

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

Evaluación del alcance del Código Técnico de Construcción Sostenible. Estudio de caso de viviendas multifamiliares en el distrito de Jesús María del área metropolitana de Lima

Tesis para optar el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA:

Pamela Polo Huamán

ASESOR:

Federico Alexis Dueñas Dávila

Lima, Julio, 2021

Resumen

El Código Técnico de Construcción Sostenible (CTCS) es la primera iniciativa nacional y gubernamental que intenta mitigar la emisión de CO₂ y el consumo de agua del sector residencial en el Perú. Dada la limitada cantidad de estudios y la repercusión nacional de esta norma, es menester una evaluación de su alcance en casos concretos. En tal sentido, se propone una evaluación del alcance del CTCS para garantizar la sostenibilidad en viviendas multifamiliares proyectadas en el distrito de Jesús María del área metropolitana de Lima. Para realizar dicha tarea, se rediseñó una vivienda multifamiliar siguiendo los lineamientos del CTCS para luego ser evaluada desde tres enfoques independientes. Esta metodología buscó aplicar una evaluación integral y obtener un resultado imparcial sobre la aplicabilidad real del CTCS, con lo cual se esperó sugerir mejoras para incrementar su eficiencia en el sector residencial. Por ello, cada enfoque de evaluación empleó una herramienta independiente, ya sea el Análisis de Ciclo de Vida, el Método Delphi o el análisis comparativo con una Passive House. De esta forma, se obtuvieron los siguientes tres principales resultados. Primero, se identificó que el CTCS redujo en 17% el impacto ambiental del edificio convencional. Segundo, se determinó que una vivienda multifamiliar diseñada según el CTCS no cumple a cabalidad con las cinco características de una vivienda sostenible en Lima. Tercero, se determinó que una vivienda multifamiliar diseñada según el CTCS cumple parcialmente con las recomendaciones del modelo Passive House. Todo esto permitió concluir que el CTCS aplicado al sector residencial de alta densidad en Lima requiere la implementación de un enfoque holístico. En detalle, se identificó tres temas comunes entre los análisis de los resultados de la aplicación de las herramientas de evaluación. En primer lugar, los criterios técnicos deben profundizar en la relación de la vivienda con el exterior respecto al clima, los elementos urbanos y los usuarios. En segundo lugar, el CTCS debe plantear estrategias que aborden todo el ciclo de vida de la vivienda. En tercer lugar, se identificó la necesidad de ampliar la cantidad de estudios en el sector residencial sobre energía, indicadores de sostenibilidad e impactos ambientales enfocados a la realidad peruana.

Palabras clave: Código Técnico de Construcción Sostenible, sostenibilidad, vivienda multifamiliar, Análisis de Ciclo de Vida, Método Delphi, Vivienda Pasiva.

Abstract

The Sustainable Construction Technical Code (CTCS) is the first national and governmental initiative that attempts to mitigate the emission of CO₂ and the consumption of water in Peru's residential sector. An scope evaluation focused on specific cases is necessary due to the limited number of studies and the national impact of this standard. In this sense, it is proposed an scope evaluation of Peru's CTCS in order to guarantee sustainability in multi-family buildings projected in Jesus Maria district of Lima's metropolitan area. In order to accomplish this task, a multi-family building was redesigned following the guidelines of the CTCS and then the new dwelling was evaluated from three independent approaches. This methodology sought to apply a comprehensive evaluation and obtain an impartial result on the actual applicability of the CTCS, which aims to suggest improvements to increase its efficiency in the residential sector. For this reason, each assessment approach uses an independent tool, which may be Life Cycle Analysis, Delphi Method or a comparative analysis with a Passive House. In this way, the following three results were obtained. First, the CTCS reduces conventional building's environmental impacts by 17%. Second, a multi-family building designed according to the CTCS does not fully meet the five characteristics of a sustainable house in Lima. Third, a multi-family building designed according to the CTCS comply partially with recommendations of the Passive House model. All this allowed to conclude that the CTCS applied to the high-density residential sector in Lima requires the implementation of a holistic approach. In detail, three common themes were identified among the analysis of results of the application of evaluation tools. In the first place, technical criterias must improve the relationship between dwellings and three surrounding elements: climate, urban elements and users. Second, the CTCS must propose strategies that address the entire life cycle of buildings. Third, there was identified the need to increase studies in the residential sector about energy, sustainability indicators and environmental impacts focused on the peruvian reality.

Keywords: Sustainable Construction Technical Code, sustainability, multifamily building, Life Cycle Analysis, Delphi Method, Passive House.

Dedicatoria

A las y los jóvenes del bicentenario, que desde su realidad, apuestan y luchan por un Perú más justo y sostenible.



Agradecimientos

Al **Dr. Alexis Dueñas Dávila**, mi asesor de tesis, quien con sus conocimientos, dirección, empatía y aspiraciones me motivó en cada fase de este trabajo, cuyo papel en mi desarrollo profesional siempre será agradecido por mi persona.

A los profesionales **Arq. Teresa Montoya Robles**, el **Ing. Sergio Jordán Villena**, la **Ing. Sandra Vergara Dávila**, el **Ing. Miguel Hadzich Marin**, el **Arq. Martin Wieser Rey**, la **Arq. Milagros Defilippi Shinzato**, el **Ing. Ramzy Kahhat Abedrabbo**, el **Ing. José Vásquez Calderón**, la **Ing. Tula Tamariz Ortiz**, la **Ing. Silke Campos Conde** y el **Ing. Eduardo Parodi Gonzales Prada**; quienes amablemente formaron parte del panel de expertos del Método Delphi, cuyas respuestas y comentarios fueron clave para culminar el presente trabajo.

A mi querida hermana **Arantxa Polo Huamán**, por escuchar las dudas sobre mi trabajo de investigación y compartir conmigo su entusiasmo cuando me faltaron ánimos.

A mi amados padres **Ana Huamán Viguria** y **Omar Polo Rivas**, por ser una fuente de inspiración y apoyo incondicional, quienes crearon un ambiente lleno de cariño, ciencia y oportunidades para que pueda culminar mis estudios universitarios.

Tabla de contenidos

Introducción	1
I. Alcances generales	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Justificación	4
II. Marco Teórico	5
2.1. Sustentabilidad y edificios	5
2.2. Edificio sostenible peruano	7
2.3. Criterios de evaluación de desempeño	9
2.3.1. Eficiencia energética	9
2.3.2. Eficiencia hídrica	12
2.4. Código Técnico de Construcción Sostenible (CTCS)	12
2.4.1. Eficiencia energética en el CTCS	13
2.4.2. Eficiencia hídrica en el CTCS	14
2.5. Análisis de Ciclo de Vida	15
2.6. Método Delphi	17
2.7. Passive House	18
2.8. Enfoques alternativos de evaluación del desempeño de las viviendas	20
2.8.1. La variable social y conductual	20
2.8.2. Diseño bioclimático	21
2.8.3. Discrepancias entre el modelo y el comportamiento real del edificio	21
III. Metodología	23
3.1. Descripción general de la metodología	23
3.2. Caso de estudio	24
IV. Rediseño del proyecto	26
4.1. Optimización del desempeño energético del edificio	26
4.1.1. Estrategia 1: Envoltente	26
4.1.2. Estrategia 2: Iluminación y refrigeración	28
4.2. Optimización del desempeño hídrico del edificio	29
4.2.1. Estrategia 1: Tratamiento de aguas grises domésticas	29
4.2.2. Estrategia 2: Aparatos sanitarios ahorradores de agua	31
4.3. Caso de estudio rediseñado	32

V. Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida	33
5.1. Descripción general	33
5.2. Definición de objetivos y alcance	34
5.3. Análisis de inventario	35
5.3.1. Edificio Convencional	36
5.3.2. Edificio Rediseñado	40
5.3.3. Fuentes de información	44
5.4. Evaluación de impactos	47
VI. Aplicación del Método Delphi	50
6.1. Descripción general	50
6.2. Conformación del panel	51
6.3. Preparación del cuestionario	52
6.4. Análisis de respuestas	53
6.5. Análisis de Monte Carlo	54
VII Comparación con una Passive House	55
7.1. Descripción general	55
7.2. Cálculo energético	56
7.2.1. Transmitancia térmica	56
7.2.2. Consumo de energía primaria	60
7.3. Recopilación de la muestra	61
7.4. Evaluación estadística	64
VIII Resultados	65
8.1. Impactos ambientales de la vivienda en estudio	65
8.1.1. Caracterización de impactos	65
8.1.2. Normalización de impactos	70
8.1.3. Ponderación de impactos	71
8.1.4. Evaluación del material aislante	74
8.2. Caracterización de una vivienda sostenible en Lima	75
8.2.1. Proceso de consenso	75
8.2.2. Análisis de Monte Carlo	78
8.2.3. Características de una vivienda sostenible en Lima	81
8.3. Consumo de energía primaria y transmitancia térmica de la vivienda	83
8.3.1. Comparación con el caso teórico	83
8.3.2. Comparación con estudios prácticos	84
IX. Discusión de Resultados	87
9.1. Capacidad del CTCS de reducir impactos ambientales	87
9.2. Afinidad de los objetivos del CTCS con la opinión de los expertos	90
9.3. Nivel de eficiencia energética que promueve el CTCS	93
Conclusiones y recomendaciones	94
Bibliografía	99

Anexo A. Producción de aguas grises	106
Anexo B. Caracterización química y selección del tratamiento del efluente	108
Anexo C. Dimensionamiento de la planta de tratamiento de aguas grises	110



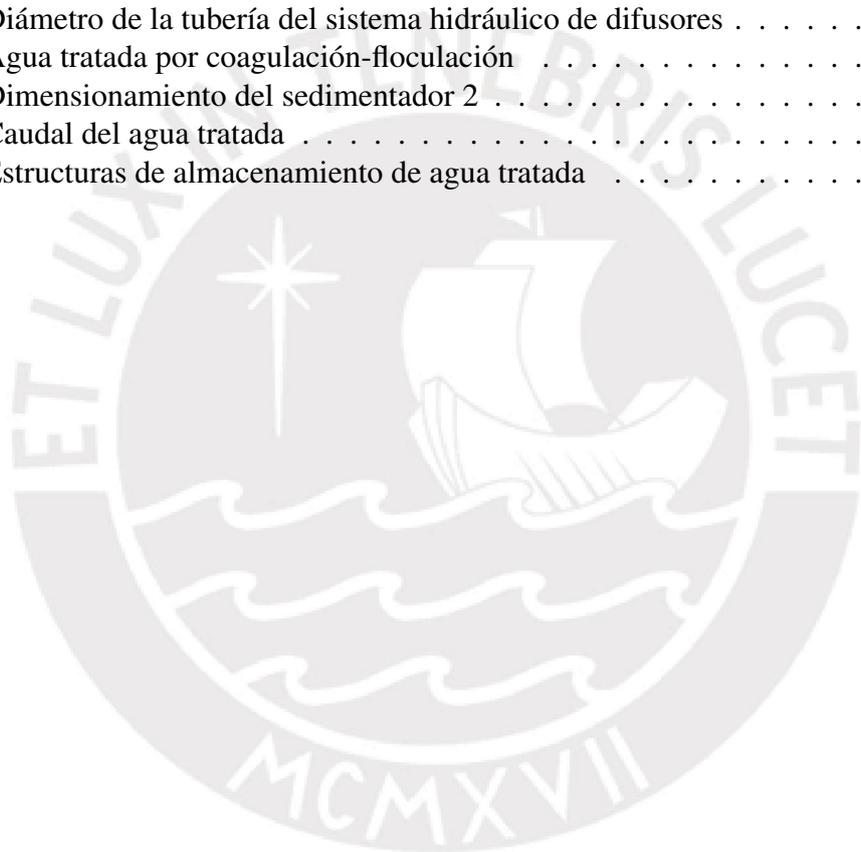
Índice de figuras

2.1. Esquema de una Passive house	20
3.1. Esquema de la metodología	24
5.1. Metodología del ACV	34
5.2. Límites del sistema del estudio para el ACV	35
6.1. Metodología del Método Delphi	51
6.2. Preguntas del cuestionario	53
7.1. Metodología del análisis comparativo con una Passive House	56
7.2. Corte transversal de los muros	57
7.3. Corte transversal de los vanos	58
7.4. Corte transversal de las losas del techo	59
7.5. Corte transversal del piso	60
7.6. Nivel de aislamiento alrededor del mundo	63
7.7. Consumo de energía primaria anual	63
8.1. Caracterización de impactos	66
8.2. Impacto ambiental de los edificios por categoría	67
8.3. Nivel de impacto de los procesos que consumen agua	68
8.4. Nivel de impacto de los procesos que contribuyen al calentamiento global	69
8.5. Nivel de incidencia cada etapa en las categorías de impacto de ambos edificios	70
8.6. Comparación de los resultados de normalización del Edificio Convencional y Rediseñado	71
8.7. Ponderación de impactos según las etapas del ciclo de vida del edificio	72
8.8. Mapa de calor de la proporción de los resultados del Edificio Rediseñado respecto al Edificio Convencional	73
8.9. Diagrama de Pareto de las categorías de impacto	74
8.10. Comparación de impactos de la producción y uso de aislante	75
8.11. Coeficientes de variación de los primeros cinco atributos	77
8.12. Coeficientes de variación de los tres atributos sugeridos	78
8.13. Probabilidad de disminución del coeficiente de variación	79
8.14. Características de la vivienda sostenible de acuerdo al nivel de consenso	81
8.15. Diagramas de caja de las transmitancias térmicas de la envolvente	85
8.16. Diagramas de caja de la energía primaria consumida	86
B.1. Esquema de agua gris reciclada para usos urbanos no potables	109

Índice de tablas

2.1. Recopilación de diferentes definiciones de vivienda sostenible	6
2.2. Comparación de los objetivos buscados por las certificaciones sostenibles usadas en Perú	8
2.2. Comparación de los objetivos buscados por las certificaciones sostenibles usadas en Perú	9
2.3. Valores máximos de transmitancia térmica en W/m^2K	13
2.4. Características de la vivienda para la instalación del calentador solar según zona bioclimática	14
3.1. Características del Edificio Convencional	25
4.1. Transmitancia térmica para zona Desértico Costero	27
4.2. Transmitancia térmica (W/m^2K) por cada componente de la envolvente	28
4.3. Consumo energético anual del Edificio Rediseñado	29
4.4. Estructuras del sistema de tratamiento de aguas grises	31
4.5. Dispositivos ahorradores de agua y volumen reducido de consumo hídrico	32
4.6. Comparación de las características de los edificios	32
5.1. Edificio Convencional: Producción	37
5.2. Edificio Convencional: Construcción - Transporte de materiales	37
5.3. Edificio Convencional: Construcción - Instalación	38
5.4. Edificio Convencional: Uso	39
5.5. Edificio Convencional: Fin de vida - Demolición	39
5.6. Edificio Rediseñado: Producción	41
5.7. Edificio Rediseñado: Construcción - Transporte de materiales	42
5.8. Edificio Rediseñado: Construcción - Instalación	43
5.9. Edificio Rediseñado: Uso	43
5.10. Edificio Rediseñado: Fin de vida - Demolición	44
5.11. Edificio Rediseñado: Fin de vida - Transporte de escombros	44
5.12. Lista de procesos	45
5.13. Características de los pasos de la metodología BEES v4.08	49
7.1. Transmitancia térmica de los muros	58
7.2. Transmitancia térmica de los vanos	59
7.3. Transmitancia térmica del techo	60
7.4. Transmitancia térmica del piso	60
7.5. Consumo de energía primaria anual de un departamento del edificio	61

8.1. Promedio y desviación estándar muestral de las valoraciones de la Ronda 3 . . .	82
8.2. Comparación entre el Edificio Rediseñado y el modelo Passive House	83
A.1. Unidades de descarga y gasto probable de los aparatos de producción de aguas grises	107
A.2. Unidades de descarga y gasto probable de los aparatos demandantes de aguas grises	107
B.1. Caracterización de las aguas grises y residuales según fuente de consulta	108
B.2. Resistencias del agua gris	109
C.1. Características de las aguas grises	110
C.2. Dimensionamiento sedimentador 1	111
C.3. Diámetro de la tubería del sistema hidráulico de difusores	112
C.4. Agua tratada por coagulación-floculación	113
C.5. Dimensionamiento del sedimentador 2	113
C.6. Caudal del agua tratada	114
C.7. Estructuras de almacenamiento de agua tratada	114



Introducción

En el 2015, la encuestadora KPMG y la revista *G de Gestión* constató que el 48% de las empresas más importantes del país miden sus emisiones de gases de efecto invernadero y que el 38%, no identifica alguna barrera para integrar la sostenibilidad a sus organizaciones (Gestión, 2015). Lamentablemente, según las proyecciones del Ministerio del Ambiente (s.f.), desde el 2015 hasta el 2018 la emisión nacional de estos gases se ha incrementado en 9%. Desde hace algunos años se está cimentando una filosofía sostenible en el Perú; ejemplo de ello son algunas buenas iniciativas públicas y privadas que intentan combatir el cambio climático y otras afecciones ambientales, aunque no se puede aseverar que ya son eficientes.

También en el 2015, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento publicó el Código Técnico de Construcción Sostenible (CTCS) como medida para reducir la emisión de gases de efecto invernadero producida directamente por el sector residencial. La literatura mundial coincide que los sectores construcción y residencial consumen un gran porcentaje de energía; por tanto, pueden emitir un considerable número de toneladas de CO₂ eq. Por ello, es preciso plantear un análisis del alcance del CTCS, especialmente por su repercusión nacional.

Con fines de acotar la investigación, este estudio se limitó a analizar el nivel de sostenibilidad que alcanzan viviendas multifamiliares en el distrito de Jesús María de Lima Metropolitana después de aplicar el CTCS a su diseño. Para ello, este trabajo se dividió en nueve capítulos. En el primero y el segundo, se describen los alcances generales y el marco teórico respectivamente. En el tercero, se describe la metodología, la cual se basa en la aplicación de tres herramientas de evaluación. El cuarto capítulo aborda el rediseño de una vivienda multifamiliar acorde al Código. En el quinto, se realiza el Análisis de Ciclo de Vida del edificio en estudio. En el sexto capítulo, se recurre al Método Delphi como instrumento para definir la sostenibilidad. En el séptimo, se compara el rediseño del edificio estudiado con una Passive House. En el octavo capítulo, se visualiza los resultados de la aplicación de las tres herramientas. En el noveno, se analiza el alcance del Código por medio de los resultados arrojados. Finalmente, en una décima sección, se encuentra las conclusiones del estudio y recomendaciones para la mejora del CTCS.

Capítulo I

Alcances generales

1.1. Planteamiento del problema

La crisis ambiental demanda cambios sustanciales en cuanto al estilo de consumo y producción de los diferentes sectores económicos (Neyestani, 2017). Debido a que el consumo excesivo o uso deficiente de los recursos tiene un impacto en el ambiente y la salud y la seguridad de las personas. Por ejemplo, la emisión de gases de efecto invernadero, que resultan ser un subproducto del consumo de energía, alteran el equilibrio natural de la atmósfera. El Centro de Conservación de Energía y Medio Ambiente (2017) señala que los principales efectos negativos al Perú son el deterioro de nuestros ecosistemas naturales, la destrucción de nuestra infraestructura y la pérdida del acceso al agua potable. Asimismo, el vertido de sustancias tóxicas antropogénicas en el agua, no solo perjudica al ecosistema acuático, sino también compromete la calidad de vida del ser humano. La Organización Mundial de la Salud (2019) estima que al menos 2 000 millones de personas se abastecen de una fuente de agua potable contaminada por heces.

El sector residencial tiene un importante impacto ambiental (Alvarez-Riso, Rosen, Del Aguila Arcentales, y Marinova, 2020). Tal es el caso que en el 2016, el 10.6% de los gases de efecto invernadero emitidos a nivel mundial provinieron del consumo de energía en edificios residenciales (Ritchie y Roser, 2017). Asimismo, el sector urbano residencial consume entre el 5% y 15% del agua extraída a nivel mundial (Ritchie y Roser, 2017). En el caso de Perú, en el 2014 el sector residencial emitió el 5.8% del CO₂ eq producido por el consumo de energía en todo el país (Instituto Nacional de Estadística e Información, 2020). En el caso del agua, el Informe sobre Desarrollo Humano Perú 2009 identificó que “en la costa se arroja al mar el 53% del agua, mientras que el 47% restante se utiliza con una eficiencia de apenas entre 25% y 40%” (2009, p.59).

Una medida para reducir el consumo del sector residencial y afrontar sus impactos es la construcción de edificios sostenibles (Balaban y Puppim de Oliveira, 2017), cuya filosofía se está cimentando en el Perú. Según la evaluación de Miranda et al. (2014), para el 2014 no existía la suficiente cantidad de profesionales comprometidos y capacitados en cuanto a sostenibilidad en la construcción. Por otro lado, Rondinel-Oviedo y Schreier-Barreto (2018) indican que se han detectado buenas iniciativas en este campo; no obstante, son aisladas.

El Código Técnico de Construcción Sostenible (CTCS) es la primera iniciativa nacional del Estado en el campo de la construcción sostenible que intenta combatir los efectos ambientales del sector construcción. Siendo este el precedente para la regulación de la construcción y uso de viviendas en el Perú, resulta imprescindible la evaluación de esta norma debido a las siguientes razones. En primer lugar, el potencial impacto de esta norma en el ambiente a nivel nacional. En segundo lugar, la limitada cantidad de estudios sobre viviendas residenciales sostenibles que permitan evaluar las medidas planteadas en el CTCS. En tercer lugar, la variabilidad del comportamiento de una edificación debido a factores físicos, climáticos o culturales, característica que compete a nuestro país debido a la diversidad de nuestro territorio.

