



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN EDIFICIOS DE CONSUMO ENERGÉTICO CASI NULO EN QUITO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ARIAS ZEA KELVIN ANDRÉS

kelvin.arias@epn.edu.ec

DIRECTOR:

Dr. ORDÓÑEZ MALLA FREDDY

freddy.ordonez@epn.edu.ec

Quito, enero 2023

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Kelvin Andrés Arias Zea**, bajo mi supervisión.

FREDDY GEOVANNY
ORDONEZ MALLA

Firmado digitalmente por FREDDY GEOVANNY ORDONEZ
MALLA
Nombre de reconocimiento (CNE): o=EC, o=BANCO CENTRAL
DEL ECUADOR, ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE
INFORMACION ECERCE, l=QUITO, serialNumber=000037832,
cn=FREDDY GEOVANNY ORDONEZ MALLA
Fecha: 2021.03.15 16:36:54 -05'00'

Dr. Freddy Ordóñez Malla

DECLARACIÓN

Yo, **Kelvin Andrés Arias Zea**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Kelvin Andrés Arias Zea

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a dos personas importantes en mi vida Danilo Yépez Alemán, el me enseñó lo hermoso de la vida y a luchar por lo que en verdad quiero y a Daniela Guerra Flores que me enseñó a no rendirme en mis momentos más difíciles, ella me ayudó a levantarme.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la segunda oportunidad que me dio.

A mi director de tesis, Freddy Ordóñez; por su guía, confianza y en especial paciencia en este trabajo de titulación. También a Francisco Jácome, que su ayuda fue importante en la simulación de este trabajo.

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional, profesores y secretarias, por su apoyo y sobre todo por haberme enseñado mucho.

Gracias a mi madre y mi abuela, quienes me ayudaron a formarme como persona; a mis hermanos Francisco y Paula por haberme enseñado muchas cosas a pesar de la distancia son mi fuerza para seguir adelante, a mi tío Cesar Zea que fue una figura paterna en mi niñez. Agradezco a mi equipo de trabajo en ASHRAE, que aparte de compañeros son amigos:

Xavier, Gaby, Eve y Diego A. A los advisors: Carlos y Miguel, cuyo apoyo ha sido importante para mí crecimiento, en una etapa importante de mi vida.

A mis amigos, los cuales han sido un pilar importante en mi vida académica, quienes me enseñaron a divertirme; pero también a esforzarme en terminar lo que me proponga: Xavier Sandoval, Iván García, Diego Arellano, Diego Vaca, Miguel Oña, Eve Majin, Mire Osorio y Jean Paul Andrade.

A mis padrinos, Kenshi Banderas y Ma. Fernanda León, que estuvieron pendientes en la etapa final de mi proyecto de titulación.

A mi enamorada, Daniela Guerra, que me ha apoyado incondicionalmente en cada aspecto de mi vida.

A mi mejor amigo, Christopher B. y a su mamá Mónica, que es como una madre para mí.

A mi amigo David Alemán, gracias a él y a EcuadorianBlood puedo disfrutar lo hermoso que es la cultura de la cerveza artesanal, así como aprender a manejar un negocio y ha Erick (Toby) que ha sido como un hermano menor y me acompañó en tantas aventuras.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido

RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	13
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
Pregunta de Investigación.....	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos.....	16
Alcance.....	17
1 MARCO TEÓRICO.....	18
1.1 Historia de Edificios de Consumo Energético Casi Nulo.....	19
1.2 Definición de Edificios de Consumo Energético Casi Nulo.....	21
1.3 Clasificación de los Edificios de Consumo Energético Nulo.....	23
1.4 Estrategias para Obtener Edificios de Consumo Energético Casi Nulo.....	24
1.4.1 Estrategia de Diseño Pasivo.....	24
1.4.2 Estrategia de Diseño Activo.....	25
1.4.3 Estrategia de Diseño de Energías Renovables.....	25
Certificaciones Internacionales.....	25
1.5.1 LEED.....	25
1.5.2 ITACA.....	26
1.5.3 Green Star.....	26
1.5.4 BREEAM.....	26
1.5.5 CASBEE.....	27
1.6 Indicadores de Sostenibilidad.....	27
1.7 Construcción Sostenible de Edificios en Quito.....	28

2 METODOLOGÍA.....	30
2.1 Selección de Indicadores de Sostenibilidad.....	30
2.1.1 Energías Usadas en un Edificio.....	31
2.1.2 Confort Térmico como Usuario de la Energía.....	32
2.2 Caso de Estudio.....	34
2.2.1 Consideraciones Importantes	36
2.2.2 Condiciones de Borde.....	39
2.3 Entorno de Simulación.....	40
2.4 Validación de la Simulación Eplus.....	45
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
3.1 Indicadores de Sostenibilidad.....	47
3.1.1 Consumo Eléctrico Mensual.....	49
3.1.2 Consumo Eléctrico Mensual por Unidad de Superficie.....	50
3.1.3 Consumo Eléctrico Mensual por Habitante.....	51
3.1.4 Consumo Energético para Iluminación.....	52
3.1.5 Consumo Energético para Iluminación por Unidad de Superficie.....	55
3.1.6 Consumo Energético para Calefacción.....	56
3.1.7 Consumo Energético para Calefacción por Unidad de Superficie.....	57
3.1.8 Consumo Energético para Cocción y Calentamiento de Agua.....	58
3.1.9 Generación Energética Renovable Fotovoltaica.....	59
3.1.10 Confort Térmico.....	60
3.2 Simulación.....	61
3.2.1 Archivo de Clima.....	62
3.2.2 Validación.....	62
3.3 Análisis de Resultados.....	63
3.3.1 Comparativa en confort térmico.	64

3.3.2 Consumo total de energía.....	67
4 CONCLUSIONES.....	69
5 ANEXO.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Visión general de las definiciones en diferentes países europeos.....	22
Tabla 2.1 Evaluación de los indicadores de sostenibilidad.....	31
Tabla 2.2 Horario de Sala-Comedor.....	34
Tabla 2.3 Materiales de Construcción de la Vivienda.....	37
Tabla 2.4 Materiales de Construcción Vivienda/Simulados.....	38
Tabla 2.5 Dimensiones de Ventanas Simuladas.....	39
Tabla 2.6 Variables de Entrada del SAM.....	42
Tabla 2.7 Variables de Salida del SAM.....	43
Tabla 3.1 Valores de los Indicadores de Sostenibilidad.....	47
Tabla 3.2 Horario de Uso de Iluminación.....	52
Tabla 3.3 Equivalencias energética del GLP.....	59
Tabla 3.4 Valores de NMBE y de NRMSE.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Límite del lugar de la transferencia de energía para la contabilidad de energía cero.....	22
Figura 1.2 Sector Energético 2020.....	28
Figura 2.1 Consumo energético del caso de estudio.....	32
Figura 2.2 Temperatura Operativa Óptima para Viviendas Ventiladas Naturalmente	33
Figura 2.3 Distribución del Departamento	35
Figura 2.4 Medidas del Caso de Estudio.....	36
Figura 2.5 Condiciones de Borde de la Vivienda.....	39
Figura 2.6 Condiciones de Borde Modificada.....	40
Figura 2.7 Modelo de la Vivienda	41
Figura 2.8 Estructura Simplificada de EnergyPlus.....	41
Figura 2.9 Creación de horario manteniendo la temperatura constante a 20°C.	4 4
Figura 2.10 Diagrama de flujo de trabajo para modelar y simular el problema....	45
Figura 3.1 Consumo de Electricidad Mensual	49
Figura 3.2 Consumo Mensual de Electricidad de la Vivienda.....	51
Figura 3.3 Consumo Mensual de Electricidad por Persona.....	52
Figura 3.4 Consumo Mensual de Electricidad en Iluminación	55
Figura 3.5 Consumo Mensual de Electricidad en Iluminación por Unidad de Superficie	56
Figura 3.6 Requerimiento de calefacción de la vivienda caso de estudio a 19.6°C	57
Figura 3.7 Requerimiento de calefacción y enfriamiento del caso de estudio a 19.6°C	58
Figura 3.8 Generación de Energía Fotovoltaica	59

Figura 3.9 Rango de Confort Térmico Mensual para un Año de cada Dependencia de la Vivienda.....	60
Figura 3.10 Porcentaje de confort térmico de una vivienda normal.....	61
Figura 3.11 Comparación de los Datos Simulados y los Datos Medidos.....	66
Figura 3.12 Porcentaje de confort térmico en la vivienda normal.....	64
Figura 3.13 Porcentaje de confort térmico en la vivienda de bajo consumo energético.....	65
Figura 3.14 Requerimiento en calefacción de la vivienda normal.....	66
Figura 3.15 Requerimiento en calefacción de la vivienda con cambios en la envolvente.....	66
Figura 3.16 Energía total usada en una vivienda	67
Figura 3.17 Energía total utilizada en una vivienda nZEB en Quito.....	68

RESUMEN

Un concepto importante en el sector de la construcción que ha ido ganando popularidad es nZEB (nearly zero energy building), los edificios de bajo consumo energético, los cuales han sido definidos por diferentes regiones. Analizando estas definiciones, se observó que estas no satisfacen las necesidades para un clima andino como el que tiene Quito. Los edificios sostenibles presentan diferentes indicadores los cuales ayudan a evaluar su sostenibilidad, diferentes entidades han desarrollado metodologías que ayudan a realizar esta evaluación. En este trabajo se analizaron los indicadores de diferentes entidades con el fin de seleccionar los indicadores que permitan obtener una definición de edificio de bajo consumo energético para un clima andino.

Se realizó el análisis individual de cada uno de los indicadores de sostenibilidad, se compararon con diferentes ordenanzas municipales del Distrito Metropolitano de Quito, así como de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción; lo cual permitió tener una amplia visión de la sostenibilidad en edificaciones en Quito. Cabe mencionar que solo fueron analizados los indicadores energéticos debido al alcance de este trabajo de titulación.

Los indicadores de sostenibilidad seleccionados permitieron llegar a la conclusión de que para climas andinos se debe considerar al confort térmico como un usuario energético, debido a que en el Ecuador el 67% de las viviendas no tienen un confort térmico adecuado. El presente trabajo pretende analizar al confort térmico como usuario energético en un clima andino, así como los diferentes parámetros de construcción que permitan mejorarlo. Para la simulación se usó dos tesis importantes, la tesis de Muñoz y Prado, que contiene como caso un estudio experimental del comportamiento térmico, el cual es una vivienda ubicada en el sector de la Vicentina. Por otro lado, la tesis de Jácome permitió seleccionar los parámetros de construcción principales para mejorar el confort térmico, los cuales fueron materiales y espesor de las paredes, material de las ventanas y WWR.

Se analizaron los parámetros individualmente por cada dependencia de la vivienda, luego se realizó un análisis completo de la vivienda, con el fin de entender cómo afecta cada uno de los cambios en el cambio total. Se pudo observar que los porcentajes de mejora en el confort térmico no representan una mejoría en el porcentaje final del confort térmico de la vivienda.

Palabras clave: Energy-Plus, Confort térmico, nZEB, sostenibilidad, indicadores de sostenibilidad.

ABSTRACT

An important concept in the construction sector that has been gaining popularity is nZEB (nearly zero energy building); low energy buildings have been defined by different regions. Analyzing these definitions, it was observed that they do not satisfy the needs for an Andean weather, like Quito's weather, sustainable buildings present different indicators which help to evaluate their sustainability, diverse entities have developed methodologies that help to carry out this evaluation. In this work, the indicators of different entities were analyzed in order to select the indicators that allow obtaining a definition of a building with low energy consumption.

Each of the sustainability indicators was analyzed individually; they were compared with different municipal ordinances of Quito's Metropolitan District, as well as the Ecuadorian Construction Regulations, which allowed us to have a broad vision of the sustainability in Quito. It should be mentioned that only the energy indicators were analyzed due to the scope of this work.

The selected sustainability indicators allowed us to conclude that for Andean climates, thermal comfort should be considered as an energy user, because in Ecuador 45% of homes do not have adequate thermal comfort. This work aims to analyze thermal comfort as an energy user in an Andean climate, as well as the different construction parameters that allow

it to be improved. For the simulation, two important theses were used, the Muñoz and Prado thesis, which contains as a case an experimental study of thermal behavior, which is a house located in the Vicentina sector. On the other hand, Jácome's thesis allowed the selection of the main construction parameters to improve thermal comfort, which were materials and thickness of the walls, material of the windows and WWR.

The parameters were analyzed individually for each dependency of the dwelling, then a complete analysis was carried out, in order to understand how each, one of the changes in the house affects the total change. It was observed that the percentages of improvement in thermal comfort do not represent an improvement in the final percentage of thermal comfort in the house.

Keywords: Energy-Plus, Thermal comfort, nZEB, sustainability, sustainability indicators.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
NZEB	Net Zero Energy Building
nZEB	Nearly Zero Energy Building
ZEB	Zero Energy Building
ZEB	Zero Emission Building
NZSoEB	Net Zero Source Energy Building
NZSiEB	Net Zero Site Energy Building
NZEC	Net Zero Energy Cost Building
nNZEB	Nearly Net Energy Building
Autonomous	Autonomous Zero Energy Building
ZEB	
+ZEB	Energy Plus Building
PV-ZEB	Photovoltaic Zero Energy Building
Wind-ZEB	Wind Zero Energy Building
PV-Solar thermal-heat pump ZEB	Photovoltaic Solar thermal heat pump Zero Energy Building
Wind-Solar thermal-heat pump ZEB	Wind Solar thermal heat pump Zero Energy Building
DMQ	Distrito Metropolitano de Quito
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
BPS	<i>Building performance simulation</i>
BLAST	<i>Building load analysis and system thermodynamics</i>
IES	<i>Integrated Environmental Solution</i>

DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN EDIFICIOS DE CONSUMO ENERGÉTICO CASI NULO EN QUITO

INTRODUCCIÓN

Debido al incremento poblacional y a los cambios en el estilo de vida, el consumo de energía primaria, que es la energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida, está en continuo aumento. Según el informe estadístico publicado por British Petroleum (BP)

[1] en 2018, en los últimos 10 años, el crecimiento promedio del consumo de energía primaria mundial ha sido de 1.7% anual. Así mismo, el 32% de la energía final, que es la energía consumida directamente por el usuario, es destinada al funcionamiento de los edificios. De este, el 24% se dirige al sector residencial y el 8% al sector comercial [2][3]. Además, para el 2017 el 85% de la energía consumida provino de la quema de combustibles fósiles, que son responsables de las emisiones de CO₂. De esta manera, el sector residencial es responsable del 19% de las emisiones a nivel mundial [2][4].

Reducir el impacto ambiental ocasionado por la construcción, operación y demolición de un edificio, es una tarea que algunos países ya están desarrollando. Para resolver este problema se debe tomar en consideración varios factores, principalmente la disminución del consumo de energía y la utilización de fuentes de energías renovables [5].

La reducción del consumo de energía en los edificios es un pilar importante en las estrategias que garantizan alcanzar los objetivos futuros relacionados con clima y energía [6]. Una oportunidad de lograr estos objetivos son los edificios de consumo energético casi nulo (nZEB), cuyo concepto ya no aparece como un concepto futuro, sino más bien como una solución realista para la mitigación de las emisiones de CO₂ y la reducción del uso de energía en el sector de la construcción [7].

En los últimos años Europa y EE. UU han comenzado a implementar el concepto de edificios de consumo energético casi nulo en edificios nuevos y existentes, mediante medidas destinadas a disminuir el consumo energético de los edificios, así como también aumentar el número de edificios que cumplan con sus definiciones de bajo consumo energético [8,9]. Sin embargo, estas medidas no son generales para todas las climatologías. En Ecuador, al estar sobre la línea equinoccial y estar atravesados por la cordillera de los Andes, se

forman muchos microclimas que hacen difícil implementar recomendaciones no adaptadas. Especialmente en altitud (Quito, por ejemplo), en donde existe una alta variabilidad de la temperatura ambiente a lo largo del día.

El crecimiento económico previsto para los próximos años en el Ecuador requerirá de mayores servicios energéticos, esto quiere decir que se necesitará de una mayor disponibilidad y acceso a los servicios energéticos, además de requerir el aumento en la producción de energía [10]. También se puede ver un crecimiento en el sector de la construcción, en el 2016, los permisos de construcción crecieron 5% con relación al 2015; en el año 2016 existió un crecimiento del 33.76% en comparación al año 2002 [11], por este motivo debe existir una guía para poder definir medidas que lleven a un bajo consumo de recursos en los edificios de la región. Recursos como la energía, gestión de residuos, gestión de agua, confort térmico, entre otros. Este trabajo se enfoca en el sector residencial al ser el sector más importante de la construcción, el cual ha reportado, para el 2016, un total de 18.400 permisos de construcción, lo que equivale al 61,8% del total [11].

Pregunta de Investigación

¿Qué se puede considerar como un edificio de consumo energético casi nulo y hasta qué punto es viable aplicar este concepto en Quito?

Objetivo general

Determinar indicadores de sostenibilidad para la obtención de un concepto de edificios de consumo de energía casi nulo en Quito

Objetivos específicos

- Realizar un estudio del estado del arte en relación a la sostenibilidad y aspectos de diseño de los edificios de consumo energético casi nulo.
- Analizar y determinar indicadores de sostenibilidad para la definición de un concepto para edificios de consumo energético casi nulo en Quito

- Realizar simulaciones de una vivienda en Quito, aplicando el concepto de edificios de consumo energético casi nulo ya definido y comparar el resultado con una vivienda con estándares comunes de construcción.

Alcance

El alcance de este proyecto es determinar indicadores de sostenibilidad que permitan cuantificar en qué grado se puede decir que un edificio es un edificio de consumo energético casi nulo (NZEB). Esta definición está ampliamente usada en países de la Unión Europea y en Estados Unidos, pero en Ecuador hay pocas experiencias acerca del tema. Este trabajo se interesa en edificios en climas andinos, por lo que se realizará un estudio de caso en el Distrito Metropolitano de Quito.

1 MARCO TEÓRICO

Los edificios son responsables de grandes impactos ambientales debido a su alto consumo de energía, agua y materias primas; además generan una gran cantidad de residuos y contaminantes para el aire, el suelo y el agua [12]. En Ecuador en el año 2020 de acuerdo al Panorama Energético LAC 2021, el consumo final en el sector residencial fue de 1.80 Mtep y en el sector comercial y servicios fue de 0.74 Mtep. Por tal motivo, la construcción sostenible tiene un papel primordial. El Consejo de la Construcción Verde en España, define al término construcción sostenible, como la construcción que sea responsable con el medio ambiente tomando en cuenta el ciclo de vida del edificio, su demolición, así como su entorno. [13].

La EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*), promueve la mejora del rendimiento energético de los edificios dentro de la Unión Europea y ayuda a la solución de problemas de altos consumos energéticos. Además, define un NZEB (*Net Zero Energy Building*), como un edificio con un rendimiento energético muy alto [14], en donde sus requerimientos de energía están cubiertos en gran medida por la energía de fuentes renovables producidas en el sitio o en las cercanías [15]. Es decir que son los edificios que mediante energías renovables producen la misma energía o más de la que consumirá durante el año [16]. Se han definido diferentes términos y categorías de construcción en los últimos años después de la definición de NZEB. Este tema ha sido ampliamente analizado y debatido, pero aún está sujeto a discusión a nivel internacional en relación con el significado técnico de estos términos [6]. Estos estudios se han realizado principalmente en países con cambios estacionales marcados, que pueden no ser aplicables a climas variantes y no extremos como los de la región andina.

Ecuador ha iniciado un proceso de implementación de estos conceptos a través de algunas normativas: la NEC 11 capítulo 13 denominada “Eficiencia Energética en la Construcción en Ecuador” y la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 506:2009 “Eficiencia Energética en Edificaciones” promueven este fin. Por un lado, la NTE INEN 2 506:2009 tiene como objetivo establecer los requisitos que un edificio debe cumplir para lograr que se minimice el consumo de energía y que este se origine de fuentes de energía renovable. Por otro lado, la NEC 11 capítulo 13 tiene como objetivo el establecimiento de las características y especificaciones técnicas que se debe tomar en cuenta al momento de diseñar, construir, usar y dar mantenimiento a las edificaciones dentro del país, logrando

que el consumo de recursos y energía requeridos se reduzcan, Ambos estudios entraron en vigencia desde el 2011 con el propósito de promover la sostenibilidad y eficiencia en el diseño, construcción y operación de edificios [17].

El presente trabajo busca determinar los indicadores de sostenibilidad energéticos, analizados de diferentes certificaciones internacionales enfocadas a las calificaciones de edificios sostenible, necesarios para definir un edificio nZEB (*Nearly Zero Energy Building*), adaptados a las condiciones climáticas de la región sierra. Esta definición nZEB se enfoca no solo en el consumo energético del edificio sino también en el confort térmico ya que estas están estrechamente vinculadas.

1.1 Historia de Edificios de Consumo Energético Casi Nulo

Los edificios de consumo energético casi nulo se los puede resumir en cinco periodos críticos de desarrollo, que fueron afectados por crisis energéticas y económicas.

El primero periodo fue entre los años 1939 hasta 1969, en el cual surgieron los primeros intentos de construir edificios eficientes con calentamiento y un enfriamiento neto en casas solares[18], uno de los edificios pioneros fue el MIT Solar House I, construido en 1939. Este edificio fue un laboratorio de una sola habitación con un colector solar. La unidad colectora estableció los parámetros tecnológicos básicos de la colección solar: placas de vidrio encerradas a pocos pies de roca y aislamiento, a través de las cuales se bombeaba agua [19].

El segundo periodo fue en el año 1973; durante la primera crisis del petróleo la organización de países exportadores de petróleo (OPEP) decidió aumentar el costo de las exportaciones de petróleo en un 70% [20]. En consecuencia, Estados Unidos comenzó a prestar más atención al patrón de consumo de energía, ya que en comparación con Europa consumían el doble de energía a pesar que la calidad de vida era muy similar [18].

La crisis energética reformó al mundo entero, afectando a la vida cotidiana de todos y forzando un cambio en la industria de la construcción [18]. Los métodos para lograr una eficiencia energética en edificios han evolucionado desde la casa solar, que se centró en la recolección de energía natural renovable del sol para calefacción, hasta un esfuerzo de reducción de la demanda de energía

Durante el tercer periodo entre los años 1970 y 1990, surgió el concepto de

diseño viable para el ahorro de energía [18]. Se construyó la casa danesa de energía cero con materiales aislantes, con un colector solar de placa plana y un almacenador de agua estacional; fue el primer experimento de construcción de eficiencia energética en usar el término *Net Zero* [18] [21].

El cuarto periodo empezó con la segunda crisis del petróleo, en 1996, Estados Unidos, Canadá y México realizaron crearon procedimientos para cuantificar el desempeño de las medidas de conservación de energía [18][22]. Durante este período, la definición de energíaneta cero comenzó a surgir.

En 2006, un informe del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL) señaló la falta de una definición común de “energía cero” y declaró que “un edificio de energía cero se puede definir de varias maneras, dependiendo del límite y las métricas” [18].

El quinto periodo empezó en el año 2007 en los Estados Unidos con la crisis del estallido de la burbuja inmobiliaria¹ y se extendió rápidamente a Europa. La industria ecológica creció debido al aumento de popularidad de las energías renovables[18].

