calculó una temperatura media interior distinta, al cambiar el material de las paredes. La temperatura media interior alcanzó 16,5°C con terciado mientras que con concreto de transmitancia 4,43 W/m²K la temperatura media interior fue de 18,7°C. Demostrándose que la influencia térmica es considerada en los cálculos. El terciado, al tener menor inercia térmica, se calienta más rápidamente con la radiación solar durante el día. Esto puede resultar en temperaturas interiores más altas, ya que el material permite un calentamiento más rápido del espacio.

BEET no muestra las temperaturas interiores alcanzadas en sus reportes, pero si en la hoja de cálculo podemos acceder a la diferencia de temperatura interior y exterior, aquí se encontró que la diferencia de temperatura era igual para la simulación de terciado y concreto, esto es debido a que esta herramienta Excel toma en cuenta la temperatura deseada interior que en este caso se ingresó 22°C con la temperatura exterior entregada por los datos climáticos. Por lo que podemos concluir que BEET no toma en cuenta la inercia térmica de los materiales al hacer los cálculos de demanda térmica.

4.2 Resultados veterinaria al ir mejorando la aislación de la envolvente

4.2.1 Aislación techo veterinaria

Tabla 10: Resultados simulación mejoramiento de transmitancia de techo veterinaria

| Aislación de techumbre - veterinaria | | | | |
|--------------------------------------|---|---|--|---|
| Software | Transmitancia muros [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] | Transmitancia del techo [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] | Transmitancia ventanas [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] | Consumo en calefacción [kWh/m^2] |
| BEET | 1,28 | 0,75 | 5,88 | 654,90 |
| Open Studio | 1,31 | 0,76 | 5,90 | 599,72 |

Se mejoró la transmitancia térmica del techo de la veterinaria en BEET de un $2,94 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ a $0,75 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, obteniéndose un ahorro de 24,3% en energía térmica destinada a la calefacción del edificio. Mientras que en Open la transmitancia del techo se mejoró desde $3,27 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ a $0,76 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, con un ahorro de 5,1%. En la figura 21 y 22 podemos ver como disminuye el consumo térmico respecto a la transmitancia térmica del techo en ambos programas.

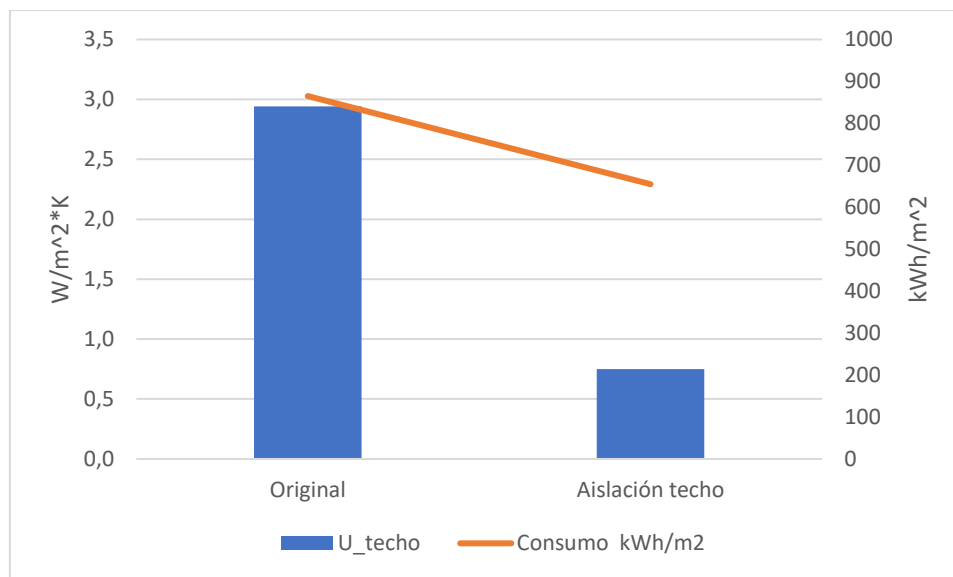


Figura 22: Consumo térmico respecto a transmitancia térmica del techo de la veterinaria, resultados BEET

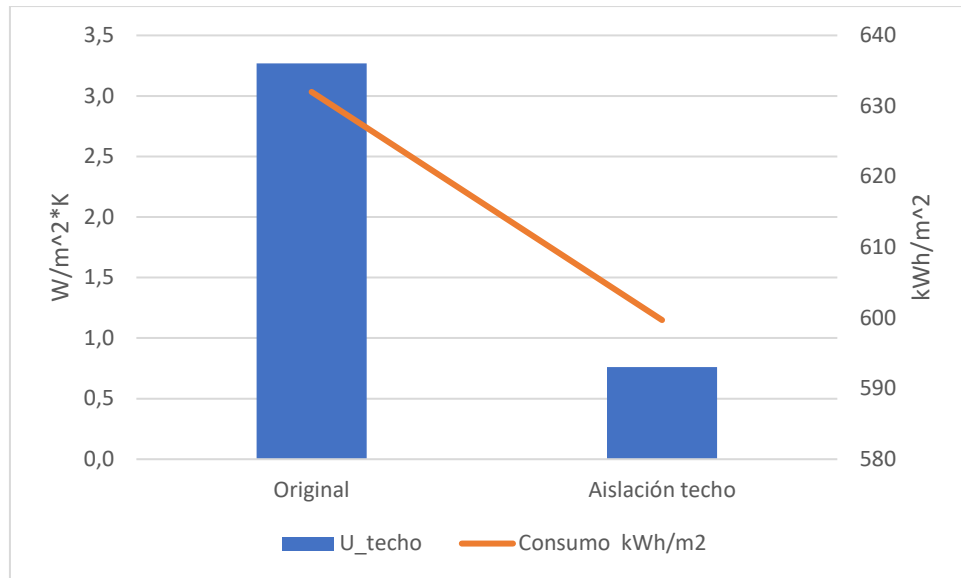


Figura 23: Consumo térmico respecto a transmitancia térmica del techo de la veterinaria, resultados Open Studio

Los programas tuvieron una diferencia en el cálculo del consumo de un 8% para la aislación de la techumbre de la veterinaria.

4.2.2 Aislación muros veterinaria

Tabla 11: Resultados simulación aislación en muros veterinaria

| Aislación de muros - veterinaria | | | | | |
|----------------------------------|-------------|--|--|---|--|
| Espesor aislación | Software | Transmitancia muros [W/m ² * K] | Transmitancia del techo [W/m ² * K] | Transmitancia ventanas [W/m ² * K] | Consumo en calefacción [kWh/m ²] |
| 40 mm | BEET | 0,35 | 2,94 | 5,88 | 738,00 |
| | Open Studio | 0,55 | 3,27 | 5,90 | 511,08 |
| 100 mm | BEET | 0,29 | 2,94 | 5,88 | 725,60 |
| | Open Studio | 0,30 | 3,27 | 5,90 | 505,22 |

Luego se simuló con aislación en los muros variando el espesor del aislante. En BEET con una transmitancia de $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ se proyecta un ahorro de 14,7%, mientras que con una transmitancia de $0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ se logra una proyección de ahorro de 16,1%.

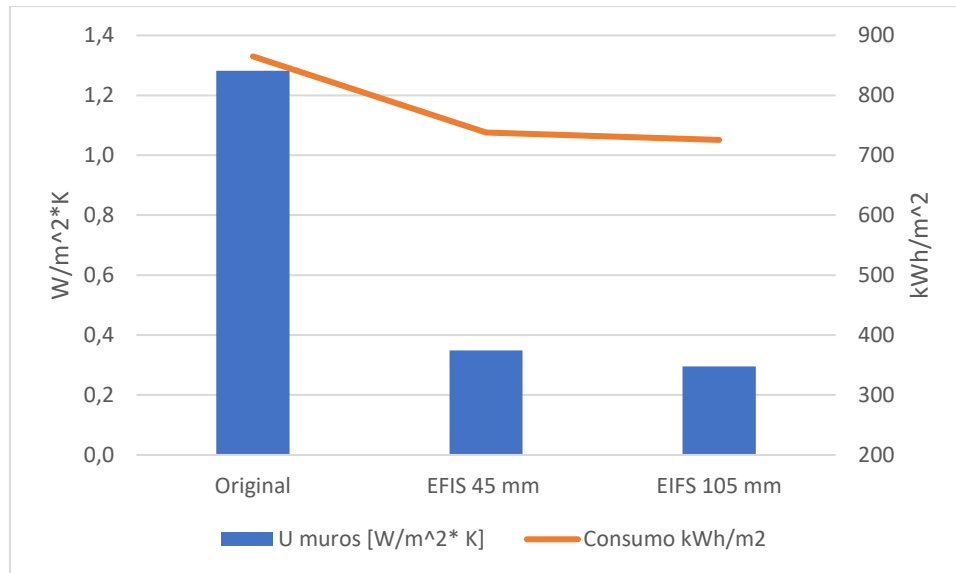


Figura 24: Comparación del consumo respecto de la disminución de la transmitancia térmica muros en la veterinaria - resultados BEET

En Open Studio con una transmitancia de $0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$ se proyecta un ahorro de 19,1%, mientras que con una transmitancia de $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ se logra una proyección de ahorro de 20,1%.