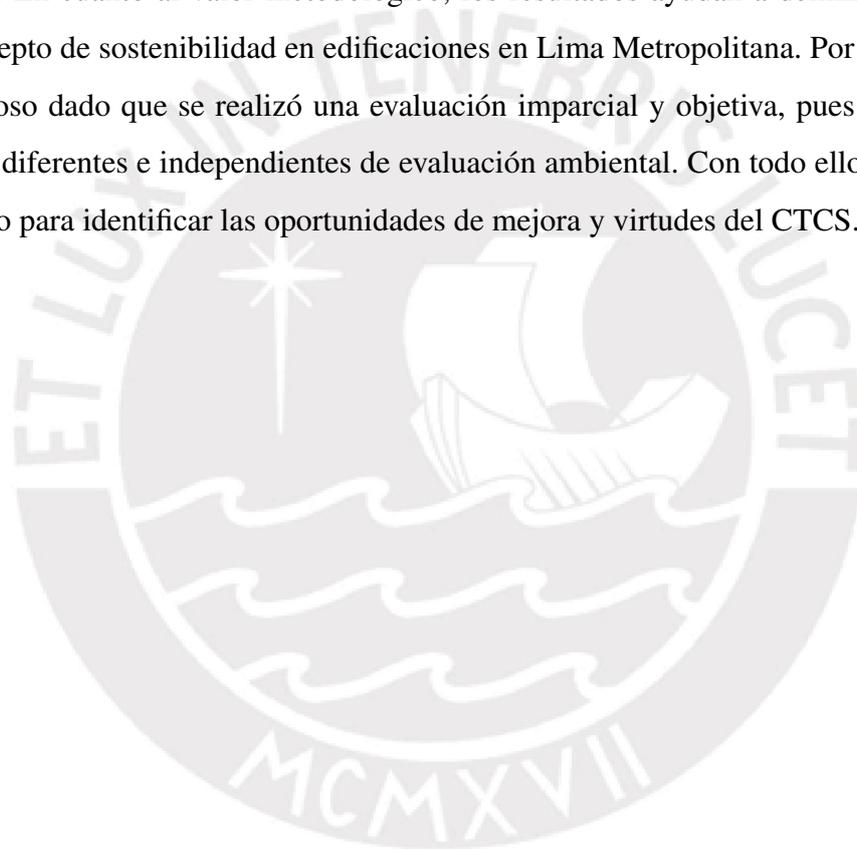
1.2. Objetivos

De acuerdo a lo presentado en la sección anterior, el objetivo general de esta investigación es evaluar el alcance del CTCS para garantizar la sostenibilidad de viviendas multifamiliares proyectadas en el distrito de Jesús María del área metropolitana de Lima. Así, los fines específicos son los siguientes:

- Determinar la capacidad del CTCS de reducir los impactos ambientales de la construcción convencional
- Comparar los objetivos del CTCS con las características de una vivienda sostenible en Lima Metropolitana
- Evaluar la capacidad del CTCS de asegurar la eficiencia energética según el modelo Passive House

1.3. Justificación

Por medio de la investigación realizada, se brinda una fuente de información sobre la eficiencia del CTCS aplicado a un caso concreto del sector residencial de Lima Metropolitana. Como tal, la investigación posee tres características: valor teórico, valor metodológico y rigurosidad. En cuanto al valor teórico, los resultados ayudan a llenar un vacío de conocimiento, pues es el primer estudio práctico sobre la aplicabilidad del CTCS; asimismo, una parte de los resultados pueden ser generalizados para el sector residencial de Lima Metropolitana; además, el estudio puede sugerir ideas e hipótesis para investigaciones futuras sobre sostenibilidad en edificaciones. En cuanto al valor metodológico, los resultados ayudan a definir y reflexionar sobre el concepto de sostenibilidad en edificaciones en Lima Metropolitana. Por último, el trabajo es riguroso dado que se realizó una evaluación imparcial y objetiva, pues se aplicó tres herramientas diferentes e independientes de evaluación ambiental. Con todo ello, se buscó dar el primer paso para identificar las oportunidades de mejora y virtudes del CTCS.



Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Sustentabilidad y edificios

Establecer un estándar de vivienda sostenible a nivel global es casi imposible. Esto se debe a la variabilidad espacial, temporal, conceptual y filosófica del término sustentabilidad. Tal es el caso que Dastbaz y Strange (2015) señalan que a nivel mundial cada grupo colectivo construye su propio entendimiento de sustentabilidad, y con ello sus propios conocimientos y sistemas para enfrentar el cambio climático. Es así que en los últimos veinte años han surgido diferentes interpretaciones en la industria, el gobierno, las compañías ambientales y los grupos comunitarios. Así que no es de esperarse la diversa gama de definiciones de una vivienda sostenible, las cuales responden a los paradigmas construidos por los sujetos que las establecen. En líneas generales, cada una lidia con los impactos ambientales generados en una o más fases del ciclo de vida de una vivienda: diseño, construcción, uso, mantenimiento y demolición. El éxito de una propuesta dependerá del entorno de la vivienda: desde el usuario hasta el tipo de economía nacional.

La Tabla 2.1 compara cinco paradigmas de edificio sostenible. El propósito es que el lector identifique el aspecto de la vivienda que el autor modifica para arribar a su objetivo, lo cual incide en mayor medida en determinadas fases del ciclo de vida del edificio.

Tabla 2.1

Recopilación de diferentes definiciones de vivienda sostenible

	Definición	Aspecto	Objetivo	Fase de ciclo de vida	Autor
1	Edificio con varias capas independientes (Casco estructural, piel, escenario, servicio, acceso y mobiliario).	Capas de un edificio	Potenciar la capacidad de adaptación de la vivienda dados los cambios imprevistos que pueden ocurrir a lo largo de su vida útil	Uso y Mantenimiento	Leupen (2006)
2	Edificio con buen desempeño energético.	Desempeño energético	Reducir el consumo energético de las viviendas por medio de la tecnología de materiales y mobiliario	Uso y Mantenimiento	Gorse et al. (2016)
3	Edificio IFD (Industrial, Flexible and Demountable)	Constructabilidad	Generar un edificio totalmente adaptable al uso de los usuarios y cuyas partes puedan ser fácilmente recicladas después de su tiempo de vida	Construcción, uso y demolición.	Haim et al. (2016)
4	Edificio confortable para sus usuarios	Consumo energético diario	Diseñar arquitectura que reduzca el consumo de energía de las actividades diarias como iluminación y control de temperatura interior según la zona climática	Uso	Farhan et al. (2019)
5	Edificio con nulas o pocas emisiones de CO ₂ .	Ciclo de vida de un edificio	Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero expulsados a la atmósfera durante todo el ciclo de vida de la vivienda	Todas	Frischknecht et al. (2019)

2.2. Edificio sostenible peruano

Lo planteado en la sección anterior, abre la interrogante sobre el modelo de edificio sostenible que se está construyendo en nuestro país. La respuesta se acopla a un edificio con buen desempeño energético e hídrico. Esto se evidencia en la normativa nacional de edificios, los proyectos de investigación y en la creciente tendencia de aplicar las certificaciones sostenibles.

Normativa nacional de edificios

La inmersión del Estado en la construcción sostenible es relativamente reciente. En el 2014, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento encarga la elaboración de un estudio para la formulación de la construcción sostenible en el Perú (Miranda, Neira, Torres, y Valdivia, 2018). En este mismo año, se publica en el diario El Peruano la Norma EM.110 “Confort Térmico y lumínico con eficiencia energética”. Documento que visibiliza, en el marco legal y constructivo, los siguientes conceptos manejados en el ámbito de la sostenibilidad de edificios: Zonificación bioclimática, transmitancia térmica, permeabilidad, condensaciones, confort lumínico y productos de construcción. Y al año siguiente, en el 2015, es aprobado el CTCS con carácter opcional.

Proyectos de investigación

Las iniciativas de investigación sobre construcción sostenible en el Perú están orientadas, en su mayoría, a mejorar el desempeño de viviendas vulnerables. Dos ejemplos icónicos de ello son el diseño de viviendas bioclimáticas contra heladas en Puno y el proyecto CASA dirigido a la región amazónica. El primero, emplea materiales locales para atemperar el interior de las viviendas y crear una estructura sismoresistente, con ello se busca el nivel necesario de confort térmico para la vida cotidiana de las poblaciones andinas (Cisneros, 2016). El segundo proyecto, Ciudades Auto-Sostenibles Amazónicas CASA genera investigaciones académicas para construir viviendas sostenibles, para lo cual se basa en el uso de materiales ecoamigables y energía renovables.

Certificaciones sostenibles

Los certificados sostenibles que se manejan a nivel nacional se limitan casi en su totalidad a la construcción privada de los sectores socioeconómicos altos. Además, se basan en estándares

res internacionales de sostenibilidad, que, según algunos trabajos de investigación, limitan su aplicabilidad a contextos distintos en los cuales se basaron originalmente. Las empleadas en nuestro país son las certificaciones *Leadership in Energy Enviromental Design* (LEED), *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodoly* (BREEAM) y *Excellence in Design For Greater Efficiencies* (EDGE). A continuación, en la tabla 2.2 se muestra una comparación de los objetivos que buscan estas certificaciones. Dicho contraste se realizó en base a las categorías que cada una de estas certificaciones toma en cuenta para su evaluación.

Tabla 2.2
Comparación de los objetivos buscados por las certificaciones sostenibles usadas en Perú

Objetivo	LEED	BREEAM	EDGE
Reducir el consumo de agua durante el uso de la edificación	Water Efficiency	Agua	Agua
Reducir las emisiones de CO ₂ debido al consumo de energía	Energy and Atmosphere	Energía	Energía
Promover la movilidad alrededor del solar	Location and Transportation	-	-
Reducir las emisiones de CO ₂ del transporte de los usuarios	-	Transporte	-
Reducir el impacto en el solar	Sustainable Sites	-	-
Reducir la emisión de CO ₂ por el uso de energía en la producción de materiales	Material and Resources	Materiales	Energía en materiales
Asegurar el confort de los usuarios	Indoor Enviromental Quality	Salud y bienestar	-
Reducir la contaminación del aire durante el uso de la edificación	Indoor Enviromental Quality	Contaminación	-
Promover la gestión de los residuos de construcción	Materials and Resources	Residuos	-

Sigue en la página siguiente

Tabla 2.2

Comparación de los objetivos buscados por las certificaciones sostenibles usadas en Perú

Objetivo	LEED	BREEAM	EDGE
Incentivar la investigación e implementación de nuevas estrategias que aseguren la sostenibilidad	Innovation	Innovación	-
Fomentar la equidad social	Regional Priority	-	
Promover sistemas eficaces de construcción	-	Gestión	-

Fuente: LEED v4 for homes design and construction (2013), BREEAM (s.f.), EDGE (2013)

Algunas de las categorías de una certificación buscan más de un objetivo, por lo cual se encuentran duplicadas. Cabe resaltar que la certificación LEED evalúa las edificaciones residenciales en base a ocho categorías (Location and transportation, Sustainable sites, Water Efficiency, Energy and Atmosphere, Material and Resources, Indoor Environmental Quality, Innovation y Regional Priority). Por otro lado, la certificación BREEAM cuenta con diez categorías (Gestión, Transporte, Energía, Materiales, Agua, Residuos, Salud y bienestar, Contaminación, Uso de suelos y Ecología e Innovación). Por último, la certificación EDGE trabaja acorde a tres categorías (Agua, Energía y Energía en materiales).

2.3. Criterios de evaluación de desempeño

2.3.1. Eficiencia energética

Desde el año 1700, el régimen de consumo energético es el industrial. Este nuevo contexto se caracteriza por el incremento exponencial del consumo energético, la elevada dependencia de nuestro estilo de vida a la energía y la implementación de fuentes de producción de energía con huellas de carbono considerables. En los procesos de producción energética, la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles y el consumo final emiten a la atmósfera diversos compuestos contaminantes (Rey y Velasco, 2006). Por ello, la eficiencia energética resulta atractiva, pues contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂. La clave de ello “reside en el hecho de que no consumimos energía, sino servicios energéticos” (Linares, 2009, p.75). Por tanto, la eficiencia energética, entendida como la utilización de tecnologías, equipamiento

y maquinaria que requieren una menor cantidad de energía para conseguir el mismo rendimiento o realizar la misma función (STEEEP, 2014), es la mejor opción para lidiar con el Cambio Climático desde el ámbito energético.

La implementación de la eficiencia energética en una vivienda está ligada a su ciclo de vida. Durante la etapa de uso, el enfoque debe centrarse en las mejoras del equipamiento electrodoméstico y de los materiales usados en la construcción y habilitación de la edificación. Respecto a esto, “las mejoras en la edificación residencial pueden clasificarse en tres grandes grupos: mejoras en la envolvente del edificio, del rendimiento de las instalaciones de calefacción y aire acondicionado, y del rendimiento de los equipos de iluminación” (Linares, 2009, p.78).

Envolvente térmica del edificio

La envolvente térmica de un edificio es definida como el área de la edificación que se encuentra en contacto con el aire exterior. Una característica fundamental de esta capa del edificio es su coeficiente de transmitancia térmica (Valor U). Definido como el flujo de calor que atraviesa una superficie unitaria de 1 m^2 de pared para una diferencia de temperatura de un grado Kelvin entre ambientes (Rey y Velasco, 2006). Como es de esperarse, la transmitancia de la envolvente depende de las propiedades térmicas de las capas de material que se utilice en el edificio. Otra característica de la envolvente es el puente térmico. Este comprende todas las zonas de la piel externa del edificio por las cuales se transmite más fácilmente el calor. Este fenómeno se produce por la diferencia de conductividad de los materiales empleados, discontinuidades y diferencia de espesor (EcoHouses, s.f.). Es así que se puede regular la temperatura interior respecto a la externa según las necesidades, usando materiales con determinadas propiedades térmicas y controlando los puentes térmicos. Tal es el caso que para climas fríos se deben desarrollar envolventes que acentúan “la aislación, la hermeticidad y la captación directa de radiación solar” (Baixas, 2012, p.3). Por otro lado, se recomienda que “en climas templados y con altos niveles de radiación solar el acento debería (...) estar puesto en la generación de sombra y ventilación” (2012, p.3).

Rendimientos de las instalaciones de calefacción y aire acondicionado

La calefacción y el aire acondicionado son usados para asegurar el confort térmico y la calidad del aire dentro de los ambientes. Estos sistemas deben efectuar los siguientes procesos: control de temperatura y humedad, ventilación y calidad del aire interior, filtrado y circulación

(Quadri, 2011). Asimismo, se debe eliminar el polvo y partículas de suspensión del aire por medio del proceso de filtración.

La reducción del consumo energético de estos sistemas puede controlarse con las siguientes premisas aplicadas en la etapa de diseño, las cuales están desarrolladas en el texto *Sistemas de aire acondicionado* de Nestor Quadri. En primer lugar, se debe adaptar la producción de aire acondicionado a la demanda de calor en la magnitud y momento que se produce, para lo cual se debe considerar la zonificación y el fraccionamiento de los equipamientos. Por otro lado, se debe contar con un aislamiento térmico adecuado para requerir maquinas más pequeñas. Asimismo, la arquitectura debe procurar reducir infiltraciones de aire y un aumento en la eficiencia en el consumo de la iluminación. Por otro parte, en los periodos del año con clima exterior favorable se debe aplicar el *free-cooling* el cual permite el ingreso de aire externo.

Si bien es cierto que estos sistemas permiten que el confort térmico sea independiente del clima local, se debe tomar en cuenta los posibles problemas de usarlos. Estos son el síndrome del edificio externo y el consumo energético innecesario o excesivo.

Por ello, es necesario tomar en cuenta otras medidas pasivas, tales como la ventilación natural. Esta puede ser aplicada en un rango amplio de zonas climáticas siempre y cuando el aire exterior tenga niveles bajos de contaminación y el ruido externo no perjudique las actividades en el interior del edificio. Esto se debe a que los sistemas de ventilación natural requieren de alta permeabilidad (Yarke, 2005).

Rendimiento de equipos de iluminación

Las principales fuentes de consumo energético en un hogar son la iluminación y los aparatos electrodomésticos. En cuanto a la iluminación, podemos optar por la iluminación natural o artificial. Como se mostró en el punto anterior, el empleo de un método sostenible pasivo o activo dependerá del criterio de los diseñadores y el equilibrio de los factores que se consideren más importantes. Tal es el caso que Rey y Velasco (2006) argumentan que un sistema de bajo consumo energético debe basarse en un diseño espacial que favorezca la iluminación natural y en la implementación de bombillas de bajo consumo y de alto rendimiento. Por otro lado, en el caso de los electrodomésticos es esencial identificar su patrón de uso en el hogar para así determinar su impacto en el consumo energético global. Para ello, se debe recolectar la siguiente información: la potencia promedio, el tiempo de uso al día y el consumo mensual. El Ministerio de Energía y Minas elaboró la *Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía* y

Diagnósticos Energéticos, cuyo principal producto es una guía de diagnóstico energético. Esta permite analizar el uso de la energía utilizada en una vivienda; es decir, permite identificar los principales equipos consumidores de energía y la cantidad de energía desperdiciada (Ministerio de Energía y Minas, s.f.).

2.3.2. Eficiencia hídrica

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992 estableció que el agua es un recurso finito y vulnerable. Características que son preocupantes ahora más que nunca, ya que hay un incremento constante de la demanda de este recurso, cuyo origen, según Bazant, sería el crecimiento demográfico y la modernización (Como se cita en Cayeros, 2016). Nos encontramos ante un escenario de escasez del agua en términos generales y globales.

Por ello, la regulación del uso y consumo de este recurso es una de las más importantes alternativas para enfrentar este problema. Es aquí donde la eficiencia hídrica cobra protagonismo, la cual ha de ser entendida como la implementación de mecanismos cuyo fin es el ahorro del agua. Acorde a Cayeros (2016) reparar, readaptar y reducir “son la principales actividades para ahorrar agua” (p.19). En otras palabras, la eliminación de problemas de fuga, las modificaciones para mejorar el funcionamiento de problemas de agua y el cambio de dispositivos de ahorro son las medidas que incrementan la eficiencia hídrica. Para ello, se deben implementar medidas y sistemas que optimicen, recirculen y reduzcan el consumo de agua en la vivienda. Una de ellas es la instalación de ahorradores de agua. En el caso del sector residencial, las medidas a aplicar se relacionan con el empleo de este recurso en la hidratación, preparación de alimentos, higiene personal, lavado de utensilios de cocina, lavado de ropa, transporte de desechos, riego, recreación, etc. de un hogar.

2.4. Código Técnico de Construcción Sostenible (CTCS)

Por medio del Decreto Supremo N°015-2015-VIVIENDA se aprueba el CTCS (Ministerio de Vivienda, 2015), cuyo objetivo es normar los criterios técnicos para el diseño y construcción de edificaciones y ciudades. El campo de aplicación de esta norma es opcional para edificaciones nuevas en el sector público y privado. Un punto resaltante es que el CTCS se desenvuelve solo en el campo de la eficiencia energética e hídrica. En los siguientes puntos se recopila la

información más relevante del CTCS referente a edificios residenciales.

2.4.1. Eficiencia energética en el CTCS

Transmitancia térmica de cerramientos según zona bioclimática

En este apartado se determina los requisitos técnicos de la envolvente referente a la transmitancia térmica del edificio según la zona bioclimática. Siendo este último término definido en la Norma Técnica EM.110 “Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética” como la clasificación climática que define los parámetros ambientales de grandes áreas geográficas. La norma plantea nueve zonas bioclimáticas y los valores límites máximos de transmitancia térmica de los materiales de los edificios. Esto se visualiza en la tabla 2.3.

Tabla 2.3
Valores máximos de transmitancia térmica en
 W/m^2K

Zona Bioclimática	Umuro	Utecho	Upiso
Desértico costero	2.36	2.21	2.63
Desértico	3.20	2.2	2.63
Interandino bajo	2.36	2.21	2.63
Mesoandino	2.36	2.21	2.63
Altoandino	1.00	0.83	3.26
Nevado	0.99	0.80	3.26
Ceja de montaña	2.36	2.20	2.63
Subtropical húmedo	3.60	2.20	2.63
Tropical húmedo	3.60	2.20	2.63

Fuente: EM. 110 (2014)

Iluminación y refrigeración

En este apartado la norma busca la reducción del consumo energético. Para ello, tiene como marco normativo la Norma Técnica Peruana 370.101-2:2008 “Etiquetado de eficiencia energética para lámparas fluorescentes compactas, circulares, lineales y similares de uso doméstico” para asegurar que todas las lámparas de la edificación usen tecnología eficiente; la Norma Técnica Peruana 399.483 2007 “Eficiencia energética en artefactos refrigeradores, refrigeradores-congeladores y congeladores para uso doméstico” para que todo edificio multifamiliar deba ser entregado al propietario con aparatos refrigerantes con eficiencia energética; y la Norma Técnica EM.010 “Instalaciones Eléctricas Interiores”.

Energía solar térmica

El CTCS establece el uso de calentadores solar dual; es decir, un dispositivo a base de energía solar y otras fuentes como la eléctrica, el gas, etc. Este dispositivo debe ser usado de forma obligatorio en los casos referentes al sector vivienda según la Tabla 2.4. Además deben seguir lo establecido en las Normas técnicas IS.010 “Instalaciones Sanitarias para edificaciones” y EM.080 “Instalaciones con Energía Solar”.

Tabla 2.4
Características de la vivienda para la instalación del calentador solar según zona bioclimática

Zona Bioclimática	Características de la vivienda
Desértico Costero	
Desértico	Vivienda de densidad baja
Interandino Bajo	RDB (unifamiliar) y de
Mesoandino	densidad media RDM
Altoandino	(multifamiliar/unifamiliar)
Nevado	
Ceja de montaña	Vivienda de densidad baja RDB
Subtropical húmedo	(unifamiliar) y de densidad media
Tropical húmedo	RDM (multifamiliar/unifamiliar)

Fuente: CTCS (2015)

2.4.2. Eficiencia hídrica en el CTCS

El CTCS se enfoca en el ahorro de agua y el reuso de aguas residuales domésticas tratadas. Para ello, promueve el uso de griferías, aparatos sanitarios ahorradores e instalaciones sanitarias para el aprovechamiento de aguas residuales domésticas tratadas. En primer lugar, el CTCS establece que toda la edificación debe contar con tecnología de ahorro de agua con las siguientes características: inodoros y tanques de inodoro (con o sin fluxómetro) con 4.8 litros por cada sifonaje y con válvulas de doble accionamiento (6 litros para descarga de residuos sólidos y 3 litros para descarga de residuos líquidos). Asimismo, las griferías de todos los puntos de agua deben ser ahorradores, con dispositivos que reduzcan el consumo de agua convencional en 30 % como mínimo. En segundo lugar, el CTCS establece que toda edificación nueva debe contar con instalaciones sanitarias para aguas residuales domésticas tratadas que cumplan con las siguientes condiciones: las aguas residuales tratadas para su reuso no deben generar conexiones cruzadas o interferir con los sistema de RDB y RDM, la instalación sanitaria para agua residual doméstica tratada podrá ser de uso común. Además, la instalación sanitaria para agua residual

doméstica tratada debe ser usada para el riego de jardines, llenado de los tanques de inodoro. Por último, en las zonas bioclimáticas Desértico Costero y Desértico, los jardines privados y de uso común deben contar con plantas xerófilas o nativas de la zona.

2.5. Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología analítica para evaluar el impacto ambiental de un producto o servicio (Jacquemin, Pontalier, y Sablayrolles, 2012). Esta se encuentra definida en la Norma ISO 14040 como la “recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida” (Organización Internacional de Normalización, 2006). Por otro lado, el ACV se ha convertido en una herramienta ampliamente usada para cuantificar los impactos ambientales de sistemas como los edificios (Soust-Verdaguer, Llatas, y García-Martínez, 2017). A decir verdad, la Comisión Europea lo considera como una de las mejores herramientas para identificar el impacto ambiental de un edificio (Schlanbusch et al., 2016).

Ciclo de vida de un edificio

El ciclo de vida es explicado en la ISO 14040 como “las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final”. En el caso de los edificios, estas etapas pueden variar según las características de los sistemas de estudio y el propósito del ACV, tal como Mastrucci et al. (2017) muestra en su estudio. Diversos autores y las normas EN 15804 e ISO 21930 consideran que un edificio cuenta con cuatro etapas: producción, construcción, uso y fin de vida. Los procesos que se consideran en cada una de estas fases se detalla a continuación.

- **Producción:** La primera fase implica los procesos relacionados con el suministro de materiales, el transporte y la manufactura.
- **Construcción:** Este apartado engloba los procesos de transporte y el ensamblaje o construcción *on site* del producto o servicio.
- **Uso:** Esta etapa abarca todos los procesos que se desarrollan en la vida útil del edificio; es decir, desde la finalización de la construcción hasta la demolición del mismo. Tales

como el uso, el mantenimiento, la reparación, el reemplazo, la remodelación, el consumo energético operacional y el consumo de agua operacional.