En 2008, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (NSTC), proveniente de Estados Unidos emitió la Agenda Federal de Investigación y Desarrollo para edificios ecológicos de alto rendimiento de Net-Zero Energy (NSTC 2008) [23]. El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) proveniente de Estados Unidos, definió los edificios de energía neta cero como aquellos que producen tanta energía como consumen durante un período definido y propusieron técnicas de medición [18][24].

A medida que los edificios de energía cercana a cero (nZEN) y de energía neta cero (NZEB) se convirtieron en el nuevo objetivo y estándar a nivel mundial, el papel de los materiales de construcción y la energía incorporada o las emisiones de CO₂ se hicieron cada vez más importantes [25]. Centrarse solo en la eficiencia energética conlleva un claro riesgo de tener un edificio con eficiencia energética que no funcione bien con respecto a otros criterios ambientales [18]. Durante la recuperación financiera, las presiones económicas y de conservación de la energía se han relajado y se ha visto una expansión del concepto de consumo energético cero neto [18].

¹ Burbuja inmobiliaria: Incremento excesivo e injustificado de los bienes raíces, ocasionado generalmente por la especulación.[18]

1.2 Definición de Edificios de Consumo Energético Casi Nulo

Luego del acuerdo de París, los Estados miembros de la Unión Europea deben proporcionar definiciones cuantitativas de “rendimiento energético muy alto” y “una medida muy significativa por energía procedente de fuentes renovables”. Además, la energía primaria que se utilizará en el indicador numérico de rendimiento (total, no renovable o renovable) y el significado de “cercano” también están sujetos a definición en cada país [6]. Esto demuestra que cada país miembro dentro de la UE, tiene su propia definición la cual se establece de acuerdo con el clima de la región, así como también de la disponibilidad tecnología de cada país, por ese motivo es un reto tratar de encontrar una definición que se adapte a la zona climática de Quito.

Cabe recalcar que, la definición de la UE minimiza la demanda de energía, dependiendo del tipo de vivienda, de la ubicación, de las políticas energéticas, de la demanda energética, entre otras; integrando tecnologías de eficiencia energética y satisfacen la demanda restante mediante el uso de fuentes de energía renovables [26]

Una definición importante en torno a los edificios de energía cero (ZEB) es la del DOE (*United States Department of the Energy*), que define un ZEB como “Un edificio de eficiencia energética donde, en base a la fuente de energía, la energía entregada a la vivienda, anual real es menor o igual que la energía exportada renovable en el sitio” [6] [27]. En esta definición la fuente de energía de los edificios toma en consideración a la energía generada en el sitio, más la energía consumida en la extracción, procesamiento y transporte de combustibles primarios; pérdidas de energía en plantas de generación de energía; y pérdidas de energía en la transmisión y distribución a la obra [6].

La Figura 1.1 muestra el límite de energía del sitio y cómo se forma a partir de la energía del edificio, la producción de energía renovable en el sitio, la energía entregada y la energía exportada [27].

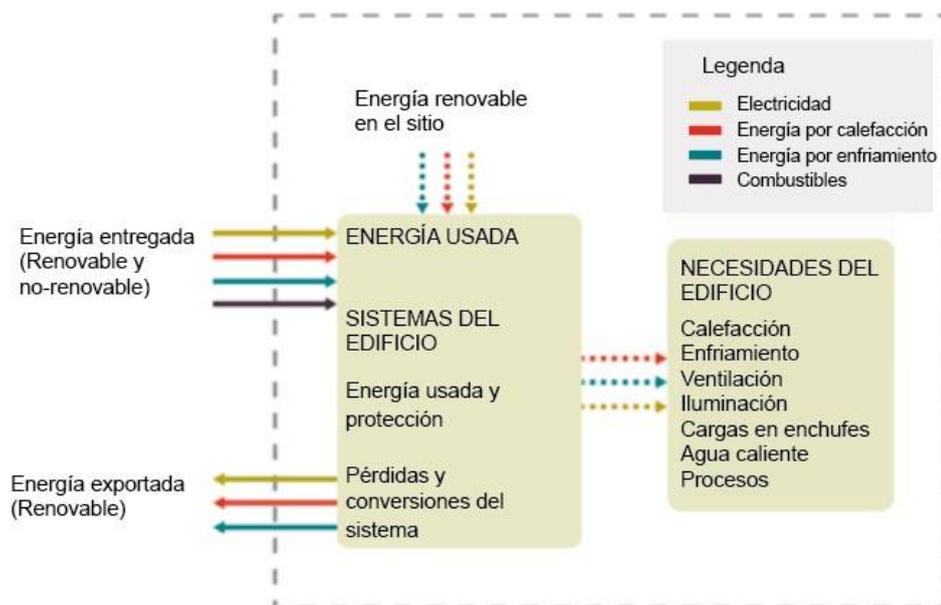


Figura 1.1 Límite del lugar de la transferencia de energía para la contabilidad de energía cero

Fuente: [27]

Se aprecia que existen dos definiciones principales de edificios de bajo consumo energético, una otorgada por la unión europea y otra por el departamento de energía de los estados unidos, sin embargo, es importante recalcar que estas definiciones son solo puntos de partida para nuevas definiciones, diferentes países europeos adoptaron sus propias definiciones. En la tabla 1.1 se hace un resumen de la visión general de las definiciones de nZEB en países de la UE.

Tabla 1.1 Visión general de las definiciones en diferentes países europeos

País	Referencia	Año de aplicación	Energía primaria usada [kWh/m ² y]		Puntos principales
			Sector residencial	Sector no residencial	
Austria	OIB (Instituto Austriaco de Ingeniería de la Construcción)	2021	160	170	Energías renovables Consumo energético Emisiones de carbono
Bélgica - Bruselas	Decreto nacional 2007	2015	45	90	Energías renovables Consumo energético Temperatura del ambiente
Bélgica - Flanders	Regulación nacional 2013	2021	30%	40%	Energías renovables Consumo energético Temperatura del ambiente

Continuación tabla 1.1

Bélgica-Wallonia	Consolidado en el reporte de la Comisión Europea	2019	no definido	no definido	Energías renovables Consumo energético
Bulgaria	Plan Nacional nZEB	2021	30-50	40-60	Energías renovables Consumo energético
Croacia	Plan Nacional nZEB	2021	33-41	no definido	Energías renovables Consumo energético
Chipre	Decreto nacional 2014	2021	100	125	Energías renovables Consumo energético
Republica Checa	Regulación nacional 2013	2020	75-80	90	Energías renovables Consumo energético Eficiencia energética

Fuente: [28,30-34]

Los demás países se pueden encontrar en el Anexo I, en la tabla 1.1 se puede apreciar como en un mismo país como Bélgica tenemos diferentes visiones de un edificio de bajo consumo energético, donde no solo tienen diferentes objetivos si no también están usando indicadores diferentes, en la región de Wallonia se da importancia solo al consumo

energético y al uso de energías renovables mientras que en la región de Bruselas se da importancia también a la temperatura del ambiente.

1.3 Clasificación de los Edificios de Consumo Energético Nulo

Para clasificar los edificios de consumo de energía nulo, hay que enfocarse en las técnicas, los materiales y las tecnologías de construcción para así minimizar las pérdidas de calor y mejorar la eficiencia energética [29].

Los edificios de consumo energético cero se clasifican dependiendo de sus objetivos; como por ejemplo cuando los propietarios de los edificios están interesados en la reducción de los costos de energía y construcción, pero también presentan interés en el uso de energías renovables, confort térmico y en la reducción de las emisiones [31].

La clasificación que existe para edificios de consumo energético nulo afecta a la manera de obtener una demanda de energía cero, ya que se tiene diferentes opciones de diseño basadas en como la definición de edificios de consumo energético nulo define el papel de la eficiencia energética del edificio, las estrategias de suministro, fuentes de energía compradas, estrategias para la oferta, la utilidad en las tarifas de consumo y sustitución de combustibles [32], con el fin de reducir el consumo energético de un edificio. Un edificio de consumo energético casi nulo se puede definir como un edificio que durante un año suministran tanta energía a la red de suministro como la que utilizan [33], lo cual se acopla con la definición de edificios de bajo consumo energético europeo.

Existen diferentes términos y categorías de construcción además de la definición NZEB dada por la EPBD (*Directiva de eficiencia energética en edificios*) proveniente de la Unión Europea [6]. En la tabla 1 Anexo II se puede ver algunos de las definiciones más importantes.

No solo existen diferentes categorías sino también de acuerdo a Fufa, Schlanbusch et al. (2016) los edificios de consumo energético nulo se pueden clasificar en seis niveles que se definen en función de diferentes límites para el balance de emisiones, los cuales se los puede apreciar en la tabla 2 del del Anexo I [34].

1.4 Estrategias para Obtener Edificios de Consumo Energético Casi Nulo

Las metas de un nZEB pueden cumplirse mediante la adopción de medidas de eficiencia energética, tecnologías de eficiencia energética y generación de energía renovable. Principalmente, se pueden utilizar tres estrategias para diseñar un edificio de energía neta cero en una zona climática compuesta [26].

1.4.1 Estrategia de Diseño Pasivo

Favorece o evita ganancias de calores sensibles y latentes para lograr el confort térmico con un consumo mínimo de energía. Además, implican una baja ganancia de calor y más disipación de calor [26]. El enfriamiento pasivo, reduce los requisitos de energía del edificio y minimiza la ganancia de calor mediante la zonificación térmica de las áreas y la instalación de dispositivos de protección. Cabe mencionar que estas estrategias están definidas para climas cálidos.

1.4.2 Estrategia de Diseño Activo

Es el sistema mecánico de eficiencia energética para calefacción, ventilación, aire acondicionado, sistema de iluminación y control, equipos eléctricos y mecánicos [26]. Como por ejemplo la estrategia es la iluminación LED, equipos más eficientes para calefacción, ventilación y aire acondicionado; los cuales reducen el consumo de energía para alcanzar un diseño de edificio de consumo energético casi nulo [35].

1.4.3 Estrategia de Diseño de Energías Renovables

El desempeño del Edificio Net Zero Energy depende de la efectividad de la Estrategia de Diseño del Sistema de Energía Renovable [26], un ejemplo de esto son los requisitos de potencia y disponibilidad del área del techo sin sombra para el cálculo del tamaño de la planta de energía fotovoltaica.

1.5 Certificaciones Internacionales

1.5.1 LEED

Desarrollado por el Consejo de Construcción Verde de EE. UU. Es uno de los programas más famosos para evaluar la sostenibilidad de las diferentes fases de construcción: el diseño, la construcción, el mantenimiento y la operación [36]. Esta certificación contribuye a la reducción del consumo de agua entre un 30% y 50% aproximadamente y la reducción del consumo de energía entre un 30% y 70% aproximadamente. “Estos porcentajes se toman en relación a una línea base de consumo creada por el USGBC en relación a edificios similares al que se está certificando.” Además, ayuda a que se reduzca la huella de carbono del proyecto, los costos de los residuos se reducen aproximadamente en un 90% y las emisiones de CO₂ alrededor de un 35%. [35, 38]

1.5.2 ITACA

En Italia, la asociación del Consejo de Construcción Sostenible (SBC) desarrolló el protocolo ITACA, un sistema de etiquetado nacional para la sostenibilidad ambiental de los edificios. Este procedimiento permite evaluar edificios de diferentes usos previstos en todas sus fases del ciclo de vida [36].

1.5.3 Green Star

Green Star es una de las herramientas voluntarias de evaluación ambiental de edificios más seguidas, desarrollada por el GBC de Green Building Council of Australia. La última versión se lanzó en 2016. El sistema evalúa el diseño ambiental y los logros de los edificios, considerando una amplia gama de problemas. El sistema se puede aplicar a la construcción de edificios, reformas y fases de operación [36]. Las edificaciones con esta certificación aproximadamente emiten menos del 50% de CO₂ en comparación a las edificaciones comunes. Además, estos edificios usan menos del 66% de electricidad, menos del 51% de agua y producen menos del 96% de desperdicios durante la construcción [35, 37].

1.5.4 BREEAM

El método de evaluación ambiental para edificios (BREEAM) es el protocolo más antiguo. La versión más reciente se desarrolló en 2016. Inicialmente, se basaba en la fase de construcción de nuevos edificios individuales, ahora cubre todo el ciclo de vida de los edificios, desde la etapa de diseño, hasta su uso y actualización [36]. El edificio con esta certificación tiene una disminución del 30% al 40% en comparación a los edificios que solo cumplen con la normativa. Además, se calcula que las emisiones de CO₂ disminuyen entre un 36% al 40% [39].

1.5.5 CASBEE

Japón basa su evaluación de sostenibilidad en el sistema de calificación CASBEE. La última versión se desarrolló en 2014 y puede aplicarse a las fases de construcción, renovación y operación de los edificios. Se basa en la “Calidad y rendimiento ambiental del edificio” denominadas como “Calidad” y “Cargas ambientales del edificio” denominadas como “cargas” [36].

1.6 Indicadores de Sostenibilidad

Los indicadores son usados como medidas cuantitativas, cualitativas o descriptivas, que simplifican la información sobre un elemento a una forma sencilla de utilizar y de comprender [39-40]. También ayudan a entender la interacción entre los edificios, el medioambiente y su entorno socioeconómico, así como los impactos que resultan de esta interacción [40], estos indicadores se pueden apreciar en el Anexo III.

Uno de los objetivos principales de los indicadores de sostenibilidad es poder evaluar el desempeño de los edificios y difundir la importancia de adoptar prácticas sostenibles, con ese fundamento se seleccionaron varios indicadores de sostenibilidad [42].

De acuerdo a la ISO 21929-1, Sostenibilidad en la construcción de edificios, establece un conjunto básico de indicadores que se debe tener en cuenta en el uso y desarrollo de indicadores de sostenibilidad para evaluar el rendimiento de sostenibilidad de los edificios nuevos o existentes, en relación con su diseño, construcción, operación, mantenimiento, renovación y final de la vida útil [43]. Los indicadores se los puede apreciar en la tabla 3 del Anexo III.

Open House es un proyecto que tiene como objetivo fusionar las metodologías existentes en Europa para la evaluación de la sostenibilidad de los edificios y así desarrollar una metodología de evaluación de la sostenibilidad de la construcción. Esta metodología se basa en estándares ISO y CEN que evalúan el ciclo de vida de un edificio [42]. Actualmente, este proyecto cuenta con 56 indicadores de sostenibilidad que están divididos en 6 aspectos diferentes, como se puede apreciar en la tabla 4 del Anexo I.

Para este trabajo de investigación se decidió considerar los indicadores que tienen como aspectos de calidad ambiental.

El proyecto SuPerBuildings es un proyecto europeo que ha seleccionado y desarrollado un conjunto de indicadores clave de sostenibilidad para edificios, fue desarrollado considerando edificios nuevos y existentes [42].

Este proyecto propone desarrollar una estructura lógica para la evaluación de la sostenibilidad de los edificios teniendo en cuenta el desempeño ambiental, económico y social. Desarrollando indicadores para la evaluación de los aspectos de sostenibilidad en los edificios [44].

1.7 Construcción Sostenible de Edificios en Quito

En el Ecuador de acuerdo a la NEC 11 capítulo 13, el segundo sector con mayor consumo de energía a nivel nacional es el sector residencial, en primer lugar, se encuentra el sector del transporte. De acuerdo al Panorama Energético LAC 2021, el consumo energético por sector en el año 2020 en Ecuador se distribuyó de la siguiente manera:

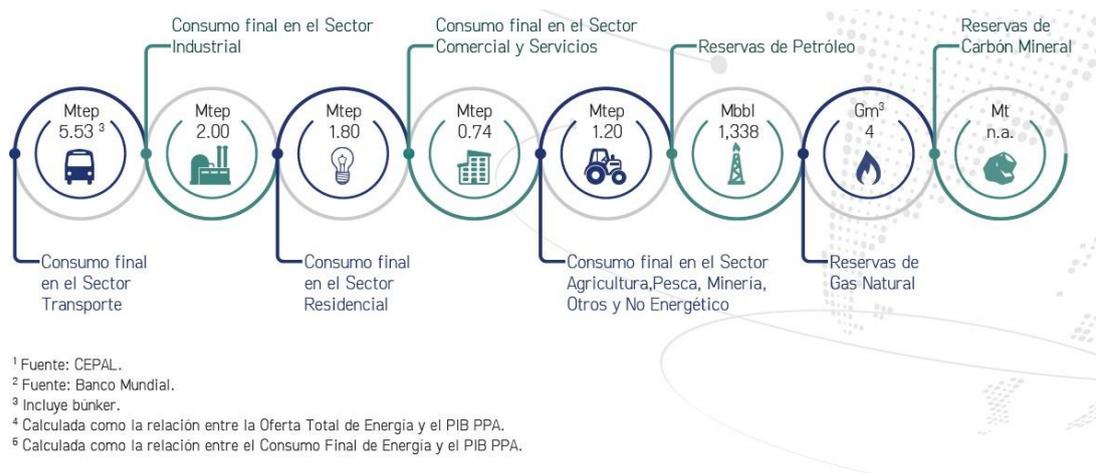


Figura 1.2 Sector Energético 2020

Fuente: [45]

Por lo que, la construcción sostenible de los edificios en Quito debe tener una orientación estratégica adaptada a la realidad social, económica y ambiental.

En la actualidad, la fase de diseño es la clave al momento de construir un edificio eficiente, al igual que la aplicación de buenos indicadores de sostenibilidad que se pueden apreciar en el Anexo II. La optimización del diseño se enfoca en el factor de forma, características climáticas del emplazamiento, materiales a utilizar y características de los equipos e instalaciones [46].

La NEC, (*Norma Ecuatoriana de la Construcción*), tiene como único punto en eficiencia energética el VEEI (Valor de eficiencia energética de la instalación, W/m²) que hace referencia a la instalación de iluminación que debe ser energéticamente eficiente; y se calcula según la NTE 2506 (*EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES REQUISITOS*) de la siguiente manera [47][48]:

$$VEEI = \frac{P * 100}{S_i * E_m}$$

Donde:

P: Potencia total instalada en las bombillas más los equipos auxiliares, incluyendo sus pérdidas [W].

S_i: Superficie iluminada [m²].

E_m: Iluminancia promedio horizontal mantenida [lux].

En el DMQ la única ordenanza en tema de eficiencia energética es la STHV-14-2017, promueve la construcción sostenible dando incentivos como el aumento de pisos de construcción hasta en un 50% por sobre lo establecido en el PUOS (Plan de Uso y Ocupación del Suelo), siempre y cuando el lote donde será construido el edificio sea en una zona de influencia del Sistema Integrado de Transporte Metropolitano y a proyectos inmobiliarios que incorporen estrategias relacionadas al consumo eficiente de agua y energía, y así como aportes paisajísticos, ambientales y tecnológicos colaborando con la protección del medio ambiente [52].

En la sección V de esta ordenanza se pueden encontrar los puntos importantes sobre eficiencia energética, en donde se menciona el incremento del número de pisos a proyectos que tengan sistemas de reutilización de aguas servidas, que garanticen las limitaciones del consumo tanto de energía como de agua y tengan un aporte tanto ambiental como tecnológico [52]. Además, existe un instructivo de aplicación de matrices ecoeficientes, las cuales explican los parámetros y condiciones de calificación para proyectos que apliquen al incremento de pisos, los cuales pueden ser apreciados en el Anexo III.

2 METODOLOGÍA

La primera etapa es realizar un estudio bibliográfico, sobre la definición de edificios de bajo consumo energético en diferentes regiones con el objetivo de comparar las diferentes definiciones que existen, para así poder tener una mejor comprensión de los edificios de bajo consumo energético. El estudio bibliográfico se complementa con el análisis de diferentes herramientas internacionales, para evaluar edificios verdes y de sus indicadores de sostenibilidad.

Para la selección de los indicadores de sostenibilidad se los analiza uno por uno, descartando los indicadores que no correspondan a energía, este punto analizaremos los indicadores que nos permitan implementar al confort térmico como un usuario de energía.

Luego se analiza una vivienda normal ubicada en Quito, en el barrio la Vicentina, en la cual se implementan los indicadores de sostenibilidad, se realizan diferentes consideraciones que permitan tener una mejor eficiencia energética y un confort térmico adecuado.

Para corroborar que estos cambios sean efectivos y permitan encontrar una definición de edificio de bajo consumo energético, se usaran diferentes softwares libres, EnergyPlus para analizar el confort térmico de la vivienda, OpenStudio que permite analizar el requerimiento energético para lograr el confort térmico adecuado y SAM que permite analizar un sistema de energías renovables en la vivienda.

2.1 Selección de Indicadores de Sostenibilidad

Como se analizó en el capítulo 1 existen varias metodologías para la calificación de edificios sostenibles, entre las más representativas están:

- LEED
- CASBEE
- GREEN STAR
- ITACA
- BREEAM

En este trabajo se analizaron los indicadores de estas 5 herramientas una por una; y, en base a la metodología y de acuerdo a su área de aplicación se les otorgó una valoración del 1 al 4. Siendo 1 el valor más bajo en donde están los indicadores que por motivos relevantes no son energéticos, seguidos del valor 2, media, en donde entran los indicadores energéticos fuera del lugar de la vivienda, como por ejemplo los que están involucrados con el edificio y los lugares aledaños a este. El valor 3 son indicadores buenos, los cuales son energéticos, pero son derivados de un indicador principal, ejemplo el consumo energético puede dividirse en indicadores de consumo eléctrico por habitante y por consumo eléctrico por metro cuadrado. Finalmente, tenemos el valor 4, excelente, los cuales son para los indicadores principales como ejemplo el consumo energético mensual de una vivienda, este consumo puede ser eléctrico o de gas doméstico.

En la tabla 2.1 se puede apreciar un ejemplo de cómo en este trabajo se procede a analizar los indicadores de sostenibilidad.

Tabla 2.1 Evaluación de los indicadores de sostenibilidad.

Indicador de sostenibilidad	Valoración	Justificación	Área de aplicación
Consumo eléctrico por metro cuadrado [kWh/m ²]	3*	Permite una relación del tamaño de la vivienda y su consumo eléctrico. Este indicador permite analizar cuanta electricidad se necesita para mantener una vivienda funcional.	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/> Calidad de ambiente interior <input checked="" type="checkbox"/>

*1 = mala, 2 = media, 3 = bueno, 4 = excelente

2.1.1 Energías Usadas en un Edificio

El concepto básico de un edificio de bajo consumo energético es un edificio que está conectado a la red, el cual es eficiente energéticamente [27]. Esta definición indica que la energía inyectada en un edificio tiene que ser la energía que cubra las necesidades básicas como calefacción, refrigeración, ventilación, cocción, agua caliente, iluminación interior y exterior, cargas de enchufe. En el distrito metropolitano de Quito, las energías disponibles

para cubrir las necesidades básicas son: Electricidad, Solar, GLP y en casos especiales Diésel.