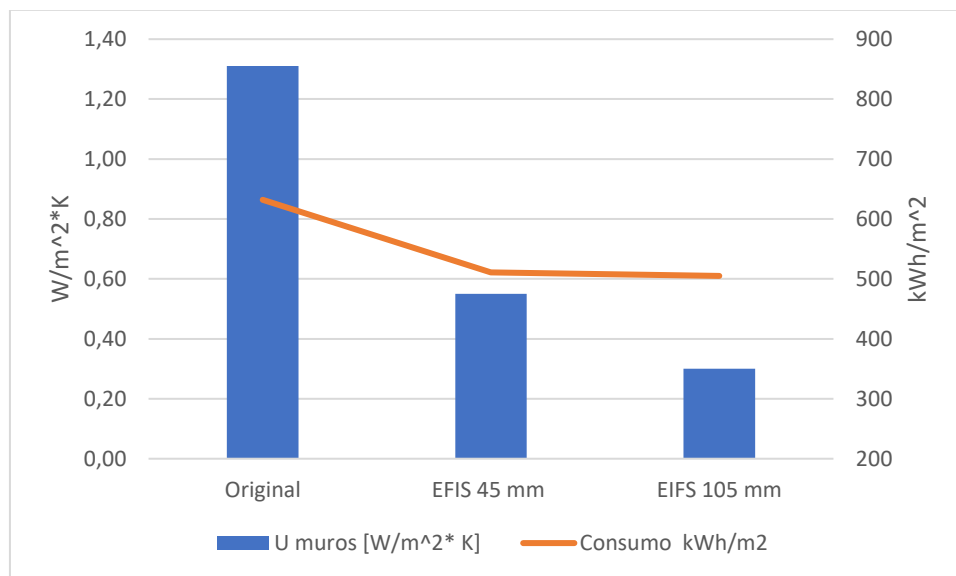


Figura 25: Comparación del consumo respecto de la disminución de la transmitancia térmica muros en la veterinaria - resultados Open Studio

Para un aislante de 45 mm de espesor los programas tuvieron una diferencia en el cálculo del consumo de 31%, mientras que para una aislación en muros de 105 mm los programas tienen una diferencia de un 30%.

4.2.3 Cambio de ventanas veterinaria

Tabla 12: Resultados simulación cambio de ventanas veterinaria

| Cambio de ventanas- veterinaria | | | | |
|---------------------------------|--|--|---|--|
| Software | Transmitancia muros [W/m ² * K] | Transmitancia del techo [W/m ² * K] | Transmitancia ventanas [W/m ² * K] | Consumo en calefacción [kWh/m ²] |
| BEET | 1,28 | 2,94 | 2,22 | 833,20 |
| Open Studio | 1,31 | 3,27 | 2,56 | 610,21 |

Al simular cambio de ventanas BEET proyecta un ahorro de energía de 3,7% con respecto a las condiciones iniciales.

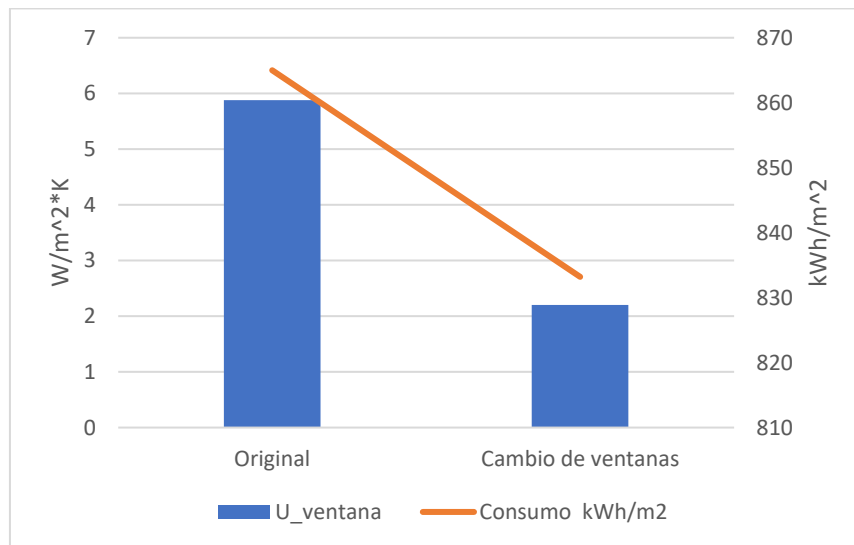


Figura 26: Comparación del consumo al realizar cambio de ventanas en la veterinaria – BEET

Al simular cambio de ventanas en OpenStudio se proyecta un ahorro de energía de 3,5% con respecto a las condiciones iniciales.

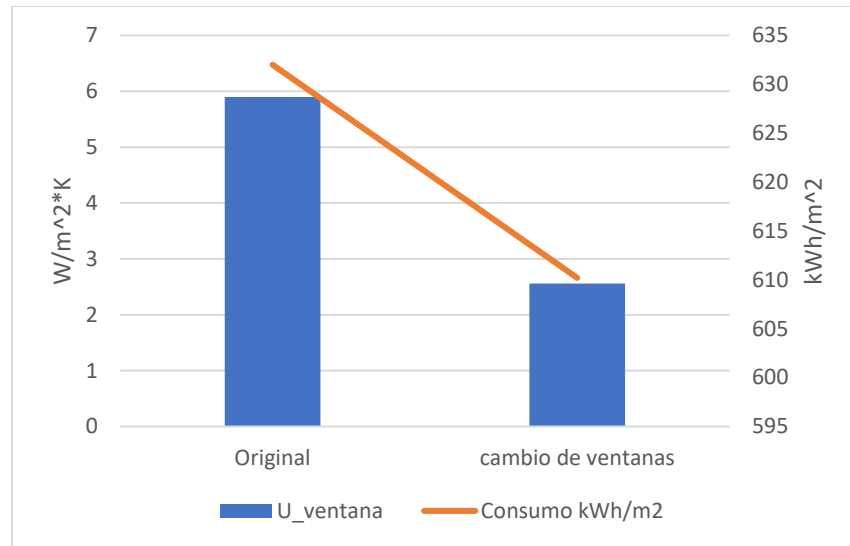


Figura 27: Comparación del consumo al realizar cambio de ventanas en la veterinaria - OpenStudio

Y entre los programas la diferencia en el cálculo del consumo al simular cambio de ventanas fue de 26,8%.

4.2.4 Aislación en muros 100 mm más cambio de ventana en veterinaria

Tabla 13: Resultados simulación veterinaria con cambio de ventana y aislamiento en muros

| Asilacion en muros más cambio de ventana - veterinaria | | | | |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Software | Transmitancia muros [W/m²· K] | Transmitancia del techo [W/m²· K] | Transmitancia ventanas [W/m²· K] | Consumo en calefacción [kWh/m²] |
| BEET | 0,29 | 2,94 | 2,33 | 696,30 |
| Open Studio | 0,30 | 3,27 | 2,56 | 490,74 |

Agregando un cambio de ventanas a la aislación térmica de 100 mm de espesor, aumenta el ahorro en un 3,4% en calefacción, es decir, se proyecta un ahorro de 19,5% respecto al caso a las condiciones iniciales en BEET.

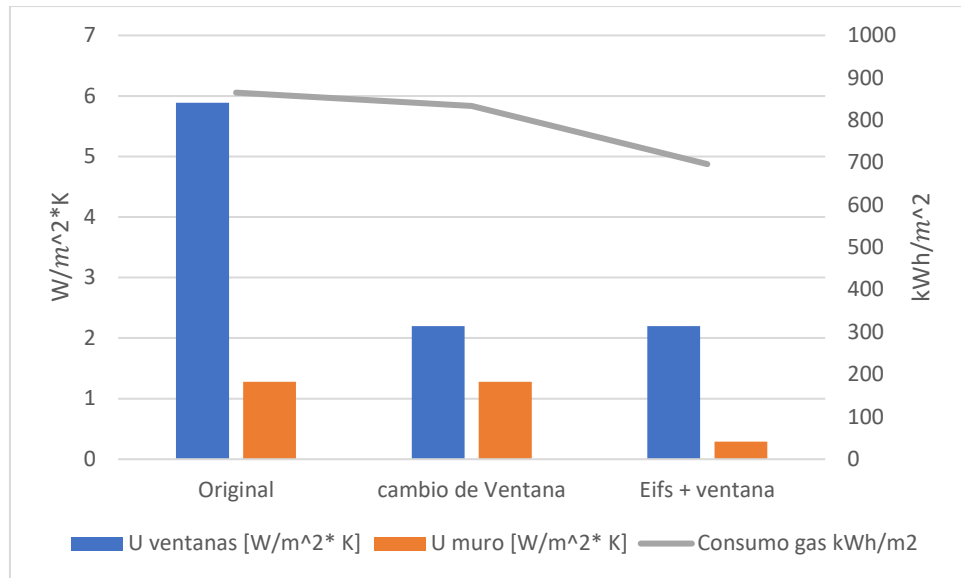


Figura 28: Consumo GLP respecto a la transmitancia térmica de muros y ventanas – resultados BEET

En Open Studio al agregarle un cambio de ventana a la simulación con poliestireno expandido de 100 mm, aumenta el ahorro en 2,3%, es decir, que aumenta en 22,4 % con respecto a las condiciones iniciales.