- **Fin de vida:** La última etapa del ciclo de vida de un edificio comprende la deconstrucción y demolición; el transporte de elementos resultantes de la deconstrucción; la gestión de residuos para reutilización, recuperación y reciclaje y la eliminación final.

Etapas del ACV

Las normas ISO 14040:2006 y la ISO 14044:2006 define las fases metodológicas del ACV y proporcionan requisitos y directrices para desarrollar este método, los cuales se describen a continuación.

Etapa 1: Definición de objetivos y alcance

En esta sección se debe establecer la aplicación pretendida, los objetivos del estudio y las fases del ciclo de vida que se analizarán. Es así que se debe establecer la unidad funcional, la cual es una unidad de referencia en base a la cual se determina el desempeño del objeto de estudio de forma cuantitativa (Arzoumanidis, D'Eusano, Raggi, y Petti, 2020). Por otro lado, se deberá establecer los límites del sistema; es decir, los procesos unitarios que se incluirán en el análisis, que podrán estar definidos por la aplicación del estudio, las restricciones de datos y costos (Sanjuan, 2018).

Etapa 2: Análisis general de inventario

En esta etapa se recopila identifica y cuantifica los flujos ambientales de salida y entrada de los procesos del sistema que fueron delimitados en la fase anterior. Estos representan los recursos, las emisiones y las pérdidas asociados al ciclo de vida del producto (Torabi y Ahmadi, 2020). La recolección de información debe ser compatible con los objetivos y el alcance del ACV y se deben priorizar los procesos con mayor relevancia para los impactos ambientales (Hauschild, Rosenbaum, y Olsen, 2017). De esta forma, se busca redactar un inventario de todos los intercambios entre el sistema y el medio ambiente.

Etapas 3: Evaluación de impacto

En este apartado se elabora el perfil de impacto del producto o servicio. Por medio de tres procesos: selección de categorías, clasificación y caracterización. En la primera, se selecciona las categorías de impacto que se consideraran con sus respectivos modelos de evaluación. En el proceso de clasificación se relaciona los datos del inventario con las categorías de impacto. Por último, la caracterización consiste en transformar todos los impactos asociados a una categoría a una solo unidad de medida para obtener un índice por cada una (Ihobe, 2009).

De forma adicional se pueden realizar el proceso de normalización y ponderación de impactos como una forma alternativa de contextualizar los resultados para la toma de decisiones. La normalización consiste en colocar los resultados de cada categoría de impactos a una misma escala, de tal forma que puedan ser conmensurables, y en algunos casos medir el desempeño de acuerdo a escalas referenciales (Huppel y Van Oers, 2011). Por otro lado, la ponderación consiste en designar importancia relativa a cada categoría de impacto, para así poder sumarlas y obtener una puntuación única y global de todo el producto (Meijer, 2014).

Etapas 4: Interpretación de resultados

Finalmente, se busca extraer las conclusiones sobre el impacto ambiental del producto estudiado e identificar los puntos críticos. Es así que se busca reconocer las etapas que producen mayor impacto y las categorías de impacto más relevantes (Sanjuan, 2018). En este apartado debe realizarse dos análisis complementarios. En primer lugar, el análisis de sensibilidad, el cual consiste en determinar la sensibilidad de los resultados del ACV variando los inputs del sistema. En segundo lugar, se podrá realizar de forma opcional el análisis de incertidumbre, el cual determina la precisión de los resultados; es así que se analizará el grado de incertidumbre de cada dato y su distribución de probabilidad por medio del análisis Monte Carlo.

2.6. Método Delphi

El método Delphi es “una técnica de obtención de información, basada en la consulta a expertos de un área, con el fin de obtener la opinión de consenso más fiable del grupo consultado” (Reguant-Álvarez y Torrado-Fonseca, 2016, p.88). La bibliografía señala que este método es sumamente versátil tal que es empleado como un método de prospectiva y de estudios de corte transversal. Es así que “Delphi contrasta y combina opiniones y argumentos individuales

emitidos por expertos y permite tomar decisiones que no es objetivo ni deseable, asumir unilateralmente por el investigador” (García y Suárez, 2013). Esto se realiza a través de rondas de preguntas a cada uno de los expertos que son intercaladas con retroalimentación. De esta forma, se logra que en las rondas siguientes cada experto conozca la opinión del grupo para que vuelva a emitir su juicio y finalmente, después de un número determinado de iteraciones, arribar a un consenso que represente al grupo. Este método puede ser dividido en cinco fases que se describen a continuación.

- Descripción del problema: En este apartado se debe describirse el problema de investigación y señalar el objetivo de la aplicación del método.
- Determinación de los criterios: En este paso se define a los panelistas. Es así que se establece el perfil de los expertos deseados, el número de ellos y la vía de consulta.
- Mecánica del panel: En este apartado se debe establecer el número de rondas, elaborar el cuestionario, establecer el tipo de retroalimentación, determinar el análisis estadístico y definir el valor numérico que representará el consenso.
- Consulta a los expertos: Esta fase consiste en la aplicación sucesiva de los cuestionarios con su respectiva retroalimentación hasta obtener el consenso esperado. Asimismo se espera aplicar el proceso estadístico definido en la etapa anterior.
- Reporte de resultados: Este apartado consiste en la presentación de un informe detallado con los resultados de la aplicación. Asimismo de las interpretaciones de los investigadores.

2.7. Passive House

Una *Passive House*, o Vivienda Pasiva, es un nuevo diseño estándar de edificio que busca la máxima eficiencia energética y con ello, la reducción de la huella de carbono de la vivienda. Este modelo está siendo desarrollado con mayor ímpetu en Alemania, donde se fundó *The Passivhaus-Institut* (PHI) en 1996. En la figura 2.1 se muestra un esquema de las características técnicas de una *Passive House*, las cuales son descritas a continuación.

- Bajo consumo energético: Reducción de hasta el 90% de energía usada para la calefacción y aire acondicionado en comparación con viviendas tradicionales europeas y 75%

en relación a nuevas viviendas del continente mencionado. Una Passive House requiere de menos de 15 kWh/(m²xaño) para estos procesos. Asimismo, la carga para la calefacción y enfriamiento del aire es de 10 W/m² como máximo. De igual manera, el consumo de energía primaria no excede los 120 kWh/(m²xaño).

- Alto nivel de confort: Este modelo emplea calor del cuerpo de los residentes y de la luz solar como fuente de energía. Es así que las temperaturas excesivas solo ocurrían el 10% del tiempo.
- Superinsulación: Materiales robustos empleados en ventanas, paredes, techos y pisos para mantener el calor durante invierno y eliminarlo durante verano. En el caso de las paredes, se emplea un material de alta densidad de celulosa de al menos 11 pulgadas de espesor. Por otro lado, las ventanas tienen de tres a cuatro capas para reducir la transmisión de sonido y crear hermeticidad, lo que se conoce como *Airtightness* (Burlard, 2019).
- Sistema de ventilación de constante intercambio de aire para un alto *Indoor Air Quality* (IAQ): En invierno, los ventiladores recolectores de calor combinan el aire fresco exterior con el calor existente en el aire saliente. En verano es el proceso inverso (Burlard, 2019). Es así que los ratios de intercambio de aire estarán limitados por un $n_{50}=0.6/h$.

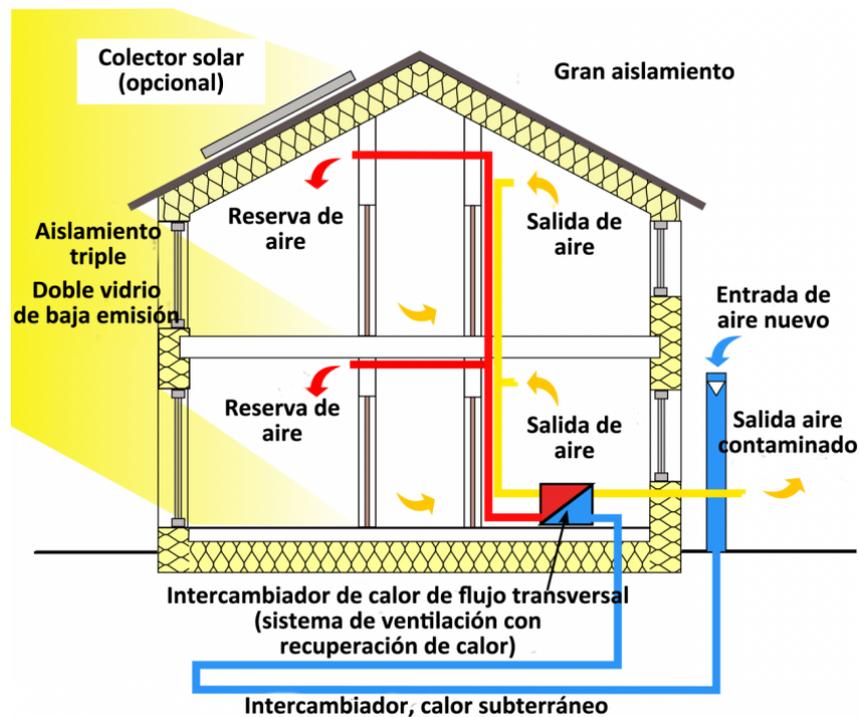


Figura 2.1
 Esquema de una Passive house
 Fuente: *Passipedia* (Passivhaus Institut, 2019)

2.8. Enfoques alternativos de evaluación del desempeño de las viviendas

2.8.1. La variable social y conductual

En esta sección se presentará el trabajo de dos autores que argumentan que las variables conductuales y sociales influyen en el desempeño energético de una vivienda. Primero, el libro *School Buildings Rehabilitation* (Almeida, Peicoto de Freitas, y Delgado, 2015) discute el efecto de diferentes estrategias para mejorar la eficiencia energética de edificios públicos sin sacrificar la calidad ambiental de los interiores, particularmente salones de clase. El texto presenta una metodología multi-objetiva; es decir, combina el análisis *Artificial Neural Networks* y *Life Cycle Cost*. Además, modela el desempeño energético empleando la herramienta *EnergyPlus*. Con ello, se obtiene como resultado principal que los edificios sin modernización ambiental presentan menores condiciones de confort y calidad de aire interior. Ante esto, se puede rescatar una idea relevante desarrollada en Almeida et al. (2015). Las recomendaciones sobre el confort térmico estipulado por la normativa no deben ser tomadas de forma estricta, ya que el confort es

una variable subjetiva que depende de factores ambientales, culturales y psicológicos.

Por otro lado, el artículo *Prototipo de vivienda vertical social sustentable, enfoque en resistencia al cambio climático* desarrollado por Edgar Hilario Piña Hernández en el 2018 tiene como objetivo principal de investigación “crear un prototipo de vivienda vertical a pequeña escala en oposición al enfoque convencional de vivienda social vertical masiva” (Piña Hernández, 2018, p.215). Esto último es abordado desde varios enfoques de sustentabilidad tales como el social, la resistencia al cambio climático, el diseño solar pasivo, la flexibilidad del edificio, el enfoque urbano, el confort térmico y la accesibilidad, para así evaluar el desempeño de las estrategias de diseño bioclimático. En adición, desde una evaluación más técnica, Piña señala que es necesario evaluar el desempeño energético sobre estrategias localmente apropiadas, ya que la efectividad de una u otra depende de las características climáticas y geográficas de cada caso en particular.

2.8.2. Diseño bioclimático

Martin Wieser Rey en su texto *Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: El caso peruano* profundiza en el diseño bioclimático y su importancia en nuestro país. En su texto, él presenta una matriz de recomendaciones de diseño arquitectónico en función de los diferentes climas que tiene el Perú. Se plantea que “el diseño arquitectónico en nuestro medio, tanto en el campo académico como profesional, no le da el suficiente interés a las condiciones climáticas en el proceso de diseño. (...) Además existe poca información vinculada a procurar el confort térmico de los usuarios basado en criterios de eficiencia energética” (Wieser, 2011). La idea de mayor interés es que el confort es una función compleja que depende de la estación del año, la actividad de la persona y la capacidad de adaptación a ciertas condiciones climáticas.

2.8.3. Discrepancias entre el modelo y el comportamiento real del edificio

El artículo *Surveying and Measuring the Thermal Properties of Buildings* (2016) que fue desarrollado por Christopher Gorse, Melanie Smith y otros autores presenta algunos métodos usados para la investigación, cuantificación y monitoreo del desempeño de los edificios. Es así que se resalta las discrepancias entre las predicciones de los modelos y el comportamiento real de los edificios. De esta forma, los autores señalan que las predicciones de los diseños pueden ser afectadas cuando no se toma en cuenta el ambiente real del edificio tales como la

exposición, la operación, otros edificios y la vegetación. Además, señalan que en el análisis energético de cualquier edificio se debe tomar en cuenta la creación de un sistema compuesto por cuatro elementos: fabricación, tipo de servicio del edificio, comportamiento de los usuarios y las condiciones ambientales.

El artículo *Monitoring and Measuring Building Performance* (2016) redactado por Christopher Gorse, David Johnston y otros autores da a conocer que existen brechas en el desempeño energético de los edificios debido al poco entendimiento de esta variable en el momento del diseño, construcción y cuantificación durante la vida útil del edificio. Los autores argumentan que el elemento más importante en el análisis es conocer las limitaciones y capacidades de las herramientas de medición debido a las siguientes razones. Primero, el costo de construcción de un edificio solo representa el 1% del costo de operación del mismo durante su vida útil. Además que la variación del uso de energía registrado en diferentes estudios en el 50% de los casos se debe al comportamiento individual de los usuarios en lugar de las propiedades intrínsecas de la vivienda. Asimismo, la forma más precisa de determinar el consumo energético de un edificio es monitoreándolo en su tiempo de uso; por lo cual, analizar esta variable en base a modelos en la etapa de diseño y construcción no es lo más adecuado.

Capítulo III

Metodología

3.1. Descripción general de la metodología

La metodología usada evaluó la eficiencia del CTCS desde tres enfoques independientes. Primero, se examinó la capacidad de Código de reducir los impactos ambientales de la construcción convencional limeña. Segundo, se contrastó los criterios técnicos de esta norma con las definiciones de expertos nacionales en sostenibilidad en viviendas. Tercero, se comparó los estándares de diseño del CTCS con un prestigioso modelo internacional de vivienda sostenible. Todo ello realizado por la aplicación de tres herramientas de evaluación: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), el Método Delphi y un proceso comparativo con una Passive House, respectivamente. De esta forma, se buscó imparcializar la evaluación a nivel de métodos y con ello, brindar una evaluación más integra.

Para arribar a lo anterior, la metodología se dividió en cuatro etapas. Como se muestra en la figura 3.1, la primera etapa fue el rediseño de una vivienda multifamiliar siguiendo los lineamientos del CTCS. Después, se aplicó al nuevo diseño las tres herramientas de evaluación descritas en el párrafo anterior. Luego, se procesaron los resultados de cada método. Finalmente, se realizó la evaluación desde tres enfoques de acuerdo al número de herramientas.

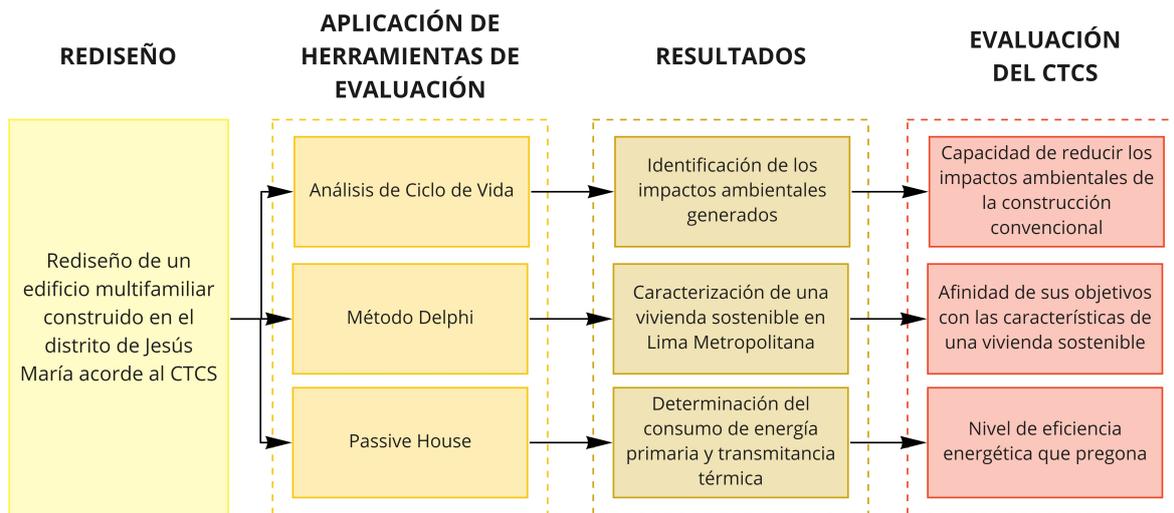


Figura 3.1
Esquema de la metodología
Fuente: Elaboración propia

3.2. Caso de estudio

El caso de estudio fue la Torre 1 de la Residencial Esmeralda. Esta construcción está ubicada en el distrito de Jesús María, provincia de Lima y departamento de Lima. Además, es un edificio de vivienda multifamiliar de 17 niveles con un área techada de 334.6 m². Las características más relevantes se muestran en la tabla 3.1 y están detalladas en los siguientes párrafos.

La envolvente del edificio está compuesta por muros, techo y piso externos, cada componente con diferentes características térmicas. Es así que los muros engloban las placas y vigas de concreto armado, tabiquería de ladrillo pandereta y vanos de vidrio laminado con marco de aluminio; de esta forma, los muros perimetrales tienen una transmitancia térmica de 4.3 W/m²K. Por otro lado, el techo final del edificio está constituido por losas aligeradas firth y losas macizas; siendo su transmitancia de un valor de 2.0 W/m²K. Y, el piso del primer nivel está compuesto por un falso piso de concreto, lo que lo caracteriza con 2.4 W/m²K.

Por otro lado, el edificio satisface sus necesidades energéticas únicamente por medio de una conexión al servicio público de electricidad. Es así que el consumo eléctrico anual del edificio asciende a 406 749 kW-h. Este valor fue determinado considerando un patrón de consumo estándar acorde al Nivel Socioeconómico Medio Alto del edificio determinado por el Instituto Nacional de Estadística e Información (INEI) (2013). Este patrón corresponde a los electrodomésticos usados, la potencia de cada aparato y las horas de operación diarias. Lo más resaltante

es el uso de refrigeradoras con potencia de 350 W, de focos ahorradores de 20 W y el uso de ventiladores eléctricos.

Del mismo modo, el edificio cuenta con una conexión de agua potable al Servicio de Agua Potable y Alcantarrilado de Lima (Sedapal). Siendo el consumo hídrico anual estimado del edificio de 19 933 m³ de agua potable. Este valor fue determinado empleando el Método de Gastos Probables de Hunter detallado en la Norma Técnica IS 0.10 “Instalaciones sanitarias para edificaciones” (Ministerio de Vivienda, 2006). Cabe resaltar que el servicio de agua potable se emplea para la ingesta, preparación de alimentos, limpieza, cuidado personal y descargas sanitarias.

Para fines de orden y referencia, el proyecto de la torre elaborado sin considerar el CTCS fue llamado Edificio Convencional, mientras que los modelos resultantes de la aplicación del Código fueron nombrados como Edificio Rediseñado.

Tabla 3.1
Características del Edificio Convencional

Características		Valor	Unidad
Trasmittancia térmica, Valor U	Muros	4.3	W/m ² K
	Techo	2.0	W/m ² K
	Piso	2.4	W/m ² K
Consumo energético anual		406 749	kW-h
Consumo hídrico anual		19 933	m ³

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV

Rediseño del proyecto

La primera etapa de la metodología fue el rediseño del Edificio Convencional. Esta se basó en cuatro estrategias de optimización que corresponden a las características habitacionales y climáticas del proyecto. En cuanto a la eficiencia energética, se optimizó la envolvente y los aparatos de iluminación y refrigeración. Por otro lado, la eficiencia hídrica fue alcanzada implementando un sistema de tratamiento de aguas grises e instalando aparatos sanitarios ahorradores. De esta forma, se obtuvo el Edificio Rediseñado.

4.1. Optimización del desempeño energético del edificio

4.1.1. Estrategia 1: Envolvente

El apartado *II.1.1 Transmitancia térmica de cerramientos según zona bioclimática* del Código establece que la transmitancia térmica de la envolvente de una edificación debe estar por debajo de un valor límite establecido según la zona bioclimática donde se ubique. Esto se logra por medio del diseño térmico de la envolvente, proceso definido en la Norma EM.110.

La nueva envolvente fue determinada a partir del rediseño de la preexistente. Es así que se adicionó capas exteriores de materiales térmicos a los componentes estructurales y arquitectónicos que forman parte de la envolvente original. El proceso de rediseño consistió en los siguientes pasos. Primero, se determinó la zona bioclimática y los valores máximos de transmitancia térmica para muros, techos y pisos correspondiente a dicho clima. Luego, se eligió los materiales que compondrían el aislamiento térmico. Seguidamente, se iteró la transmitancia térmica global de muros, techos y pisos hasta conseguir los valores deseados en cada elemento.

Zona bioclimática y transmitancias térmicas máximas

La zona climática donde se ubica el caso de estudio es Desértico Costero. Esta fue determinada a partir de las nueve características climáticas con las cuales la Norma EM.110 define cada zona. Se recopiló y procesó los datos hidrometeorológicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (s.f.) de los últimos cinco años y la data del *Atlas de Energía Solar* (2003) de la misma institución. Asimismo, se empleó el ábaco psicrométrico de Lima que se encuentra en el texto *Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico* de Martin Wieser del 2009.

Luego, conocida la zona bioclimática, se consultó la Norma EM.110 para así obtener los valores máximos de transmitancia térmica en la zona Desértico Costero. Estos se encuentran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1
Transmitancia térmica para zona Desértico Costero

Zona bioclimática	U(W/m ² K)		
	Muro	Techo	Piso
Desértico Costero	2.36	2.21	2.63

Fuente: Norma EM. 110 (2014)

Composición de la envolvente

Se realizó tres rediseños de la envolvente. La diferencia entre cada uno es el uso de un aislante térmico en particular, entre los cuales tenemos: el corcho expandido, la lana de vidrio de baja densidad y la lana mineral de baja densidad; cuyos coeficientes de conductividad térmica (k) fueron obtenidos de la Norma EM.110. Por otro lado, los rediseños tienen cuatro puntos en común. Primero, las primeras capas, de interior a exterior, están compuestas por el sistema estructural original presentado en el expediente técnico del proyecto. Segundo, se agregó una capa de material aislante y otras adicionales para el sostenimiento y la protección de estos materiales térmicos, tales como cola de contacto adhesiva, malla de fibra de vidrio, mortero de cemento-arena y acabado. Tercero, estas capas se posicionaron en las caras externas de la componente estructural del edificio; es decir, el aislamiento es externo. Cuarto, todos los vanos están compuestos por vidrio insulated de 4/9/4 y carpintería de marco de PVC. Por otro lado, la elección de los tres aislantes térmicos se basó en la disponibilidad de estos productos en Lima. Es así que estos materiales pueden ser fácilmente encontrados en el mercado constructor por

los contratistas.