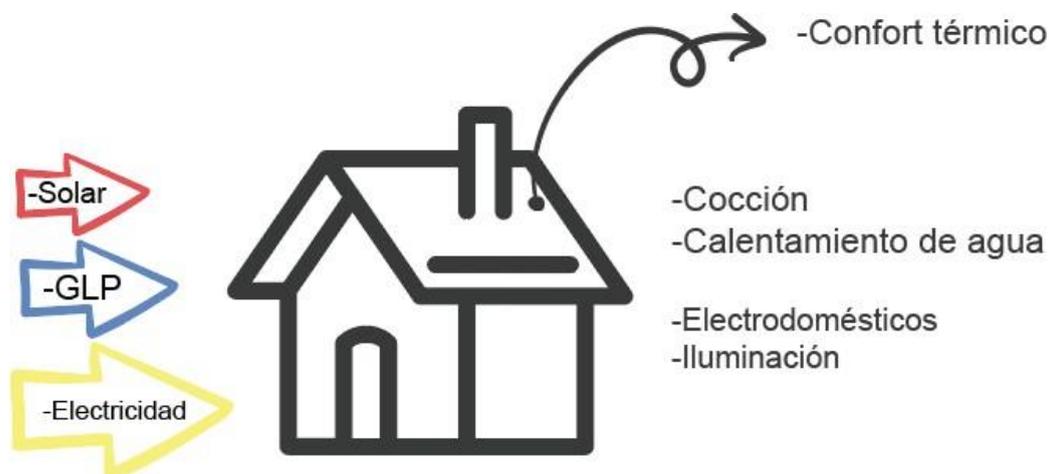


Figura 2.1 Consumo energético del caso de estudio.

Fuente: [Propia]

La electricidad y el gas licuado de petróleo son las principales fuentes de combustible de un edificio [49]. Los equipos para calefacción y refrigeración convencionales alimentados con electricidad y diésel todavía son usados. El GLP es usado como fuente principal de combustible para el calentamiento del agua y para cocción de alimentos.

2.1.2 Confort Térmico como Usuario de la Energía

El clima de Quito se caracteriza por ser andino y a veces frío, por esta razón en esta región se considera al confort térmico como usuario energético, debido a la dificultad de alcanzar un confort térmico estable en esta región.

Para tener una guía del rango de confort la ASHRAE 55 permite tener una estimación del rango de temperatura de confort para viviendas que sean ventiladas naturalmente [50].

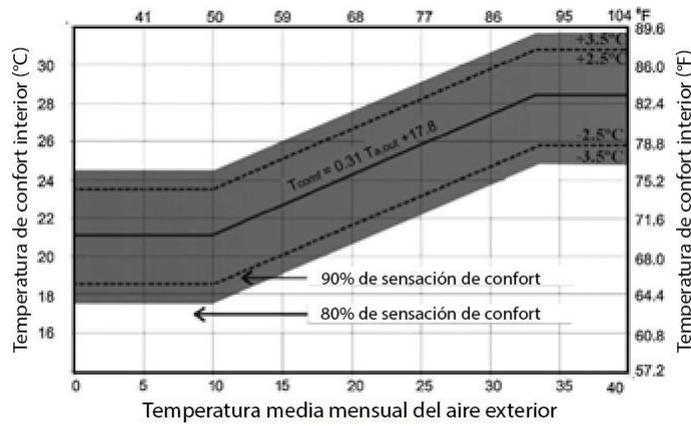


Figura 2.2 Temperatura Operativa Óptima para Viviendas Ventiladas Naturalmente

Fuente: [50]

La figura 2.2 representa el rango de temperatura donde el usuario que se consideraría tiene un confort térmico adecuado. Para este modelo ASHRAE simplificó el modelo utilizando la temperatura de bulbo seco, siendo está mucho más accesible, ya que se puede calcular mediante datos meteorológicos típicos [50]. Presentando así las ecuaciones 2.1 y 2.2

Una vez entendido el confort térmico, ahora se procede a analizarlo como usuario energético para esto nos ayudamos del software OpenStudio y EnergyPlus para calcular el requerimiento energético de la vivienda para mantenerla a cierta temperatura.

Se evaluará al confort con el mínimo valor deseado, en este caso es de 19.6 °C, la simulación permite analizar para todas las horas del año si la vivienda necesita de calefacción o de aire acondicionado.

Este trabajo analiza el confort térmico de dos maneras, como usuario de energía, simulando el requerimiento de este para calefacción o enfriamiento dependiendo de la época del año y conforme la vivienda lo necesite.

Para esto se usó la extensión de simulación de EnergyPlus llamado OpenStudio el cual permitirá calcular la energía en kWh que necesita la vivienda para su calefacción y/o enfriamiento de esta.

La otra manera de evaluar el confort térmico es analizando la temperatura operativa y calculando el porcentaje de horas que la vivienda está dentro del rango de confort térmico.

2.2 Caso de Estudio

La vivienda de estudio está localizada en el Distrito Metropolitano de Quito en el barrio La Vicentina, esta ciudad se caracteriza por tener un clima andino frío. Dentro del análisis se realizaron dos simulaciones, la primera en donde se considera al confort térmico como usuario energético y la segunda que considera los indicadores energéticos de consumo, para satisfacer estos se realizó una simulación en SAM, esta se detalla más adelante.

Para poder analizar los diferentes indicadores energéticos, se necesitó información sobre: el consumo energético, planillas de luz, consumo promedio de GLP y horarios de uso energético sectorizado.

Es necesario conocer los horarios de iluminación, ocupación y el de infiltraciones, esta información fue brindada por los usuarios para realizar horarios aproximados. Un ejemplo son los horarios del uso de iluminación, la vivienda cuenta con 11 puntos de luz de 11 [W] cada uno. En la siguiente tabla, se puede apreciar el horario de uso de iluminación, ocupación e infiltraciones por horas de la sala-comedor.

Tabla 2.2 Horario de Sala-Comedor

Sala-comedor				
Tipo de horario	Días de la semana	Hora	Tipo	Valor
Iluminación	Lunes-sábado	00H00 - 05H00	On/Off	0
		05H00 - 06H00		1
		06H00 - 17H00		0
		17H00 - 22H00		1
		22H00 - 24H00		0
	Domingo y feriados	00H00 - 19H00		0
		19H00 - 23H00		1
		23h00 - 24h00		0
Ocupación	Lunes-sábado	00H00 - 06H00	Any number [W/persona]	70
		06H00 - 07H00		144
		07H00 - 13H00		70
		13H00 - 15H30		144
		15H30 - 17H00		99
		17H00 - 19 H00		144
		19H00 - 22H00		99
		22H00 - 24H00		70
	Domingo y feriados	00H00 - 09H00		70
09H00 - 10H00		144		

Continuación tabla 2.2

Sala-comedor				
Tipo de horario	Días de la semana	Hora	Tipo	Valor
		10h00 - 16h00		70
		16H00-18H00		99
		18H00 - 21H00		144
		21H00 - 22H00		99
		22H00 - 24H00		70
Infiltraciones	Lunes-sábado	00H00 - 16H00	Fraction	0,3
		16H00 - 18H00		1
		18H00 - 24H00		0,3
	Domingo y feriados	00H00 - 10H00		0
		10h00 - 18h00		1
		18H00 - 24H00		0

Fuente: [Propia]

Para analizar el confort térmico se zonificaron las áreas de la vivienda. En la figura 2.3. y en la figura 2.4 se muestran las dimensiones de la misma, para una mejor comprensión.

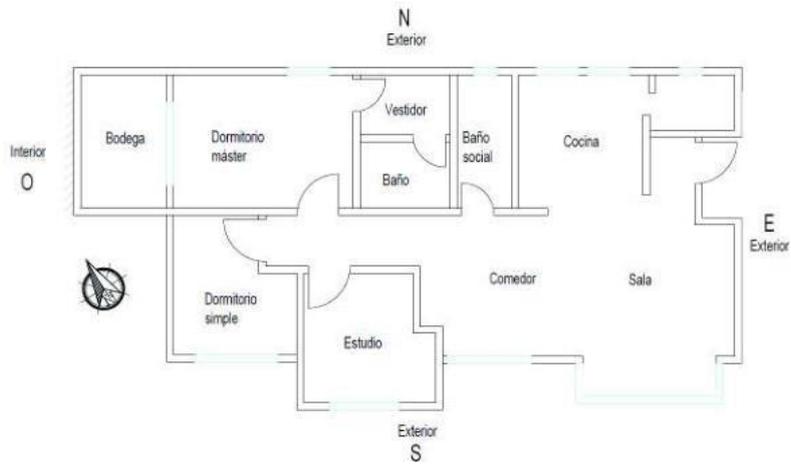


Figura 2.3 Distribución del Departamento

Fuente: [Propia]

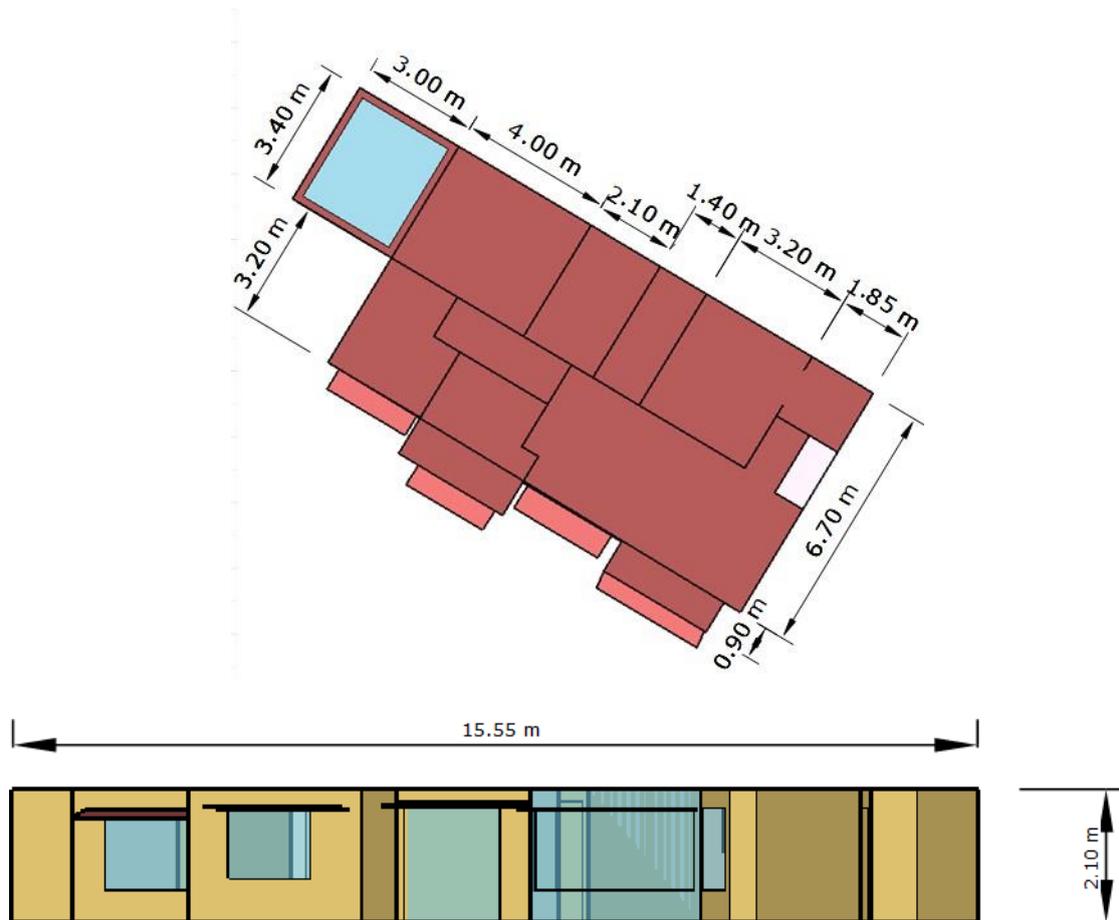


Figura 2.4 Medidas del Caso de Estudio

2.2.1 Consideraciones Importantes

Para el análisis del confort térmico se analizaron diferentes parámetros, bajos los cuales el confort térmico se encuentra alterado dentro de una vivienda, sin contar a los habitantes. Entre ellos están los materiales de construcción de la vivienda que se detallan en la tabla 2.3, estos materiales fueron validados con el objetivo de tener una aproximación más exacta de la influencia en el comportamiento térmico de la vivienda [51].

Tabla 2.3 Materiales de Construcción de la Vivienda

Clasificación	Componente	Material	Densidad [Kg/m ³]	Conductividad [W/m K]	Calor específico [J/Kg k]
Materiales	Paredes y techo	Hormigón	1.600	0,97	900
	Piso	Parqué (madera dura)	680	0,17	1.630
	Piso y paredes de baño y cocina	Baldosa	1.650	0,78	700
	Piso bodega	Hormigón	1.600	0,97	900
Ventanas	Ventanas internas	Vidrio simple	-	0,90	-
	Ventanas externas	Vidrio doble (6 mm)	-	0,90	-
Materiales poliméricos	Techo bodega	Polycarbonato	1.210	0,20	1.600
	Puertas	Madera	608	0,15	1.630

Fuente: [52]

El WWR, es el porcentaje de acristalamiento, el cual se define como la relación de la superficie que ocupa el vidrio y la superficie total de todas las paredes; se calcula con la siguiente formula:

$$WWR = \frac{A_{ventana}}{A_{paredes}} * 100 \quad (2.3)$$

El porcentaje de acristalamiento del departamento a estudiar es de aproximadamente entre 15% y 16% [52], el WWR depende principalmente de la radiación y de la orientación de la vivienda. Para este trabajo se decidió manejar un valor convencional, previamente analizado en el trabajo de Jácome el cual tiene un valor del 20%, para la simulación se usó este valor para cambiar el tamaño de las ventanas y analizar así su comportamiento en el confort térmico de la vivienda.

Para obtener mejor confort térmico es mejor la implementación de materiales de mayor espesor, según Jácome, en Quito es mejor aprovechar la utilización ladrillo sobre el bloque, también se recomienda tener un porcentaje de WWR, con un valor del 22% (este valor depende de la inercia térmica de la casa) [53].

En la tabla 2.4 se puede observar los cambios que se realizaron en los materiales, los cuales fueron utilizados para analizar el porcentaje que aumenta o disminuye en el confort térmico y luego se analizó como todos los cambios actúan sobre el confort del caso de estudio.

Tabla 2.4 Materiales de Construcción Vivienda/Simulados

Clasificación	Componente	Material actual	Material simulado
Materiales constructivos	Paredes	Hormigón	Concreto 17 cm + lana de vidrio
	Techo	Hormigón	Concreto 17 cm
	Piso	Parqué (madera dura)	Concreto 17 cm + Parqué (madera dura)
	Piso y paredes de baño y cocina	Baldosa	Concreto 17 cm + Baldosa
	Piso bodega	Hormigón	Concreto 17 cm
Materiales acristalados	Ventanas	Vidrio simple	Vidrio doble (6 mm)
	Ventanas externas	Vidrio doble (6 mm)	Vidrio doble (6 mm)
Materiales poliméricos	Techo bodega	Policarbonato	Policarbonato
	Puertas	Madera	Madera

Fuente: [Propia]

Para el cambio en el WWR de las ventanas se cambiaron las dimensiones, las cuales darán un WWR que este alrededor del 20%, el cual es el destinado en este trabajo de investigación. Las nuevas dimensiones se pueden apreciar en la tabla 2.5, mismas que fueron establecidas con el fin de alcanzar un porcentaje de acristalamiento del 20%. Para las demás dependencias que disponen de ventanas debido a su geometría no fue factible cambiar sus dimensiones.

Tabla 2.5 Dimensiones de Ventanas Simuladas

Ventanas Actuales			Dimensiones Nueva Ventana			
	Área ventana [m ²]	WWW [%]	Largo [m]	Ancho [m]	Área nueva ventana [m ²]	WWW [%]
DM	0.6	7.2	1.9	0.9	1.71	20.4
DS	2.3	18.6	1.8	1.4	2.52	20.0
Cocina	1.5	9.1	2.1	1.6	3.36	20.8
Estudio	1.7	15.0	1.5	1.5	2.25	20.4

Fuente: [Propia]

2.2.2 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde del modelo actual, se detallan en la figura 2.5, las cuales fueron analizadas y validadas anteriormente en el modelo de Muñoz y Prado [64].

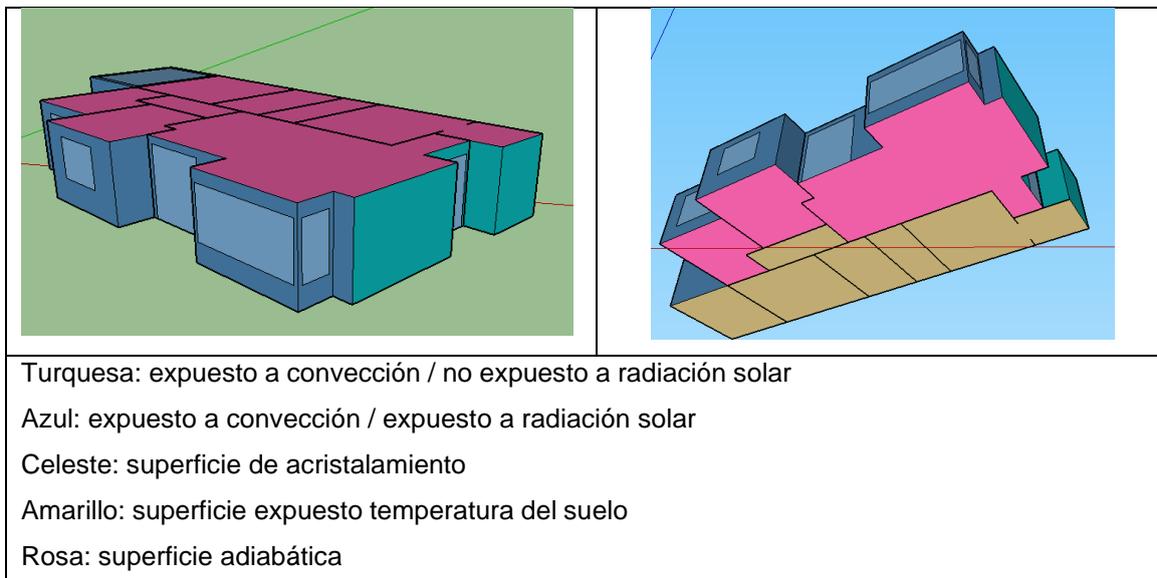


Figura 2.5 Condiciones de Borde de la Vivienda

Fuente: [64]

En la vivienda actual se puede apreciar de color amarillo una temperatura superficial de 18°C, esta temperatura fue considerada debido a que debajo de la vivienda se localizan bodegas que están a esa temperatura. Para nuestro modelo con el propósito de mejorar el confort térmico, reteniendo el calor en la vivienda y evitando infiltraciones y pérdidas de calor por el piso, se considera que la mejor opción es mejorar la vivienda haciendo que este piso sea adiabático a temperatura constante de 18°C, como se puede apreciar en la figura 2.6.

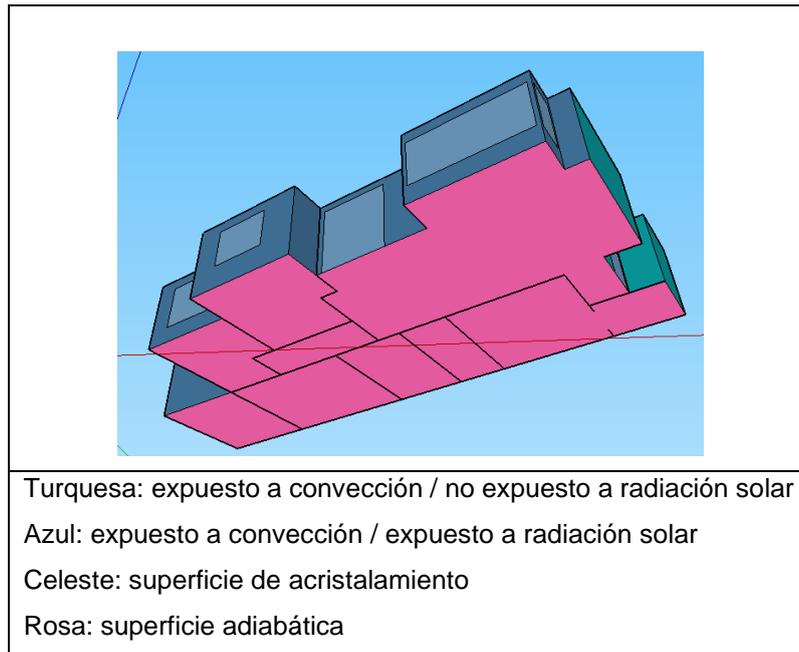


Figura 2.6 Condiciones de Borde Modificada

Fuente: [Propia]

2.3 Entorno de Simulación

Para el proceso de modelación de la vivienda se empleó el software SketchUp, el cuales utilizado tanto en arquitectura como en ingeniería por ser un programa de diseño y modelado en 3D. SketchUp permite establecer un vínculo con EnergyPlus para realizar simulaciones energéticas; usando la extensión Legacy OpenStudio permite crear y editar modelos en archivos de entrada (con formato .idf) de EnergyPlus. De esta manera permite modelar las diferentes zonas de la vivienda, permitiendo introducir información sobre los materiales de la vivienda.

Una vez definidos los materiales de construcción y dimensiones se realiza el modelo en SketchUp en 3D como se puede observar en la figura 2.7.

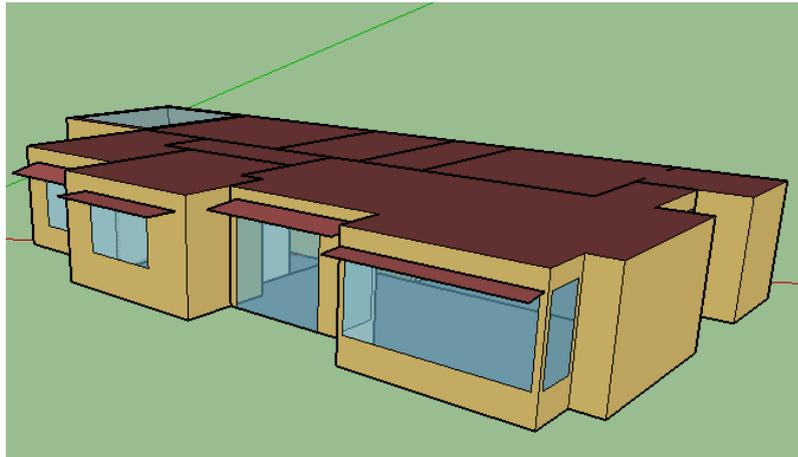


Figura 2.7 Modelo de la Vivienda

Fuente: [Propia]

Los archivos (.idf) de EnergyPlus, permiten añadir las características del caso de estudio, como la ubicación, situación geográfica y las características de los materiales, que están detallados más adelante, los cuales serán empleados en la vivienda y en la simulación. Una vez obtenido el modelo, todos los parámetros de diseño son ingresados en el programa EnergyPlus, que permite realizar simulación energética en edificios, este programa es un motor de simulación energética de código abierto basado en diferentes programas desarrollados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. El cual ha sido utilizado en diferentes estudios de comportamiento térmico, en la figura 2.8 se muestra la estructura simplificada de EnergyPlus [54].