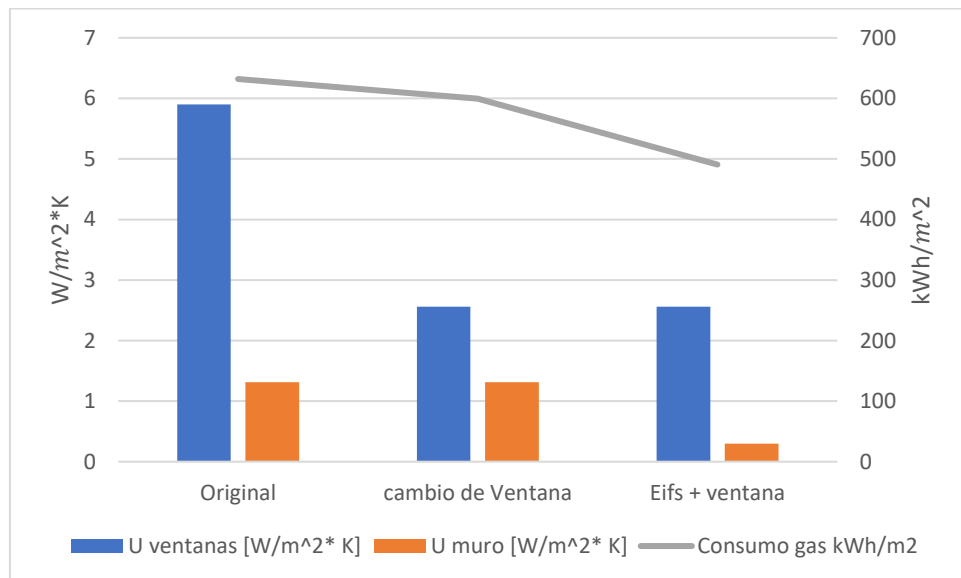


Figura 29: Consumo de GLP respecto a la transmitancia de muros y ventanas - resultados Open Studio

Obteniéndose una diferencia en el cálculo del consumo entre programas para este caso de un 30%.

4.2.5 Aislación de muros, techo y cambio de ventanas en veterinaria

Tabla 14: Resultados mejoramiento completo de la envolvente en veterinaria

| Asilacion completa - veterinaria | | | | |
|----------------------------------|--|--|---|--|
| Software | Transmitancia muros [W/m ² * K] | Transmitancia del techo [W/m ² * K] | Transmitancia ventanas [W/m ² * K] | Consumo en calefacción [kWh/m ²] |
| BEET | 0,29 | 0,75 | 2,50 | 468,80 |
| Open Studio | 0,30 | 0,77 | 2,56 | 448,91 |

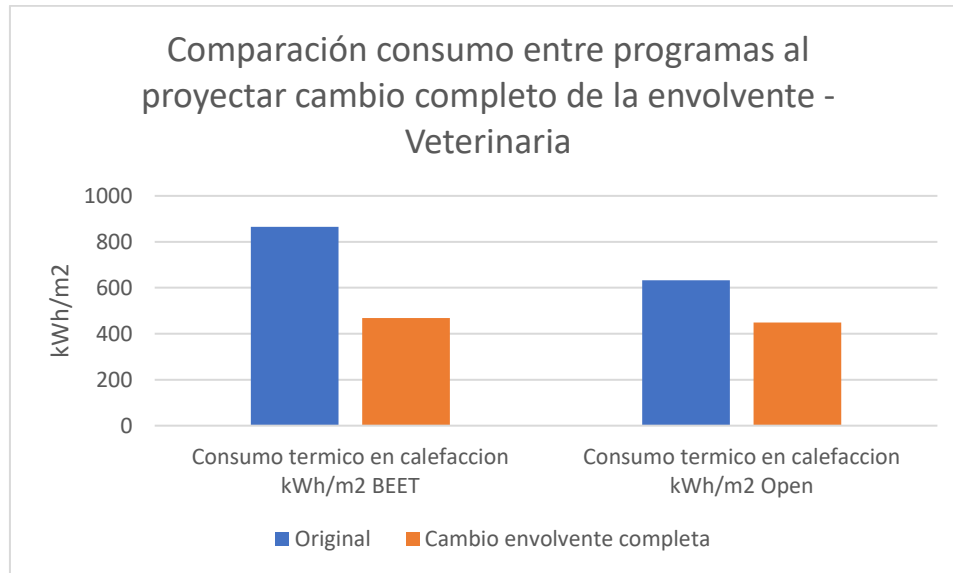


Figura 30: Comparación de consumos entre programas

Al simular la veterinaria con todos los cambios, se proyectó un ahorro en BEET de 45,8% y 29% en Open Studio. Para este caso hubo una diferencia en el cálculo de la demanda entre los programas de un 4,2 %.

4.3 Resultados de la municipalidad al ir mejorando la aislación de la envolvente

4.3.1 Aislación de la techumbre municipalidad

Tabla 15: Resultados al simular aislación en techo de municipalidad

| Aislación techumbre - municipalidad | | | | |
|-------------------------------------|--|--|---|--|
| Software | Transmitancia muros [W/m ² * K] | Transmitancia del techo [W/m ² * K] | Transmitancia ventanas [W/m ² * K] | Consumo en calefacción [kWh/m ²] |
| BEET | 2,7 | 0,47 | 5,88 | 501,28 |
| Open Studio | 2,88 | 0,47 | 5,89 | 227,51 |

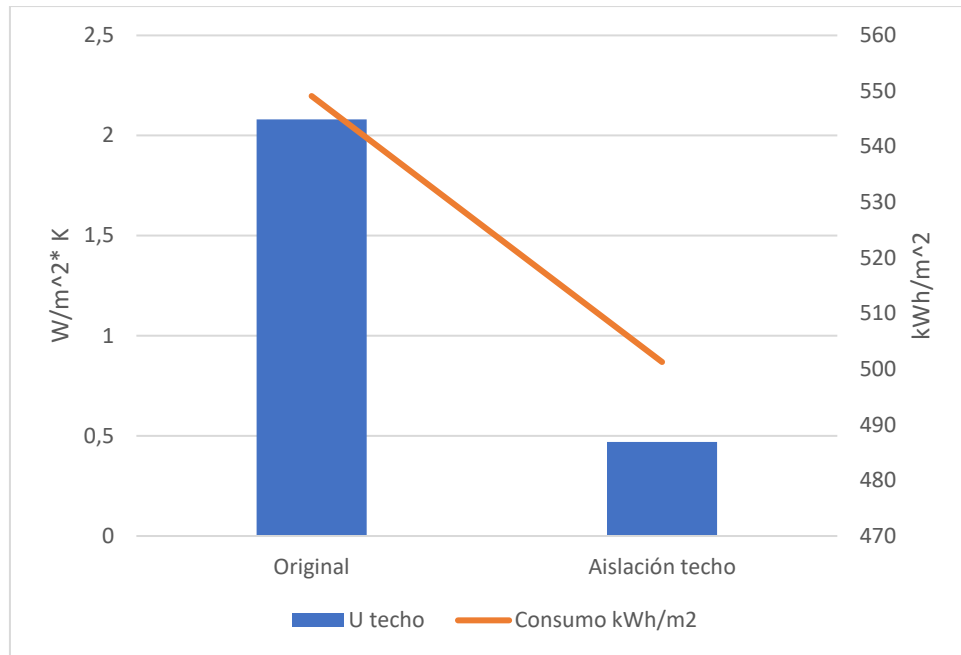


Figura 31: Consumo de GLP respecto de la transmitancia térmica del techo – Municipalidad BEET

Se realizó la simulación de techo de la municipalidad variando la transmitancia del techo en BEET y en Open Studio de $2,08 W/m^2 K$ a $0,47 W/m^2 K$ y $2,24$ $0,47$ respectivamente, proyectándose un ahorro en calefacción de $8,7\%$ en BEET y $0,7\%$ en Open Studio para este caso.