Transmitancia térmica global por componente de la envolvente

El procedimiento para determinar la transmitancia por componente de envolvente fue el estipulado en la Norma EM.110. En resumidas cuentas, se iteró el grosor de cada aislante hasta que la transmitancia térmica global del componente de la envolvente estuvo por debajo de los valores límites máximos de la tabla 4.1.

La determinación del grosor del aislante se cionó a los siguientes criterios. Para la paredes perimetrales se eligió el grosor de aislante que proporcionó 2.36 W/m²K de transmitancia térmica en los tres rediseños. Por otro lado, las componentes Techo y Pisos no contaron con aislamiento, ya que desde el diseño original tenían transmitancias térmicas por debajo del valor máximo señalado en el CTCS. De esta forma, se obtuvo las transmitancias (Valor U) para cada componente de la envolvente como se muestra en la tabla 4.2

Tabla 4.2

Transmitancia térmica (W/m²K) por cada componente de la envolvente

	Grosor de aislante (mm)			U (W/m ² K)	
	Corcho expandido	Lana de vidrio de baja densidad	Lana mineral de baja densidad	Alcanzada en el diseño	Exigida por norma
Muro	6.9	6.0	5.9	2.36	2.36
Techo	0	0	0	2.04	2.21
Piso	0	0	0	2.40	2.63

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Estrategia 2: Iluminación y refrigeración

El patrón de consumo eléctrico del Edificio Rediseñado varió en tres electrodomésticos respecto al patrón del Edificio Convencional. Para el rediseño, se implementó tecnología ahorradora de energía para la iluminación y la refrigeración, tal como lo estipula el CTCS. Además se suprimió la energía consumida por el ventilador eléctrico, ya que se contó con una envolvente térmica que genera confort interior.

Es así que el CTCS establece que las lámparas instaladas deben ser de tecnología eficiente según el sistema de etiquetado de la NTP 370.101-2 (Dirección General de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas, 2015). Por ello, se proyectó el rediseño con bombillas Led de 10.5kW de potencia y consumo de 52.5 W-h/día. Asimismo, las refrigeradoras instaladas en la edificación deben ser energéticamente eficientes según la NTP 399.483 (Dirección General

de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas, 2017). Por ende, considerando el nivel socioeconómico NSE B de la ubicación del proyecto, se estableció el uso de refrigeradoras sin escarcha con dispensador de 327 litros de volumen bruto con rango de eficiencia energética A y consumo de 421.6 kW-h/año (1 171 W-h/día). De esta forma, se estableció el consumo energético anual del edificio sostenible, el cual es de 89 537 kW-h/año. Este valor se muestra en la tabla 4.3. En esta tabla se resume el consumo diario y anual de la refrigeradora de eficiencia A, los focos Led y el resto de aparatos (estos últimos tienen el mismo consumo que en la vivienda original) de todo el edificio.

Tabla 4.3
Consumo energético anual del Edificio Rediseñado

Equipos electrónicos	Consumo diario (kW-h/día)	Consumo anual (kW-h/año)
Refrigeradora, eficiencia A	79.6	28 668
Focos Led de 10.5 kW	21.4	7 711
Otros aparatos	893.8	321 768
Total	994.8	358 147

Fuente: Elaboración propia

4.2. Optimización del desempeño hídrico del edificio

4.2.1. Estrategia 1: Tratamiento de aguas grises domésticas

El apartado II.2.1. *Ahorro de agua y reúso de aguas residuales domésticas tratadas* del CTCS establece que las edificaciones deben contar con un sistema de tratamiento de aguas grises que serán usadas en la recarga de inodoros. De esta forma, con la implementación de la planta, se estimó un ahorro de agua potable de 1 853 m³ al año. Cabe destacar, que este valor correspondería al consumo de agua de los inodoros de todo el edificio desde la conexión domiciliaria.

Por consiguiente, se realizó el predimensionamiento de una central de tratamiento de aguas grises domésticas que se proyecta ubicar en el sótano de la edificación. Para ello, se siguió el siguiente procedimiento. Primero, se determinó la producción de aguas grises por medio de información proporcionado por Sedapal. Luego, se caracterizó químicamente el efluente y se determinó los niveles de tratamiento necesarios por medio de las recomendaciones de Li et al. (2009), Erazo y Cárdenas (2000), Ramon et al.(2004). Finalmente, se realizó el dimensionamiento de cada proceso de tratamiento del agua con ayuda del manual *Tratamiento y Reuso de*

Aguas Residuales del (2009). El desarrollo detallado de este análisis puede ser encontrado en el Anexo A, Anexo B y Anexo C.

El análisis del proyecto determinó que el sistema de tratamiento de aguas grises debe ser de tres etapas. En primer lugar, la etapa de tratamiento primario por sedimentación; luego, una etapa de tratamiento secundario por floculación-coagulación; finalmente, como tratamiento terciario, el proceso de infiltración con arena y desinfección por cloro. Adicionalmente, se proyectó un sistema indirecto superior con bombeo para el almacenamiento y la distribución del agua gris tratada.

Como se visualiza en la tabla 4.4, se emplearon diferentes estructuras para cumplir los requerimientos del análisis. Tales como dos sedimentadores de concreto armado, un coagulador de difusores de tubería de PVC, un floculador de concreto armado con un agitador mecánico, un filtro de arena metálico ascendente vertical, una cisterna con bomba de concreto armado y un tanque de almacenamiento del mismo material.

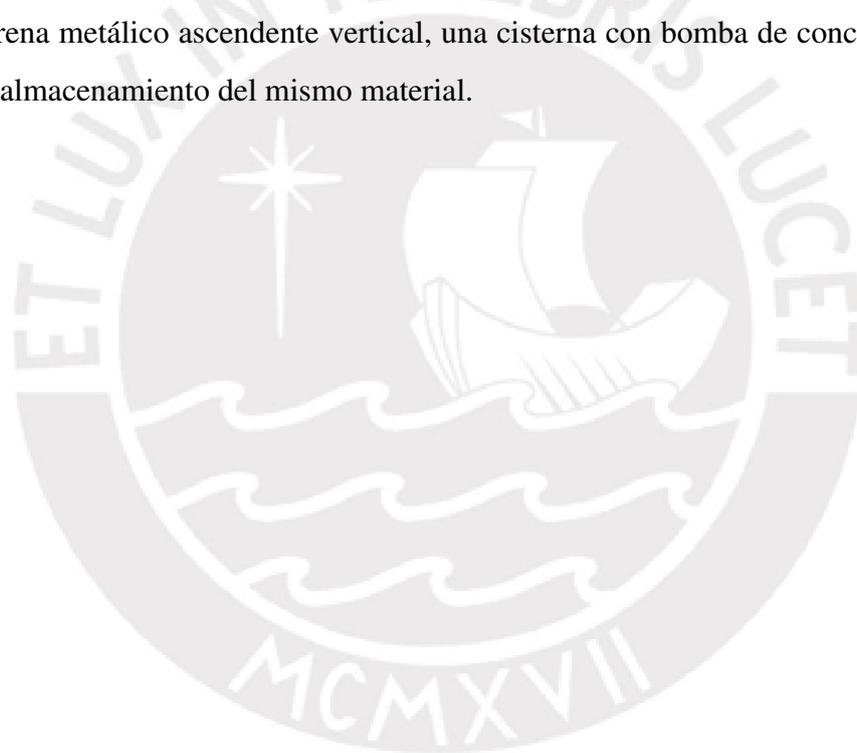


Tabla 4.4
Estructuras del sistema de tratamiento de aguas grises

Estructura	Metrado	Unidad
Sedimentador N°1		
Concreto (2x4.5x1.3m)	3.2	m ³
Acero de refuerzo fy=4200 kg/cm ²	134.1	kg
Registro de 6" de bronce	1	und
Coagulador		
Tubería de salida de PVC de 3"	3.0	m
Floculador		
Concreto (1x1x0.25m)	0.5	m ³
Acero de refuerzo fy=4200 kg/cm ²	19.1	kg
Agitador BMA-150 de motor de 0.25 kW	1	und
Tubería de salida de PVC de 2"	1.0	m
Sedimentador N°2		
Concreto (2x3.3x1.3m)	2.7	m ³
Acero de refuerzo fy=4200 kg/cm ²	114.6	kg
Registro de 6" de bronce	1	und
Tubería salida de PVC de 1"	0.5	m
Filtro rápido de arena		
Filtro rápido de arena ascendente vertical de 1" brazos colectores	1	und
Tubería salida de PVC de 1"	1	m
Cisterna		
Concreto (4x2x2.3m)	4.4	m ³
Acero de refuerzo fy=4200 kg/cm ²	185.0	kg
Tubería de succión de PVC de 1"	2.3	m
Bomba hidrostal Modelo A1I-1.9T	1	und
Tubería de impulsión de PVC de 3/4"	43.2	m
Tanque		
Concreto (1.45x2x3m)	2.7	m ³
Acero de refuerzo fy=4200 kg/cm ²	173.5	kg

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Estrategia 2: Aparatos sanitarios ahorradores de agua

El CTCS señala que los aparatos sanitarios como lavaderos, lavatorios y duchas deben ser ahorradores. De tal forma que el consumo de agua se reduzca en al menos 30% respecto a los aparatos existentes en el mercado. En consecuencia, para el rediseño del edificio se propuso el uso de aparatos reductores de consumo, los cuales se muestran en la tabla 4.5.

En dicho cuadro, también se puede encontrar los porcentajes de reducción de cada dispositivo, los cuales fueron obtenidos de la base de datos de Sedapal (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima, s.f.). Es así que lo más resaltante en esta tabla es el consumo de agua

de 29.4 m³/día, 20.8 m³/día por debajo del consumo de 50.2 m³/día de los aparatos instalados en el edificio original. Esto representa un ahorro anual de 7 507 m³ de agua potable.

Tabla 4.5

Dispositivos ahorradores de agua y volumen reducido de consumo hídrico

Aparatos	Cantidad en el edificio	Consumo original (m³/día)	Aparato reductor de consumo	Porcentaje de reducción (%)	Consumo reducido (m³/día)
Lavatorio	136	3.5	Llave economizadora	57	1.5
Lavadero de cocina	68	14	Reductor de caudal	40	8.4
Lavadero de ropa	136	7	Reductor de caudal	40	4.2
Ducha privada	136	20.9	Kit economizador	50	10.5
Sumidero	204	4.8	-	0	4.8
Total	-	50.2		-	29.4

Fuente: Elaboración propia

4.3. Caso de estudio rediseñado

Al aplicar las cuatro estrategias de optimización anteriores, se obtiene el Edificio Rediseñado, cuyas principales características se detallan en la tabla 4.6. Como se puede visualizar, hay una reducción considerable de la transmitancia térmica de los muros, debido al uso de vanos aislantes. Además, el ahorro energético es del 12% y el hídrico del 47% respecto al consumo del Edificio Convencional.

Tabla 4.6

Comparación de las características de los edificios

Características	E. Convencional	E. Rediseñado	Und
Transmitancia térmica, U	Muros	4.28	2.36 W/m ² K
	Techos	2.04	2.04 W/m ² K
	Piso	2.40	2.40 W/m ² K
Consumo energético anual	406 749	358 147	kW-h
Consumo hídrico anual	19 932	10 572	m ³

Fuente: Elaboración propia

Capítulo V

Aplicación del Análisis de Ciclo de Vida

5.1. Descripción general

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es la primera herramienta de evaluación del CTCS. El principal objetivo del uso de esta es determinar la capacidad del CTCS de reducir los impactos ambientales de la construcción convencional; en específico, en el caso de una vivienda multifamiliar en Jesús María. Por ello, se realizó un estudio comparativo de ACV entre el Edificio Convencional y el Rediseñado.

La metodología de este análisis está estandarizado por la ISO 14044 (2006b). Por tanto, se siguieron los cuatro pasos descritos en la figura 5.1. Primero se definieron los objetivos y el alcance. De esta forma, el estudio se extendió a todo el ciclo de vida del edificio en base a un metro cuadrado de área techada como unidad funcional. Luego, se realizó el análisis del inventario por medio de fuentes primarias, como el expediente técnico y patrones de consumo del distrito, y la base de datos *Ecoinvent 3.6* (Wernet et al., 2016) como fuente secundaria, regido por el sistema de asignación *cut off by classification* y en base a una biblioteca con procesos unitarios (*unit process*). A continuación, se evaluó los impactos por medio de la metodología *Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES)* versión 4.08 en el Software *Simapro Faculty* versión 9.1.0. Finalmente, se interpretaron los resultados para sugerir mejoras.

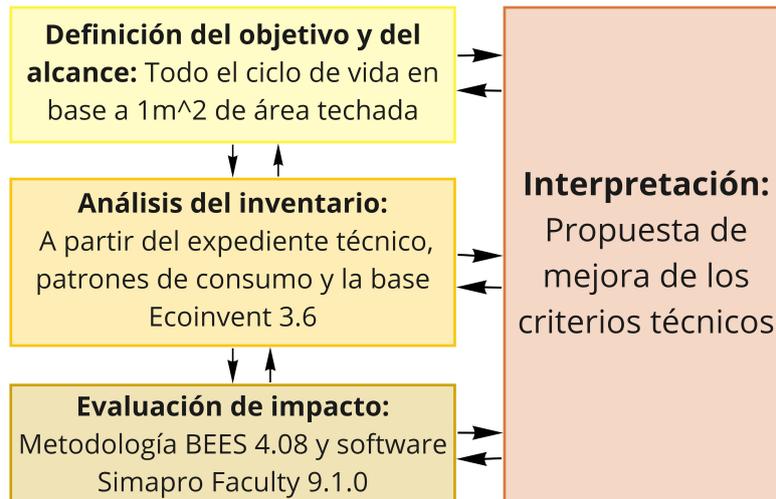


Figura 5.1
 Metodología del ACV
 Fuente: Elaboración propia

5.2. Definición de objetivos y alcance

El objetivo del ACV fue comparar el impacto ambiental de una vivienda multifamiliar convencional y una rediseñada según el CTCS. De esta forma, se analizó la Residencial Esmeralda y tres rediseños, cuya única diferencia entre estos últimos tres fue el aislante empleado en sus envolventes.

El sistema se limitó a las componentes del edificio que regula el CTCS. Debido a dos motivos. Primero, el estudio se enfocó en la norma y no en el edificio en sí mismo. Segundo, los elementos de la vivienda no regulados por el CTCS no son modificados en ninguno de los rediseños.

Asimismo, el estudio abarcó desde *la cuna a la tumba* de los componentes pertinentes del edificio. Acorde a la ISO 14040 (2006a), se estudiará todas las fases del ciclo de vida. Tal como se muestra en la figura 5.2, el estudio engloba la producción, la construcción, el uso y el fin de vida de los componentes del edificio oportunos a la investigación. Por consiguiente, la unidad funcional fue el metro cuadrado de área techada. Esto normaliza los resultados para su posterior contraste con otros estudios.

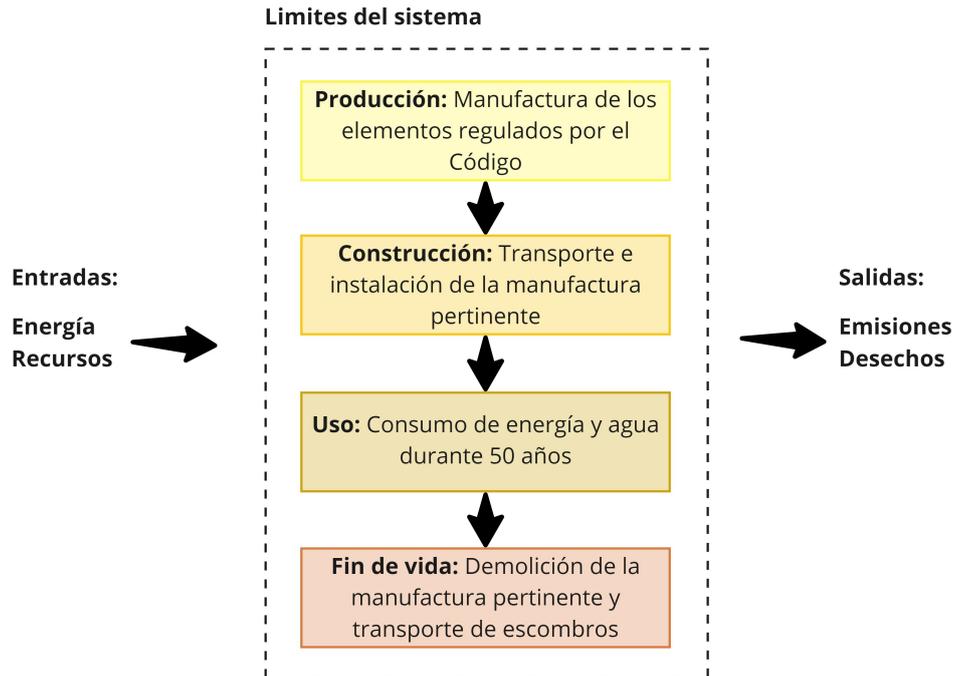


Figura 5.2
 Límites del sistema del estudio para el ACV
 Fuente: Elaboración propia

5.3. Análisis de inventario

El inventario del Edificio Convencional y Rediseñado se realizó en base a las etapas de ciclo de vida de los edificios descritas en la figura 5.2. En la etapa de producción, se contabilizó los materiales de la estructura y la tabiquería de la envolvente para el Edificio Convencional; en cambio, para el Edificio Rediseñado, además de la tabiquería y la envolvente, se contabilizó el aislante y la planta de tratamiento. En la etapa de construcción, se estudió el transporte de materiales desde la fábrica hasta la ubicación del proyecto; y el consumo de agua y electricidad de la instalación y construcción. En la etapa de uso se estimó el consumo de agua y electricidad durante 50 años, considerado el tiempo de vida de la estructura, para ambos edificios. Finalmente, la etapa de fin de vida consistió en la estimación del consumo de agua, electricidad y diésel durante la demolición; y el transporte de escombros a un punto de disposición final local.

5.3.1. Edificio Convencional

Producción

La producción abarca la manufactura de los materiales finales que se usaron en obra para construir la envolvente del edificio. Esta fase considera la extracción de materias primas, el transporte a la fábrica de los materiales y la fabricación de los materiales de la envolvente. Siendo la envolvente conformada por elementos estructurales en muros, techo y piso; tabiquería de paredes perimetrales; y vanos en los muros.

De esta forma, se cuantificó los materiales tal como se muestra en la tabla 5.1. Tal es el caso que la estructura de la envolvente está construida en base a concreto armado en placas y vigas; aligerado tipo firth y losas macizas en el techo; y falso piso de mezcla C:H 1:8 en la losa del primer nivel. En cuanto a la tabiquería, el expediente técnico indicó el uso de ladrillo pandereta y mortero de cemento y arena para los enlucidos. Así como, vidrio laminado con marco de aluminio en ventanas y puertas. A todo ello debe sumarse los acabados de pintura con mortero de cemento y arena en los elementos verticales y losetas de cerámica en los pisos y techo. En la tabla mencionada se encuentra el metrado por tipo de material y la cantidad de los mismos según la unidad funcional expresados en unidad por metro cuadrado (und/m²).

Construcción

El transporte de materiales se modeló bajo las siguientes premisas. Se estimó la distancia de recorrido del traslado de cada material desde la fábrica hasta la obra. Asimismo, se determinó el medio de transporte según las prácticas comunes en la ciudad de Lima y la cantidad de material a movilizar. Por otro lado, se calculó la distancia en toneladas por kilómetro (ton-km) de cada material respecto a la unidad funcional. Esto fue obtenido multiplicando la cantidad de material por área techada por la distancia de recorrido desde la fábrica hasta el proyecto. De esta forma, se identificó el uso de tres medios de transporte (camión, camión concretero y tráiler). Como se muestra en la tabla 5.2, se transportó 5.1 ton-km/m² de materiales en camión, 27.3 ton-km/m² en tráiler y 47.9 ton-km/m² en camión concretero.

Tabla 5.1
Edificio Convencional: Producción

N°	Materiales	und	Cantidad (und)	Cantidad (und/m ²)
Estructura y tabiquería				
1	Concreto f'c=210kg/cm ²	m ³	320.7	0.96
2	Concreto f'c=175kg/cm ²	m ³	14.8	0.04
3	Concreto f'c= 350kg/cm ²	m ³	5.1	0.02
4	Acero en vigueta firth	kg	136.2	0.4
5	Acero fy=4200kg/cm ²	kg	34 875	104.2
6	Ladrillo bovedilla	kg	13 802	41.3
7	Ladrillo pandereta	kg	23 457	70.1
8	Falso piso mezcla C:H 1:8	m ³	25.1	0.08
9	Contrapiso para cerámico	m ³	16.7	0.05
10	Cerámico 30x30cm	kg	7 894	23.6
11	Mortero cemento-arena	m ³	108.2	0.3
Vanos				
12	Marco de aluminio	m ²	72.3	0.2
13	Vidrio laminado	kg	29 157	87.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2
Edificio Convencional: Construcción - Transporte de materiales

Medio de transporte	Distancia (ton-km/m ²)
Camión	5.1
Camión concretero	47.9
Trailer	27.3

Fuente: Elaboración propia

En adición, el modelado de la instalación de los materiales se rigió a las siguientes condiciones. Se cuantificó la energía y el agua consumidas por los procesos constructivos de cada elemento de la envolvente. Para ello, se empleó el análisis de precios unitarios de cada partida para identificar las herramientas eléctricas y sus rendimientos; además, se consultó la cantidad de agua empleada por partida. Estos valores se relacionaron con las cantidades metradas anteriormente para así obtener los resultados de consumo que se muestran en la tabla 5.3. Como se aprecia en esta ayuda visual, el consumo de energía y agua por área techada es de 113.9 kW-h/m² y de 1 m³ respectivamente.

Tabla 5.3
Edificio Convencional: Construcción - Instalación

Elemento	Consumo	
	Hídrico (m³)	Energético (kW-h)
Placas de envolvente	230.7	2 522
Vigas de muros	33.8	339.8
Tabiquería perimetral	6.4	611.9
Vano	-	34 412
Techo	30.1	161.0
Piso	30.1	78.8
Total	331.1	38 126
Total por área techada	1.0	113.9

Fuente: Elaboración propia

Uso

En este apartado se analizó el uso de la energía y del agua durante los 50 años de vida útil del edificio. Cabe destacar que los materiales de la edificación tienen un comportamiento pasivo durante su vida útil (García, 2010); por lo cual, en la etapa de uso de la edificación solo se analizó el consumo de la vivienda. Por otro lado, el tiempo de vida útil del estudio se determinó en 50 años, ya que este es el tiempo de vida que se proyecta para estas estructuras acorde a la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” (Ministerio de Vivienda, 2018).