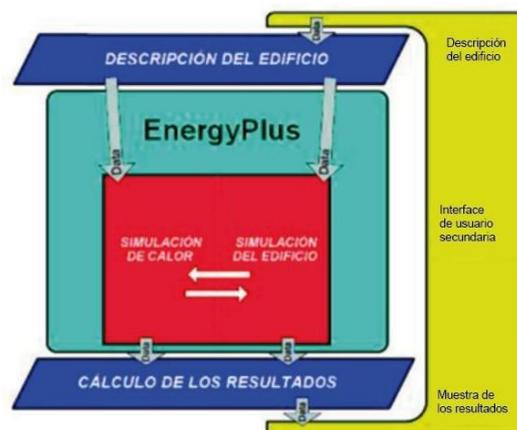


Figura 2.8 Estructura Simplificada de EnergyPlus

Fuente; [54]

EnergyPlus, arroja un archivo (.csv), el cual es analizado, utilizando Excel, cada simulación se realizó de manera horaria, dando como resultado 8.760 datos de temperatura operativa. Para cada simulación se calcula su confort, así como también sus valores estadísticos para un mejor entendimiento. En el Anexo IV, se muestran los parámetros y algoritmos usados en ese programa, estos definen el modelo usado para la simulación.

Posteriormente, se empleó el software SAM (system advisor model), este programa es especializado en simulación de instalaciones fotovoltaicas. La simulación desarrollada fue de micro generación fotovoltaica. Esto permitió analizar la vivienda y su potencial energético para la reducción de consumo eléctrico con el propósito de obtener una vivienda bajo consumo energético. Los parámetros de entrada se pueden apreciar en la tabla 2.6

Tabla 2.6 Variables de Entrada del SAM

	Tipo	Variable	Descripción
Parámetros de Entrada	Datos meteorológicos	Archivo .tmy	Archivo de clima del barrio
	Elementos del sistema	Módulo	Jinko Solar 275pp-60
		Inversor	LG Electronics Inc: LG375A1C-V5
	Dimensionamiento	Número de paneles	2 por el consumo de la vivienda
		Tipo de arreglo	Lineal
	Orientación y seguimiento	Ángulo de inclinación	10°
		Acimut	90°
		GCR	0.663
	Sombras	Sombras propias	No aplica
		Sombras externas	No aplica
	Pérdidas	Pérdidas DC	Pérdidas por inversor
		Pérdidas AC	1%
		Pérdidas de irradiación	5%
	Tiempo de vida	Degradación del sistema	0.5% Anual

Fuente: [Propia]

Se estimó una hora solar pico² de 4.1 para la ciudad de Quito en base a la irradiación global del Atlas Solar del Ecuador [59] y una eficiencia del equipo del 85%, asumiendo pérdidas del 15% recomendado por paquete computacional PVWatts Calculator.

$$Tamaño\ del\ sistema = \frac{demanda\ energética\ anual}{HSP * 365 \frac{días}{año} * \eta}$$

Donde

HSP: Hora solar pico en la ciudad de Quito 4.1 [Horas]

η : rendimiento

El tamaño del sistema es de 786[W], con este valor se calcula el número de módulos con la siguiente fórmula:

$$Número\ de\ módulos = \frac{Tamaño\ del\ sistema}{Poder\ del\ módulo}$$

Donde

Poder del módulo: es seleccionado por el modelo del módulo Jinko Solar.

El número de módulos que se van a usar es de 2, un modelo Jinko Solar 275pp-60, el cual es implementado en usos residenciales [60].

Usando el software SAM (System Advisor Model), se analizó, en base al modelo del módulo, el inversor de modelo LG Electronics Inc. LG375A1C-V5.

Los parámetros de salida obtenidos de la simulación se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.3.1 Variables de Salida del SAM

	Tipo	Variable	Descripción
Parámetros de Salida	Parámetro físico	Área de la vivienda	Área necesaria del sistema fotovoltaico
	Parámetros técnicos	Generación de electricidad	Generación del sistema fotovoltaico
		Consumo de electricidad	Consumo mensual del sistema fotovoltaico

Fuente: [Propia]

²Hora solar pico: De forma sencilla decimos que la Hora Solar Pico (HSP) es la cantidad de energía solar que recibe un metro cuadrado de superficie [57]

Se ingresaron el número de paneles en un arreglo en serie, donde también se establece los parámetros de seguimiento, ángulo de orientación acimut, ángulo de inclinación y el GCR que es la relación de cobertura de suelo (Ground-coverage ratio).

El seguimiento se estableció como paneles fijos y el ángulo de orientación acimut se fijó como 90°. Lo que representa el panel orientado de este a oeste, la relación de la cobertura del suelo relaciona el largo de los paneles, el espacio próximo al mismo y entre filas con finalidad de limpieza, mantenimiento y movilización asumiendo un espacio necesario de 50 [cm] con lo cual el GCR se calcula en 0.663 como indica la bibliografía [60].

Finalmente, para calcular el requerimiento energético para calefacción y/o enfriamiento requerido por la vivienda usamos el motor OpenStudio el cual es un software o programa de simulación gratuito que facilita la entrada proveniente de SketchUp al EnergyPlus para apoyar la modelización energética de toda una vivienda.

Para la esta operación primero se crearon horarios de calentamiento y enfriamiento para la vivienda donde se estableció como mínima temperatura requerida la de 19.6°C, para todo el año de simulación.

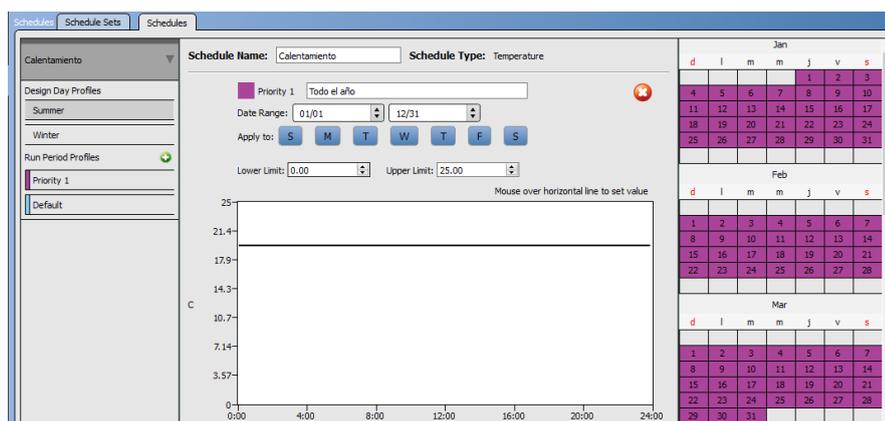


Figura 2.3 Creación de horario manteniendo la temperatura constante a 20°C.

Para finalmente obtener el requerimiento energético de la vivienda y analizar el periodo de tiempo donde esta requiera enfriamiento o calentamiento y analizar la energía que se necesita para esto.

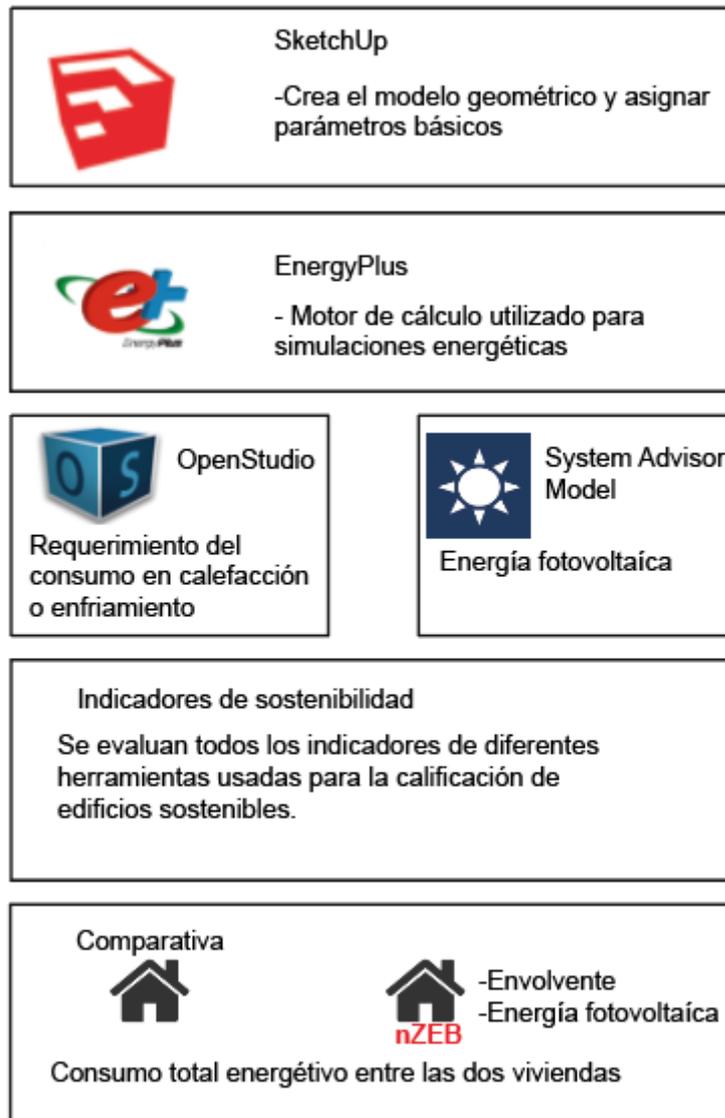


Figura 2.3 Diagrama de flujo de trabajo para modelar y simular el problema.

2.4 Validación de la Simulación Eplus

Para el presente trabajo se utilizaron dos métodos estadísticos, empleados para comprobar si los datos medidos en el trabajo de Muñoz y del modelo realizado en este trabajo están dentro de una tolerancia admisible. Los datos medidos fueron monitoreados desde el 11 de mayo al 21 de mayo y del 2 de junio al 6 de junio con un total de 15 días.

Estos métodos son NMBE (normalized mean bias error) menor al 5%, el cual mide el que tan cerca están los datos del modelo comparado con los datos medidos y es implementado principalmente para corregir y se calcula usando la siguiente fórmula:

$$NMBE (\%) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{true}}{x_{true}} \right) * 100$$

Donde

X_i = Datos del modelo

X_{true} = Datos medidos

El NRMSE (*Normalized Root Mean Square Error*), menor al 10%, es una medida de las diferencias entre los valores del modelo y los valores medidos y se calcula usando la siguiente fórmula

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{true} - x_i)^2}{\bar{x}_{true}}} * 100$$

Donde

X_i = Datos del modelo

X_{true} = Datos medidos

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los procesos establecidos en la metodología. Determinando el efecto de los indicadores de sostenibilidad en la definición de edificio de bajo consumo energético.

3.1 Indicadores de Sostenibilidad

En esta sección se evaluaron los indicadores de sostenibilidad de diferentes metodologías de calificación de edificios sostenibles. Como resultado de esta evaluación se obtiene la tabla 3.1, donde se resume la definición del indicador, las áreas de aplicación dentro de las metodologías de aplicación y las limitaciones de esta.

Además, en la tabla se encuentra la valoración otorgada como se describe en la metodología, en un rango de 1 a 4.

Tabla 3.1 Valores de los Indicadores de Sostenibilidad

Ítem	Indicador de sostenibilidad	Definición	Área de Aplicación	Limitaciones	Valoración
1	Consumo Eléctrico Mensual [kWh/mes]	Permite una relación del consumo mensual (planilla de luz) mes a mes.	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/>	No mide la eficiencia energética desarrollada. Está influenciado por muchos factores no relacionados a la eficiencia energética, tales como cambios en el nivel de ingresos o precios de la energía	4
2	Consumo Eléctrico por Metro Cuadrado [kWh/m ²]	Permite una relación del tamaño de la vivienda y su consumo eléctrico. Este indicador permite analizar cuanta electricidad se necesita para mantener una vivienda funcional.	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/>	No mide la eficiencia energética desarrollada. Está influenciado por muchos factores no relacionados a la eficiencia energética, tales como cambios en el nivel de ingresos, o precios de la energía.	3

Continuación tabla 3.1

4	Consumo Energético para Iluminación	Permite conocer las tendencias de consumo energético por iluminación.	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/> Calidad de ambiente interior <input checked="" type="checkbox"/>	No toma en cuenta preferencias del consumidor local respecto al tipo de luz.	4
5	Consumo Energético para Iluminación por Metro Cuadrado	Permite conocer las tendencias de consumo energético por iluminación.	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/> Calidad de ambiente interior <input checked="" type="checkbox"/>	No mide el desarrollo técnico en eficiencia energética. No considera las necesidades individuales de iluminación.	3
6	Consumo Energético de Calefacción	Permite conocer las tendencias de consumo energético para calentar una vivienda.	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/> Calidad de ambiente interior <input checked="" type="checkbox"/>	No distingue entre la eficiencia del equipamiento y de la edificación. No toma en cuenta la superficie no calefaccionada.	3
7	Consumo Energético de Calefacción por Metro Cuadrado	Permite conocer las tendencias de consumo energético para calentar una vivienda por unidad de superficie	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/> Calidad de ambiente interior <input checked="" type="checkbox"/>	No distingue entre la eficiencia del equipamiento y de la edificación. No toma en cuenta la superficie no calefaccionada ni las viviendas sin calefacción de locales.	2
8	Consumo Energético para Cocción y Calentamiento de Agua	Da una indicación sobre las tendencias en consumo energético para cocción. Relaciona el consumo de GLP mes a mes.	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/> Calidad de ambiente interior <input checked="" type="checkbox"/>	No considera el uso de pequeños electrodomésticos para cocción ni calentamiento de agua, tampoco los hábitos de cocción ni de usos de agua caliente. No considera los subsidios.	3
9	Generación de Energías Renovables Fotovoltaica [kWh/m ²]	Permite conocer la energía renovable que se genera en el área de la vivienda mes a mes.	Energía y atmosfera <input checked="" type="checkbox"/>	No considera tecnologías empleadas para la generación de energías renovables. No considera el costo de la generación de energías renovables, ni los subsidios otorgados por el gobierno.	4
10	Confort Térmico [°C/mes]	Analiza la temperatura operativa de una vivienda, para entender el porcentaje de confort que esta ofrece dentro de una determinada zona climática.	Calidad de ambiente interior <input checked="" type="checkbox"/>	No considera los hábitos de los habitantes. Solo considera la envolvente de la vivienda.	4

Fuente: [Propia]

3.1.1 Consumo Eléctrico Mensual

Es el consumo energético expresado en kWh/m² año, este valor expresa el consumo energético en electricidad que gasta una vivienda en un año por cada m², para el presente trabajo se realizó un compendio de datos de consumo energético mensual el cual permitió realizar una comparación mes a mes del consumo de electricidad durante un año.

La figura 3.1 se realizó con datos de la planilla de consumo eléctrico de la vivienda, en el gráfico se puede apreciar que los meses de abril a junio son los meses de mayor consumo energético. La electricidad es la fuente dominante para el uso de electrodomésticos, iluminación, calefacción y puede ser usado para comparaciones de consumo entre diferentes tipos de vivienda y regiones; un ejemplo de esto sería usar la comparación para tener un mejor entendimiento del consumo de electricidad entre la sierra y la costa para comprender la diferencia de consumos entre calefacción y acondicionamiento de aire.

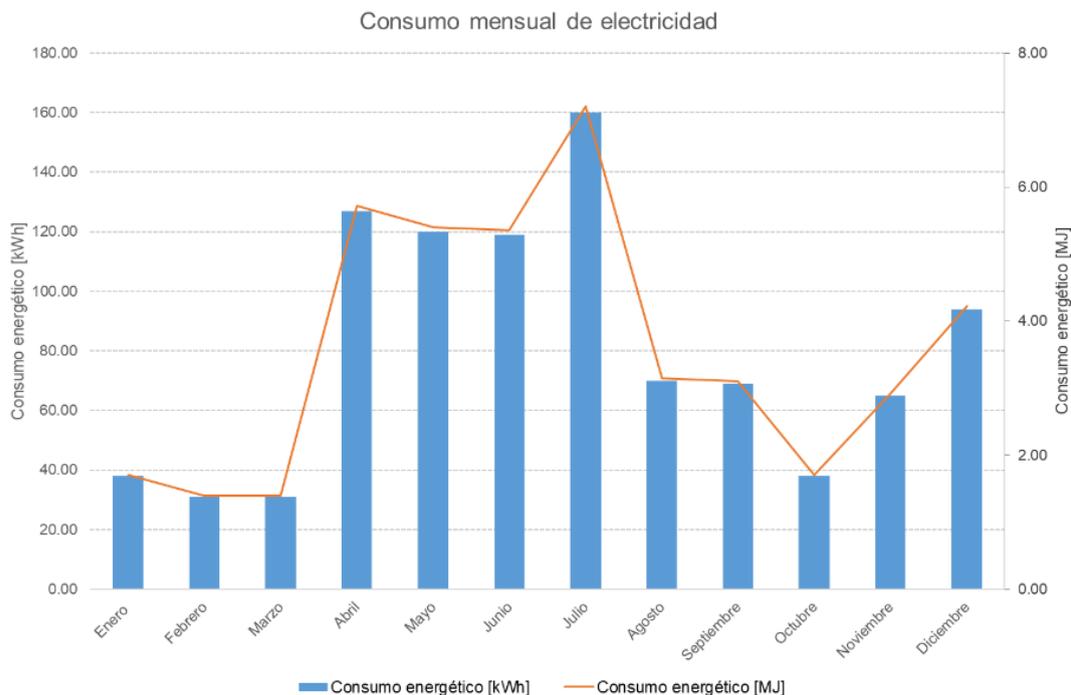


Figura 3.1 Consumo de Electricidad Mensual

En la figura 3.1, se observa como en los meses de abril a julio hay un mayor consumo energético, esto se debe a los horarios de consumo de los habitantes.

Usar este indicador en un nivel macro permite conocer el crecimiento en consumo de una región, en este trabajo permite conocer los hábitos de consumo de una vivienda; sin embargo, tiene limitaciones, ya que no mide la eficiencia energética desarrollada y descarta muchos factores no relacionados a la eficiencia energética, tales como: cambios en el nivel de ingresos o precios de la electricidad.

Para este trabajo también se analizó como consumo mensual la energía necesaria para mantener un confort térmico adecuado.

3.1.2 Consumo Eléctrico Mensual por Unidad de Superficie

Es un indicador de eficiencia energética global empleado por diferentes normativas europeas con el fin de analizar el consumo de electricidad sobre superficie útil para poder certificar el nivel de eficiencia que esta superficie dispone.

Este indicador provee una visión útil sobre las principales causas del consumo energético; al implementarlo en un nivel macro, se puede identificar de mejor manera varias características de las viviendas como: consumo energético en calefacción, iluminación, etc. En la figura 3.2 se puede apreciar este indicador a lo largo de un año, para esto se empleó el consumo de electricidad otorgado en la planilla de luz entre el área de la vivienda que son 80 m².

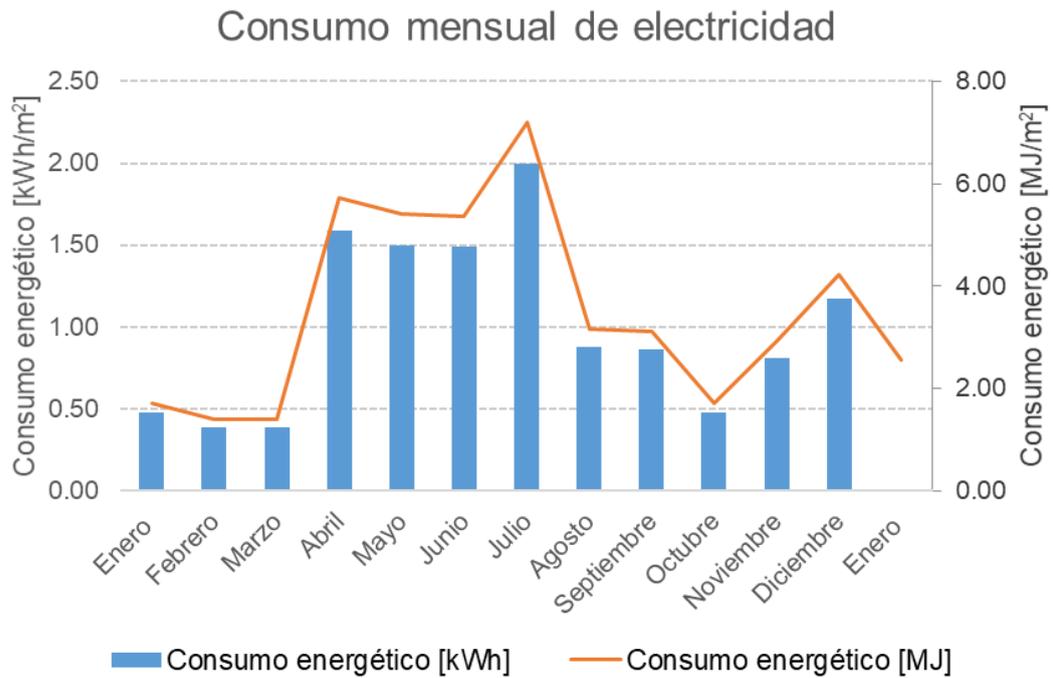


Figura 3.2 Consumo Mensual de Electricidad de la Vivienda

Fuente: [Propia]

3.1.3 Consumo Eléctrico Mensual por Habitante

Este indicador muestra un factor del consumo energético dividido entre los habitantes de la vivienda, mes a mes, permitiéndonos tener una mejor comprensión de los hábitos de consumo. A nivel macro este indicador permite tener una visión amplia del crecimiento de consumo.

El indicador da una visión útil sobre las principales causas del consumo energético; al implementarlo en un nivel macro determinar de mejor manera varias características de las viviendas como: consumo energético en calefacción, iluminación, etc.

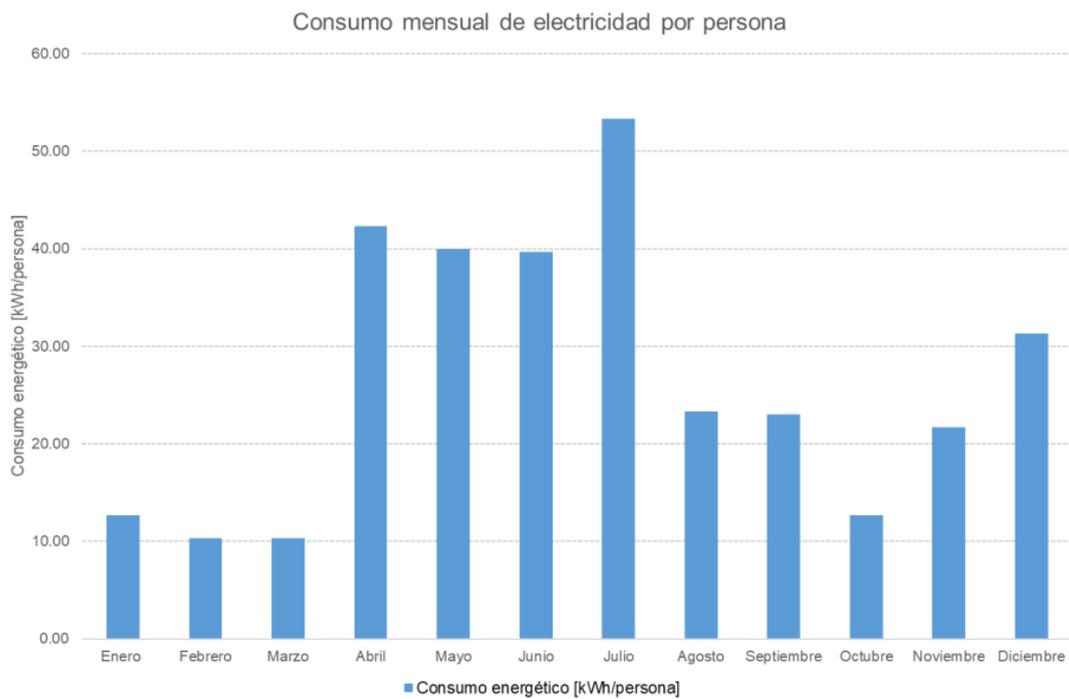


Figura 3.3 Consumo Mensual de Electricidad por Persona

Fuente: [Propia]

3.1.4 Consumo Energético para Iluminación

En el sector residencial los principales consumos de energía eléctrica son: iluminación, electrodomésticos y calefacción o aire acondicionado. La iluminación es uno de los usos finales que más impacto tiene en los cambios de consumo energético. Este indicador muestra la cantidad de energía consumida para iluminación.