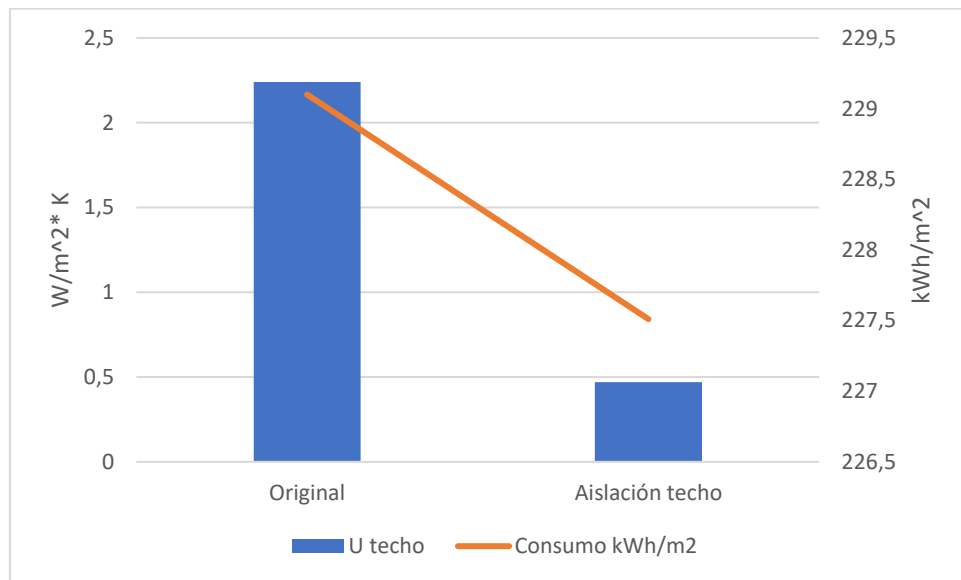


Figura 32: Consumo de GLP respecto la transmitancia térmica del techo - Municipalidad - Open Studio

En el cálculo de la demanda térmica los programas tuvieron una diferencia de $54,6\%$.

4.3.2 Aislación muros municipalidad

Tabla 16: Resultados al simular aislación en muros de municipalidad

| Aislación muros - municipalidad | | | | | |
|---------------------------------|-------------|--|--|---|--|
| Espesor aislación | Software | Transmitancia muros [W/m ² * K] | Transmitancia del techo [W/m ² * K] | Transmitancia ventanas [W/m ² * K] | Consumo en calefacción [kWh/m ²] |
| EIFS45 mm | BEET | 0,71 | 2,08 | 5,88 | 469,40 |
| | Open Studio | 0,72 | 2,24 | 5,89 | 178,37 |
| EIFS105 mm | BEET | 0,34 | 2,08 | 5,88 | 455,00 |
| | Open Studio | 0,34 | 2,24 | 5,89 | 177,17 |

Al igual que en el caso de la veterinaria se realizó la simulación de EIFS con poliestireno expandido de 40mm y 100mm. En BEET con el mayor espesor el ahorro proyectado fue de 17,14%, disminuyendo la transmitancia en los muros de 2,7 W/m²K a 0,34 W/m²K. Mientras que con el aislante de menor espesor el ahorro proyectado fue de 15%.

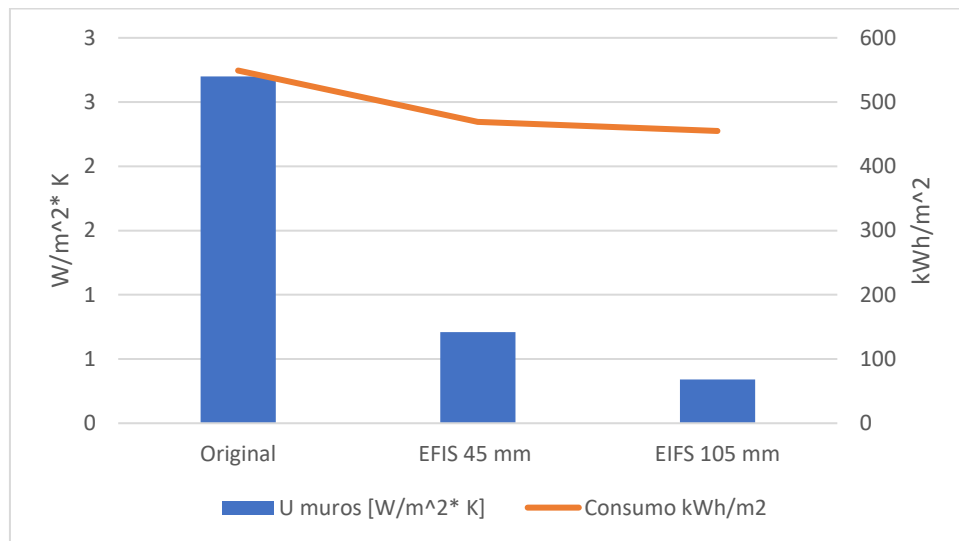


Figura 33: Consumo térmico respecto a la transmitancia en muros – Municipalidad – BEET

La proyección de ahorro en Open Studio para la aislación de mayor espesor de muros del edificio municipal fue de 22,7%, donde la transmitancia se varió de 2,88 W/m²K a 0,34 W/m²K. Mientras que para el aislamiento de menor espesor el ahorro fue de 19%.

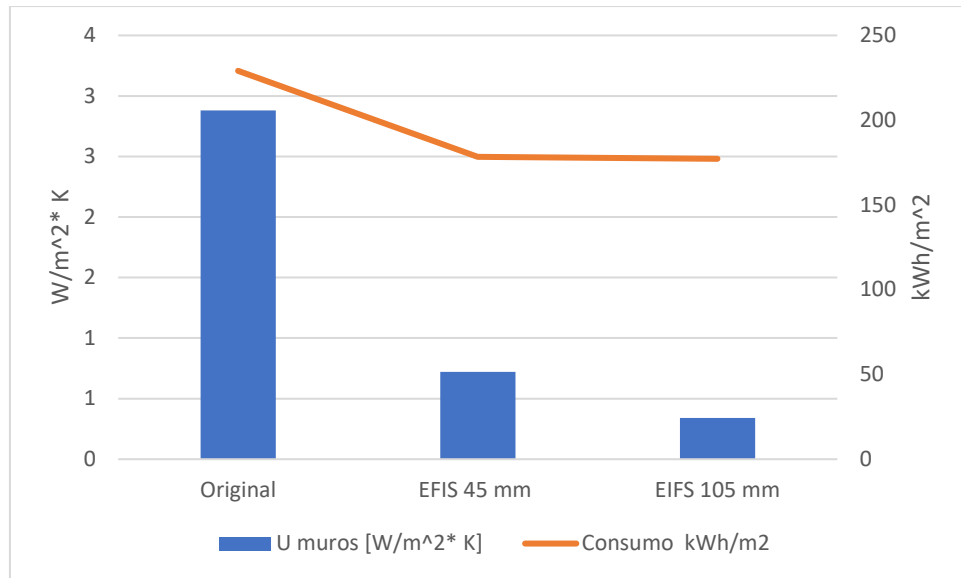


Figura 34: Consumo de GLP respecto a la transmitancia en muros - municipalidad- Open Studio

Para la aislación de muros de menor espesor los softwares difirieron en 62% en el cálculo del consumo, mientras que para la aislación de mayor espesor la diferencia fue de 61%.

4.3.3 Cambio de ventanas municipalidad

Tabla 17: Resultados simulación cambio de ventanas en municipalidad

| Cambio ventanas- municipalidad | | | | |
|--------------------------------|--|--|---|--|
| Software | Transmitancia muros [W/m ² * K] | Transmitancia del techo [W/m ² * K] | Transmitancia ventanas [W/m ² * K] | Consumo en calefacción [kWh/m ²] |
| BEET | 2,70 | 2,08 | 2,22 | 537,50 |
| Open Studio | 2,88 | 2,24 | 2,14 | 217,39 |

Al simular un cambio de ventanas en la municipalidad la herramienta Excel proyectó un ahorro con respecto a las condiciones iniciales de 2%.