Paralelamente, se trabajó con un comportamiento de usuarios estándar. Por ello, se estableció el patrón de consumo de una unidad de vivienda en Jesús María y se extrapolaron los consumos al resto del edificio. De esta forma, se estableció dos tipos de consumo. El primero será el consumo energético por la realización de actividades cotidianas en la vivienda que incluye el uso de electrodomésticos e iluminación. Las características generales de los aparatos los agrupan en tecnología de eficiencia B y C según la Norma Técnica Peruana 370.101-2 “Etiquetado de eficiencia energética para lámparas fluorescentes compactas, circulares, lineales y similares de uso doméstico” (Dirección General de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas, 2015). Para todo ello, se consultó fuentes de información como el INEI y el Ministerio de Energía y Minas (MINEM). El segundo grupo abarcó el consumo hídrico debido a los servicios higiénicos e ingesta de agua potable. En esta sección, se consideró el uso de aparatos y accesorios sanitarios sin tecnología de ahorro, tal como lo estipula el expediente técnico del proyecto. Es así que se empleó el método de gastos probables de Hunter y datos proporcionados por Sedapal para establecer el consumo de la torre.

Tal como se muestra en la tabla 5.4, se estimó un consumo de 20 338 MW-h de electricidad

y 996 624 m³ de agua durante la vida útil del edificio. Al relacionar estos valores con la unidad funcional del ACV, se obtiene 60 778 kW-h y 2 978 m³ de consumo por cada metro cuadrado de área techada.

Tabla 5.4
Edificio Convencional: Uso

Consumo		Anual	En 50 años	En 50 años por área techada
Energético	kW-h	406 749	20 337 459	60 778
Hídrico	m ³	19 933	996 624	2 978

Fuente: Elaboración propia

Fin de vida

Se estimó la energía y el agua consumidos durante la demolición de la torre. El edificio aún se encuentra en funcionamiento, por lo cual se valoró esta etapa en base al trabajo de investigación *Análisis de Eco Eficiencia de la demolición de una edificación en Lima* (Aguilar y Loo, 2017). De este estudio se usaron dos ratios: la demolición horaria (12.7 ton/hr) y el uso de agua diaria por tonelada demolida (0.02 m³/ton-día). Paralelamente se cuantificó el peso total de la envolvente a ser demolida (1 205 ton). Y se proyectó el uso de una retroexcavadora, una cisterna, un martillo demoledor y una amoladora. Los resultados de la estimación se visualizan en la tabla 5.5. Es así que se estimó un consumo de 313 toneladas de diésel, 9.6 MW-h de electricidad y 50.9 m³ de agua por la demolición del edificio. Valores que al ser divididos por los 334.6 m² de área techada, resultan en los ratios que se visualizan en la cuarta columna de la tabla 5.5.

Tabla 5.5
Edificio Convencional: Fin de vida - Demolición

Consumo		Por todo el edificio	Por área techada
Diesel	kg	313 058	935.6
Eléctrico	kW-h	9 560	28.6
Hídrico	m ³	50.9	0.2

Fuente: Elaboración propia

Conjuntamente, se modeló el proceso de transporte de escombros tomando de referencia el estado del mercado actual. Es así que se consideró como punto de disposición de residuos a la empresa Cajas Ecologicas SAC ubicada a 22.5 km de la Residencial. Asimismo, se consideró el traslado de los escombros por medio de un camión rígido de capacidad de carga entre 20

y 30 toneladas. De esta forma, se estimó una distancia de 22 116 ton-km de recorrido para el transporte de escombros.

5.3.2. Edificio Rediseñado

Producción

La producción del Edificio Rediseñado abarca la manufactura de los materiales que se usaron para construir la envolvente y la planta de tratamiento de aguas grises. La envolvente de este edificio comprende los mismos elementos del Edificio Convencional más la instalación del aislante. La planta de tratamiento está compuesta por estructuras de concreto armado y equipos mecánicos.

Es así que se realizó el metrado y análisis de composición de los materiales como se muestra en la tabla 5.6. Los primeros 11 materiales son los mismos que se cuantificaron para la etapa de producción del Edificio Convencional. En cuanto a los vanos, se empleó vidrio insulado 4/9/4 con marco de PVC. El rediseño de la envolvente arrojó un sistema de capas complementarias al aislante (Ítem 16, 17 y 21). Por otro lado, en esta tabla se incluyen las tres opciones de aislante que se evaluaron (Ítem 18, 19 y 20); cabe destacar que se realizó un ACV para cada aislante, cuya única diferencia entre ellos es la vida del aislante debido a su uso en el edificio. Finalmente, se cuantificó los elementos de la planta de tratamiento más importantes, los cuales incluyen el uso de concreto armado, tuberías de PVC y equipos mecánicos. Para ello, se empleó los planos del rediseño y las fichas técnicas de los equipos.

Tabla 5.6
Edificio Rediseñado: Producción

N°	Materiales		Cantidad (und)	Cantidad (und/m ²)
Estructura y tabiquería				
1	Concreto f'c=210kg/cm ²	m ³	320.7	0.96
2	Concreto f'c=175kg/cm ²	m ³	14.8	0.04
3	Concreto f'c= 350kg/cm ²	m ³	5.1	0.02
4	Acero en vigueta firth	kg	136.2	0.4
5	Acero fy=4200kg/cm ²	kg	34 875	104.2
6	Ladrillo bovedilla	kg	13 802	41.3
7	Ladrillo pandereta	kg	23 457	70.1
8	Falso piso mezcla C:H 1:8	m ³	25.1	0.08
9	Contrapiso paracerámico	m ³	16.7	0.05
10	Cerámico 30x30cm	kg	7 894	23.6
11	Mortero cemento-arena	kg	216 396	646.7
Vanos				
14	PVC de marcos de ventana	m ²	262.1	0.8
15	Vidrio insulado incoloro 4/9/4	m ²	976.5	2.9
Aislante				
16	Mortero cemento-arena	kg	232 041	693.5
17	Cola de contacto adhesiva	m ³	3.5	0.01
18	Corcho expandido	kg	2 668	8.0
19	Lana de vidrio de baja densidad	kg	263.6	0.8
20	Lana mineral de baja densidad	kg	829.5	2.5
21	Malla fibra de vidrio	kg	5 272	15.8
Planta de tratamiento				
22	Concreto f'c=210kg/cm ²	m ³	13.3	0.04
23	Acero fy=4200kg/cm ²	kg	740.9	2.2
24	Acero AISI 360L	kg	19.5	0.06
25	Acero al carbono	kg	13.6	0.04
26	Acero AISI 420	kg	23.2	0.07
27	Zincados	m ²	0.06	2x10 ⁻⁴
28	Bronce	kg	3.0	9x10 ⁻³
29	PVC	kg	20.2	0.06
30	Propileno etileno fluorado	kg	1.6	5x10 ⁻³
31	Caucho sintético nitrilo	kg	6.2	0.02
32	Polipropileno	kg	1.2	4x10 ⁻³
33	Carburo de silicio	kg	0.9	3x10 ⁻³
34	Arena silícea	kg	30.0	0.09

Fuente: Elaboración propia

Construcción

El transporte de materiales desde la fábrica hasta el proyecto se modeló siguiendo las mismas premisas tomadas para el Edificio Convencional. Es decir, se cuantificó la cantidad de material, se identificó el medio de transporte y se calculó la distancia desde la fábrica hasta la Residencial. De esta forma, se resumió la información por tipo de transporte. En total, se identificó cinco medios: camión, camión concretetero, trailer, camión rígido y barco. En la tabla 5.2 se muestra el transporte en ton-km por área techada del edificio. Las diferencias entre los tres submodelos del Edificio Rediseñado son mínimas.

Tabla 5.7
Edificio Rediseñado: Construcción - Transporte de materiales

Medio de transporte	Distancia (ton-km/m ²)		
	Edificio Rediseñado con		
	Corcho	Lana de vidrio	Lana mineral
Camión	12.3	12.0	12.1
Camión concretetero	49.6	49.6	49.6
Trailer	52.7	52.7	52.7
Camión rígido	4.5x10 ⁻³	4.5x10 ⁻³	4.5x10 ⁻³
Barco	3 262	3 262	3 262

Fuente: Elaboración propia

El inventario de la instalación de materiales cuantificó la energía y el agua consumidas por los procesos constructivos de la envolvente y la planta de tratamiento. La diferencia que tiene este inventario con el del Edificio Convencional es la análisis del vano, el aislante y la planta de tratamiento. Para el caso de la instalación de vanos se usó un rendimiento distinto; para el aislante se consideró el uso de un taladro; para la planta se consideró un vibrador y agua para el curado del concreto. En total, se estimó un consumo de 340.4 m³ de agua y 1 403 MW-h de energía, tal como se ilustra en la tabla 5.8. Por último, tomando en cuenta el área techada del edificio, se tienen valores de 1 m³ de consumo hídrico y 4 192 kW-h de consumo eléctrico por área techada durante la instalación de la envolvente y de la planta de tratamiento.

Tabla 5.8
Edificio Rediseñado: Construcción - Instalación

Elemento	Consumo	
	Hídrico (m ³)	Energético (kW-h)
Placas de envolvente	230.7	2 522
Vigas de muros	33.8	339.8
Tabiquería perimetral	6.4	611.9
Techo	30.1	161.0
Piso	30.1	78.8
Vano aislante	-	38 236
Aislante	-	1 360 707
Planta de tratamiento	9.3	1.7
Total	340.4	1 402 659
Total por área techada	1.0	4 192

Fuente: Elaboración propia

Uso

Al igual que el Edificio Convencional, en esta etapa se cuantificó el agua y energía usados durante una proyección de vida del edificio de 50 años. La diferencia con el patrón de consumo del otro edificio radica en el uso de electrodomésticos más eficientes. En el caso de la energía, se consideró refrigeradoras de eficiencia A y bombillas Led de 11W de potencia, y se eliminó el uso de ventiladores durante verano. Por otro lado, el consumo hídrico fue más reducido por la instalación de accesorios ahorradores en los puntos de salida de agua y por la construcción de una planta de tratamiento de aguas grises que alimenta los inodoros del edificio. De esta forma, como se presenta en la tabla 5.9, se estimó el consumo de 17.9 MW-h de energía eléctrica y 528 622 m³ de agua. Como en todos los casos, estas cantidades fueron divididas por el área techada del edificio para obtener los ratios de la quinta columna de la tabla.

Tabla 5.9
Edificio Rediseñado: Uso

Consumo		Anual	En 50 años	En 50 años por área techada
Energético	kW-h	358.2	17 907	53.5
Hídrico	m ³	10 572	528 622	1 580

Fuente: Elaboración propia

Fin de vida

La etapa de demolición del Edificio Rediseñado fue estimada siguiendo las mismas consi-

deraciones planteadas para el anterior ACV. La diferencia radica en que se consideró tres tipos de envolvente y la planta de tratamiento. Como se muestra en la tabla 5.10, el consumo de agua es prácticamente el mismo en los tres modelos (0.2 m³ por metro cuadrado de área techada). Del mismo modo, el consumo de diésel y de electricidad de las maquinarias empleadas es similar en los tres edificios.

Tabla 5.10
Edificio Rediseñado: Fin de vida - Demolición

Consumo por área techada		Edificio Rediseñado con		
		Corcho	Lana de vidrio	Lana mineral
Diesel	kg	1 150.6	1 148.8	1 149.2
Eléctrico	kW-h	35.14	35.08	35.09
Hídrico	m ³	0.2	0.2	0.2

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el transporte de escombros fue inventariado considerando como punto de acopio el depósito de la empresa Cajas Ecológicas SAC. Por ello se consideró el uso de un camión rígido para el traslado, el cual recorrería 22.5 km. Tal como se ilustra en la tabla 5.11, el transporte de la envolvente y la planta de tratamiento demandaría alrededor de 99.5 ton-km por área techada de recorrido para los tres modelos.

Tabla 5.11
Edificio Rediseñado: Fin de vida - Transporte de escombros

Transporte de escombros		Edificio Rediseñado con		
		Corcho	Lana de vidrio	Lana mineral
Escombros por todo el edificio	ton	1 482	1 480	1 480
Escombros por área techada	ton/m ²	4.4	4.4	4.4
Transporte por área techada	ton/m ² -km	99.7	99.5	99.5

Fuente: Elaboración propia

5.3.3. Fuentes de información

Se usó fuentes de información primaria y secundaria para el análisis de inventario. Las fuentes primarias fueron el metrado de materiales, transporte, energía y agua empleados en todas las fases del ciclo de vida. El detalle de toda esta información se encuentra en los puntos anteriores.

En cambio, la fuente secundaria empleada fue la base de datos Ecoinvent 3.6 con el sistema de asignación *cut off by classification* considerando su biblioteca de procesos unitarios (*unit*

process). Este modelo de asignación considera que un sistema primario no se beneficia si su producto es reciclado; es decir, los productos reciclados solo soportan las cargas ambientales de los procesos de reciclaje. Este paradigma se ajusta a la realidad del estudio que se desea modelar, motivo por el cual fue elegido. Tanto el CTCS como el expediente técnico del Edificio Convencional no prevén el uso de material reciclado para la construcción de los edificios. Asimismo, se esta consideró un proceso de manufactura de materiales que no incluye al reciclado como una entrada en sus flujos de producción, dado la práctica común en el país.

Por otro lado, el uso de procesos unitarios de mercado (*Market process*) o producción (*Transformation process*) se rigió en base al nivel de detalle que se tenía sobre cada proceso y su origen. Para los materiales con limitada información sobre el proveedor, se prefirió optar por un inventario de mercado, dado que este engloba datos promedios de producción y transporte a escala global. Asimismo, para algunos materiales importados se optó por inventarios de mercado, ya que no se cuenta con información detallada de su producción. En contraste, los materiales de producción nacional y los importados, a cuya información de manufactura se tuvo acceso, fueron modelados en base a inventarios de transformación y su transporte fue cuantificado con un proceso unitario adicional. Bajo estas consideraciones, se emplearon 39 procesos unitarios para la elaboración del ACV de este estudio, los cuales se muestran en la tabla 5.12.

Tabla 5.12
Lista de procesos

N°	Materiales	Inventario
1	Concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$	Concreto, 20MPa [PE] production, ready mix, Portland
2	Concreto $f'c=175\text{kg/cm}^2$	Concreto, 175 kg/cm ² [PE] producción, premezclado, Portland
3	Concreto $f'c= 350\text{kg/cm}^2$	Concrete, 40MPa {PE} production, ready-mix, Portland
4	Acero en vigueta firth	Reinforcing steel {RoW} production Cut-off, U
5	Acero $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	Reinforcing steel {RoW} production Cut-off, U
6	Ladrillo bovedilla	Light clay brick [RoW] production
7	Ladrillo pandereta	Clay brick {RoW} production Cut-off, U
8	Falso piso mezcla C:H 1:8	Concreto, C:H 1:8 [PE] producción, premezclado, Portland
9	Contrapiso paracerámico	Concreto, 140kg/cm ² [PE] producción, premezclado, Portland
10	Cerámico 30x30cm	Ceramic tile {RoW} production Cut-off, U

Sigue en la página siguiente

N°	Materiales	Inventario
11	Mortero cemento-arena	Cement mortar {PE} production, hand-mixed, on-site
12	Marco de aluminio	Window frame, aluminium, U=1.6 W/m ² K {RoW} production
13	Vidrio laminado	Flat glass, coated {RoW} market for flat glass, coated
14	Marcos de PVC	Window frame, poly vinyl chloride, {RoW} production
15	Vidrio insulado incoloro	Glazing, double, U<1.1 W/m ² K {RoW} production
16	Cola de contacto adhesiva	Glued laminated timber, for outdoor use {GLO} market for
17	Corcho expandido	Cork slab {RoW} production Cut-off, U
18	Lana de vidrio	Glass wool mat {RoW} production Cut-off, U
19	Lana mineral	Stone wool, packed {RoW} stone wool production, packed
20	Malla fibra de vidrio	Glass fibre {RoW} production Cut-off, U
21	Acero AISI 360L	Iron-nickel-chromium alloy {GLO} market for Cut-off, U
22	Acero al carbono	Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} market for Cut-off, U
23	Acero AISI 420	Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} market for Cut-off, U
24	Zincados	Zinc coat, pieces {GLO} market for Cut-off, U
25	Bronce	Casting, bronze {GLO} market for Cut-off, U
26	PVC	Propylene, pipeline system {RoW} production Cut-off, U
27	Propileno etileno fluorado	Propylene, pipeline system {RoW} production Cut-off, U
28	Caucho sintético nitrilo	Synthetic rubber {GLO} market for Cut-off, U
29	Polipropileno	Polypropylene, granulate {GLO} market for Cut-off, U
30	Carburo de silicio	Silicon carbide {GLO} market for Cut-off, U
31	Arena sílicea	Silica sand {GLO} market for Cut-off, U
32	Camion	Transport, freight, light commercial vehicle {RoW}
33	Camion concretero	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}
34	Trailer	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW}
35	Camion rigido	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}
36	Barco de carga	Transport, freight, sea, container ship {GLO}
37	Agua	Tap water {PE} market for tap water Cut-off, U
38	Electricidad	Electricity, low voltage {PE} market for Cut-off, U
39	Diesel	Diesel {PE} market for diesel Cut-off, U

Fuente: Elaboración propia

5.4. Evaluación de impactos

El método de evaluación de impactos que se empleó fue la *Building for Environmental and Economic Sustainability* (BEES) versión 4.08. La metodología BEES 4.0 fue publicada por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de Estados Unidos en el 2007 (Lippiatt, 2007). Esta tuvo actualizaciones hasta el 2018, siendo la última versión BEES v 4.08.

La metodología BEES v 4.08 clasifica los impactos en 13 categorías de impacto ambiental. Estas son el calentamiento global, la acidificación, la salud humana relacionada a la aparición de cáncer, la salud humana relacionada a efectos no cancerígenos, la eutrofización, el agotamiento de recursos, la calidad del aire interior, la alteración del hábitat, el consumo de agua, la contaminación atmosférica, la formación de smog, el agotamiento del ozono y la toxicidad ecológica.

El proceso de caracterización de los impactos de BEES v 4.08 se basa en la herramienta de evaluación ambiental *Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts* del año 2003 (TRACI 1.0) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. TRACI 1.0 emplea dos metodologías para la evaluación de impactos. Por un lado, emplea la metodología Problemas Ambientales, la cual se pasa en dos procesos. El primero es la clasificación de los flujos de inventario que contribuyen a un determinado impacto. El segundo paso es la caracterización de las potenciales contribuciones de cada flujo a su correspondiente impacto ambiental. Bajo esta metodología se valoran los siguientes 11 impactos: el calentamiento global, la acidificación, la salud humana, la eutrofización, el agotamiento de recursos, la alteración del hábitat, la contaminación atmosférica, la formación de smog, el agotamiento del ozono y la toxicidad ecológica. Por otro lado, el consumo de agua y la calidad del aire son evaluados en base a la metodología Uso Directo de Inventarios, lo cual significa que los resultados de los inventarios son directamente usados como una medida del impacto. De esta forma la caracterización de BEES obtiene una puntuación única por cada uno de los 13 impactos en las unidades de referencia que se muestran en la tabla 5.13.

La normalización de BEES tiene por objetivo transformar los resultados de las categorías de impactos a valores conmensurables. Para esto se apoya en la metodología de normalización desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). La normalización consiste en dividir los resultados de las categorías de impacto entre la contribución total estimada por categoría para la realidad de los Estados Unidos en un año y por persona. De esta forma, cada categoría normalizada se convierte en una medida de desempeño del impacto respecto a un contexto fijo de los Estados Unidos. Los factores de

normalización que resultan de la división de estos valores máximos se muestran en la tabla 5.13.

La ponderación de BEES es un mecanismo de síntesis para condensar los resultados de cada categoría en una sola puntuación. Luego de normalizar los resultados de la categoría de impacto, es posible asignar pesos ponderados a cada categoría de acuerdo a un determinado juicio. La ponderación es considerada un paso subjetivo: para algunos autores con poco valor y para otros, necesario. Se puede aseverar que la ponderación de las categorías de impacto normalizadas son un vínculo entre los resultados cuantificables del ACV y elecciones subjetivas basadas en el juicio de los tomadores de decisión (Gloria, Lippiatt, y Cooper, 2007).

Los pesos ponderados que se emplearon en el análisis son los pesos del Panel de Stakeholders BEES (*BEES Stakeholder Panel Importance Weights*). Estos pesos ponderados fueron desarrollados en el 2006 por medio de la conformación de un panel de productores de materiales, usuarios y expertos en ACV de los Estados Unidos. Estos emitieron sus valoraciones sobre la importancia de cada categoría en cuanto a espacio y tiempo; es decir, en referencia a la realidad estadounidense y para una proyección de tres periodos de tiempo: corto plazo (0 a 10 años), mediano plazo (10 a 100 años) y largo plazo (más de 100 años). La metodología que se empleó fue el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process*). De esta forma se obtuvieron los pesos que se muestran en la tabla 5.13.

Los pesos ponderados obtenidos por el Panel de Stakeholders BEES resultó atractivo ya que reúne el conocimiento de diferentes sectores de la construcción por medio de una metodología estructurada y consistente, el Proceso Analítico Jerárquico. Si bien estos pesos están contextualizados en un país y época diferentes, sirven como punto de referencia para la evaluación del desempeño ambiental, mientras no se tenga un estudio local que pondere la importancia de las categorías de impacto en nuestro país.

Tabla 5.13

Características de los pasos de la metodología BEES v4.08

Categoría de impacto	Caracterización	Normalización	Ponderación
	Unidad de categoría	Factor	Peso
Calentamiento Global	g CO ₂ eq	3.91x10 ⁻⁸	29.3
Agotamiento de recursos	superplus MJ	2.83x10 ⁻⁵	9.7
Polución atmosférica	microDALYs	5.21x10 ⁻⁵	8.9
Consumo de agua	litros	1.89x10 ⁻⁶	7.8
Salud humana. efectos cancerígenos	gr C ₆ H ₆ eq	3.00x10 ⁻⁸	7.6
Salud humana, efectos no cancerígenos	gr C ₇ H ₇ eq	5.68x10 ⁻¹²	5.3
Toxicidad ecológica	gr 2,4-D eq	1.91x10 ⁻⁷	7.5
Eutrofización	gr N eq	2.59x10 ⁻⁵	6.2
Formación de smog	gr NO _x eq	6.60x10 ⁻⁶	6.1
Alteración del habitat	T&E count	299	3.5
Calidad del aire interior	gr TVOC eq	2.85x10 ⁻⁵	3.3
Acidificación	milimole H ⁺ eq	1.28x10 ⁻¹⁰	3.0
Agotamiento del ozono	gr CFC11 eq	2.94x10 ⁻³	2.1

Fuente: Lippiatt (2007) y Gloria et al. (2007)

La selección de BEES v 4.08 como la metodología de evaluación de impactos se sustentó en las siguientes tres razones. Primero, BEES fue desarrollada especialmente para el sector construcción (National Institute of Standards and Technology, 2018). Segundo, se buscó una metodología que enfatizara en las categorías de impactos que el CTCS aborda (consumo desmedido de recursos naturales, como el agua y energía, y la producción de gases de efectos invernadero); de tal forma, que se les asigne un peso relativo intermedio o superior y que los resultados de normalización de estas categorías sean independientes. Tercero, era menester obtener una puntuación única referencial del desempeño de los edificios evaluados para así comparar el resultado de esta herramienta de evaluación con las dos restantes; por lo cual, era necesario incluir una metodología capaz de ponderar los resultados de la categoría de impactos con pesos provenientes de un análisis confiable.