La iluminación de la vivienda cuenta con 14 puntos de luz de 11 [W] cada uno, el horario de uso de los focos se detalla en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Horario de Uso de Iluminación

Horarios de Uso de Iluminación				
Ubicación	Día de la Semana	Hora	Tipo	Valor
Sala-Comedor	Lunes-sábado	00H00 – 05H00	On/Off	0
		05H00 – 06H00		1
		06H00 – 17H00		0
		17H00 – 22H00		1
		22H00 – 24H00		0
	Domingo y feriados	00H00 – 19H00		0
		19H00 – 23H00		1
		23H00 – 24H00		0
Cocina	Lunes-sábado	00H00 – 05H00	On/Off	0
		05H00 – 06H00		1
		06H00 – 17H00		0
		17H00 – 22H00		1
		22H00 – 24H00		0
	Domingo y Feriados	00H00 – 19H00		0
		19H00 – 23H00		1
		23H00 – 24H00		0
Baño	Todos los días	00H00 – 06H00	On/Off	0
		06H00 – 07H00		1
		07H00 – 17H00		0,25
		17H00 – 20H00		0,5
		20H00 – 24H00		0
Estudio	Lunes-viernes	00H00 – 16H00	On/Off	0
		16H00 – 18H00		1
		18H00 – 24H00		0
	Fines de semana	00H00 – 16H00		0
		16H00 – 18H00		1
		18H00 – 24H00		0

Continuación tabla 3.2

Horarios de Uso de Iluminación				
Ubicación	Día de la Semana	Hora	Tipo	Valor
Dormitorio simple	Lunes-sábado	00H00 – 06H00		0
		06H00 – 07H00		1
		07H00 – 19H00		0
		19H00 – 23H00		1
		23H00 – 24H00		0
	Fines de semana	00H00 – 18H00		0
		18H00 – 22H00		1
		22H00 – 24H00		0
Dormitorio máster	Lunes-sábado	00H00 – 06H00	0	
		06H00 – 07H00	1	
		07H00 – 19H00	0	
		19H00 – 23H00	1	
		23H00 – 24H00	0	
	Fines de semana	00H00 – 18H00	0	
		18H00 – 22H00	1	
		22H00 – 24H00	0	
Vestidor	Todos los días	00H00 – 06H00	0	
		06H00 – 07H00	1	
		07H00 – 17H00	0,25	
		17H00 – 20H00	0,5	
		20H00 – 24H00	0	
Bodega	Todos los días	00H00 – 19H00	0	
		19H00 – 21H00	1	
		21H00 – 00H00	0	

Fuente: [Propia]

El consumo eléctrico mes a mes por iluminación se detalla a continuación en el gráfico 3.4, donde se puede apreciar un consumo constante exceptuando el mes de febrero.

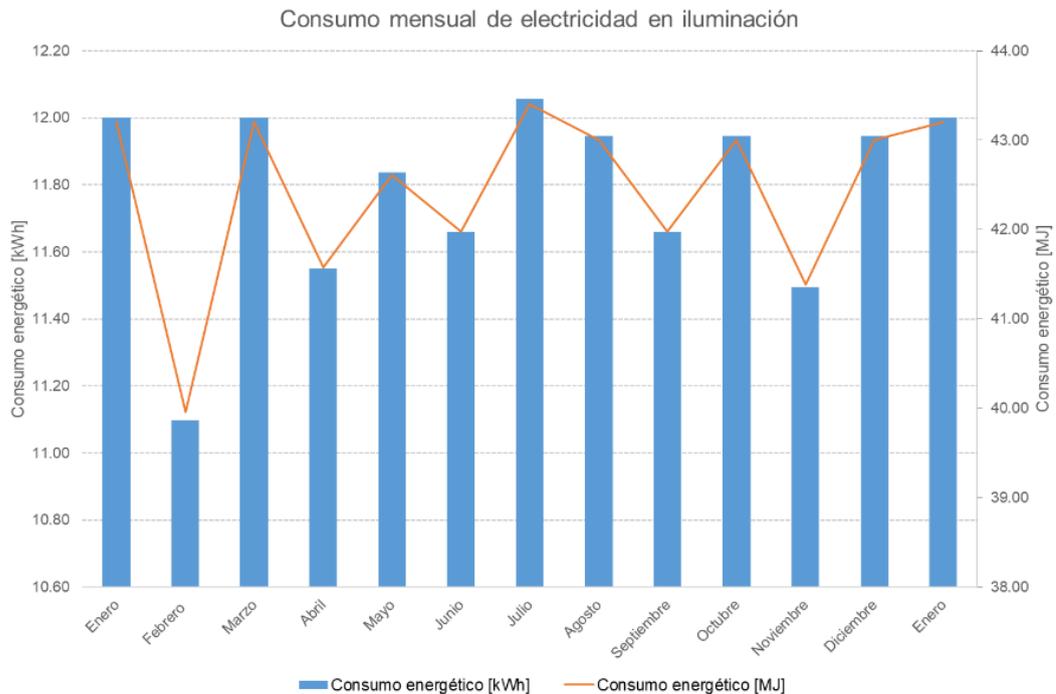


Figura 3.4 Consumo Mensual de Electricidad en Iluminación

Fuente: [Propia]

3.1.5 Consumo Energético para Iluminación por Unidad de Superficie

El consumo energético por unidad de superficie toma en cuenta la superficie que necesita iluminación. Sin embargo, la relación entre el requerimiento de iluminación y la superficie útil no es tan evidente como el de la energía por vivienda. Una persona que viva en una pequeña vivienda, no requiere menos iluminación que una persona viviendo en una vivienda grande de múltiples habitaciones, ya que sólo la habitación donde se encuentra la persona requiere de iluminación, pero para este trabajo al no comparar diferentes viviendas se consideró solo el consumo para iluminación por superficie útil.

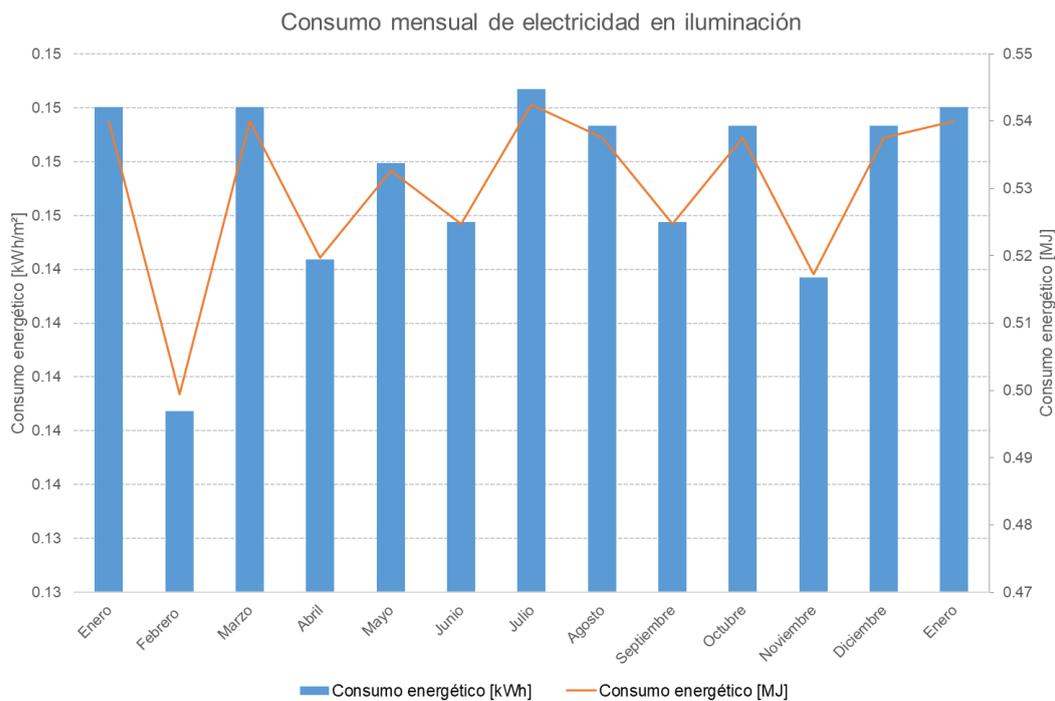


Figura 3.5 Consumo Mensual de Electricidad en Iluminación por Unidad de Superficie
Fuente: [Propia]

3.1.6 Consumo Energético para Calefacción

Este indicador permite conocer la relación de consumo energético, destinado a mantener un confort térmico en climas fríos por unidad de tiempo mes a mes. También permite comprender el impacto que la superficie de la vivienda tiene en el consumo energético para: calefacción de locales, iluminación y enfriamiento de locales. Este es en general el factor más significativo en cuanto al consumo energético en las viviendas.

En la simulación realizada en OpenStudio se analizaron estos valores a lo largo del año para comprender la importancia de su consumo, Quito al estar en una zona andina principalmente su clima se caracteriza por ser frío y es necesario para mantener un confort térmico adecuado. Se puede observar que los meses de enero y abril son los meses de más consumo al ser estos los meses más fríos y de la misma manera de junio a agosto los meses de menos consumo al ser estos los más calientes.

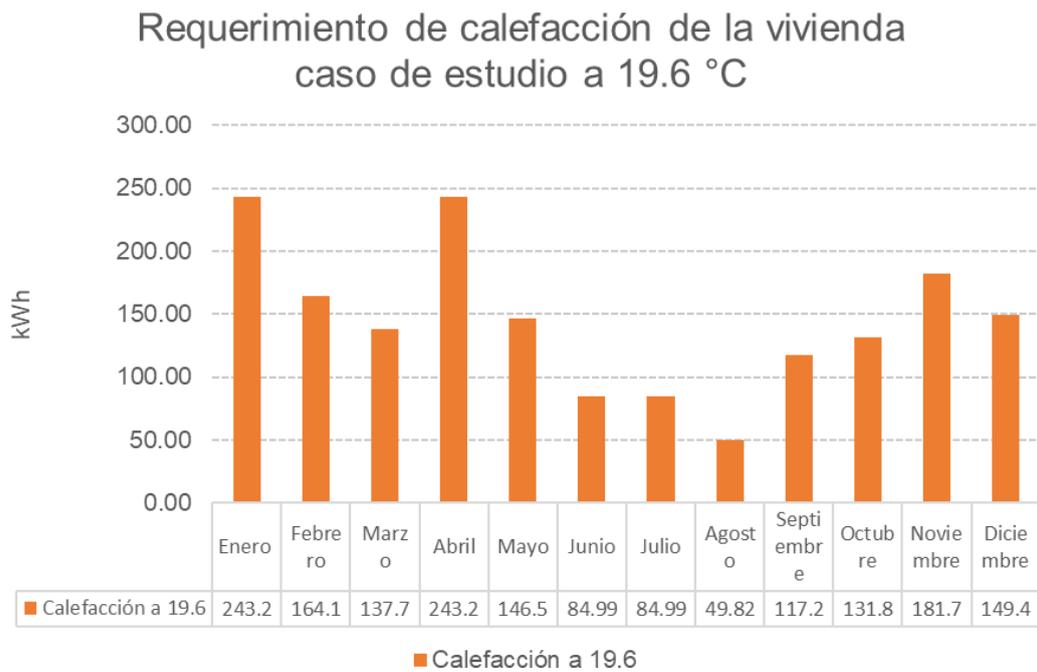


Figura 3.6 Requerimiento de calefacción de la vivienda caso de estudio a 19.6°C

Fuente: [Propia]

3.1.7 Consumo Energético para Calefacción por Unidad de Superficie

Este indicador permite conocer la relación de consumo energético destinado a mantener un confort térmico en climas fríos por unidad de superficie durante un periodo de tiempo mes a mes. También da una indicación de las tendencias en consumo para calefacción, pero no toma en cuenta la superficie no calefaccionada, ni las viviendas sin calefacción de locales.

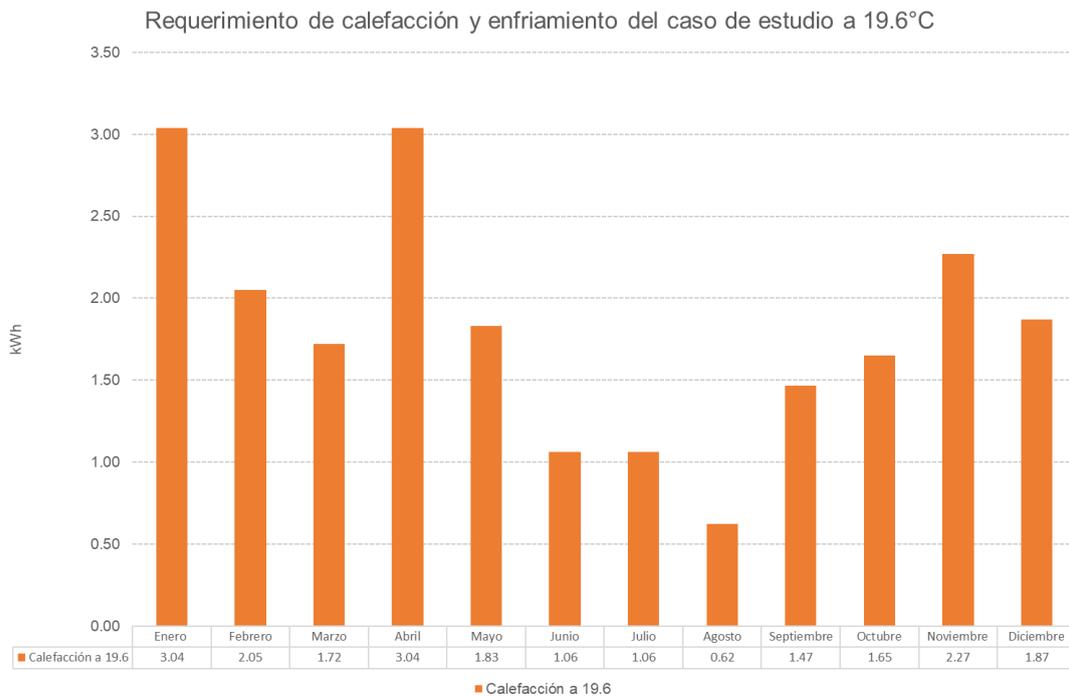


Figura 3.7 Requerimiento de calefacción y enfriamiento del caso de estudio a 19.6°C

3.1.8 Consumo Energético para Cocción y Calentamiento de Agua

Existen varios equipos que usan GLP, entre los más importantes en una vivienda común son: cocina a gas y calefón a gas; usados para la cocción de alimento y para el calentamiento de agua respectivamente. El propósito de este indicador es dar un seguimiento a las tendencias de la eficiencia energética de estos servicios, se lo considera un indicador macro, ya que se usa per cápita o por vivienda ocupada, en este caso se modificará el indicador para analizar la vivienda por el número de personas, así se entenderá de mejor manera el consumo de gas en la vivienda.

Para analizar el consumo en esta vivienda se determinó que la misma consume 2 cilindros de gas al mes, los cuales tienen un peso de 15 [Kg], en la tabla 3.3 se puede analizar la equivalencia energética del GLP, el consumo de la vivienda mensual es constante, ocupando 14 [kWh/persona] lo que es equivalente a 50.4 [MJ/persona].

Tabla 3.3 Equivalencias energética del GLP

1 [Kg] de GLP equivale a:	
14 [kWh]	Electricidad
2 [Kg]	Carbón
6 [Kg]	Leña

Fuente: [58]

3.1.9 Generación Energética Renovable Fotovoltaica

Para esta simulación usamos el software SAM, explicado en el apartado de metodología en donde se detalla los parámetros tanto de entrada como de salida, así como la ubicación y potencia de los paneles.

En la actualidad existen diferentes tipos de paneles solares, el que se analizó en este trabajo es el panel fotovoltaico, ya que es el más utilizado en la generación de electricidad en el hogar.

El indicador de consumo energético renovable expresado en [KWh/m²] mes, indicará cuanta energía renovable podemos instalar en la vivienda de caso de estudio. Actualmente, la vivienda no cuenta con esta tecnología y para el análisis de este, se utilizó el software SAM, que permitirá realizar un análisis del consumo energético actual de la vivienda y seleccionar un panel fotovoltaico adecuado y su ahorro.

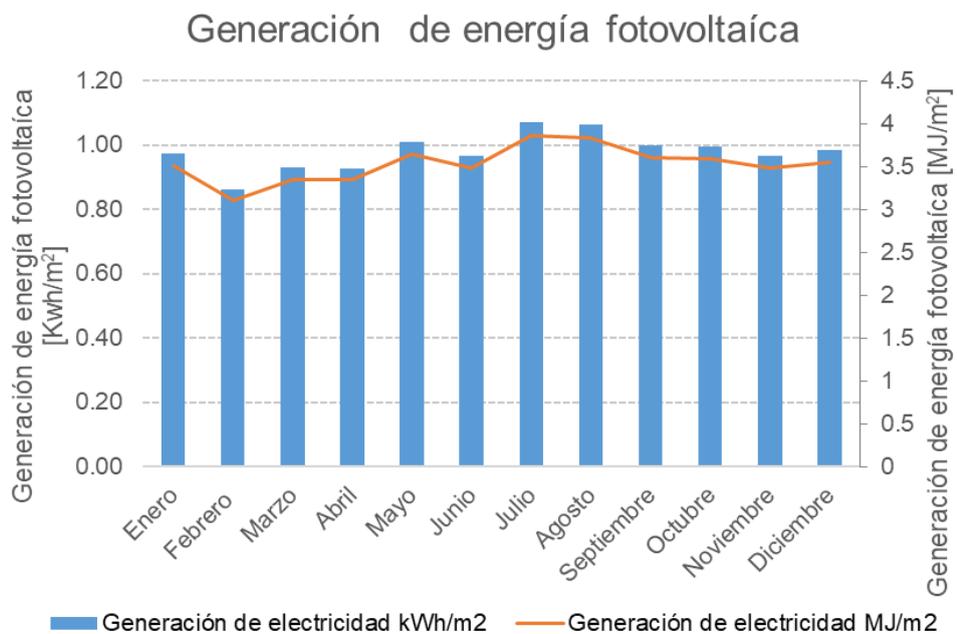


Figura 3.8 Generación de Energía Fotovoltaica

Fuente: [Propia]

3.1.10 Confort Térmico

Un indicador importante en este trabajo es el confort térmico, para lo cual se analiza la temperatura operativa en promedio al mes simulada con el programa Eplus, para ver si este se encuentra dentro de los márgenes de confort establecidos.

La temperatura operativa es medida promedio mes a mes de manera horaria, durante el periodo de 1 año, en el caso base se lo analizó como se puede ver en la figura 3.9, donde es alcanzado solo en la bodega y en el dormitorio principal en un periodo de tiempo que va desde principios de mayo y principios de septiembre.

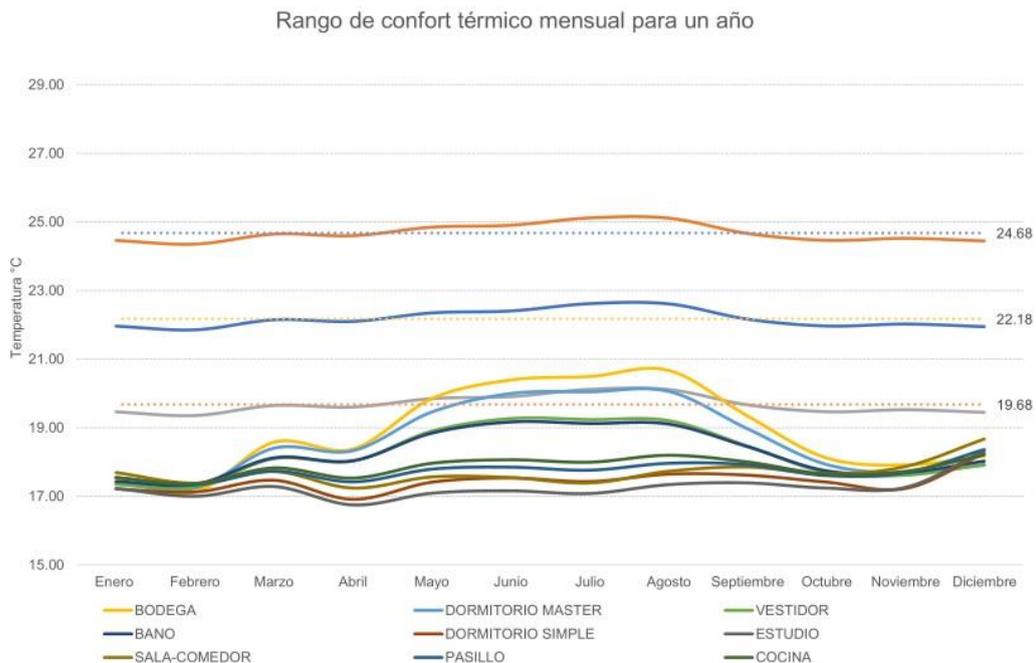


Figura 3.9 Rango de Confort Térmico Mensual para un Año de cada Dependencia de la Vivienda

Fuente: [Propia]

Para una mayor comprensión se divide a la vivienda en dos zonas, la zona 1 que está conformada por: la sala, la cocina, el baño, el estudio y el dormitorio simple; mientras que la zona 2 está conformada por: el dormitorio master, el closet y la bodega.

La zona 2 es la zona que mayor confort térmico posee esto se debe a que la bodega tiene mayores ganancias térmicas.

En la gráfica 3.10 se puede apreciar el porcentaje de confort de la vivienda, de esta manera nos damos cuenta de que esta alcanza niveles bajos de confort en la zona 1 y en la zona 2 en los periodos fríos del año.

Este comportamiento de la vivienda junto con el indicador de energía necesaria para calefacción, nos da a entender que en Quito es necesario consumir energía para estar confortable en una vivienda. La energía requerida para calefacción es más elevada que el consumo energético mensual de la vivienda.