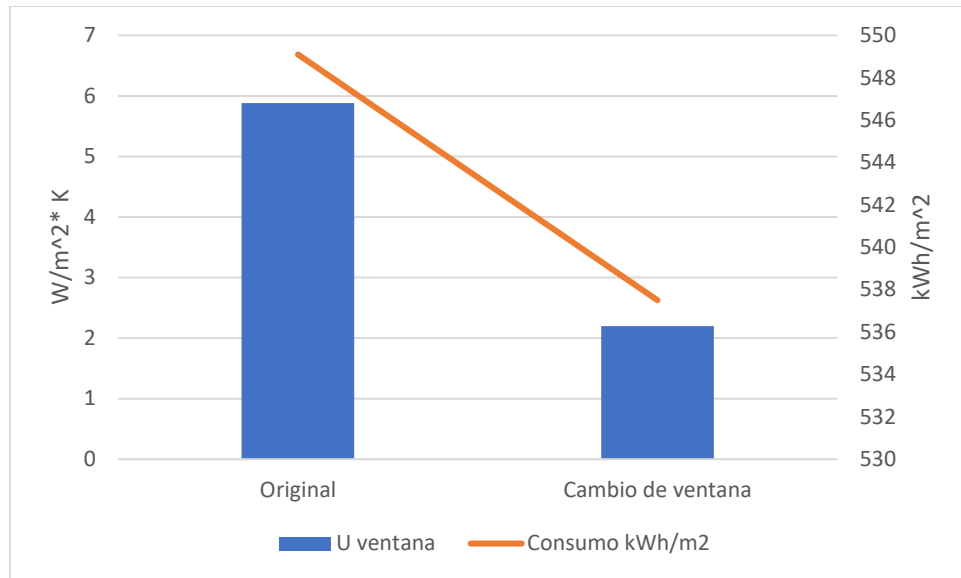


Figura 35: Comparación del consumo al realizar cambio de ventanas en la municipalidad – BEET

Al simular en OpenStudio el cambio de ventanas de la municipalidad se proyectó un ahorro de 5,1%.

Las herramientas tuvieron una diferencia en el cálculo del consumo para este caso de 59,6%.

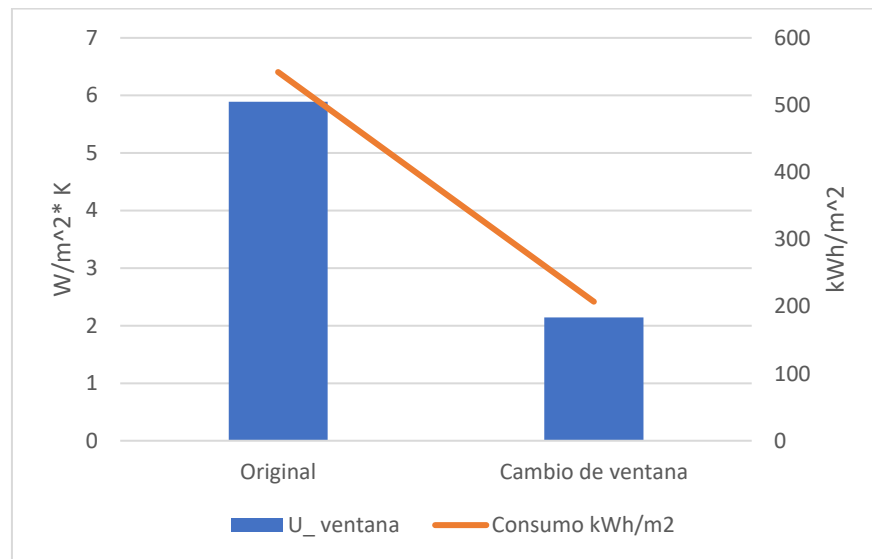


Figura 36: Comparación del consumo al realizar cambio de ventanas en la municipalidad – OpenStudio

4.3.4 Aislación en muros 100 mm más cambio de ventana en municipalidad

Tabla 18: Resultados de la simulación cambio de ventanas en municipalidad

| Aislación muros más cambio de ventana - municipalidad | | | | |
|---|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Software | Transmitancia muros [W/m²·K] | Transmitancia del techo [W/m²·K] | Transmitancia ventanas [W/m²·K] | Consumo en calefacción [kWh/m²] |
| BEET | 0,34 | 2,08 | 2,22 | 444,00 |
| Open Studio | 0,34 | 2,24 | 2,14 | 117,14 |

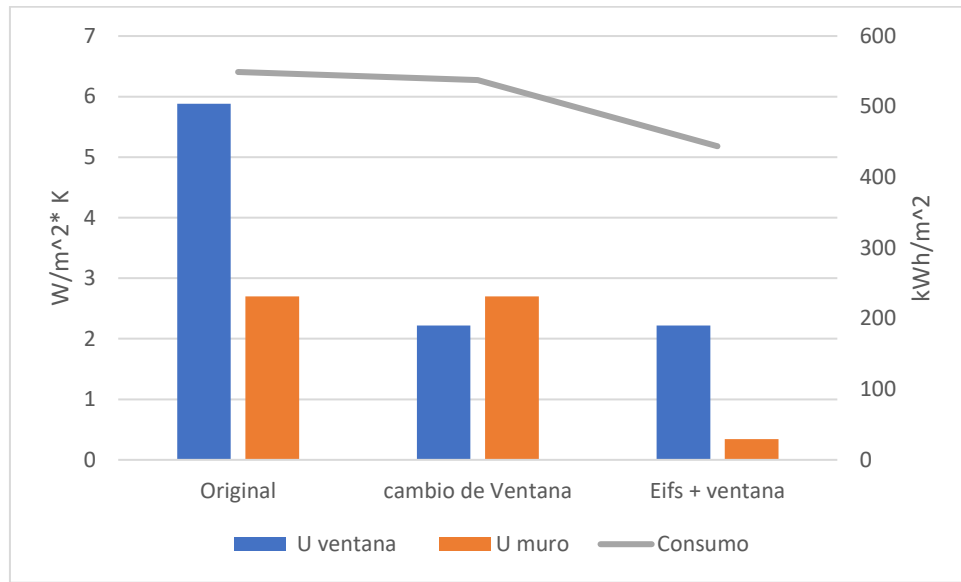


Figura 37: Consumo de GLP respecto a la transmitancia de muros y ventanas - municipalidad – BEET

Al caso anterior se le agrega un cambio de ventanas donde el ahorro en BEET aumentó en un 2%, es decir que el ahorro con respecto a las condiciones iniciales fue de 19,1%.

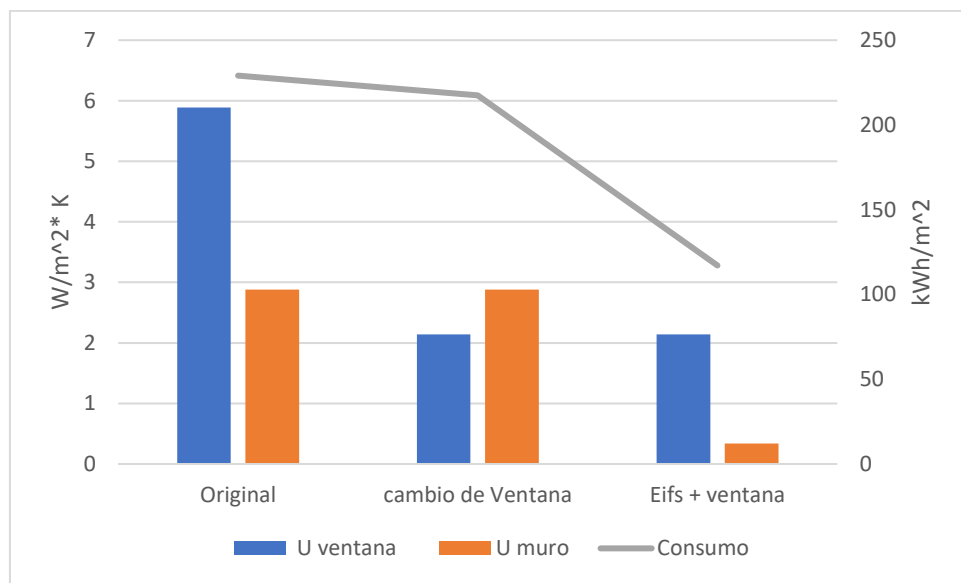


Figura 38: Consumo de GLP respecto de la transmitancia en muros y ventanas - municipalidad - Open Studio

En Open Studio al agregar el cambio de ventanas al cambio de muro tenemos una disminución en el consumo de energía para calefacción de 48,9% respecto al caso original. Proyectándose un aumento de 26,2% de ahorro respecto del caso de sistema EIFS de 100 mm de espesor en aislante.

Para este caso simulado la diferencia en el cálculo de la demanda térmica entre programas fue 73,6%.

4.3.5 Aislación de muros, techo y cambio de ventanas en municipalidad

Tabla 19: Resultados de simulación cambio de envoltente completa municipalidad

| Asilacion completa - municipalidad | | | | |
|------------------------------------|--|--|---|--|
| Software | Transmitancia muros [W/m ² * K] | Transmitancia del techo [W/m ² * K] | Transmitancia ventanas [W/m ² * K] | Consumo en calefacción [kWh/m ²] |
| BEET | 0,34 | 0,47 | 2,22 | 399,14 |
| Open Studio | 0,34 | 0,47 | 2,56 | 165,37 |

Simulando todos los cambios juntos, se proyectó un ahorro en BEET de 27,3% y 27,8% en Open Studio en el consumo de energía térmica en calefacción con respecto a las condiciones originales.