Capítulo VI

Aplicación del Método Delphi

6.1. Descripción general

La segunda fase de la metodología consistió en la evaluación de los criterios técnicos del CTCS a través del Método Delphi. Es así que se determinó los requisitos mínimos para crear una vivienda multifamiliar sustentable en la zona urbana de Lima. Para así, evaluar el alcance del CTCS.

Se eligió esta herramienta cualitativa dado la amplitud de definiciones de sostenibilidad. De esta manera, el panel de expertos permitió llegar a un consenso sobre la caracterización de una vivienda sostenible en Lima, pues se pretendió contrastar las opiniones de versados sobre viviendas sostenibles de diferentes escuelas.

La figura 6.1 muestra los pasos del Método Delphi adaptados a los fines de la investigación. En primer lugar, se conformó el panel de expertos. Para luego preparar el primer cuestionario. A continuación, se realizó un proceso iterativo de rondas que inició con el envío del cuestionario y prosiguió con el análisis de los resultados hasta completar el consenso estadístico o completar tres rondas de preguntas. Luego, se aplicó el Método de Monte Carlo para simular el resultado final más probable. Finalmente, se pudo sintetizar las características de una vivienda sostenible en Lima.

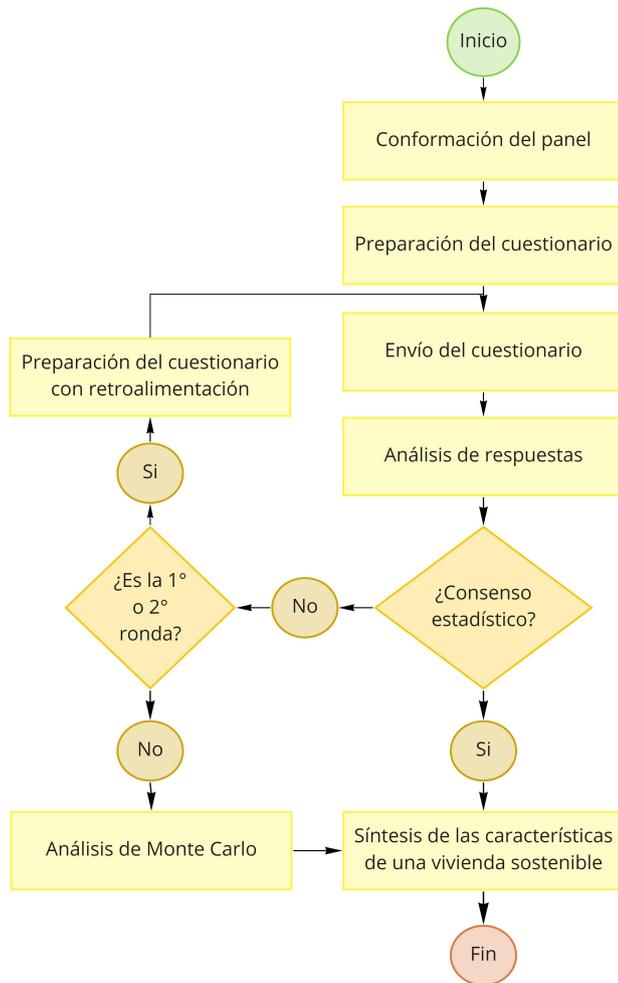


Figura 6.1
 Metodología del Método Delphi
 Fuente: Elaboración propia

6.2. Conformación del panel

La conformación del panel consistió en la determinación de los criterios para seleccionar a los expertos y de la solicitud de participación a los mismos. De esta forma, se determinó el siguiente perfil de cinco características y, luego, se incorporó a 10 profesionales que lo cumplían.

1. Los expertos son profesionales de las carreras de Ingeniería Civil, Arquitectura, Ingeniería Ambiental e Ingeniería Mecánica.
2. Los participantes ejercen como docentes universitarios, investigadores y/o profesionales en relación al tema de sostenibilidad en construcciones civiles.
3. Los panelistas que se seleccionaron cuentan con publicaciones científicas relevantes en

el campo de la sostenibilidad y/o han participado en proyectos de inversión pública o privada representativos afines a temas de sostenibilidad.

4. Los panelistas tienen experiencia en el contexto de la construcción sostenible de Lima.
5. Los expertos no están legalmente relacionados con el Documento Base de la Norma que aprueba el Código Técnico de Construcción Sostenible del año 2015.

Se seleccionó 10 panelistas debido a tres motivos. En primer lugar, reducir el error inherente del método con un panel de más de siete participantes; ya que “a partir de un mínimo de siete expertos el error disminuye notablemente por cada experto añadido” (García y Suárez, 2013). En segundo lugar, tener un razonable período de aplicación del método, puesto que se evaluó el riesgo de demoras en las respuestas. En tercer lugar, anticipar el riesgo de deserción de los panelistas, por lo cual se tiene tres panelistas adicionales al número sugerido. De esta forma, se contó con la participación de tres ingenieros civiles, tres arquitectos, tres ingenieros mecánicos y un ingeniero ambiental.

6.3. Preparación del cuestionario

El cuestionario se centró en la ponderación de los atributos de una vivienda multifamiliar sostenible en Lima. Es así que este cuestionario fue usado en las tres rondas. Para la primera ronda, se generó una lista de cinco características de una vivienda sostenible. Esta fue creada por la investigadora a partir de los criterios técnicos del CTCS y de investigaciones internacionales sobre vivienda sostenible. Estos cinco atributos se evaluaron por medio de las preguntas en recuadro naranja de la figura 6.2. Es así que la incidencia de los materiales en el impacto ambiental de un edificio (A1), el consumo energético ideal en las viviendas por habitante (A2) y el consumo de agua ideal en las viviendas por habitante (A3) son los atributos trabajados en el Código. En cambio, la regulación del uso de tecnología pasiva y activa (A4) y la incidencia de la flexibilidad en la reducción de impactos ambientales (A5) son los atributos cuyas importancias son más resaltadas en la bibliografía internacional.

Segunda y Tercera Ronda

Primera Ronda			
A1	MATERIALES	¿En qué medida las características de los materiales condicionan el impacto ambiental de un edificio?	Desde el 0% hasta el 100% de incidencia
A2	CONSUMO ENERGÉTICO	¿Cuál es el consumo energético ideal en las viviendas por habitante al que debemos aspirar en kWh/mes/hab?	Valores en kWh/mes/hab
A3	CONSUMO HÍDRICO	¿Cuál debe ser el consumo hídrico ideal al que debemos aspirar en lt/día/hab?	Valores en lt/día/hab
A4	TECNOLOGÍA PASIVA Y ACTIVA	¿Considera que se debe regular el uso de tecnología pasiva y activa en las viviendas?	No/Si
A5	FLEXIBILIDAD	¿En qué medida considera que la flexibilidad de un edificio reduce sus impactos ambientales?	Escala de importancia de 1 a 10
A6	RESIDUOS	¿En qué medida el control de los residuos de una vivienda reduce su impacto ambiental?	Desde el 0% hasta el 100% de incidencia
A7	CONFORT TÉRMICO Y LUMÍNICO	¿En qué medida el control del confort térmico y lumínico de una vivienda reduce su impacto ambiental?	Desde el 0% hasta el 100% de incidencia
A8	ENTORNO	¿Cuán importante es relacionar la vivienda con su entorno para reducir sus impactos ambientales (Entiéndase entorno como clima y/o otras edificaciones aledañas)?	Desde el 0% hasta el 100% de incidencia

Figura 6.2
Preguntas del cuestionario
Fuente: Elaboración propia

En la primera ronda, se pidió que valoraran las cinco características presentadas y que sugirieran otros atributos aún no considerados. La segunda ronda, incluyó las mismas preguntas más la adición de tres atributos que fueron obtenidos por la síntesis de los comentarios realizados por los panelistas en la primera ronda. Es así que se incluyó la importancia del control de los residuos de una vivienda para reducir el impacto ambiental (A6), el control del confort térmico y lumínico de una vivienda para reducir su impacto ambiental (A7) y la relación de la vivienda con su entorno para mitigar los impactos ambientales (A8). La última ronda comprendió las ocho preguntas del cuestionario, las cuales fueron respondidas o calificadas según una escala de importancia. Por ello, en la figura 6.2 todas las preguntas están rodeadas por un único recuadro rojo.

6.4. Análisis de respuestas

La segunda y tercera ronda incluyeron el análisis de las respuestas de la ronda anterior debido a dos motivos. Primero proporcionar retroalimentación de los resultados a los panelistas

de cada ronda. La retroalimentación de los resultados de cada una siguió la siguiente mecánica. Por un lado, el procesamiento estadístico de la ponderación de cada atributo se basó en medidas de tendencia central y de dispersión. Por otro lado, en cada iteración se proporcionó a cada experto el cuestionario con las valoraciones anteriores junto al análisis estadístico respectivo. De tal forma, que los panelistas vean la ubicación de su respuesta respecto al grupo y respondan las preguntas en base a ello. Segundo, verificar que el coeficiente de variación de las respuestas de cada pregunta llegue a ser menor o igual 0.1. El coeficiente de variación sirve para llegar al consenso. El valor de 0.1 es empleado para brindar confiabilidad a los resultados y evaluar la existencia de una constante. De esta forma, se descarta o verifica la importancia de cada uno de los ocho atributos propuestos para definir una vivienda sostenible en Lima.

6.5. Análisis de Monte Carlo

La cantidad de rondas no fue suficiente para aseverar con precisión la existencia o falta de consenso en todos los atributos. Por lo cual, se estimó la probabilidad de obtener un coeficiente de variación menor a la de la tercera ronda o menor a 0.1. De esta forma, se desarrolló un análisis más robusto para descartar o validar cada atributo con mayores criterios.

Se aplicó el enfoque clásico de la simulación probabilística del Método Monte Carlo. Por ello, el procedimiento consistió en escribir un programa en un hoja de cálculo que emule el comportamiento de las valoraciones de los panelistas, en donde la variable Coeficiente de Variación de Ronda tiene una distribución normal. Luego, se utilizó un generador de números aleatorios para modelar los aspectos probabilísticos de este sistema (Najarian, 2020). De esta forma, se determinó los posibles coeficientes de variación de cada atributo que se obtendrían en 10 000 rondas virtuales del Método Delphi. Finalmente, se calculó la probabilidad de obtener un coeficiente de variación menor a la Ronda 3 y la probabilidad de obtener un coeficiente de variación menor a 0.1.

Capítulo VII

Comparación con una Passive House

7.1. Descripción general

La tercera herramienta de evaluación fue el análisis comparativo con una Passive House. En este apartado se comparó el modelo Passive House y el Edificio Rediseñado. Para así, evaluar la capacidad de los criterios técnicos del CTCS de asegurar la eficiencia energética según estándares internacionales acreditados por la comunidad científica y profesional.

Este procedimiento se realizó en base a dos características del modelo Passive House. Primero, la transmitancia térmica (U) esperada de muros, techos, pisos y vanos. Segundo, el consumo de energía primaria máxima anual por área techada de una unidad familiar. Se eligió solo estas propiedades, ya que son las que se trabajan en el CTCS en cuanto a eficiencia energética.

La metodología del trabajo siguió los siguientes pasos, los cuales también se ilustran en la figura 7.1. Primero, se calculó la transmitancia térmica y el consumo de energía primaria anual del Edificio Convencional y Rediseñado. Paralelamente, se recopiló la transmitancia térmica y el consumo de energía primaria anual de más de 10 passive house construidas alrededor del mundo. Para así, evaluar estadísticamente todos estos valores, tomando en cuenta los límites máximos establecidos por el Passive House Institute. Finalmente, se interpretó los resultados.

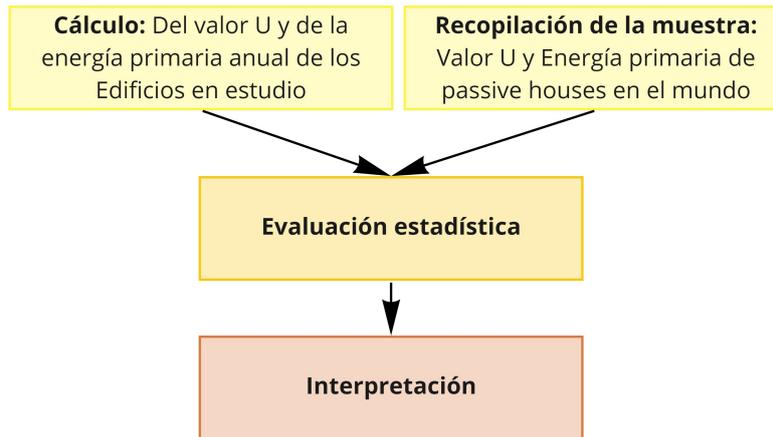


Figura 7.1
 Metodología del análisis comparativo con una Passive House
 Fuente: Elaboración propia

7.2. Cálculo energético

7.2.1. Transmitancia térmica

La transmitancia térmica fue determinada para los muros, el techo, el piso y los vanos del Edificio Convencional y del Rediseñado. Los cálculos se apoyaron en tres premisas. Primero, no se consideraron puentes térmicos. Segundo, se consideró la resistencia de aire externo e interno en todos los análisis, incluidos vanos. Tercero, solo se analizó un modelo del Edificio Rediseñado, ya que las tres envolventes que se diseñaron (corcho, lana de vidrio y lana mineral) tienen la misma transmitancia final.

Muros

Existen tres tipos de muros en el Edificio Convencional y Rediseñado. El Edificio Convencional cuenta con 1 851 m² de placas de 10 cm de espesor (a), 712.3 m² de placas de 15 cm de espesor (b) y 802.1 m² de muros de tabiquería de canto (c). El Edificio Rediseñado tiene los mismos muros, pero con la adición del aislamiento. Tal como se muestra en la figura 7.2, se puede verificar que son los mismos muros del Edificio Convencional con capas adicionales de aislante.

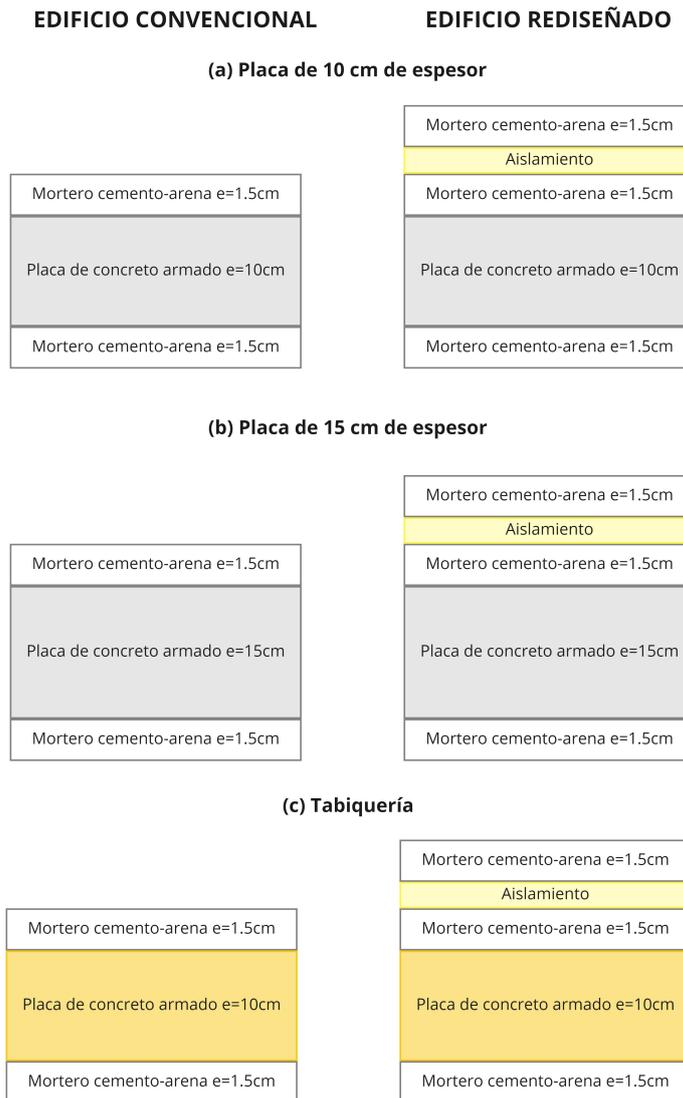


Figura 7.2
 Corte transversal de los muros
 Fuente: Elaboración propia

La transmitancia térmica fue determinada para cada uno de los tipos de muro y luego se ponderó estos valores en relación al área vertical que ocupan. De esta forma, se obtuvo que los muros del Edificio Convencional tienen $3.52 \text{ W/m}^2\text{K}$ de transmitancia térmica y los muros del Edificio Rediseñado tienen $2.13 \text{ W/m}^2\text{K}$. Estos fueron calculados a partir de las transmitancias térmicas de cada tipo de muro, tal como se muestra en la tabla 7.1.

Tabla 7.1
Transmitancia térmica de los muros

Muro	Área (m ²)	U (W/m ² K)	
		Edificio Convencional	Edificio Rediseñado
Placa de 10cm	1 851	3.96	2.29
Placa de 15cm	712.3	3.53	2.14
Tabiquería	802.1	2.53	1.73
Valor U ponderado		3.52	2.13

Fuente: Elaboración propia

Vanos

El Edificio Convencional está compuesto por vidrios laminados y carpintería de vanos de aluminio. En cambio, el Edificio Rediseñado cuenta con vidrio insulated 4/9/4 y PVC como carpintería. En la figura 7.3 se puede visualizar las diferencias entre cada tipo de vano. Por otro lado, los resultados de la transmitancia de cada tipo de vano se encuentra en la tabla 7.1 para ambos edificios. Del mismo modo que el caso de los muros, se determinó un valor de transmitancia térmica ponderado para el vano en su conjunto considerando el vidrio y la carpintería usada en todo el edificio. Es así que para el Edificio Convencional cuenta con una transmitancia de 2.82 W/m²K, a diferencia del vano del Edificio Rediseñado con un valor menor de 1.91 W/m²K.

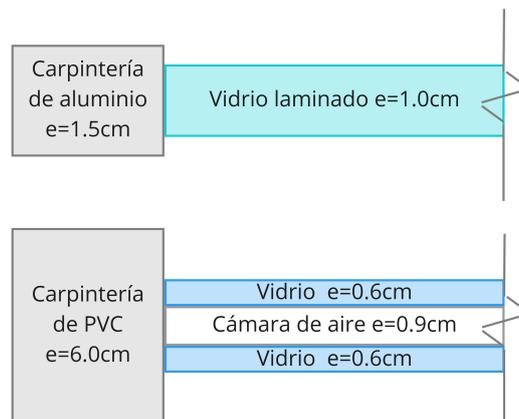


Figura 7.3
Corte transversal de los vanos
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.2
Transmitancia térmica de los vanos

Vanos	Edificio Convencional		Edificio Rediseñado	
	Área (m ²)	U (W/m ² K)	Área (m ²)	U (W/m ² K)
Vidrio	1 166	2.82	976.5	1.99
Marco	72.3	2.89	262.1	1.60
Valor U ponderado		2.82		1.91

Fuente: Elaboración propia

Techo

Se identificó tres secciones transversales diferentes que forman parte del techo de la torre. La primera es la parte de las losas aligeradas construidas en base al ladrillo bovedilla, la cual ocupa un área de 225.4 m². La segunda sección transversal es la correspondiente a la vigueta firth de la losa aligerada que ocupa 50.6 m² del techo. La última sección transversal se extiende en 50.8 m² y pertenece a la losa maciza del techo. La distribución de las capas que componen estos tres elementos del techo se muestra en la figura 7.4. Ambos edificios cuentan con el mismo techo exterior, por lo cual ambos tienen 2.0 (W/m²K) de transmitancia térmica en este elemento. En la tabla 7.3 se puede verificar las transmitancias parciales de cada tipo de techo.



Figura 7.4
Corte transversal de las losas del techo
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.3
Transmitancia térmica del techo

Techo	Área (m²)	U (W/m²K)
Bovedilla	225.4	1.58
Vigueta firth	50.6	2.76
Maciza	50.8	3.20
Valor U ponderado		2.01

Fuente: Elaboración propia

Piso

El piso en contacto con el suelo natural del edificio original no requirió aislamiento adicional. Esto se debe a que la transmitancia de este elemento se encuentra por debajo de los valores máximos indicados en el CTCS. Por ello, se cuenta con una única transmitancia térmica para ambos modelos. Este valor es de 2.40 W/m²K, tal como se visualiza en la table 7.4, y es obtenido en base a las capas del piso de la torre que se muestran en la figura 7.5.



Figura 7.5

Corte transversal del piso

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.4
Transmitancia térmica del piso

Piso	Área (m²)	U (W/m²K)
Concreto	334.6	2.40
Valor U ponderado		2.40

Fuente: Elaboración propia

7.2.2. Consumo de energía primaria

El segundo parámetro por el cual se evaluó el edificio es el consumo de energía primaria por área construida. Es así que se determinó la energía primaria consumida por vivienda del

Edificio Convencional y Rediseñado. Para ello, se usó la energía final promedio requerida por cada departamento y las pérdidas por generación, transmisión y distribución.

Por un lado, la energía final resulta ser el consumo energético según los aparatos instalados en el departamento. Para el caso del Edificio Convencional este asciende a 6.1 MW-h/año y para el Edificio Rediseñado es de 5.3 MW-h/año. Por otro lado, el porcentaje de pérdidas fueron obtenidos del estudio *La Industria de la Electricidad en el Perú: 25 años de aporte al crecimiento económico del país* del Osinergmin (2016). Para el presente estudio se empleó los valores correspondientes al año 2015. Por ello, el porcentaje de pérdida por transmisión es de 3.8% respecto al total de la producción y el porcentaje de pérdida por distribución es de 7.5% de la energía entregada a las redes. Es importante mencionar que el porcentaje de pérdida por generación se estimó tomando en cuenta las diversas fuentes de generación eléctrica de nuestro país y su respectivo rendimiento publicado en la fuente mencionada.

De esta manera se obtuvo que el consumo anual de energía primaria por departamento del Edificio Convencional es de 10.0 MW-h, mientras que del Edificio Rediseñado es de 8.8 MW-h al año. Considerando un área por departamento de 70.5 m² se obtiene un consumo anual por departamento y área construida de 142.4 kW-h/m²-año para el Edificio Convencional y de 125.4 kW-h/m²-año para el Edificio Rediseñado, tal como se ilustra en la tabla 7.5.

Tabla 7.5
Consumo de energía primaria anual de un departamento del edificio

Parámetro		E. Convencional	E. Rediseñado
Consumo diario de energía final	kW-h/día	16.6	14.6
Consumo anual de energía final	MW-h/año	6.1	5.3
Pérdida de energía por distribución	%	7.5	7.5
Pérdida por transmisión (Año 2015)	%	3.8	3.8
Pérdida por generación (Año 2015)	%	37.0	37.0
Consumo anual de energía primaria	MW-h/año	10.0	8.8
Área departamento	m ²	70.5	70.5
Consumo anual	kW-h/m ² -año	142.4	125.4

Fuente: Elaboración propia

7.3. Recopilación de la muestra

El Passive House Institute establece valores máximos para la transmitancia térmica y el consumo de energía primaria anual. La transmitancia térmica máxima para paredes, techos y pisos es 0.15 W/m²K. En cambio para las ventanas, fija el valor de 0.85 W/m²K. Por otro lado,

el consumo de energía primaria esperado de una Passive House es de 120 kW-h/m²-año. En conjunto con otras características de la vivienda, estos valores asegurarían el confort térmico dentro de la vivienda, debido a que se reduce el uso de fuentes activas de energía que regulan la temperatura interior. Y, a su vez, esto reduce la producción de gases de efecto invernadero como el CO₂. Bajo esta premisa, se han ido desarrollando varios prototipos de Passive House, en particular en el primer mundo.