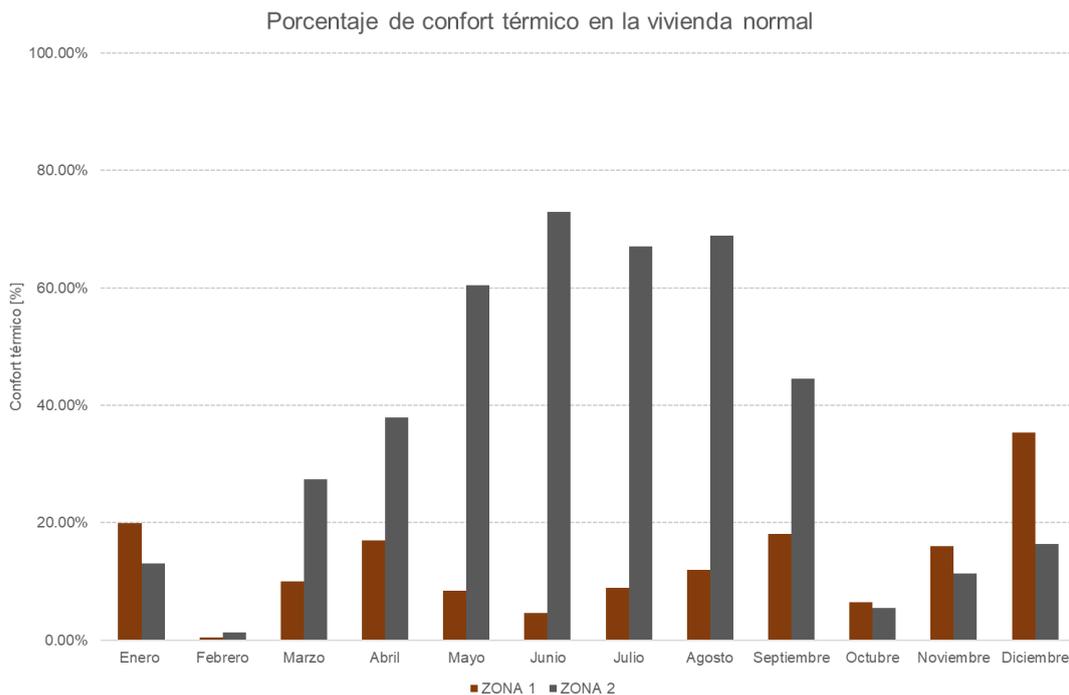


Figura 3.10 Porcentaje de confort térmico de una vivienda normal

Fuente: [Propia]

3.2 Simulación

Para la simulación se analizó si la vivienda podría ser considerada como vivienda de bajo consumo energético, considerando al confort térmico como usuario de energía. Una vez seleccionado los indicadores energéticos, se procedió a analizar el confort térmico de la vivienda y luego analizar en que periodos de tiempo la misma necesita de calefacción, de esta manera se comprobó cuanta energía total necesita una vivienda satisfaciendo su confort térmico.

Se utilizó OpenStudio y Energy plus para calcular, primero la temperatura operativa y segundo para calcular el requerimiento energético en kWh para que la vivienda alcance su confort térmico.

3.2.1 Archivo de Clima

El archivo de clima usado para la simulación del comportamiento térmico, tiene un formato compatible con el software E plus (EWS), este archivo tiene diferentes variables climáticas como temperatura: de bulbo seco y húmedo, humedad relativa, velocidad del viento, etc. El archivo de clima fue realizado con datos obtenidos en la estación meteorológica del observatorio astronómico de Quito, el cual está ubicado a una distancia aproximada de 1.5 [km] de la ubicación del caso de estudio.

3.2.2 Validación

Los valores de aceptación para las dos medidas de 5% para NMBE y de 10%, como se fueron establecidos con anterioridad para la calibración de los modelos térmicos en el trabajo de Fonti [59], en donde se calibraron modelos térmicos de viviendas, se midieron las temperaturas del aire interior y de las superficies de las paredes [59][51]. Como se puede apreciar en la tabla 3.4 los valores para las dos zonas están dentro del rango de aceptación.

En la figura 3.11 se puede observar las comparaciones para cada zona de la temperatura del aire interior de los datos medidos y simulados.

Tabla 3.4 Valores de NMBE y de NRMSE

	Zona 1	Zona 2
NMBE ($\pm 5\%$)	0.799	0.219
NRMSE ($< 10\%$)	6.742	6.535

Fuente: [Propia]

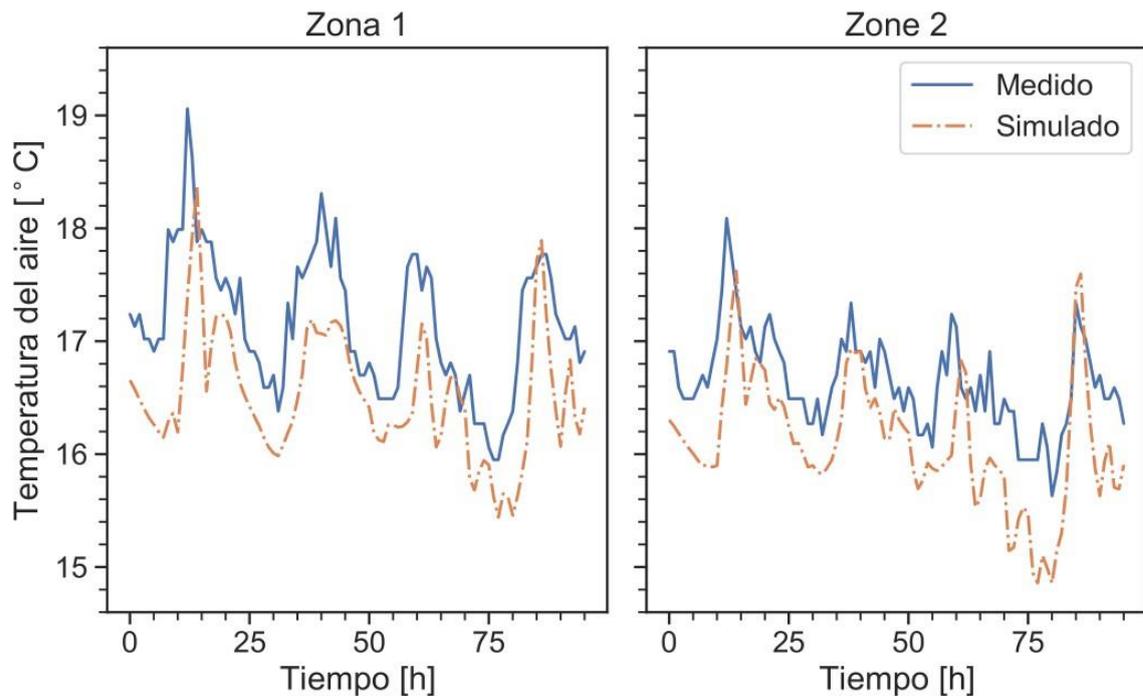


Figura 3.11 Comparación de los Datos Simulados y los Datos Medidos

Fuente: [Propia]

Los resultados muestran que los datos tanto reales como simulados están dentro del rango de error aceptable. Esto indica que los algoritmos y las condiciones de entrada utilizadas en el modelo para los cálculos de energía representan valores reales. Eso quiere decir este modelo, debería ser lo suficientemente preciso para predecir el comportamiento térmico de la vivienda de caso de estudio.

El código para el cálculo de estos métodos estadísticos se realizó usando el software Python y puede ser analizado en el Anexo V.

El modelo realizado para el análisis del comportamiento térmico de este trabajo está dentro de valores admisibles.

3.3 Análisis de Resultados

En este punto se compara tres aspectos de la vivienda, el requerimiento en calefacción de la vivienda y su consumo final de energía, para finalmente analizar su definición de bajoconsumo energético.

Los indicadores permiten tener una mejor comprensión del consumo de la vivienda, su consumo energético final. Un ejemplo de esto es la energía necesaria para el calentamiento de la vivienda.

3.3.1 Comparativa en confort térmico.

Este indicador permite entender cuáles son las horas de confort de la vivienda mes a mes, lo que permite analizar si los cambios realizados en la envolvente son los necesarios para elevar estas horas. Se puede apreciar en la figura 3.12 y 3.13 las horas de confort de los periodos de tiempo fríos aumentan. En el mes de diciembre se puede observar que en la zona 1 existe un cambio del 35% al 77% y en la zona 2 del 16% al 72%.

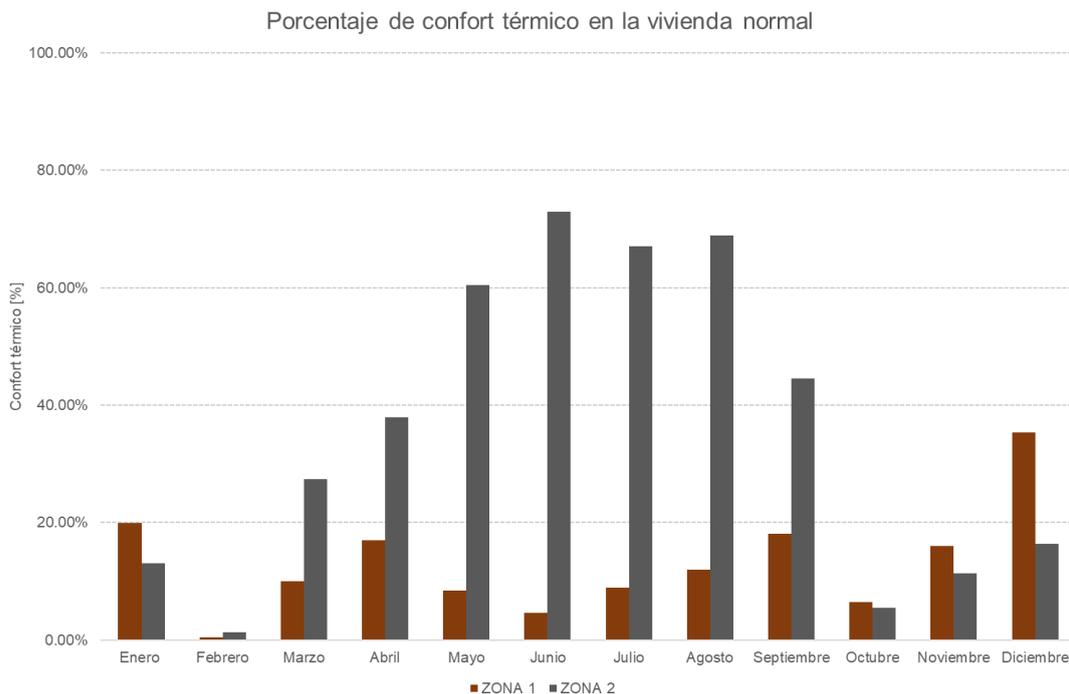


Figura 3.12 Porcentaje de confort térmico en la vivienda normal

Fuente: [Propia]

Como se puede apreciar el confort térmico aumenta notablemente; sin embargo, es necesario aumentar la temperatura de la vivienda con el fin de incrementar su confort térmico.

La bodega presentó mayores mejoras en el confort térmico, esto se debe a que la bodega tiene un techo de policarbonato, el cual le otorga mayores ganancias térmicas. Por este motivo, se presenta un efecto invernadero, esta dependencia afecta a la zona 2 principalmente, la cual posee un significativo aumento en su confort térmico.

Simulando el requerimiento energético para satisfacer la temperatura mínima para alcanzar el confort térmico.

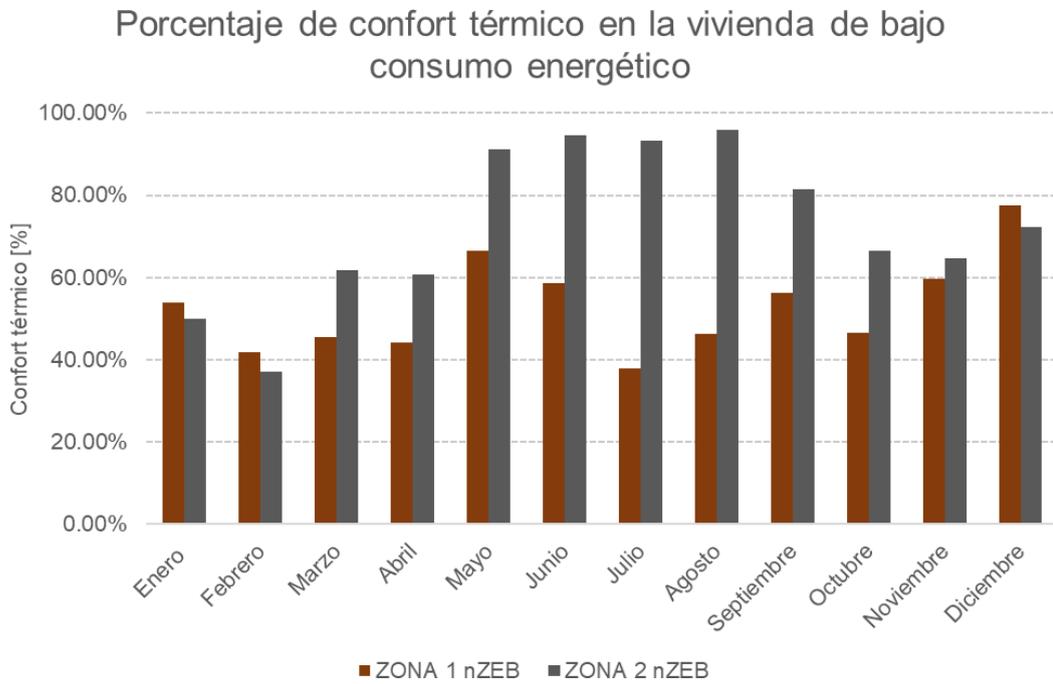


Figura 3.13 Porcentaje de confort térmico en la vivienda de bajo consumo energético
Fuente: [Propia]

En la figura 3.14 en donde se tiene consumos energéticos elevados por el requerimiento para alcanzar la temperatura mínima para el confort, este valor llega en los meses fríos valores de hasta 243 kWh.

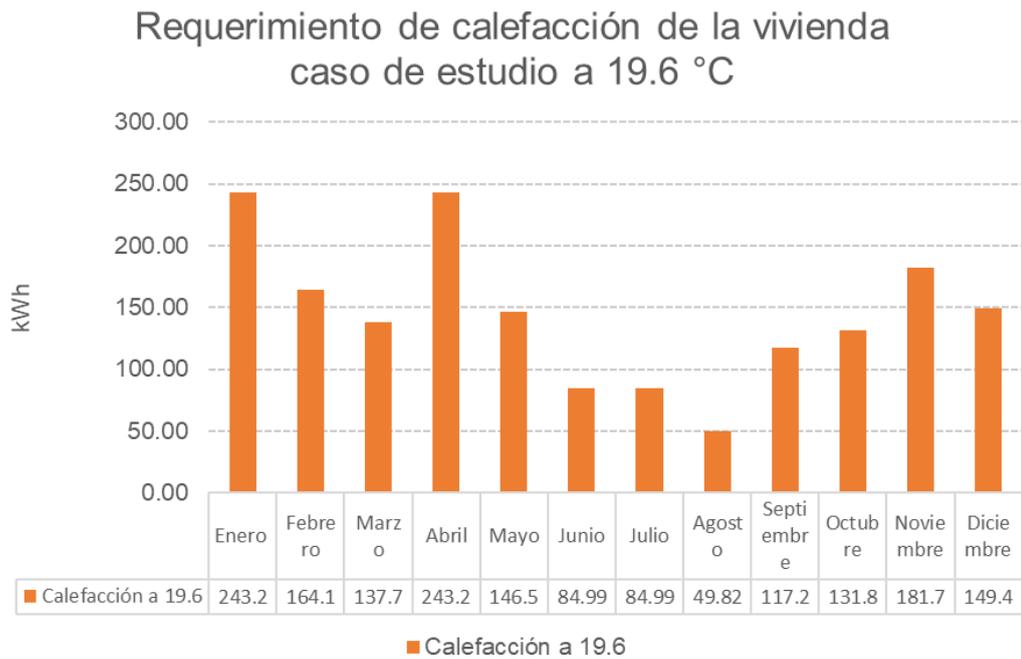


Figura 3.14 Requerimiento en calefacción de la vivienda normal

Fuente: [Propia]

Realizando cambios a la envolvente y mejorando el confort térmico de la vivienda nosolo se analizó el aumento en el confort térmico, si no la reducción del consumo en requerimiento; para alcanzar el confort térmico adecuado reduciendo el consumo hasta en un 88%, como se puede apreciar en la figura 3.15.

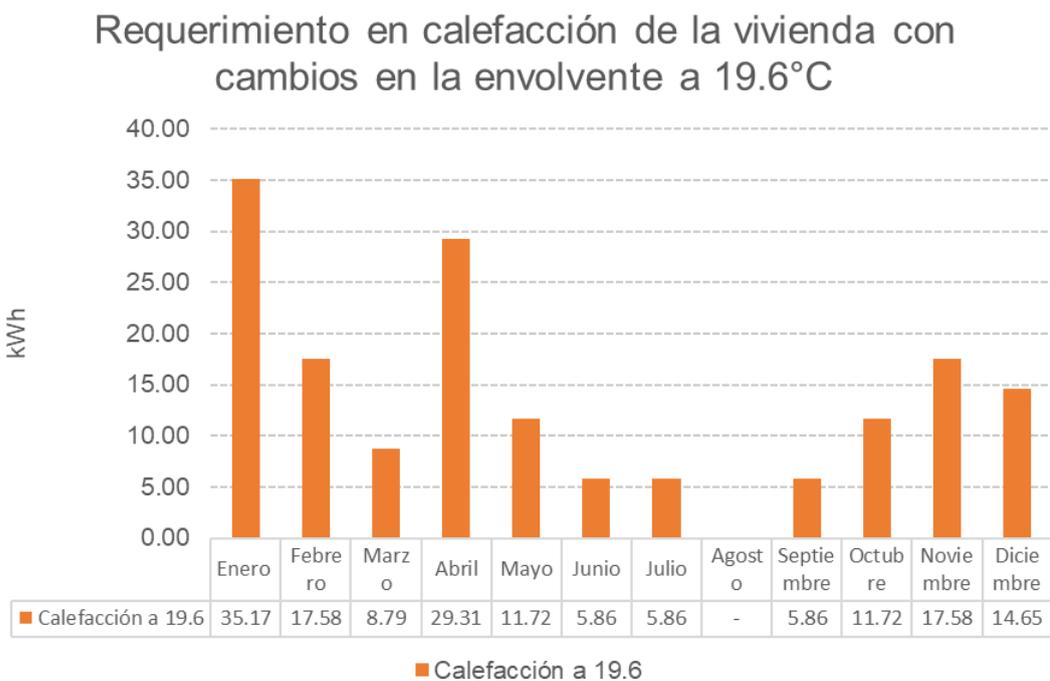


Figura 3.15 Requerimiento en calefacción de la vivienda con cambios en la envolvente

Fuente: [Propia]

3.3.2 Consumo total de energía

Al analizar el indicador de confort térmico y de energía usada en calefacción, se puede interpretar que la vivienda actualmente no puede considerarse como una vivienda de bajo consumo energético, ya que esta no posee un confort térmico adecuado y para poder conseguir el mínimo de confort térmico la vivienda necesita mucha energía. A esta energía se le suma la energía de consumo en electrodomésticos y luz, así como la energía usada para calentamiento de agua y cocción, llegando a alcanzar valores de hasta 295.2 kWh.

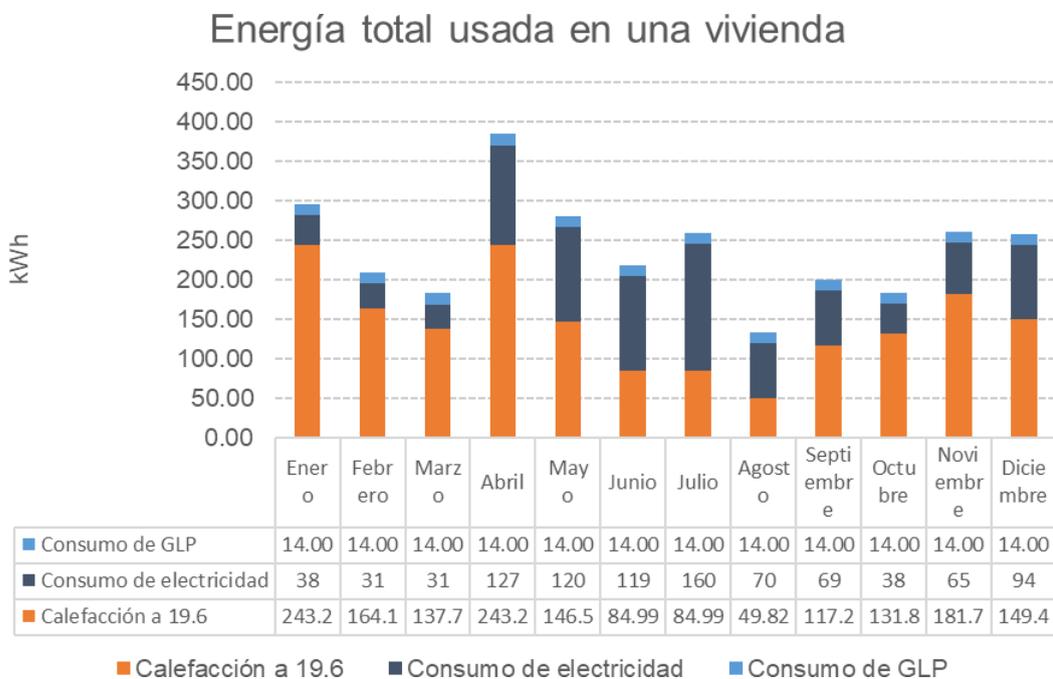


Figura 3.16 Energía total usada en una vivienda

Fuente: [Propia]

En la figura 3.16 se analizó los consumos totales de energía de la vivienda de caso de estudio como se puede apreciar en la gráfica, exceptuando los meses de abril a julio que tienen un consumo tope de 96 kWh, reduciendo el consumo en un 75% existe valores negativos con reducciones de hasta el 111% de energía.