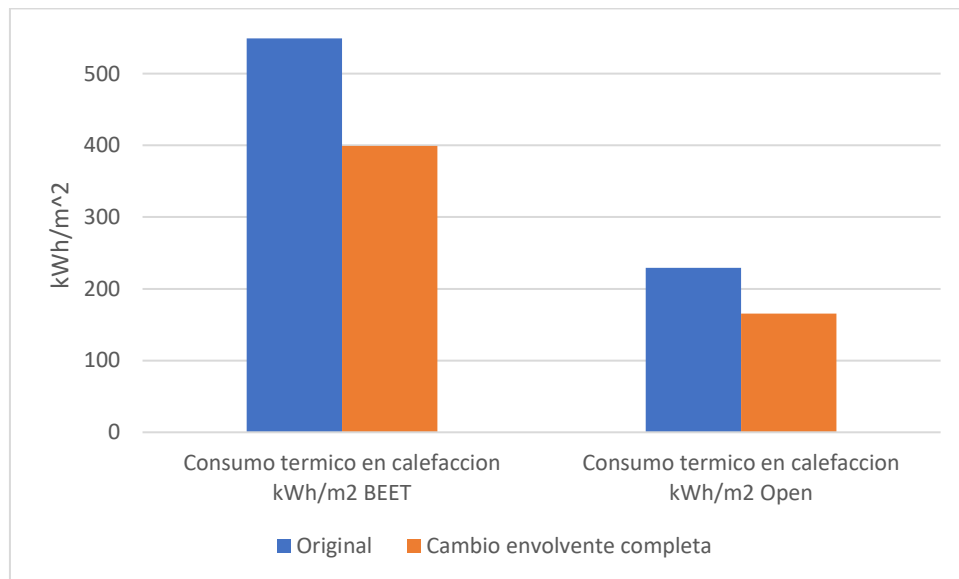


Figura 39: Comparación consumo entre programas al proyectar cambio completo de la envoltente

Para estas simulaciones la diferencia entre los consumos entre los softwares fue de 58,6%.

4.4 Influencia de azimut en la simulación

A continuación, se muestra el consumo en calefacción de la veterinaria y la municipalidad al igualar el azimut en ambos programas.

Para la veterinaria con condiciones iniciales constructivas la diferencia en la demanda térmica fue de 23,6%, con los consumos como se muestra en la figura 39.

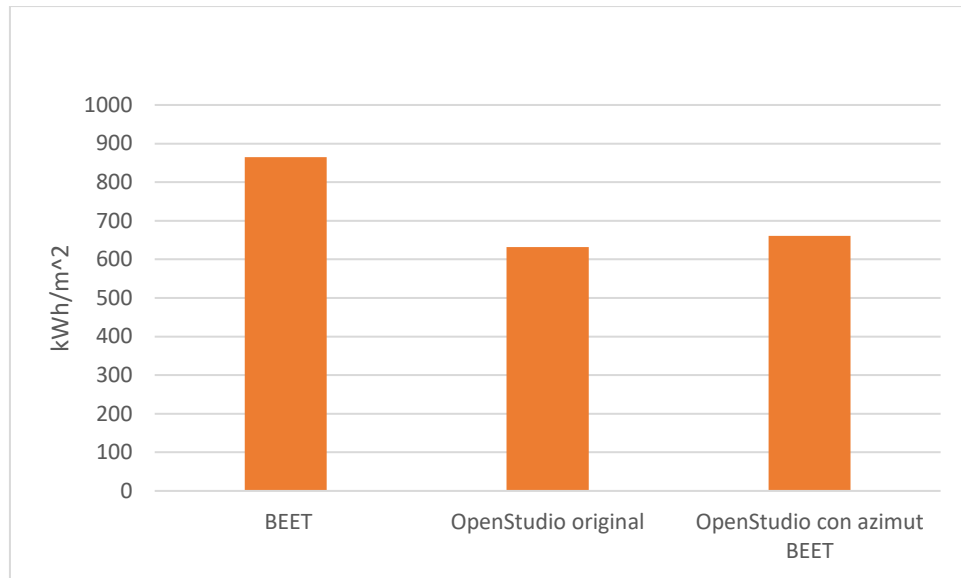


Figura 40: Comparación de consumo en calefacción al igualar la orientación en los programas.

Para la municipalidad sin aislación la diferencia de la demanda térmica al igualar el azimuth fue 57,7%, con los consumos que se muestran en la figura 40.

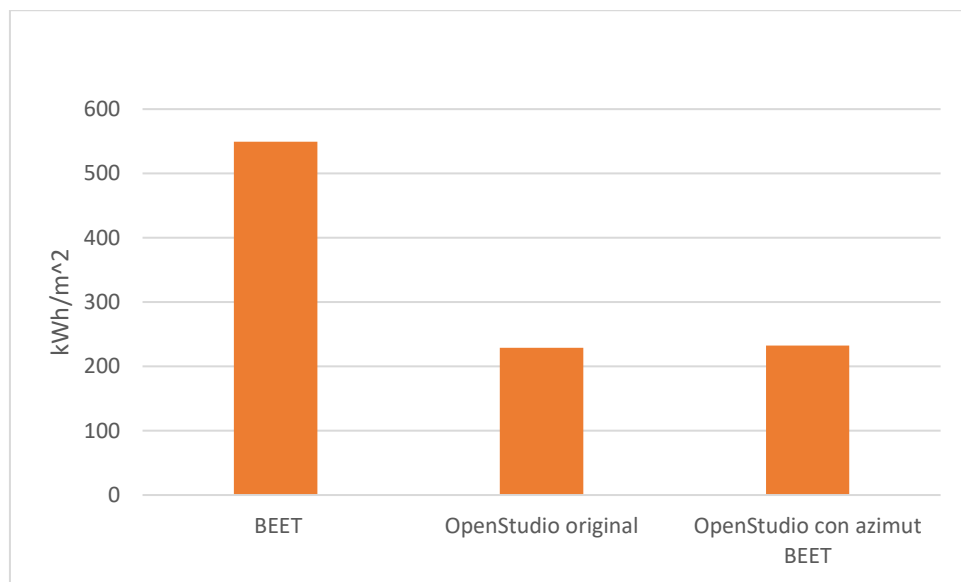


Figura 41: Comparación de consumo al igualar orientación en los programas

Podemos ver que la orientación, aunque ayudó a disminuir la diferencia entre los resultados de las herramientas, esto fue el mínimo, es por esto por lo que en el siguiente punto se analizará la influencia de los detalles del modelo 3D.

4.5 Modelación simple de los edificios en Open Studio

Al simular la veterinaria como un cubo y orientarla hacia el sur como esta predeterminado en BEET, fue donde más se acercaron los resultados, obteniendo una diferencia de 5,3% en el cálculo de consumo.