En la figura 7.6, se muestran 14 viviendas Passive House, cuyas características fueron adaptadas al clima, cliente y legislación de cada país donde fueron construidas. La información fue obtenida a partir de publicación de los resultados de los siguientes estudios: Bruno et al. (2017), Belpoliti et al. (2020), Yan et al. (2017), Truong y Garvie (2017), Elsarrag y Alhorr (2012), Lee et al. (2020), Iorsache et al. (2016), Rehab et al. (2015), Stephen et al. (2013), Dodoo y Gustavsson (2013), Liang et al. (2017), Ekstrom y Blomsterberg (2016), Alajmi et al. (2018) y Georges y Mathisen (2015).

En el caso de los muros, techos y pisos, las localidades que presentaron una transmitancia térmica mayor a la línea horizontal que corta el eje de las ordenadas en 0.15 no cumplieron con el aislamiento térmico exigido por el estándar Passive House. Asimismo, para el caso de los vanos, las localidades que presentaron una transmitancia térmica por encima de la línea horizontal que corta el eje de las ordenadas en 0.85 no cumplieron con los valores recomendados por este modelo internacional. En la figura 7.6, se puede verificar que el Edificio Rediseñado no cumplió con la transmitancia térmica pedida por la Passive House. Además, su valor fue escandalosamente superior al sugerido, lo cual lo ubicó en los últimos lugares. Por otro lado, se aprecia que aproximadamente el 50% de los casos estudiados no tuvo el aislamiento exigido.

Por otro lado, se recolectó información sobre el consumo de energía primaria anual de 10 Passive Houses. Las fuentes consultadas corresponden a publicaciones en revistas, las cuales son: Lee et al. (2020), Dodoo and Gustavsson (2013), Piccardo et al. (2020), Stephan et al. (2013), Iordache et al. (2016), Truong y Garvie (2017), Liang et al. (2017), Alajmi et al. (2018) y Liang X et al. (2017). En la figura 7.7, se comprueba que el Edificio Rediseñado tampoco cumplió con lo estipulado por el estándar. El edificio consumió 125.4 kW-h/m²-año, ligeramente superior a los 120 kW-h/m²-año requeridos. Además, solo el 50% de las viviendas denominadas Passive House cumplen con el consumo primario máximo.

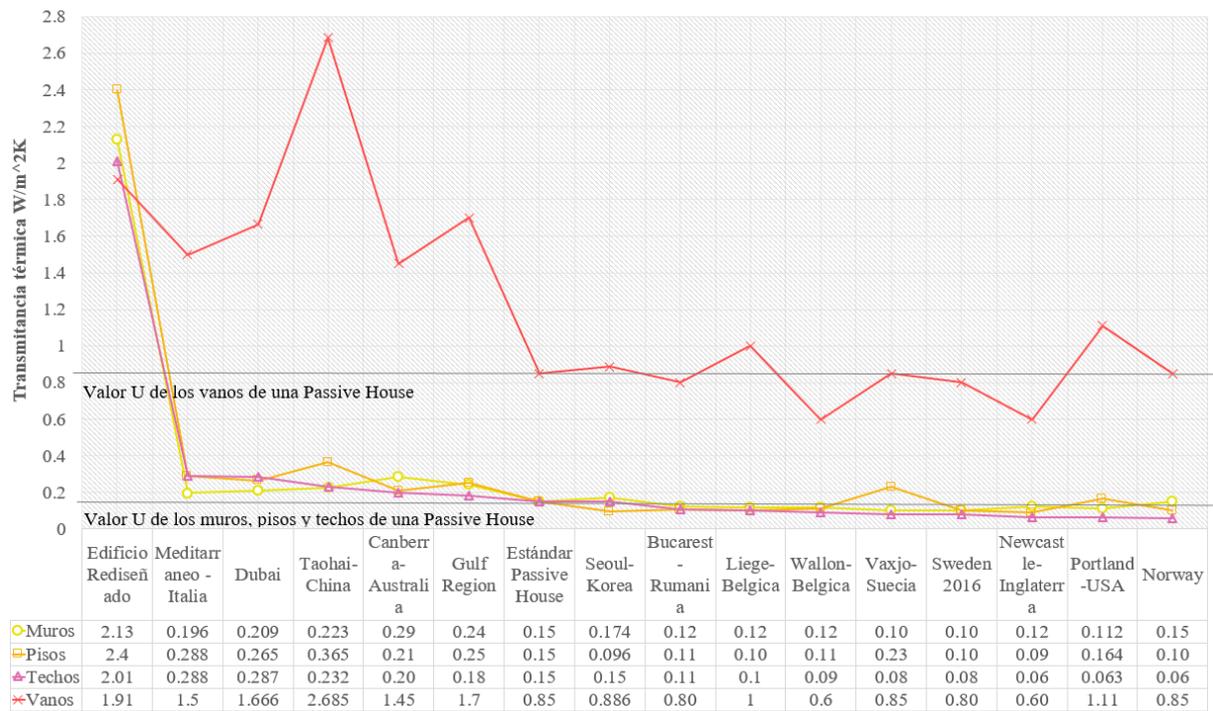


Figura 7.6
 Nivel de aislamiento alrededor del mundo
 Fuente: Elaboración propia

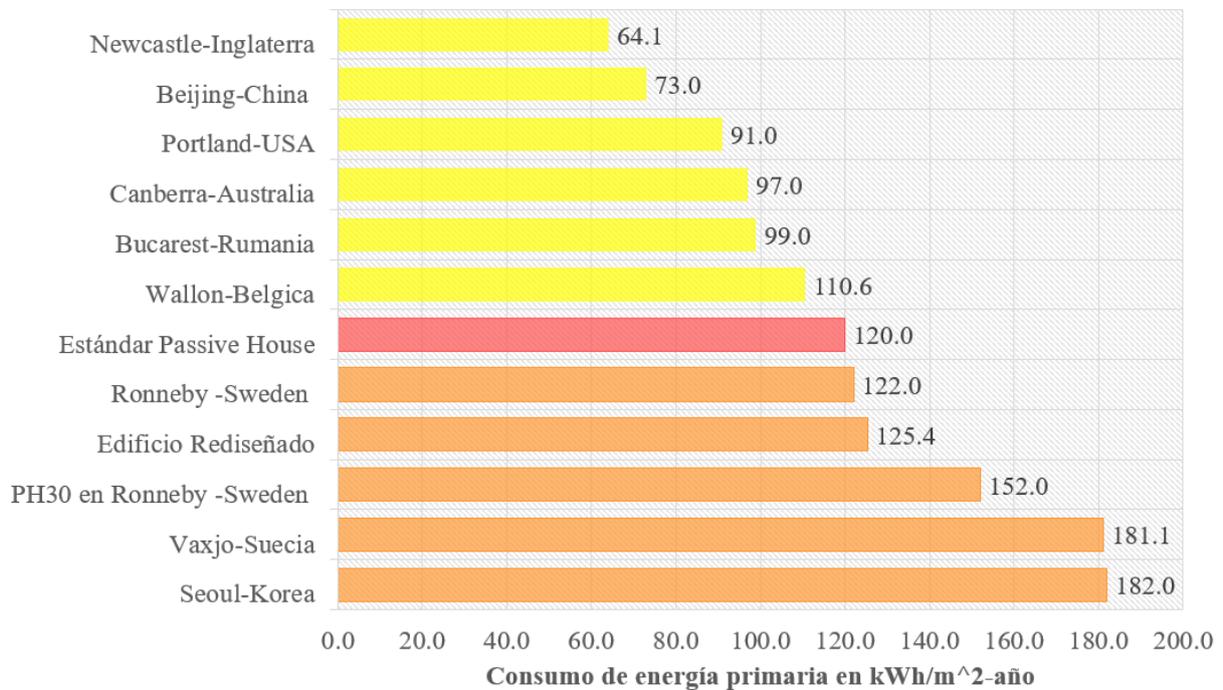


Figura 7.7
 Consumo de energía primaria anual
 Fuente: Elaboración propia

7.4. Evaluación estadística

Se realizó dos tipos de análisis. En primer lugar, la detección de datos atípicos. Esto se realizó para identificar estadísticamente si los valores de transmitancia térmica y consumo de energía primaria anual del Edificio Convencional escapan de la definición de una Passive House. Para ello, se usó el gráfico Boxplot que permite identificar la dispersión y datos anormales. En segundo lugar, la evaluación de diferencias entre grupos. Con esto se buscó identificar si existe variación de la transmitancia térmica debido al tipo de elemento (muros, techos, pisos y ventanas).



Capítulo VIII

Resultados

8.1. Impactos ambientales de la vivienda en estudio

8.1.1. Caracterización de impactos

La categoría Calidad del aire interior no tuvo flujos de entrada y salida, por lo cual no se registro un resultado en la caracterización de esta categoría. Los materiales que podrían emitir Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC por sus siglas en inglés) son la lana de vidrio y la lana mineral, dos de los aislantes usados en los rediseños. Sin embargo, el riesgo de la emisión de esta sustancia es nula o mínima cuando su instalación es correcta. Por otro lado, la metodología BEES asume que estos aislantes son correctamente instalados, por lo cual no se emitiría VOC. Por tal motivo, al ser estos dos aislantes la única fuente de VOC, no se registró un resultado en esta categoría.

Los tres rediseños del edificio original tuvieron prácticamente el mismo desempeño ambiental. Tal como se muestra en la figura 8.1, el edificio rediseñado en base a corcho expandido fue el que posee peor desempeño de los tres rediseños en todas las categorías. Sin embargo, esta diferencia fue como máximo del 0.2% respecto a los otros rediseños. Dado que los resultados de las categorías fueron muy similares, en el gráfico 8.2 se muestra el promedio de los resultados de los tres rediseños en contraste con el desempeño del Edificio Convencional.

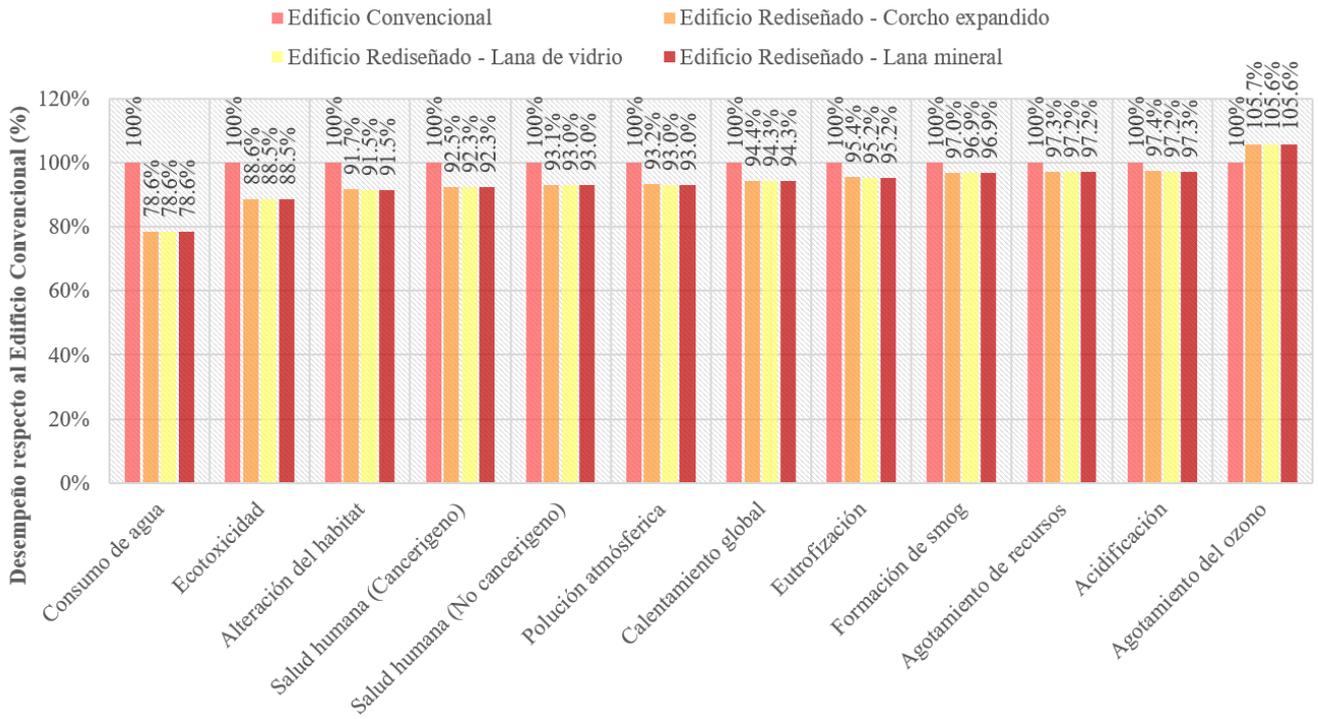


Figura 8.1
Caracterización de impactos
 Fuente: Simapro

Por otro lado, la aplicación de los criterios técnicos del CTCS incrementaron el desempeño ambiental del edificio en 11 de 12 categorías ambientales. En la figura 8.2, las categorías están ordenadas según la efectividad del CTCS para reducir el impacto. El impacto con mayor éxito de mitigación fue el consumo de agua: existe una reducción del 21% que representa 1 767 m³. Luego, tenemos a la Ecotoxicidad (11.4%), la Alteración del hábitat (9.3%), la Salud humana referente al cáncer (7.5%), la Salud humana referente a efectos no cancerígenos (7%), la polución atmosférica (6.9%), el calentamiento global (5.7%) y la eutrofización (4.7%). Y en menor medida, la formación de smog se redujo en 3%, el agotamiento de recursos en 2.7% y la acidificación en 2.7%.

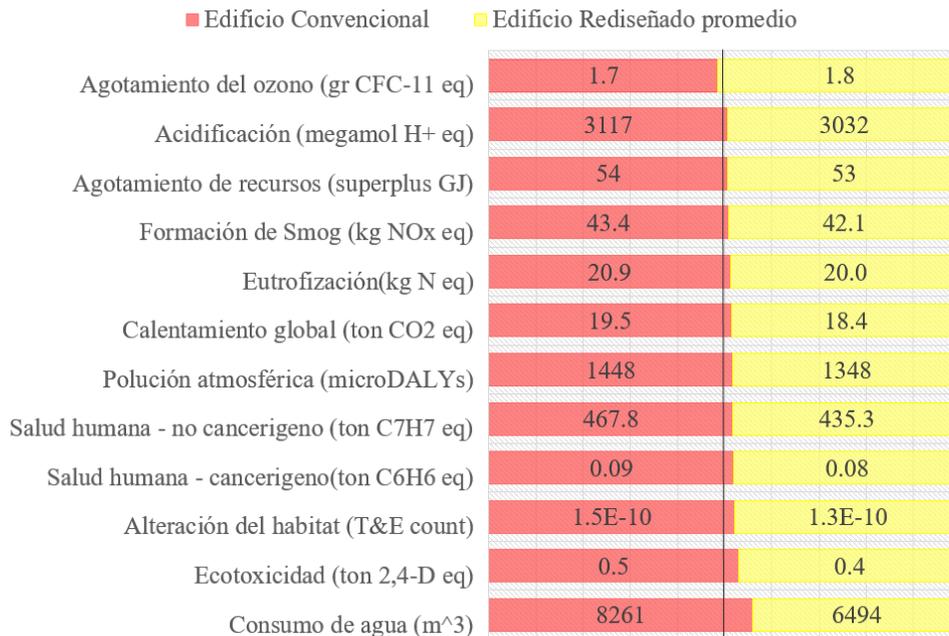


Figura 8.2
Impacto ambiental de los edificios por categoría
Fuente: Elaboración propia

La variación del consumo de agua se debió principalmente a cinco procesos. Estos reunieron el 99 % del consumo de agua en cada edificio. Como se aprecia en la figura 8.3 fueron tres los procesos principales que generan un impacto negativo en esta categoría: la producción del agua potable por medios convencionales (*Tap Water PE, tap water production, conventional treatment*), la producción de electricidad de alto voltaje por medio de hidroeléctricas (*Electricity, high voltage PE*) y la producción de agua potable por medios de filtración (*Tap Water PE, tap water production, direct filtration treatment*). Por otro lado, hubo dos procesos que tuvieron un impacto neto positivo, es decir, contribuyeron en devolver agua al ambiente. Estos fueron el tratamiento de agua residual (*Wastewater, unpolluted ROW, treatment of*) y la comercialización de agua potable (*Tap water PE, market for tap water*).

La incidencia de estos cinco procesos en el consumo total de cada edificio presentó las siguientes características. En primer lugar, la producción de agua potable por medios convencionales y la comercialización de agua potable fueron procesos dependientes; por tal motivo, el consumo de agua de ambos procesos variaron en la misma proporción. En segundo lugar, la proporción de agua consumida por la producción de energía eléctrica de alto voltaje por medio de hidroeléctricas fue mayor en el Edificio Rediseñado en contraste con el Convencional. En tercer lugar, la suma de los valores absolutos de las entradas y salidas de agua al sistema del Edificio Convencional fue mayor al sistema del Edificio Rediseñado; es decir, el Edificio

Rediseñado perturbó en menor cantidad el sistema de agua cruda.

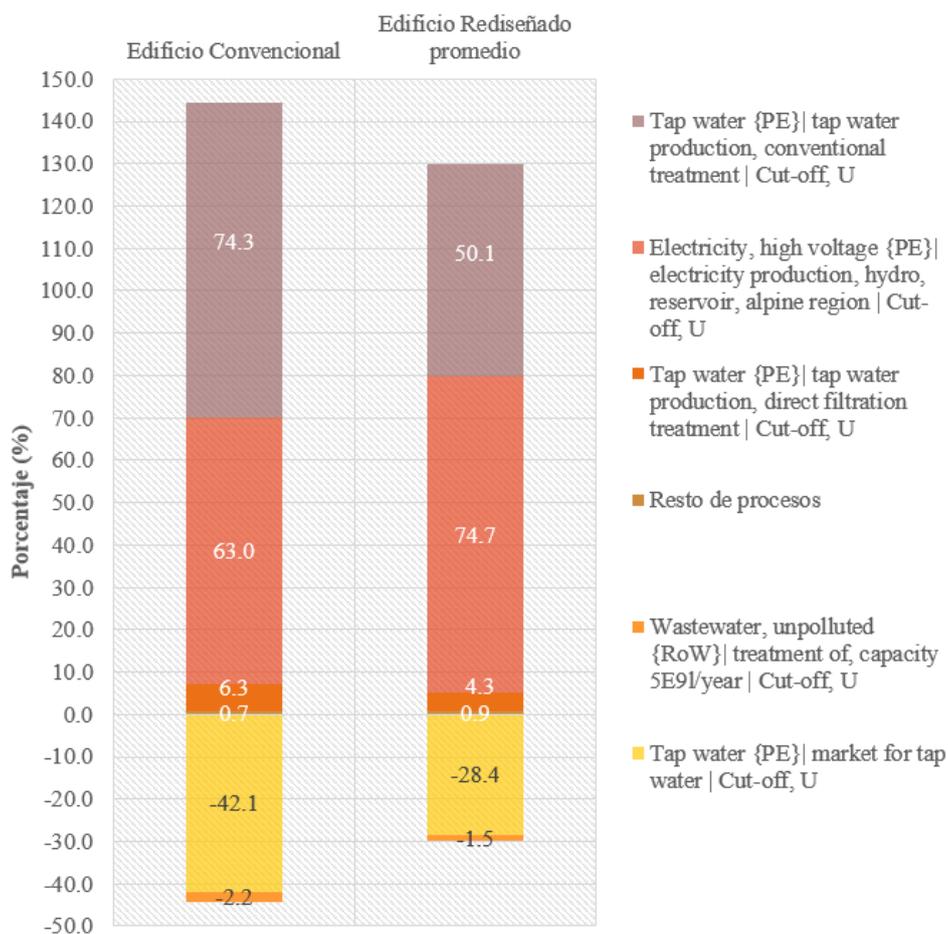


Figura 8.3
 Nivel de impacto de los procesos que consumen agua
 Fuente: Elaboración propia

Los procesos que contribuyeron a la categoría de Calentamiento global se muestran en la figura 8.4. El 75% de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) emitido en ambos edificios correspondió a la producción de energía eléctrica de alto voltaje que proviene de fuentes de energía no renovables. Para el caso del Edificio Convencional este porcentaje representó 14.7 ton de CO₂ eq; en cambio, para el Edificio Rediseñado, representó 13.8 ton CO₂ eq.

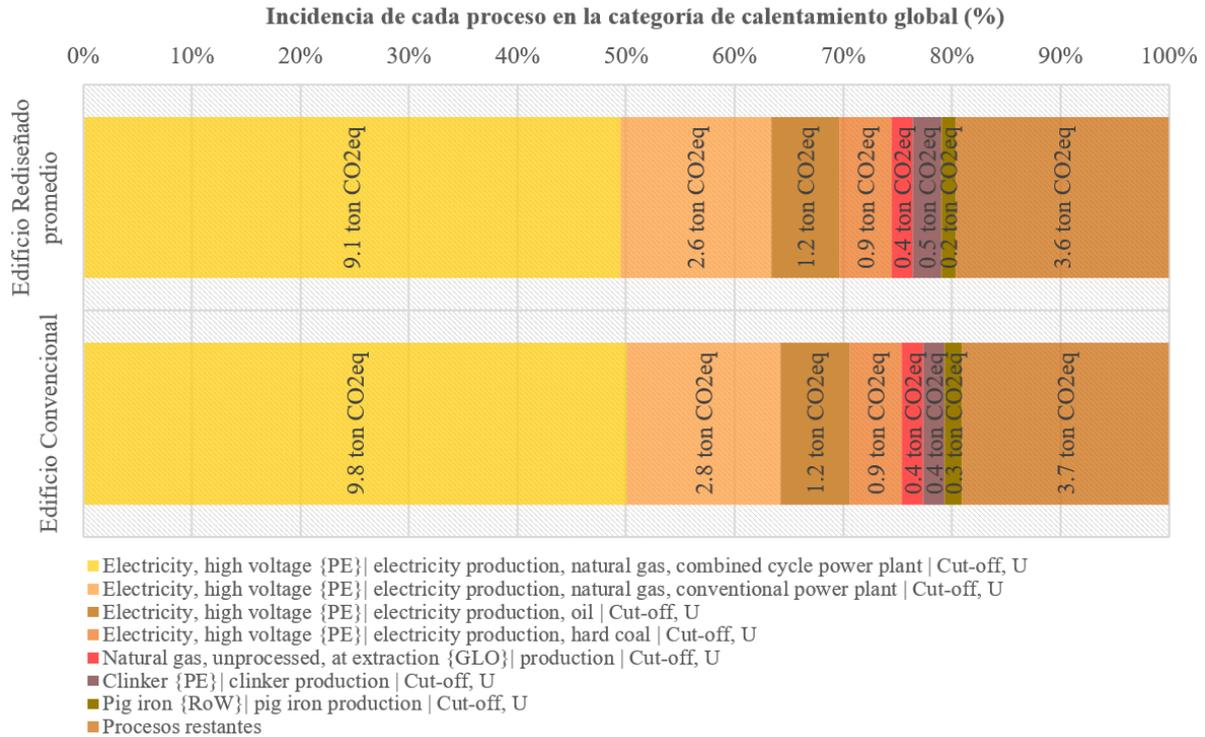


Figura 8.4

Nivel de impacto de los procesos que contribuyen al calentamiento global

Fuente: Elaboración propia

La única categoría donde el CTCS resultó más perjudicial fue el Agotamiento de ozono. Es así que, debido al CTCS, hubo un incremento del 5.7% en el impacto en esta categoría. La revisión de los procesos, determinó que el 3% de este incremento de triclorofluorometano equivalente (CFC 11 eq) se debió a que el Edificio Rediseñado requirió una mayor producción de petróleo crudo y gas.