Energía total utilizada en una vivienda nZEB en Quito

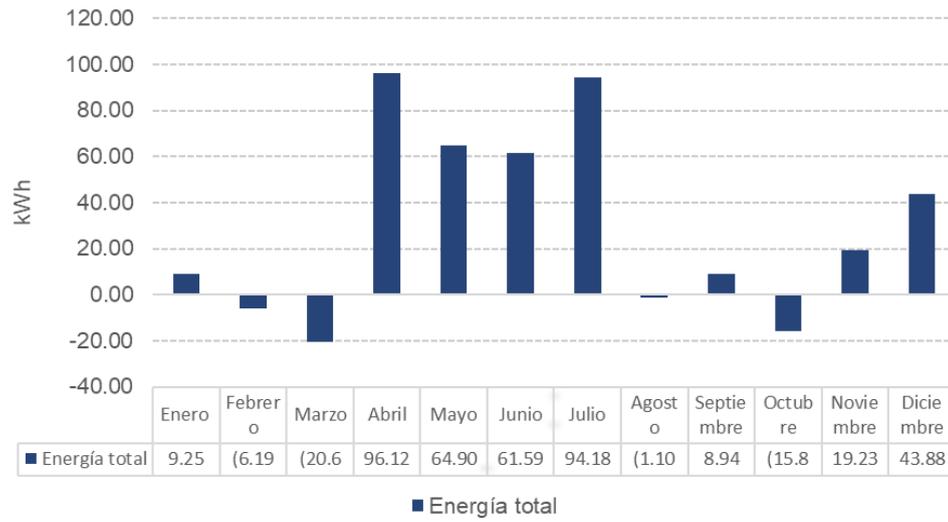


Figura 3.17 Energía total utilizada en una vivienda nZEB en Quito

Fuente: [Propia]

4 CONCLUSIONES

La definición más apropiada para una vivienda de bajo consumo energético es una vivienda cuyo consumo energético neto, considerando la implementación de energías renovables, es considera lente baja, manteniendo un confort térmico adecuado considerando que este es un usuario energético. Aplicando varias definiciones de edificios de bajo consumo energético, así como sus sugerencias para alcanzar metas de reducción energética y cambiando la envolvente del mismo para aumentar la eficiencia de la vivienda en mantener el confort térmico se ha logrado reducir considerablemente el consumo energético de esta vivienda, alcanzando la meta de vivienda de bajo consumo energético

La mayoría de definiciones de edificios de bajo consumo energético no satisfacen la necesidad de una región andina, esto se debe a que esta definición está establecida para climas estacionarios y extremos. Para Quito, lugar donde prima un clima frío, se debe considerar al confort térmico como usuario energético, ya que para mantenerlo son necesarios los equipos de calefacción, los cuales son consumidores grandes de energía. Como se pudo verificar en la simulación de OpenStudio que para alcanzar el confort térmico es necesario hasta 250Kwh, dicho valor supera al consumo habitual de la vivienda caso de estudio donde el mes de agosto al ser el de mayo consumo llega a 160 kWh.

En la zona 1 se pudo analizar que al no existir una ganancia térmica por radiación como en la zona 2, influenciada por la bodega, el aumento en el confort térmico fue bajo, los cambios realizados pueden ser mejorados, analizando diferentes vías que ayuden a mantener ganancia térmica, así como disminuyendo las infiltraciones en esta zona.

La vivienda simulada de bajo consumo energético en donde se mejoró la envolvente para elevar la temperatura y poder mantener un confort térmico adecuado y se implementó un sistema de energía fotovoltaica se pudo comprobar que el ahorro energético en la vivienda, disminuyó hasta en un 111% compara con la vivienda de caso de estudio.

El consumo de energía per cápita y por unidad de superficie son los indicadores más ampliamente utilizados para el sector residencial. Este indicador permite comparar la eficiencia energética entre distintas regiones aportando una visión interesante respecto a las tendencias del consumo energético.

Se comprobó cómo los cambios sugeridos aumentan el confort térmico para viviendas en donde la radiación solar incida sobre las zonas acristaladas ayudando así a tener una ganancia térmica, con los materiales sugeridos esta ganancia térmica se puede mantener como se prueba en la zona 2, también se recomienda emplear equipos de bajo consumo energético que ayuden a aumentar la ganancia térmica.

Se recomienda en próximos trabajos, realizar estudios de confort térmico para viviendas de climas andinos en las cuales se tomen en cuenta parámetros como: temperatura superficial de las paredes interiores y exteriores, temperatura radiante y humedad relativa.

Este trabajo de titulación no considero la parte económica, se considera analizar en trabajos futuros el retorno de inversión y la viabilidad de aplicar de aplicar la definición de edificios de bajo consumo energético usando los cambios en envoltorio y aplicación de energías renovables.

Referencias Bibliográficas

- [1] British Petroleum, "BP Statistical Review of World Energy 67th edition," 2018.
- [2] R. E. González-Mahecha, A. F. P. Lucena, A. Szklo, P. Ferreira, and A. I. F. Vaz, "Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in zero/nearly zero energy buildings," *Energy Build.*, vol. 172, no. May, pp. 505–516, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.04.027.
- [3] H. J. Rosenberg and K. Blust, "Guía de Conceptos Básicos de Edificios verdes y LEED (Core Concepts and LEED Guide) SEGUNDA EDICIÓN (SECOND EDITION)," U.S. Green Building Council, USA, 2006.
- [4] International Energy Agency, *Global Status Report 2017*. 2017.
- [5] S. Vora, P. M. Rajgor, and J. Pitroda, "A Critical Review of Net Zero Energy Efficient Design Strategies In Construction Sector," *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ.*, vol. 3, no. 1, pp. 1187–1194, 2017.
- [6] D. D. Agostino and L. Mazzarella, "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions," *J. Build. Eng.*, 2018, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.10.019.
- [7] A. J. Marszal *et al.*, "Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies," *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 971–979, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.022.
- [8] H. Yi, R. S. Srinivasan, W. W. Braham, and D. R. Tilley, "An ecological understanding of net-zero energy building: Evaluation of sustainability based on emergy theory," *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 654–671, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.059.
- [9] Ministerio de Fomento, "PLAN NACIONAL DESTINADO A AUMENTAR EL NÚMERO DE EDIFICIOS DE CONSUMO DE ENERGÍA CASI NULO EN ESPAÑA.pdf." p. 37, 2014.
- [10] A. Borroto and S. Sánchez, "Manual de Eficiencia Energética en Edificios Públicos," Ecuador, 2008.
- [11] Instituto Nacional de Estadística y Censos, "ENCUESTA DE EDIFICACIONES 2016," Ecuador, 2016.
- [12] Ó. Ribero, D. Garzón, Y. Alvarado, and I. Gasch, "Economic benefits of LEED certification: a case study of the Centro Ático building," *Rev. Ing. Construcción RIC*, vol. 31, pp. 139–146, 2016.

- [13] A. Ramírez, “La construcción sostenible,” 2009. doi: 10.1016/j.mejo.2008.07.044.
- [14] P. Milano, “Towards cost-optimal nearly zero-energy buildings,” no. July 2013, 2015.
- [15] N. van der Grijp *et al.*, “Demonstration projects of Nearly Zero Energy Buildings: Lessons from end-user experiences in Amsterdam, Helsingborg, and Lyon,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 49, no. May 2018, pp. 10–15, 2019, doi: 10.1016/j.erss.2018.10.006.
- [16] “Edificios nZEB que son y como ayudan a reducir consumo energético - Naturgy - Hogar.”
https://www.naturgy.es/blog/negocios_y_autonomos/edificios_nzeb_que_son_y_como_ayudan_a_reducir_consumo_energetico (accessed Apr. 23, 2022).
- [17] L. E. Soria Pazmiño, “EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA ENVOLVENTE DE TRES EDIFICIOS DE OFICINAS, CONSTRUIDOS EN LA CIUDAD DE QUITO A PARTIR DEL AÑO 2011.,” PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, 2017.
- [18] M. Hu, “Net Zero Is Not A Choice But An Ethical Practice – Evolution Of Net Zero Building,” no. April, pp. 170–174, 2018, doi: 10.35483/acsa.am.106.29.
- [19] D. Barber, “Living With the Sun: Architecture and the Association for Applied Solar Energy, 1954-1958,” pp. 1954–1958, 2007.
- [20] A. García, “El petróleo y la crisis económica mundial: Una mezcla explosiva,” *Cult. y Represent. Soc.*, vol. Año 9, no. 17, p. 368, 2009, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [21] T. V. Esbensen and V. Korsgaard, “Dimensioning of the solar heating system in the zero energy house in Denmark,” *Sol. Energy*, vol. 19, no. 2, pp. 195–199, 1977, doi: 10.1016/0038-092X(77)90058-5.
- [22] D. Claridge and B. Gustafson, “North American Energy M&V Protocol Version 1.0,” 1996.
- [23] N. S. Council and Technology, “Net-Zero Energy, High-Performance Green Buildings,” 2008.
- [24] S. Korkmaz, D. Riley, and M. Horman, “Piloting Evaluation Metrics for Sustainable High-Performance Building Project Delivery,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 136, no. 8, pp. 877–885, 2010, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000195.
- [25] E. A. Alsema, D. Anink, A. Meijer, A. Straub, and G. Donze, “Integration of Energy and Material Performance of Buildings: I=E+M,” *Energy Procedia*, vol. 96, no.

October, pp. 517–528, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.094.

- [26] S. Sharma and P. Syal, “Defining Design Criteria of Net Zero Energy Building for Composite Climate Zone,” no. May, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.14180.22404.
- [27] (DOE) US Department of Energy, “A Common Definition for Zero Energy Buildings,” no. September, p. 22, 2015, [Online]. Available: http://energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/bto_common_definition_zero_energy_buildings_093015.pdf<http://energy.gov/eere/buildings/downloads/common-definition-zero-energy-buildings>.
- [28] S. Pless and P. Torcellini, “Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options,” 2010. doi: 10.2172/983417.
- [29] S. Attia, *Net Zero Energy Buildings (NZEB)*. Elsevier Science & Technology, 2018.
- [30] M. B. Piderit, F. Vivanco, G. van Moeseke, and S. Attia, “Net zero buildings-A framework for an integrated policy in Chile,” *Sustain.*, vol. 11, no. 5, pp. 1–18, 2019, doi: 10.3390/su11051494.
- [31] P. Torcellini, S. Pless, and M. Deru, “Zero energy buildings: A critical look at the definition.,” *Energy*, vol. 2, no. August, p. 15, 2006, doi: 10.1016/S1471-0846(02)80045-2.
- [32] U. Berardi, *ZEB and nZEB (Definitions, design methodologies, good practices and case studies)*. 2018.
- [33] Yuehong Lu, Xiao-Ping Zhang, Zhijia Huang, Jinli Lu, and Changlong Wang, “Definition and Design of Zero Energy Buildings,” *Intech*, vol. i, no. tourism, p. 13, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/57353>.
- [34] M. Alonso, L. Georges, and Ø. Rønneseth, *State of the Art Analysis of Nearly Zero Energy Buildings*, no. July. 2018.
- [35] J. Oh, T. Hong, H. Kim, J. An, K. Jeong, and C. Koo, “Advanced strategies for net-zero energy building: Focused on the early phase and usage phase of a building’s life cycle,” *Sustain.*, vol. 9, no. 12, 2017, doi: 10.3390/su9122272.
- [36] B. Mattoni, C. Guattari, L. Evangelisti, F. Bisegna, P. Gori, and F. Asdrubali, “Critical review and methodological approach to evaluate the differences among international green building rating tools,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. April 2017, pp. 950–960, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.105.
- [37] USGBC, “LEED Zero Program Guide,” 2019.
- [38] R. Reed, S. Wilkinson, A. Bilos, and K.-W. Schulte, “A Comparison of International

- Sustainable Building Tools,” *17th Annu. Pacific Rim Real Estate Soc. Conf.*, no. January, p. 16, 2011.
- [39] R. J. Cole and M. J. Valdebenito, “The importation of building environmental certification systems: International usages of BREEAM and LEED,” *Build. Res. Inf.*, vol. 41, no. 6, pp. 662–676, 2013, doi: 10.1080/09613218.2013.802115.
- [40] J. G. Navarro, L. M. Martínez, R. H. Fuertes, and A. G. Martínez, “Establecimiento de indicadores de sostenibilidad para entornos degradados: el Valle minero de Laciana (León, España),” pp. 52–70, 2009, doi: 10.3989/ic.08.022.
- [41] F. Arias, “Desarrollo sostenible y sus indicadores,” *Rev. Soc. y Econ.*, vol. 11, pp. 200–229, 2006.
- [42] C. Araújo, L. Bragança, and M. G. de Almeida, “Sustainable construction key indicators,” *Port. SB13 - Contrib. Sustain. Build. to Meet EU 20-20-20 Targets*, no. BREEAM 2012, pp. 505–512, 2013.
- [43] ISO, *Sustainability in building construction — Sustainability indicators*, vol. 2011. 2011, p. 39.
- [44] T. Häkkinen, T. Lützkendorf, M. Balouktsi, and A. Immendörfer, “Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings,” 2010.
- [45] OLADE and sieLAC, “Anuario 2017 Estadísticas Energéticas,” *OLADE*, p. 295, 2017.
- [46] J. Rafael, H. Hernández, J. Carlos, and T. Espinoza, “GESTIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS EDIFICACIONES DEL ECUADOR MANAGEMENT OF ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS IN ECUA,” vol. 10, pp. 4–9, 2018.
- [47] MIDUVI, “Eficiencia Energética en Edificaciones Residenciales NEC-HS-EE,” p. 40, 2018.
- [48] Instituto Ecuatoriano de Normalización, *Eficiencia Energética en edificaciones. Requisitos*, vol. 2506. 2009, p. 16.
- [49] X. Cao, X. Dai, and J. Liu, “Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade,” *Energy Build.*, vol. 128, pp. 198–213, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
- [50] S. Attia and S. Carlucci, “Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate,” *Energy Build.*, vol. 102, pp. 117–128, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.017.

- [51] F. Ordóñez, F. Jácome, P. Castro, and C. Naranjo-Mendoza, "Sensitivity analysis of the variables affecting indoor thermal conditions on unconditioned dwellings in equatorial high-altitude regions from an experimentally validated model," *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 2549, 2019, doi: 10.1080/17512549.2019.1582437.
- [52] J. E. Muñoz Carrillo and I. A. Prado Pozo, "Estudio experimental del comportamiento térmico de una vivienda en Quito situada en el barrio La Vicentina," 2018.
- [53] F. Jacome, "Estudio De Sensibilidad De Los Parametros Que Influyen En El Comportamiento Termico De Una Vivienda De Quito Con Ganancias Internas Usando Simulacion Energetica," p. 145, 2018, doi: 10.1103/PhysRevX.7.041008.
- [54] A. Martín Alcalde, "Estudio Y Simulación De Un Edificio Con Energy Plus," *ETS Ing. U. Rovira y Virgili*, 2010.
- [55] CONELEC Consejo Nacional de Electricidad, "Atlas Solar Del Ecuador Con Fines De Generación Eléctrica," *Corporación para la Investig. Energética*, p. 51, 2008, [Online]. Available: <http://energia.org.ec/cie/wp-content/uploads/2017/09/AtlasSolar.pdf>.
- [56] D. Ricardo and V. Daniel, "EVALUACIÓN DEL POTENCIAL TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA LA MICROGENERACIÓN ELÉCTRICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO TRABAJO," 2019.
- [57] N. Yildirim and L. Bilir, "Evaluation of a hybrid system for a nearly zero energy greenhouse," *Energy Convers. Manag.*, vol. 148, no. April 2019, pp. 1278–1290, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.068.
- [58] Z. Cedeño, "Estimación del Perjuicio al Estado causado por el subsidio otorgado al consumo del Gas Licuado de Petróleo o GLP en el Ecuador y la incidencia de su comercio irregular hacia Colombia o Perú.," p. 226, 2013.
- [59] A. Fonti, G. Comodi, S. Pizzuti, A. Arteconi, and L. Helsen, "Low Order Grey-box Models for Short-term Thermal Behavior Prediction in Buildings," *Energy Procedia*, vol. 105, no. May, pp. 2107–2112, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.592.
- [60] I. Zacà, D. D'Agostino, P. Maria Congedo, and C. Baglivo, "Data of cost-optimality and technical solutions for high energy performance buildings in warm climate," *Data Br.*, vol. 4, pp. 222–225, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.DIB.2015.05.015.
- [61] M. Panagiotidou and R. J. Fuller, "Progress in ZEBs-A review of definitions, policies and construction activity," *Energy Policy*, vol. 62, pp. 196–206, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.06.099.

5 ANEXO

Anexo I

País	Referencia	Año de aplicación	Energía primaria usada [kWh/m ² y]		Puntos principales
			Sector residencial	Sector no residencial	
Austria	OIB (Instituto Austriaco de Ingeniería de la Construcción)	2021	160	170	Energías renovables Consumo energético Emisiones de carbono
Bélgica - Bruselas	Decreto nacional 2007	2015	45	90	Energías renovables Consumo energético Temperatura del ambiente
Bélgica - Flanders	Regulación nacional 2013	2021	0.3	0.4	Energías renovables Consumo energético Temperatura del ambiente
Bélgica - Wallonia	Consolidado en el reporte de la Comisión Europea	2019	no definido	no definido	Energías renovables Consumo energético
Bulgaria	Plan Nacional nZEB	2021	30-50	40-60	Energías renovables Consumo energético
Croacia	Plan Nacional nZEB	2021	33-41	no definido	Energías renovables Consumo energético
Chipre	Decreto nacional 2014	2021	100	125	Energías renovables Consumo energético
Republica Checa	Regulación nacional 2013	2020	75-80	90	Energías renovables Consumo energético Eficiencia energética
Dinamarca	Regulación nacional 2010	2021	20	25	Energías renovables Consumo energético Temperatura del ambiente Participación tecnológica
Estonia	Regulación Nacional	20221	50-100	90-270	Energías renovables

	68:2012				
Finlandia	Consolidado en el reporte de la Comisión Europea	2021	no definido	no definido	Energías renovables
Francia	Plan Nacional nZEB	2013	40-65	70-110	Energías renovables Consumo energético Temperatura del ambiente Participación tecnológica
Alemania	Plan Nacional nZEB	2021	0.4	no definido	Energías renovables Consumo energético
Grecia	Ley Nacional 4122/2013	2019	no definido	no definido	Energías renovables
Hungría	Decreto Nacional 7/2006	2019	50-72	60-115	Energías renovables Consumo energético
Irlanda	Plan Nacional nZEB	2019	45	0.6	Energías renovables Emisiones de carbono
País	Referencia	Año de aplicación	Energía primaria usada [kWh/m2y]		Puntos principales
			Sector residencia I	Sector no residencia I	
Italia	Decreto de la EPBD (Directiva de eficiencia energética)	2019	40%-50%	30%-45%	Energías renovables Consumo energético Eficiencia energética
Latvia	Regulación Nacional 383/2013	2019	95	95	Energías renovables Consumo energético
Lituania	Regulación Nacional 2.01.09/2012	2019	40%-50%	30%-45%	Energías renovables Consumo energético
Luxemburgo	Plan Nacional nZEB	2019	40%-50%	30%-45%	Energías renovables Consumo energético Emisiones de carbono
Malta	Plan Nacional nZEB	2019	40	60	Energías renovables Consumo energético
Países Bajos	Plan Nacional nZEB	2019	40%-50%	30%-45%	Energías renovables Consumo energético
Noruega	Centro de investigación de edificios zero emisiones	2019	no definido	no definido	Energías renovables Consumo energético Emisiones de carbono

Polonia	Plan Nacional nZEB	2019	60-75	45-70	Energías renovables
Portugal	Ley nacional 118/2013	2019	no definido	no definido	Energías renovables
Rumania	Plan Nacional nZEB	2019	93-217	50-192	Energías renovables Emisiones de carbono
Eslovaquia	Decreto Nacional 364/2012	2019	32-54	36-96	Energías renovables Consumo energético
Eslovenia	Plan Nacional nZEB	2019	45-50	70	Energías renovables Consumo energético
España	Decreto nacional 235/2013	2019	40%-50%	30%-45%	Energías renovables Emisiones de carbono
Suecia	Plan Nacional nZEB	2019	30-75	30-105	Energías renovables
Inglaterra	Plan Nacional nZEB	2018	44	no definido	Energías renovables Consumo energético Emisiones de carbono

Anexo II

Tabla 0.1 Términos principales lanzados alrededor de edificios de consumo energético cero.

Acrónimo	Significado	Características
nZEB	Nearly Zero Energy Building	Edificio de alto rendimiento energético con una cantidad muy baja de energía requerida cubierta en gran medida por energía de fuentes renovables en el sitio o cercanas.
NZEB	Net Zero Energy Building	Edificio que entrega tanta energía a la red como consume.
ZEB	Zero Energy Building	Edificio que en su funcionamiento diario no consume energía de la red.
ZEB	Zero Emission Building	Cero emisiones de carbono liberadas al medio ambiente
NZSoEB	Net Zero Source Energy Building	Un edificio que produce en su ubicación tanta energía como utiliza en un año, cuando se contabiliza en la fuente
NZEC	Net Zero Energy Cost Building	La cantidad de dinero que el propietario paga por la energía consumida se equilibra con el dinero que recibe el propietario por la energía entregada a la red durante un año
Autonomous ZEB	Autonomous Zero Energy Building	Edificio independiente que abastece sus propias necesidades
+ZEB	Energy Plus Building	Un edificio que produce más energía de las energías renovables de las que importa durante un año
PV-ZEB	Photovoltaic Zero Energy Building	Un edificio con una baja demanda de energía eléctrica y un sistema fotovoltaico
Wind-ZEB	Wind Zero Energy Building	Un edificio con una baja demanda de energía eléctrica y una turbina eólica en el sitio
PV-Solar thermal-heat pump ZEB	Photovoltaic Solar thermal heat pump Zero Energy Building	Un edificio con baja demanda de calor y electricidad cero, un sistema fotovoltaico en combinación con colectores solares térmicos, bombas de calor y almacenamiento de calor
Wind-Solar thermal-heat pump ZEB	Wind Solar thermal heat pump Zero Energy Building	Un edificio con baja demanda de calor y electricidad y una turbina eólica en combinación con un colector solar térmico, una bomba de calor y almacenamiento de calor

Fuente: [6] [60][61]

Tabla 0.2 Niveles de edificios cero emisiones

NIVELES	DEFINICIÓN
<i>ZEB-O÷EQ</i>	Emisiones netas relacionadas con todo el uso de energía, excepto el uso de energía en equipos domésticos debe ser cero.
<i>ZEB-O</i>	Emisiones netas relacionadas con todo el uso de energía operacional deben ser cero, incluido el uso de energía para los equipos.
<i>ZEB-OM</i>	Emisiones netas relacionadas con todo el uso de energía operacional más todas las emisiones incorporadas de los materiales e instalaciones deben ser cero.
<i>ZEB-COM</i>	<i>ZEB-OM</i> , incluyendo las emisiones relacionadas con el proceso de construcción del edificio.
<i>ZEB-COME</i>	<i>ZEB-COM</i> , incluyendo las emisiones relacionadas con el final de la vida útil del edificio.
<i>ZEB-COMPLETE</i>	Emisiones relacionadas con un análisis completo del ciclo de vida del edificio. También se puede incluir la reutilización, recuperación y reciclaje.