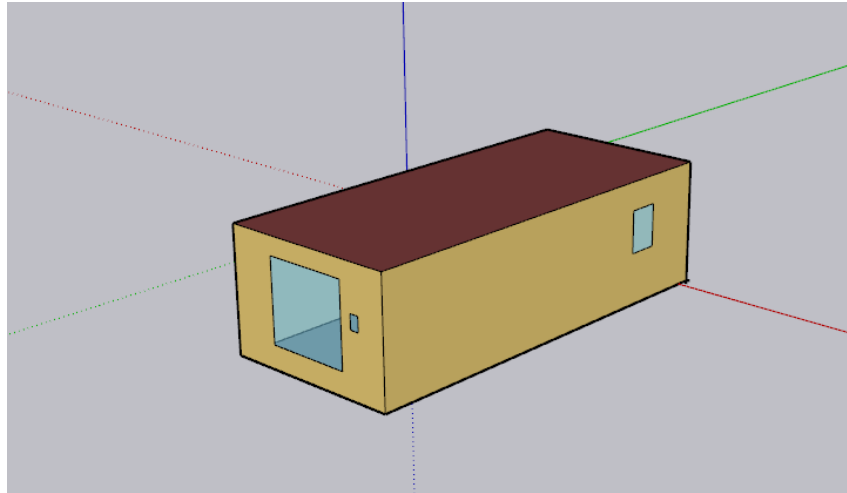


Figura 42: Veterinaria modelo 3D simplificado

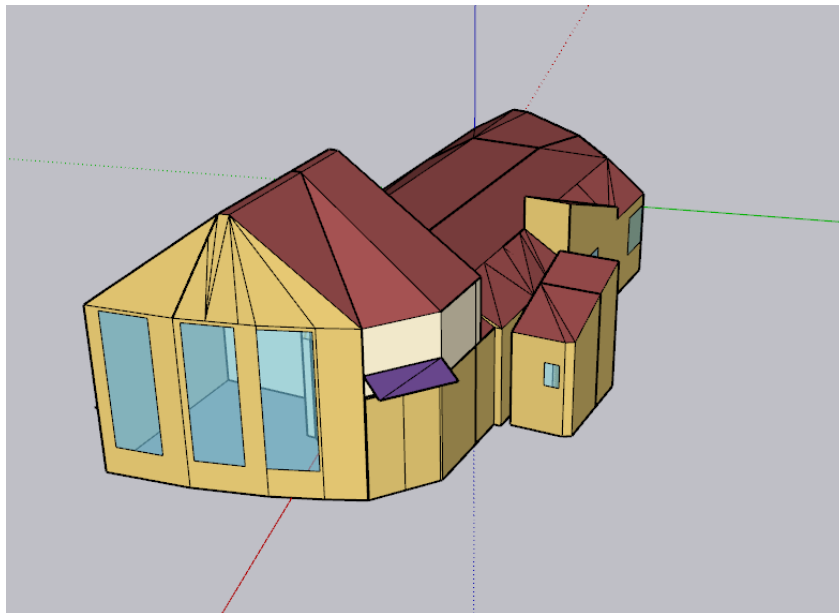


Figura 43: Veterinaria modelo 3D original

En la figura 44 se muestra la demanda energética térmica en BEET para la veterinaria en condiciones bases (sin ninguna mejora en la envolvente) vs la demanda termia en OpenStudio/EnergyPlus con la misma materialidad, pero simplificando el modelo 3D.

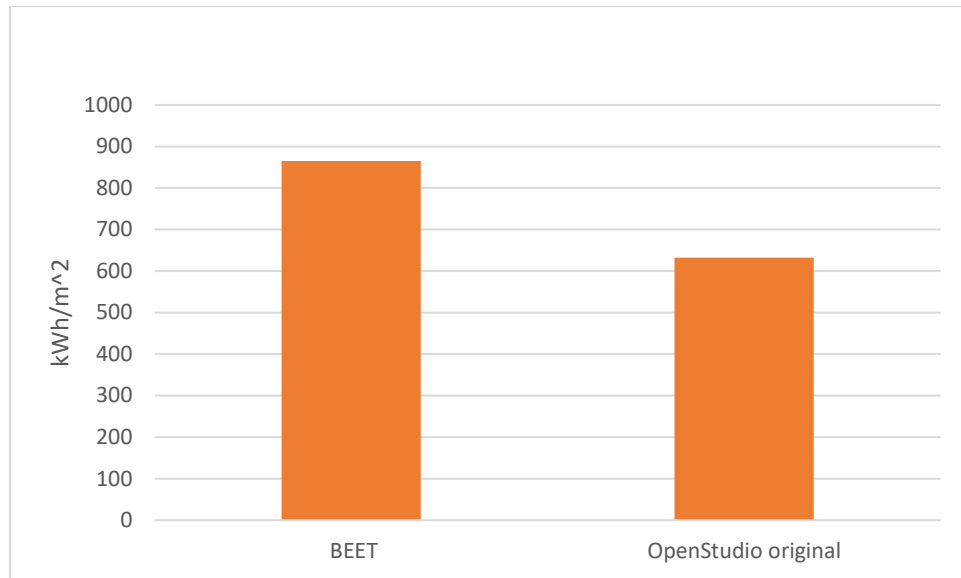


Figura 44: Comparación de consumos al simplificar modelo 3D en OpenStudio - veterinaria

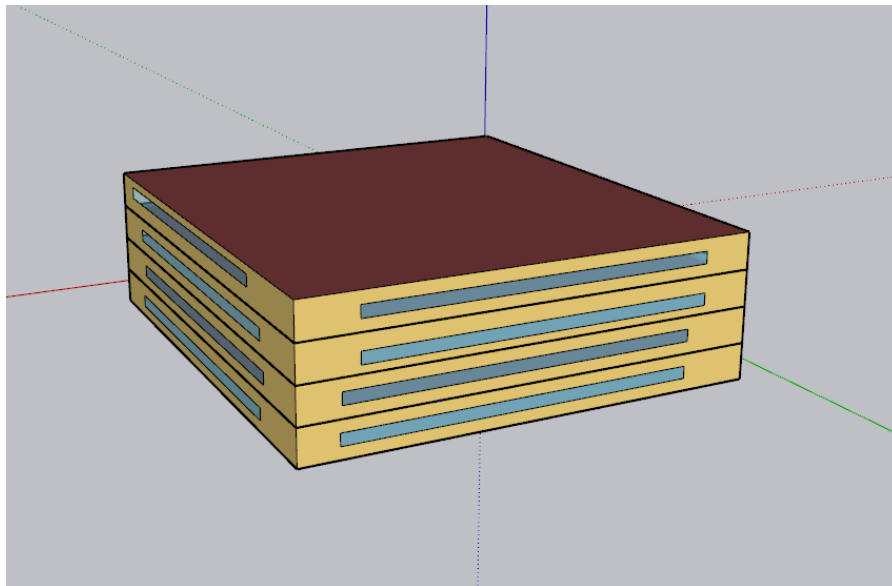


Figura 45: Municipalidad modelo 3D simplificado

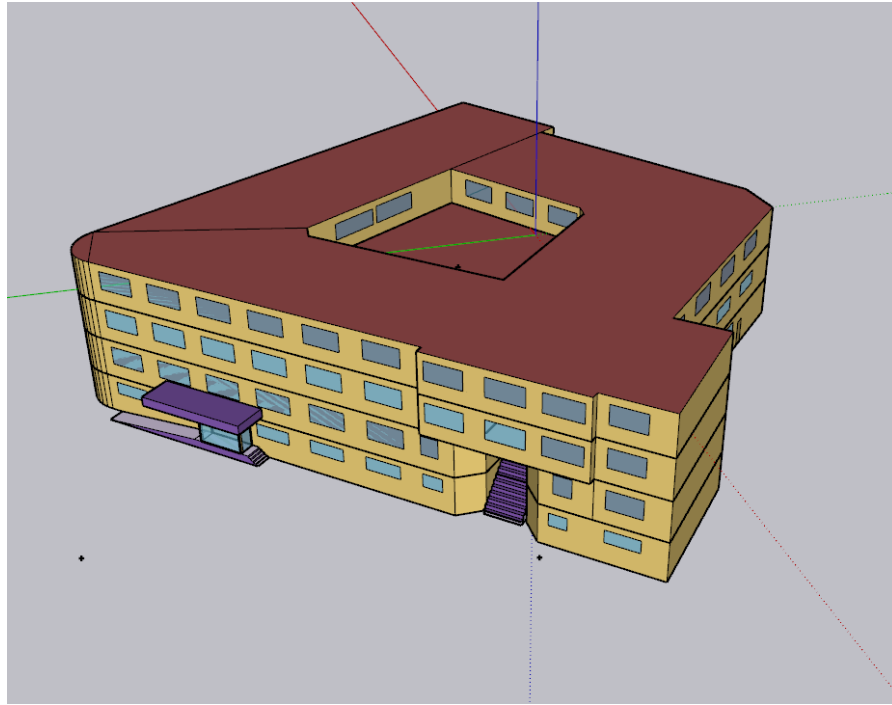


Figura 46: Municipalidad modelo 3D original

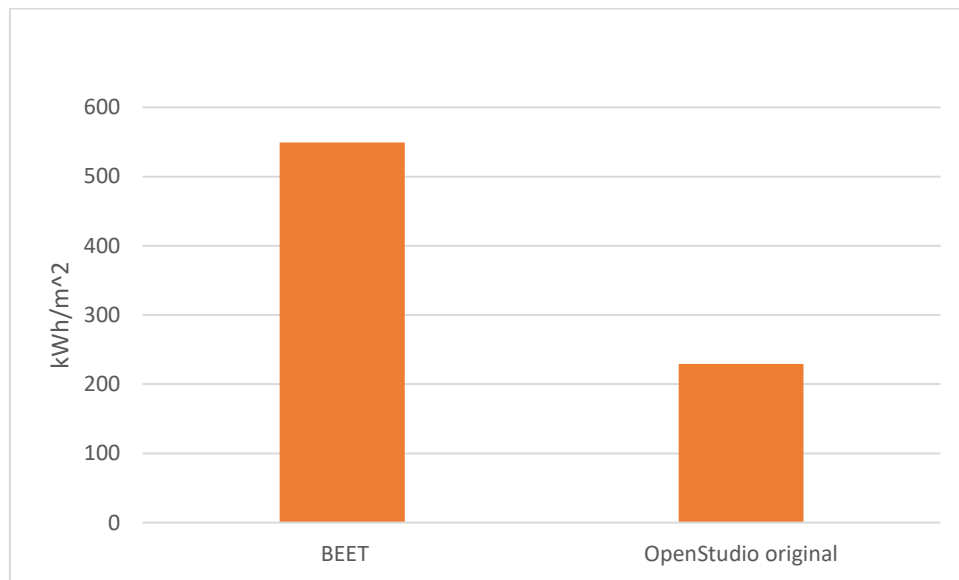


Figura 47: Comparación de consumos al simplificar modelo 3D en OpenStudio – municipalidad

En la figura 47 se muestra la demanda energética térmica en BEET para la veterinaria en condiciones bases (sin ninguna mejora en la envolvente) vs la demanda termia en OpenStudio/EnergyPlus con la misma materialidad, pero simplificando el modelo 3D.

Al simplificar el dibujo de la municipalidad la diferencia en el consumo entre los programas fue de 15,9%.

5 Conclusiones

Las simulaciones realizadas indican que el factor que más influye en la diferencia del cálculo de la demanda térmica en calefacción a lo largo de un año es la capacidad de OpenStudio para crear un modelo 3D detallado de los edificios. Esta herramienta permite una representación más precisa de la geometría y las características del edificio, lo que se traduce en simulaciones más confiables y ajustadas a la realidad.

A medida que se mejora la envolvente térmica de un edificio, las herramientas de simulación proyectan ahorros de ordenes cercanos. Simulando el cambio de envolvente completa en ambos programas, se proyectó un ahorro en BEET de 27,3% y 27,8% en Open Studio en el consumo de energía térmica en calefacción con respecto a las condiciones originales.

Dentro de las posibles mejoras para la herramienta BEET, se sugiere la inclusión de condiciones climáticas específicas de la comuna o ciudad donde se encuentran los edificios, así como la capacidad de ingresar la orientación real de estos. Estas características permitirían una simulación más ajustada a las condiciones locales, mejorando la precisión de los resultados.

Además, sería beneficioso que los cálculos en BEET incluyeran el efecto de la inercia térmica de los materiales. A medida que aumenta el número de pisos en un edificio, la diferencia en el cálculo de la demanda energética podría ser más notable si se considera el efecto amortiguador que los materiales tienen sobre las fluctuaciones de temperatura.

BEET cumple su función de herramienta que sirve para proporcionar a los usuarios individuales sin ser expertos en el área una plataforma preliminar de evaluación rápida donde pueden evaluar el rendimiento energético de sus edificios. Pudiendo ser usada como herramienta para anteproyectos, y, según los resultados obtenidos, profundizar en el análisis utilizando herramientas más precisas.

Referencias

- [1] Iberdrola. (s.f.). Sobreexplotación de los recursos naturales. Recuperado el 26 de junio de 2024, de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/sobreexplotacion-de-los-recursos-naturales>
- [2] Hannah Ritchie y Max Roser. (s.f.). Energy Production & Consumption. Our World in Data. Recuperado el 26 de junio de 2024, de <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- [3] Comisión Nacional de Energía. (2022). *Anuario CNE 2022*. Recuperado de <http://energiaabierta.cl>
- [4] Ministerio de Energía. (2020). *Energía 2050: Política energética de Chile, Hoja de Ruta al 2050*. Recuperado de https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf
- [5] Agencia de Sostenibilidad Energética. (enero, 2023). *Guía Metodológica para el desarrollo de estrategias energéticas locales, Programa comuna Energética*. Recuperado de <https://energia.gob.cl/documentos/guia-metodologica-para-el-desarrollo-de-estrategias-energeticas-locales>
- [6] Banco Mundial. (2017). *Energy Efficiency*. Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/energy-efficiency>
- [7] Solarinfo. (2023, diciembre 5). *COP28 acoge compromiso global sobre energías renovables y eficiencia energética*. Recuperado de <https://www.solarinfo.es/2023/12/05/cop28-acoge-compromiso-global-sobre-energias-renovables-eficiencia-energetica>
- [8] Comisión Nacional de Energía. (s.f.). *Balance de Energía*. Recuperado de <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- [9] ACERA. (2023). Boletín Estadísticas ACERA 2023. Recuperado de <https://www.acera.cl/wp-content/uploads/2023/06/2023-05-Boletin-Estadisticas-ACERA.pdf>
- [10] Comisión Nacional de Energía. (2024, junio). *CNE lanzó Anuario Estadístico 2023*. Recuperado de <https://www.cne.cl/prensa/prensa-2024/06-junio/cne-lanzo-anuario-estadistico-2023/>
- [11] Instituto Nacional de Normalización. (2021). NCh853:2021. Recuperado de <https://www.inn.cl/norma/nch853-2021>
- [12] Yargattimath Trupti (2023) Self Assessment Building Energy Efficiency Tool (BEET). (Hoja de cálculo excel).
- [13] Universidad Tecnológica de Chile. (n.d.). Solución constructiva de muro de albañilería EAFIS. Recuperado de <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-tecnologica-de-chile/calculo-estructural/m1-solucion-constructiva-muro-albanileri-aeifs/38965577>
- [14] Casabianca, G. A., Snoj, M. V., & Marusic, J. (n.d.). *Herramientas para el análisis de la eficiencia energética en edificios*. Materia Optativa Energía en Edificios, cátedra Evans/Casabianca,

Proyecto PIA-TRP 18 – SI - Centro de Investigación Hábitat y Energía (CIHE-SI-FADU-UBA). Recuperado de <https://publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/actas/article/view/2402>

[15] Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Pedersen, C. O., & Winkelmann, F. C. (2000). EnergyPlus: Energy Simulation Program. *ASHRAE Journal*, 42, 49-56. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Drury-Crawley/publication/230606369_EnergyPlus_Energy_Simulation_Program/links/56f03dad08ae0dcdafd6a68b/EnergyPlus-Energy-Simulation-Program

[16] EnergyPlus. (2015). *Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations*. The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Copyright © 1996-2015. All rights reserved. EnergyPlus is a trademark of the U.S. Department of Energy. Recuperado de <https://dl.icdst.org/pdfs/files3/13a5f02cef65a50fe4e967964e66ed0d.pdf>

[17] Sánchez Ramírez, M. I. (2013). *Modelo dinámico para la optimización de un sistema eléctrico en base a biodiesel* [Memoria de título, Universidad de Chile]. Repositorio Universitario de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151706/Modelo-dinamico-para-la-optimizacion-de-un-sistema-electrico-en-base-a-biodiesel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Anexo 1: Materiales simulados

Capa constructiva muro con aislante veterinaria

| Layer | Capa del elemento constructivo | Espesor de cada capa (e) |
|-------|---------------------------------------|--------------------------|
| | | m |
| | Resistencia superficial exterior | |
| 1 | MATERIALES AISLANTES-POLIESTIRENO EXP | 0,1 |
| 2 | MADERAS-MADERA TERCIADA- | 0,018 |
| 3 | Camara de aire | 0,06 |
| 4 | MADERAS-MADERA TERCIADA- | 0,012 |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| | Resistencia superficial interior | |

Capa constructiva techo con aislación veterinaria

| Layer | Capa del elemento constructivo | Espesor de cada capa (e) |
|-------|--------------------------------------|--------------------------|
| | | m |
| | Resistencia superficial exterior | |
| 1 | Metal-Galvanized steel | 0,001 |
| 2 | Plancha de OSB | 0,012 |
| 3 | MATERIALES AISLANTES-CORCHO-EN PLANO | 0,04 |
| 4 | MADERAS-PINO SPRUCE, ABETO-PERPEND | 0,015 |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| | Resistencia superficial interior | |

Capa constructiva muro con aislante

| Layer | Capa del elemento constructivo | Espesor de cada capa (e) |
|-------|---------------------------------------|--------------------------|
| | | m |
| | Resistencia superficial exterior | |
| 1 | MATERIALES AISLANTES-POLIESTIRENO EXP | 0,1 |
| 2 | MORTEROS-DE REVOQUE Y JUNTAS-Exterior | 0,01 |
| 3 | HORMIGONES-AGREGADOS-PETROS | 0,29 |
| 4 | MORTEROS-DE REVOQUE Y JUNTAS-Interior | 0,01 |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| | Resistencia superficial interior | |

Capa constructiva techo con aislación municipalidad

| Layer | Capa del elemento constructivo | Espesor de cada capa (e) |
|-------|--------------------------------------|--------------------------|
| | | m |
| | Resistencia superficial exterior | |
| 1 | Metal-Galvanized steel | 0,001 |
| 2 | | 0,012 |
| 3 | Camara de aire | 0,01 |
| 4 | MATERIALES AISLANTES-ESPUMA-FENOLICA | 0,05 |
| 5 | MORTEROS-YESO-EN PLANCHAS | 0,01 |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| | Resistencia superficial interior | |