Fuente:[34]

Anexo III

LEED v4 para el Diseño y Construcción de Edificios: Viviendas y Multifamiliares de Poca Altura

INDICADOR		VALOR
Ubicación y Transporte		15
Prerrequisito	Evitar Terrenos Inundables	Obligatorio
VÍA DE DESEMPEÑO		
Crédito	Ubicación para el Desarrollo de Barrios LEED	15
VÍA PRESCRIPTIVA		
Crédito	Selección del Sitio	8
Crédito	Desarrollo Compacto	3
Crédito	Recursos Comunitarios	2
Crédito	Acceso al Transporte Público	2
Sitios Sustentables		7
Prerrequisito	Prevención de la Contaminación en la Construcción	Obligatorio
Prerrequisito	Plantas No Invasivas	Obligatorio
Crédito	Reducción del Efecto Isla de Calor	2
Crédito	Manejo de Aguas Pluviales	3
Crédito	Control de Plagas No Tóxico	2
Uso Eficiente del Agua		12
Prerrequisito	Medición del Consumo de Agua	Obligatorio
VÍA DE DESEMPEÑO		
Crédito	Consumo Total de Agua	12
VÍA PRESCRIPTIVA		
Crédito	Consumo de Agua en el Interior	6
Crédito	Consumo de Agua en el Exterior	4
Energía y Atmósfera		38
Prerrequisito	Desempeño Energético Mínimo	Obligatorio
Prerrequisito	Medición del Consumo de Energía	Obligatorio
Prerrequisito	Educación del Propietario de la Vivienda, Inquilino o Administrador del Edificio	Obligatorio
VÍA DE DESEMPEÑO		
Crédito	Consumo de Energía Anual	29
AMBAS VÍAS		
Crédito	Sistema Eficiente de Distribución del Agua Caliente	5
Crédito	Seguimiento avanzado del consumo de energía	2
Crédito	Diseño Activo Preparado para la Instalación Solar	1
Crédito	Acreditación de Puesta en Marcha de HVAC	1

VÍA PRESCRIPTIVA		
Prerrequisito	Tamaño de la Vivienda	Obligatorio
Crédito	Orientación del Edificio para Obtener Energía Solar Pasiva	3
Crédito	Infiltración de Aire	2
Crédito	Aislamiento de la Envolvente	2
Crédito	Ventanas	3
Crédito	Equipo de Calefacción y Refrigeración del Espacio	4
Crédito	Sistemas de Distribución de Calefacción y Refrigeración	3
Crédito	Equipos Domésticos Eficientes de Agua Caliente	3
INDICADOR		VALOR
Crédito	Iluminación	2
Crédito	Electrodomésticos de Alta Eficiencia	2
Crédito	Energía Renovable	4
Materiales y Recursos		10
Prerrequisito	Madera Tropical Certificada	Obligatorio
Prerrequisito	Gestión de la Durabilidad	Obligatorio
Crédito	Verificación de la Gestión de la Durabilidad	1
Crédito	Productos Preferibles Medioambientalmente	4
Crédito	Gestión de Desechos de Construcción	3
Crédito	Almacén con Uso Eficiente de Materiales	2
Calidad Ambiental Interior		16
Prerrequisito	Ventilación	Obligatorio
Prerrequisito	Ventilación de la Combustión	Obligatorio
Prerrequisito	Protección de la Contaminación del Garaje	Obligatorio
Prerrequisito	Construcción Resistente al Radón	Obligatorio
Prerrequisito	Filtración del Aire	Obligatorio
Prerrequisito	Humo Ambiental del Tabaco	Obligatorio
Prerrequisito	Compartimentación	Obligatorio
Crédito	Ventilación Mejorada	3
Crédito	Control de Contaminantes	2
Crédito	Regulación de los Sistemas de Distribución de Calefacción y Refrigeración	3
Crédito	Compartimentación Avanzada	1
Crédito	Ventilación Avanzada de la Combustión	2
Crédito	Protección Avanzada de la Contaminación del Garaje	2
Crédito	Productos de Bajas Emisiones	3
Innovación		6
Prerrequisito	Calificación preliminar	Obligatorio

Crédito	Innovación	5
Crédito	LEED AP Vivienda	1
Prioridad Regional		4
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
TOTALES		Puntos Posibles: 110
Certificado: de 40 a 49 puntos, Plata: de 50 a 59 puntos, Oro: de 60 a 79 puntos Platino: de 80 a 110		

LEED v4 para el Diseño y Construcción de Edificios: Multifamiliares de Mediana Altura

INDICADOR		VALOR
Ubicación y Transporte		15
Prerrequisito	Evitar Terrenos Inundables	Obligatorio
VÍA DE DESEMPEÑO		
Crédito	Ubicación para el Desarrollo de Barrios LEED	15
VÍA PRESCRIPTIVA		
INDICADOR		VALOR
Crédito	Selección del Sitio	8
Crédito	Desarrollo Compacto	3
Crédito	Recursos Comunitarios	2
Crédito	Acceso al Transporte Público	2
Sitios Sustentables		7
Prerrequisito	Prevención de la Contaminación en la Construcción	Obligatorio
Prerrequisito	Plantas No Invasivas	Obligatorio
Crédito	Reducción del Efecto Isla de Calor	2
Crédito	Manejo de Aguas Pluviales	3
Crédito	Control de Plagas No Tóxico	2
Uso Eficiente del Agua		12
Prerrequisito	Medición del Consumo de Agua	Obligatorio
VÍA DE DESEMPEÑO		
Crédito	Consumo Total de Agua	12
VÍA PRESCRIPTIVA		
Crédito	Consumo de Agua en el Interior	6
Crédito	Consumo de Agua en el Exterior	4

Energía y Atmósfera		37
Prerrequisito	Desempeño Energético Mínimo	Obligatorio
Prerrequisito	Medición del Consumo de Energía	Obligatorio
Prerrequisito	Educación del Propietario de la Vivienda, Inquilino o Administrador del Edificio	Obligatorio
Crédito	Consumo de Energía Anual	30
Crédito	Distribución Eficiente del Agua Caliente	5
Crédito	Seguimiento avanzado del consumo de energía	2
Materiales y Recursos		9
Prerrequisito	Madera Tropical Certificada	Obligatorio
Prerrequisito	Gestión de la Durabilidad	Obligatorio
Crédito	Verificación de la Gestión de la Durabilidad	1
Crédito	Productos Preferibles Medioambientalmente	5
Crédito	Gestión de Desechos de Construcción	3
Calidad Ambiental Interior		18
Prerrequisito	Ventilación	Obligatorio
Prerrequisito	Ventilación de la Combustión	Obligatorio
Prerrequisito	Protección de la Contaminación del Garaje	Obligatorio
Prerrequisito	Construcción Resistente al Radón	Obligatorio
Prerrequisito	Filtración del Aire	Obligatorio
Prerrequisito	Humo Ambiental del Tabaco	Obligatorio
Prerrequisito	Compartimentación	Obligatorio
Crédito	Ventilación Mejorada	3
Crédito	Control de Contaminantes	2
Crédito	Regulación de los Sistemas de Distribución de Calefacción y Refrigeración	3
Crédito	Compartimentación Avanzada	3
Crédito	Ventilación Avanzada de la Combustión	2
Crédito	Protección Avanzada de la Contaminación del Garaje	1
Crédito	Productos de Bajas Emisiones	3
Crédito	Humo No Ambiental del Tabaco	1
INDICADOR		VALOR
Innovación		6
Prerrequisito	Calificación preliminar	Obligatorio
Crédito	Innovación	5
Crédito	LEED AP Vivienda	1
Prioridad Regional		4
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1

Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
TOTALES		Puntos posibles: 110
Certificado: de 40 a 49 puntos, Plata: de 50 a 59 puntos, Oro: de 60 a 79 puntos Platino: de 80 a 110		

LEED v4 para BD+C: Nueva Construcción y Renovaciones Importantes

INDICADOR		VALOR
Ubicación y Transporte		16
Crédito	Ubicación para el Desarrollo de Barrios LEED	16
Crédito	Protección de Tierras Susceptibles	1
Crédito	Sitio de Alta Prioridad	2
Crédito	Densidad de los Alrededores y Diversidad de Usos	5
Crédito	Acceso a Transporte de Calidad	5
Crédito	Instalaciones para Bicicletas	1
Crédito	Huella Reducida de Estacionamiento	1
Crédito	Vehículos Eficientes	1
Sitios Sustentables		10
Prerrequisito	Prevención de la Contaminación en la Construcción	Obligatorio
Crédito	Evaluación del Sitio	1
Crédito	Desarrollo del Sitio - Protección o Restauración del Hábitat	2
Crédito	Espacios Abiertos	1
Crédito	Manejo de Aguas Pluviales	3
Crédito	Reducción del Efecto Isla de Calor	2
Crédito	Reducción de la Contaminación Lumínica	1
Uso Eficiente del Agua		11
Prerrequisito	Reducción del Consumo de Agua en el Exterior	Obligatorio
Prerrequisito	Reducción del Consumo de Agua en el Interior	Obligatorio
Prerrequisito	Medición del Consumo de Agua por Edificio	Obligatorio
Crédito	Reducción del Consumo de Agua en el Exterior	2
Crédito	Reducción del Consumo de Agua en el Interior	6
Crédito	Consumo de Agua de la Torre de Enfriamiento	2
Crédito	Medición del Consumo de Agua	1
Energía y Atmósfera		33
Prerrequisito	Comisionamiento y Verificación Básicos	Obligatorio

Prerrequisito	Desempeño Energético Mínimo	Obligatorio
Prerrequisito	Medición del Consumo de Energía por Edificio	Obligatorio
Prerrequisito	Gestión Básica de Refrigerantes	Obligatorio
INDICADOR		VALOR
Crédito	Comisionamiento Avanzado	6
Crédito	Optimización del Desempeño Energético	18
Crédito	Medición de Energía Avanzada	1
Crédito	Respuesta a la Demanda	2
Crédito	Producción de la Energía Renovable	3
Crédito	Gestión Avanzada de Refrigerantes	1
Crédito	Energía Verde y Compensaciones de Carbono	2
Materiales y Recursos		13
Prerrequisito	Almacenamiento y Recolección de Productos Reciclables	Obligatorio
Prerrequisito	Planificación de la Gestión de los Desechos de Construcción y Demolición	Obligatorio
Crédito	Reducción del Impacto del Ciclo de Vida del Edificio	5
Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Declaración Ambiental de Productos	2
Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Fuentes de Materias Primas	2
Crédito	Transparencia y Optimización de los Productos de Construcción - Ingredientes de los Materiales	2
Crédito	Gestión de los Desechos de Construcción y Demolición	2
Calidad Ambiental Interior		16
Prerrequisito	Desempeño Mínimo de la Calidad del Aire Interior	Obligatorio
Prerrequisito	Control del Humo Ambiental del Tabaco	Obligatorio
Crédito	Estrategias Avanzadas de Calidad del Aire Interior	2
Crédito	Materiales de Baja Emisión	3
Crédito	Plan de Gestión de la Calidad del Aire Interior en la Construcción	1
Crédito	Evaluación de la Calidad del Aire Interior	2
Crédito	Confort Térmico	1
Crédito	Iluminación Interior	2
Crédito	Iluminación Natural	3
Crédito	Vistas de Calidad	1
Crédito	Desempeño Acústico	1
Innovación		6
Crédito	Innovación	5
Crédito	LEED Accredited Professional	1

Prioridad Regional		4
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
Crédito	Prioridad Regional: Crédito Específico	1
TOTALES		Puntos 110 posibles:
<p>Certificado: de 40 a 49 puntos, Plata: de 50 a 59 puntos, Oro: de 60 a 79 puntos Platino: de 80 a 110</p>		

Anexo IV

PARÁMETROS Y ALGORITMOS DE SIMULACIÓN DE ENERGYPLUS

CLASE	CAMPO	VALOR
Building	Terrain	City
	Temperature convergence tolerance value [H°C]	0,4
	Solar distribution	Full exterior with reflections
	Maximum number of warm days	25
Shadow Calculation	Calculation method	Average over days in frequency
	Calculation frequency	20
	Maximum figures in shadow Overlap calculation	15000
Surface convection algorithm: Inside	Algorithm	TARP
Surface convection algorithm: Outside	Algorithm	DOE-2
Zone air heat Balance algorithm	Algorithm	Third order backward difference
Zona Air Mass Flow Conservation	Adjust zone mixing for zone air mass flow balance	No
	Infiltration balancing method	Adjust infiltration flow
	Infiltration balancing zones	Mixing source zones
Time step	Number of time per hour	4
Surface construction elements	Material	-
	Window material	
	Construction	
Run period	Begin month, begin day, end month and end day of month.	Define the days and months to simulation
Site	Ground temperature: building surface	
Internal gains	People	2-3 people
	Lights	On/off
	Electric equipment	Refrigerator
Zone air flow	Wind and stack open area	-
	Zone mixing	
	Zone cross mixing	
Output reporting	Variable dictionary	-

	Variable	Zone operative temperature, zone mean temperature.
--	----------	--

En *Energy plus* existen diferentes clasificaciones de parámetros a ingresar de acuerdo a lo que se vaya a simular. En este caso de estudio se simuló una vivienda localizada en la ciudad de Quito, por el sector de la Vicentina, la vivienda se encuentra dentro un condominio y está construida en la planta baja de una edificación de 6 pisos de departamentos. Por ellos se definieron los parámetros mostrados en este anexo.

Simulation Parameters

Building

Se describe parámetros de orientación de la edificación respecto al norte, en

- **Terrain:** se especifica en qué tipo de terreno se encuentra localizada la edificación, si esta está en un ambiente urbano, en la ciudad, en el campo, etc. Las simulaciones presentadas utilizan City.
- **Solar distribution:** Especifica cómo EnergyPlus trata al haz de radiación solar y las reflectancias de las superficies exteriores que ingresan al edificio. Existen varias opciones entre las cuales *full exterior with reflections* es la utilizada en el estudio, pues esta permite que todas las paredes exteriores sean reflectantes, lo cual es cierto para el caso de estudio en que se asumió sombras
- **Temperature convergence tolerance value:** Indica la tolerancia para la convergencia en los cálculos que realiza el programa para las temperaturas. Para este estudio se optó por escoger el valor por default ya que variarlo no afectaba los resultados.
- **Maximum number of warm days:** Este parámetro indica el máximo de días de pre calentamiento para la simulación, esta variable afecta en simulaciones complejas donde se requiere un valor mayor de esta para que exista convergencia en los cálculos. Es por ello que se escogió el valor de 25 días, valor predeterminado por EnergyPlus.

Surface convection algorithm- Inside: Especifica el algoritmo usado para los cálculos de coeficiente de convección en las superficies internas de la vivienda. Se eligió el algoritmo TARP, pues este calcula los coeficientes de convección en función de la orientación de las superficies y el diferencial de

temperatura entre la superficie y el aire (GARD Analytics, 2003).

Surface convection algorithm- Outside: Este parámetro especifica al igual que el anterior el algoritmo que el programa usa para los cálculos del coeficiente de convección en las superficies exteriores. En este caso se seleccionó el DOE-2 algoritmo por defecto; este algoritmo usa diferentes formulaciones para calcular el coeficiente de convección dependiendo del tipo de superficie.

Zone air heat Balance algorithm: Parámetro que determina el algoritmo utilizado en el programa Third order back Ward difference, el cual utiliza una aproximación de tercer orden de las diferencias finitas para resolver los cálculos del balance energético. (Energyplus, 2017.)

Zona air mass flow conservation: Este apartado activa los cálculos del balance de flujo de masa de aire de la zona. Esta característica está disponible solo para zonas que también tienen un tipo de mezcla de aire con otra zona o con infiltraciones. El usuario puede especificar que la mezcla de zonas, la infiltración o ambas se pueden anular para equilibrar los flujos de masa de aire de la zona, para destacar de que existen reglas que debe cumplir cada zona para usar este campo. Y se especifican en los documentos de Energy Plus

Time step: Se especificará el número de mediciones por hora que se simulará, se puede realizar de 1 a 60 mediciones en cada hora. En el estudio se utilizó un timestep de 4 ya que se requerían datos cada 15 minutos.

Run Period: Se determina el tiempo o periodo de estudio, EnergyPlus permite realizar simulación de periodos cortos como días o largos como una simulación anual.

Site

- **Ground temperture- Building Surface:** Se especifica la temperatura que el piso de la zona o zonas analizadas, tendrá en el año o en el intervalo de tiempo que haya especificado en *Run Period*. Este valor se lo seleccionó de 18 °C para las zonas que tienen esta condición de borde (pág. 28).

Surface construction elements: se especifican todos los materiales y características constructivas de las viviendas.

- **Material:** en este punto se debe introducir todos los materiales del cual están comprendidas las paredes, pisos, techos, y puertas. Mientras que para definir

materiales para las ventanas se debe agregar

- **Window Material:** Glazing: se determina las propiedades del vidrio que se usó para las ventanas. Dado que la vivienda posee ventanas dobles, se especificó las propiedades de estas, así como el gas que usa como aislante en *Window Material: Gas*, el cual en este caso es aire
- **Construction:** este ítem define las propiedades constructivas de las paredes, techos, pisos, puertas y ventanas con los materiales anteriormente introducidos cabe mencionar que los materiales constructivos deben ser definidos por capas, de fuera hacia dentro.

Internal Gains: En este apartado de la simulación se deben agregar elementos que provoquen ganancias internas a la edificación simulada, también la zona a la cual las ganancias afectan. Entre las ganancias internas usadas en esta simulación están: *People, lights y electric equipment*.

Zone Airflow: Es una importante característica en las edificaciones, pues muestra el flujo de aire entre las zonas y el flujo de aire debido a la ventilación natural (ventanas abiertas) o ventilación inducida (ventiladores de aire). En el presente trabajo se usaron tres ítems para describir el comportamiento del aire en la vivienda: *Wind and stack open area, Zone mixing y Zone cross mixing*.

- **Wind and stack open area**, en este modelo el caudal de aire de ventilación está en función de la velocidad del viento y se lo puede usar solo o en combinación con *Zone Ventilation: DesignFlowRate*. Este modelo está destinado a cálculos simplificados de ventilación en comparación con las investigaciones de ventilación más detalladas que se pueden realizar con el modelo *AirflowNetwork*.
- **Zone mixing**, este modelo está diseñada para permitir un tratamiento simplificado del intercambio de aire entre zonas. Se debe tomar en cuenta que este modelo solo afecta el balance de energía de la zona “*receiving*” y que no producirá ningún efecto en la zona “*source*”.
- **Zone cross mixing**, este modelo es ideal para dos zonas que intercambian una cantidad igual de aire entre sí y no tienen intercambio de aire con otras zonas. Al igual que con *Zone mixing*, este modelo simplifica el flujo de aire entre zonas. La principal diferencia entre *Mixing* y *Cross Mixing* es que *Cross Mixing* tiene un efecto de energía tanto en la fuente (*source*) como en la zona de recepción (*receiving*), manteniendo así la masa de aire y los equilibrios de energía en las dos zonas

Anexo V

```
### Programa de comparación
# librerías
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

meas = pd.read_csv('measured_data_inez60_v2.csv', header=0) #datos medidos vicentina
sim = pd.read_csv('validacion_vicentina.csv', header=0) #datos simulados vicentina
clima = pd.read_csv('ClimaQuitoCST5-8.csv', header = 0) #datos climaticos vicentina

### Vicentina filter data
# funciones de fechas medidas
dates = sim.iloc[:,0]

date_i1 = dates.index[dates==' 05/11 01:00:00'].tolist()[0]
date_f1 = dates.index[dates==' 05/19 24:00:00'].tolist()[0]
+ 1date_i2 = dates.index[dates==' 05/21
01:00:00'].tolist()[0] date_f2 = dates.index[dates==' 05/21
24:00:00'].tolist()[0] + 1date_i3 = dates.index[dates=='
06/02 01:00:00'].tolist()[0] date_f3 = dates.index[dates=='
06/06 24:00:00'].tolist()[0] + 1date_i4 =
dates.index[dates==' 08/10 01:00:00'].tolist()[0] date_f4 =
dates.index[dates==' 08/11 24:00:00'].tolist()[0] + 1
date_i5 = dates.index[dates==' 08/16 01:00:00'].tolist()[0]
date_f5 = dates.index[dates==' 08/24 24:00:00'].tolist()[0]
+ 1date_i6 = dates.index[dates==' 08/26
01:00:00'].tolist()[0] date_f6 = dates.index[dates==' 08/28
24:00:00'].tolist()[0] + 1

def set1(sims):    #sims es un dataframe

simulation = sims
sim_sep1 = simulation.iloc[list(range(date_i1, date_f1,1))]
```

```
sim_sep2 = sim_sep1.reset_index(drop=True)
return sim_sep2
```

```
def set2(sims):
```

```
simulation = sims
sim_sep1 = simulation.iloc[list(range(date_i2, date_f2,1))]
sim_sep2 = sim_sep1.reset_index(drop=True)
return sim_sep2
```

```
def set3(sims):
```

```
simulation = sims
sim_sep1 = simulation.iloc[list(range(date_i3, date_f3,1))]
sim_sep2 = sim_sep1.reset_index(drop=True)
return sim_sep2
```

```
def set4(sims):
```

```
simulation = sims
sim_sep1 = simulation.iloc[list(range(date_i4, date_f4,1))]
sim_sep2 = sim_sep1.reset_index(drop=True)
return sim_sep2
```

```
def set5(sims):
```

```
simulation = sims
sim_sep1 = simulation.iloc[list(range(date_i5, date_f5,1))]
sim_sep2 = sim_sep1.reset_index(drop=True)
return sim_sep2
```

```
def set6(sims):
```

```
simulation = sims
```

```

sim_sep1 = simulation.iloc[list(range(date_i6, date_f6,1))]
sim_sep2 = sim_sep1.reset_index(drop=True)
return sim_sep2

def dateconcat(sims):

    return pd.concat([set1(sims), set2(sims), set3(sims), set4(sims), set5(sims), set6(sims)], ignore_index=True)

    sim_filtered = dateconcat(sim) #datos simulados filtrado en las fechas
medidasmeas_1 = meas.Sala #datos medidos sala (zona1)
    sim_1 = sim_filtered.loc[:, 'SALA-
COMEDOR:Zone Air Temperature [C](Hourly)'] #datos simulados de sala

meas_2 = meas.Estudio #datos medidos estudio (zona2)
sim_2 = sim_filtered.loc[:, 'ESTUDIO:Zone Air Temperature [C](Hourly)'] #datos simulados estudio
cima_filtered = dateconcat(clima)
Temp = cima_filtered.loc[:, 'Dry Bulb Temperature {C}']
nv = 696

#%%% MBE and RMSE calculation
def mbe(s,m):

    return (np.sum((m - s))/np.sum(m))*100

    def rmse(s,m,n):

        return (np.sqrt(np.sum((m-s)**2)/n)/(np.mean(m)))*100
mbe = [mbe(sim_1, meas_1), mbe(sim_2, meas_2)]
rmse = [rmse(sim_1,meas_1,nv), rmse(sim_2,meas_2,nv)]
zones = ['zone 1', 'zone 2']*2
print('MBE vicentina ', mbe)
print('RMSE vicentina', rmse)
#%%% Figures

```

```
fonts = 16
```

```
#grafica de temperaturas
```

```
fig, axes = plt.subplots(nrows=1, ncols=2, sharey=True,
    figsize=(8,5)) axes[0].plot(range(96), meas_1[48:144], label =
    'Medido', linestyle='-') axes[0].plot(range(96), sim_1[48:144],
    label='Simulado', linestyle='-') axes[0].set_ylim(14.6,19.6)
axes[0].set_ylabel(r'Temperatura del aire [ $^{\circ}$ C]', fontsize=fonts)
axes[0].set_xlabel('Tiempo [h]', fontsize=fonts)
axes[0].set_title('Zona 1', fontsize=fonts)
axes[0].tick_params(labelsize=fonts*0.9)
axes[0].minorticks_on()

axes[1].plot(range(96), meas_2[48:144], label = 'Medido', linestyle='-')

axes[1].plot(range(96), sim_2[48:144], label='Simulado', linestyle='-')
axes[1].set_xlabel('Tiempo [h]', fontsize=fonts)
axes[1].set_title('Zone 2', fontsize=fonts)
axes[1].tick_params(labelsize=fonts*0.9)
axes[1].minorticks_on()
axes[1].legend(loc = 'best', fontsize=fonts*0.9)
plt.tight_layout()
fig.savefig('validación simulación vicentina.pdf')

plt.show()
```