A continuación se analizó la incidencia de cada etapa del ciclo de vida de ambos edificios en cada categoría. En primer lugar, en ambos edificios, la etapa de Uso fue la que reunió las mayores salidas de los procesos y en la mayoría de categorías, la etapa de Construcción fue la que poseyó menor influencia en el resultado global. En segundo lugar, la etapa de Producción del edificio incrementó tenuemente su influencia posteriormente a la aplicación del CTCS. Esto ocurrió en todas las categorías, tal como se puede apreciar en la figura 8.5, donde las siglas ER refieren al Edificio Rediseñado y las siglas EC al Edificio Convencional, la incidencia de la etapa de Producción del ER disminuyó en promedio en 18% respecto a la del EC. En tercer lugar, la etapa de Construcción incrementó considerablemente su incidencia en el resultado global luego de aplicar el CTCS; en promedio en 2100% en todas las categorías. Finalmente, en todas las categorías de impacto, se presentó un leve incremento de la incidencia de la etapa

de Fin de vida en el resultado global del edificio después de aplicar los criterios técnicos del CTCS, en promedio, el incremento fue en 23 %.

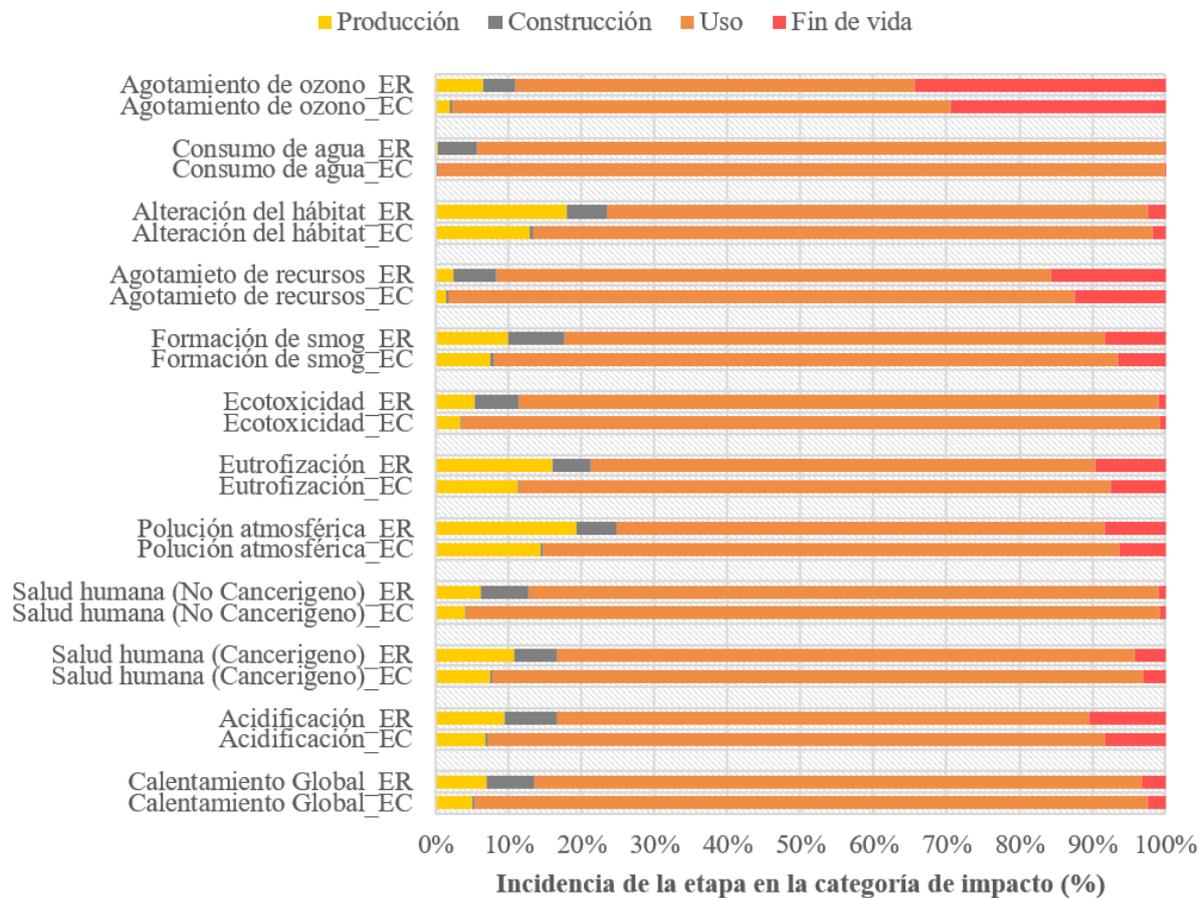


Figura 8.5
 Nivel de incidencia cada etapa en las categorías de impacto de ambos edificios
 Fuente: Elaboración propia

8.1.2. Normalización de impactos

La normalización permitió identificar tres grupos de categorías de impactos. Estas fueron calificadas por su magnitud relativa respecto al impacto máximo considerado en cada categoría para la realidad de los Estados Unidos. El primer grupo englobó a las categorías con un notable aporte relativo. Tal como se aprecia en la figura 8.6, la categoría de consumo de agua se ubicó en este grupo en ambos edificios. El segundo grupo constó de las categorías con un mediano peso relativo; es decir, con un puntaje normalizado entre 0.2 y 1.6. Aquí encontramos, en orden de importancia, al agotamiento de recursos, el calentamiento global, la eutrofización y la formación de smog. Por último, el tercer grupo reunió a las categorías con un peso relativo mínimo; en otras palabras con un puntaje menor a 0.1. En este grupo se agruparon a la ecoto-

xicidad, la contaminación atmosférica, el agotamiento del ozono, la salud humana, la acidificación y la alteración del hábitat.

Por otro lado, la diferencia entre edificios en cada categoría mantiene la misma proporción de los resultados de la caracterización. Esto se produjo por las implicancias matemáticas del proceso de normalización.

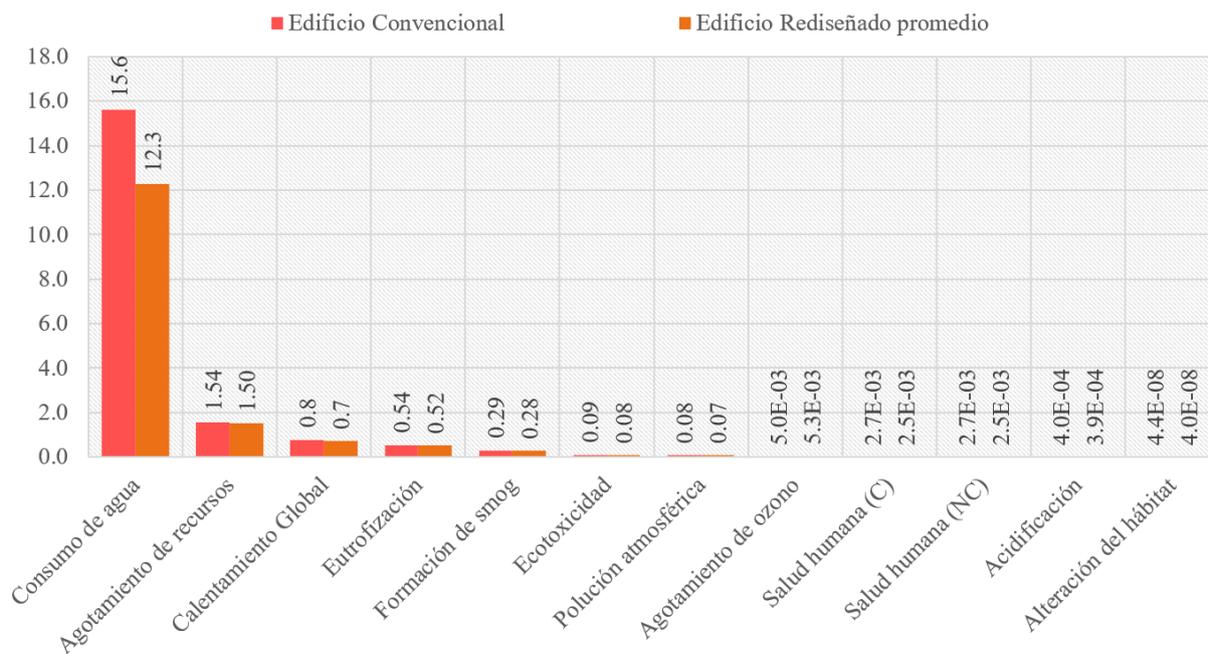


Figura 8.6
Comparación de los resultados de normalización del Edificio Convencional y Rediseñado
 Fuente: Elaboración propia

8.1.3. Ponderación de impactos

El principal resultado de la ponderación de impactos fue la puntuación única de cada edificio. Como se aprecia en la figura 8.7, el Edificio Convencional tuvo una puntuación de 164.4 pt; en cambio, el Edificio Rediseñado tuvo 136.5 pt. Es decir, el Edificio Rediseñado tuvo 17 % menos impacto ambiental que el Edificio Convencional, según la ponderación de la metodología BEES v 4.08 del Panel de Stakeholders.

La etapa de Uso fue la de mayor aporte de impactos en ambos edificios. Por un lado, esta etapa concentró el 97 % de los impactos del Edificio Convencional. Por otra parte, la etapa de Uso del Edificio Rediseñado concentró el 90 % de los impactos.

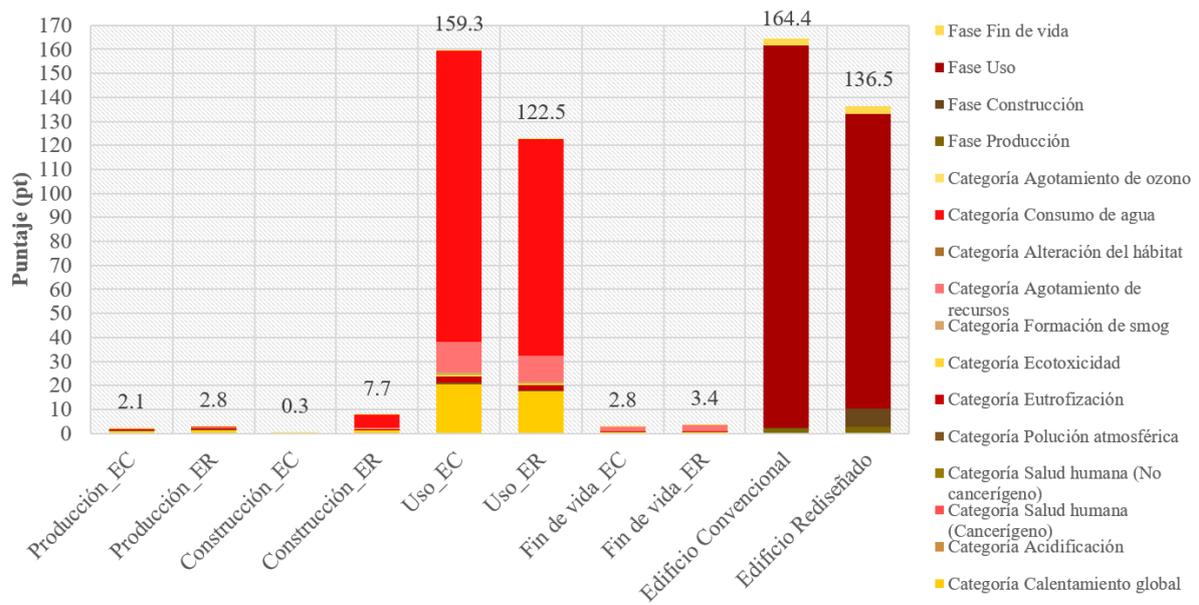


Figura 8.7
Ponderación de impactos según las etapas del ciclo de vida del edificio
 Fuente: Elaboración propia

El impacto de la etapa de Uso fue el único que disminuyó debido al CTCS. El puntaje de la etapa de Uso del Edificio disminuyó desde 159.3 pt a 122.5 pt luego de aplicar el CTCS. En cambio, el puntaje de la etapa de Producción aumentó de 2.1 pt a 2.8 pt; en la etapa de Construcción, de 0.3 pt a 7.7 pt; y, en la etapa de Fin de vida del edificio, el puntaje del impacto se incrementó desde 2.8 pt a 3.4 pt. Todas las facciones de las categorías que intervienen en la fase Producción disminuyeron. Como se puede ver en la figura 8.8, el decremento varía entre el 14% y 26%, siendo el Consumo de agua, la categoría con mayor porcentaje de reducción.

Por otra parte, la etapa de Construcción fue la fase de mayor variación. El mapa de calor de la figura 8.8 muestra que cada facción de las categorías de impacto involucradas en esta etapa, incrementaron sus valores luego que se aplicara los criterios técnicos del CTCS al edificio. Es así que los incrementos fueron enormemente significativos, ya que como mínimo hubo un incremento de 1163% en la categoría del Alteración del hábitat, y como máximo se tuvo el valor de 3303% de incremento en la categoría Consumo de agua.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			
	Producción	Construcción	Uso	Fin de vida
Calentamiento global	130%	2333%	85%	123%
Acidificación	134%	2204%	84%	123%
Salud humana (Cancerígeno)	132%	2440%	82%	123%
Salud humana (No cancerígeno)	144%	2696%	85%	123%
Polución atmosférica	125%	1601%	79%	123%
Eutrofización	136%	1846%	81%	123%
Ecotoxicidad	139%	2830%	81%	123%
Formación de smog	128%	1833%	84%	123%
Agotamiento de recursos	156%	2572%	86%	123%
Alteración del hábitat	128%	1163%	80%	123%
Consumo de agua	146%	3303%	74%	124%
Agotamiento de ozono	361%	1689%	85%	123%

Figura 8.8

Mapa de calor de la proporción de los resultados del Edificio Rediseñado respecto al Edificio Convencional

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la influencia de cada categoría, el Consumo de agua y el Calentamiento global fueron las categorías más trascendentes. Debido a que concentraron más del 80% del impacto global en cada edificio como se ilustra en el diagrama de Pareto de la figura 8.9. La diferencia de aporte de estos dos impactos en el resultado global de cada edificio fue de 2%, con el mayor valor a favor del Edificio Convencional. En el caso del Consumo de agua, este impacto tuvo una importancia del 73.9% en el puntaje global del Edificio Convencional; en cambio, para el Edificio Rediseñado, esta categoría representó el 70%. En el caso del Calentamiento global, el peso relativo de esta categoría en el impacto global del Edificio Convencional fue de 13.5%, a diferencia del peso relativo de 15.4% que tuvo esta categoría en los resultados del Edificio Rediseñado.

El desempeño ambiental de ambos edificios en cada categoría fue semejante, con una ligera tendencia a la mejora en el Edificio Rediseñado. Hubo una sola categoría donde se presentó una mejora clara en el desempeño debido a la aplicación del CTCS: el Consumo de agua, ya que hubo una reducción de impacto de 21%. Luego, la Ecotoxicidad se redujo en 11%. La Alteración del hábitat y el Perjuicio a la salud humana con efectos cancerígenos se redujeron cada uno en 8%. La Polución atmosférica y el Perjuicio a la salud humana con efectos no cancerígenos fueron las dos categorías con una reducción del 7%. Por otro lado, la contribución en el Calentamiento global se redujo en 6%. La efectos que provocan la Eutrofización se redujeron en 5%. El resto de categorías presentó una reducción del 3%, excepto por el Agotamiento de

ozono, el cual se incrementó en 6% debido a la aplicación del CTCS.

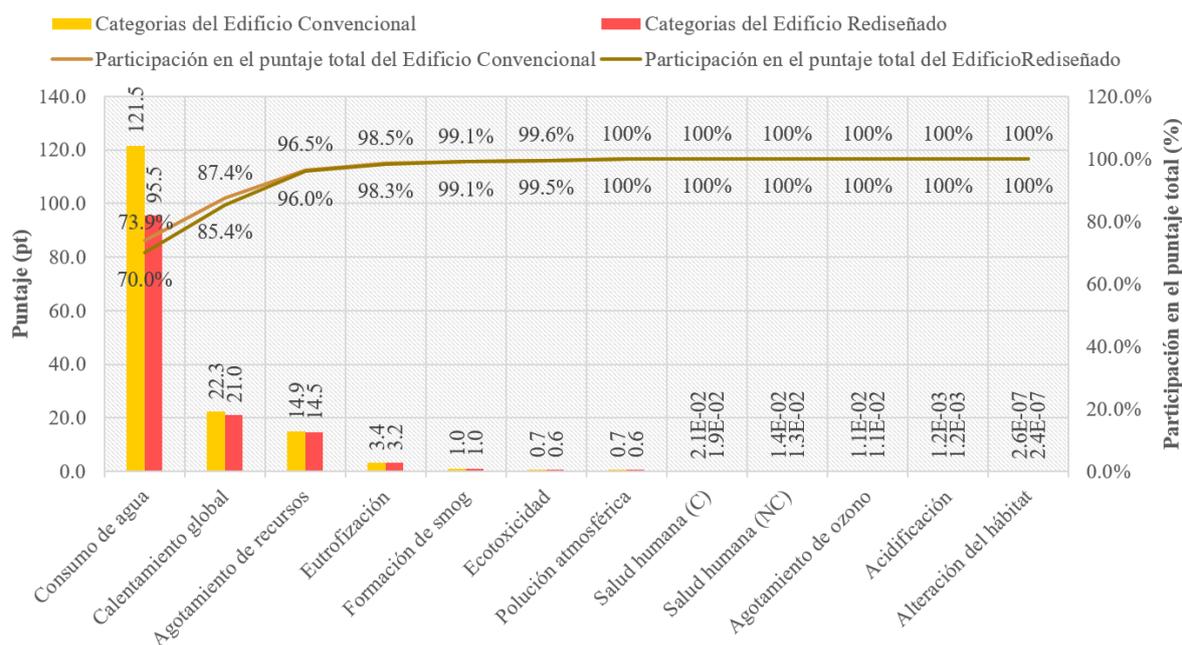


Figura 8.9
 Diagrama de Pareto de las categorías de impacto
 Fuente: Elaboración propia

8.1.4. Evaluación del material aislante

Los resultados de la figura 8.1 determinaron que el impacto del edificio rediseñado era indiferente al uso del aislante. Sin embargo, un ACV de la disposición de un 1kg de aislante en contraposición a la cantidad necesaria de este material en el edificio, para cumplir las exigencias del CTCS arrojaron otros resultados. En la figura 8.10 se verifica que la lana de vidrio de baja densidad tuvo mayor impacto por kilogramo, seguido de la lana mineral de baja densidad y el corcho expandido. Sin embargo, al realizar el análisis de inventario de la cantidad de cada aislante por metro cuadrado de área techada del edificio, el corcho expandido produjo mayor impacto (Aislante A: corcho expandido UF).

En resumidas cuentas, usar el corcho expandido en la edificación impactó seis veces más que emplear la lana de vidrio, el aislante más contaminante por kilogramo de producción. Esto se verifica en la figura 8.10, donde el corcho expandido usado por 1 m² de área techada tuvo una puntuación de 35 mPt en contraste a la lana de vidrio con 5.2 mPt.

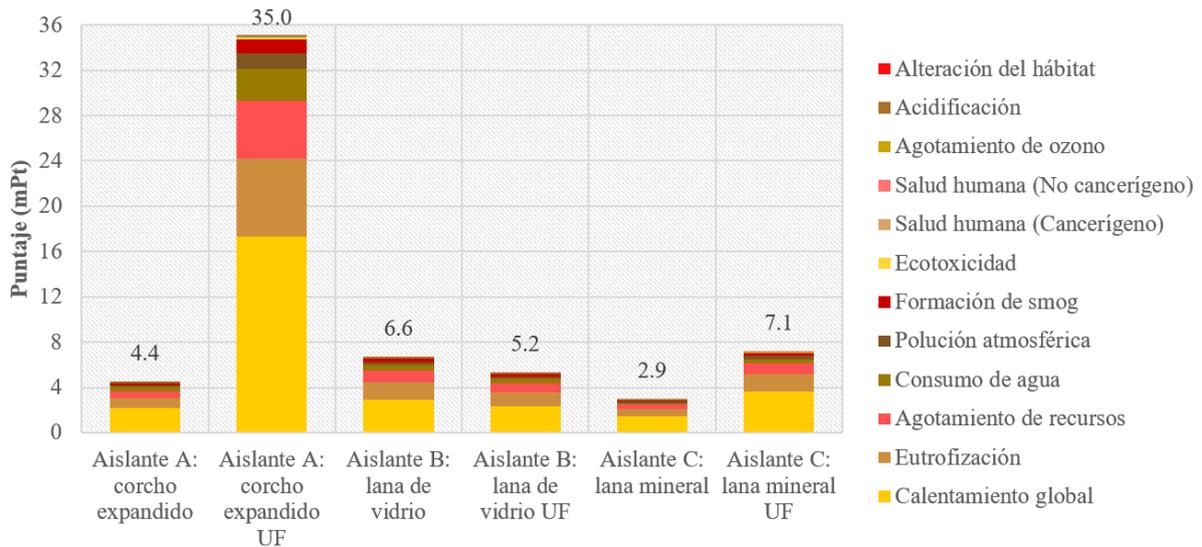


Figura 8.10
Comparación de impactos de la producción y uso de aislante
 Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se identificó que el material cuyo impacto fue más independiente de la cantidad empleada en el edificio es la lana de vidrio. Puesto que el impacto generado por kilogramo producido (6.6 mPt) fue cercano al impacto de usar este material aislante en el edificio (5.2 mPt). Seguido de la lana mineral, con una variación de 2.9 mPto en contraste a 7.1 mPt.

Asimismo, las tres categorías más importantes en el análisis fueron el Calentamiento Global, la Eutrofización y el Agotamiento de recursos. Esto debido a que en cada ACV estas categorías concentraron poco más del 80% de la carga ambiental total de cada producto. En el caso del corcho expandido, el porcentaje fue de 83.7%; en el caso de la lana de vidrio, estas categorías concentraron el 84% de las cargas; y, la lana mineral, el 86.1%.

8.2. Caracterización de una vivienda sostenible en Lima

8.2.1. Proceso de consenso

Desde un principio, los expertos estuvieron de acuerdo en el nivel de influencia que tienen los materiales y la flexibilidad en la sostenibilidad de un vivienda. En la figura 8.11 se observa que los coeficientes de variación de la evaluación de estos dos atributos fueron menores a 0.25 en todas las rondas. En el caso del atributo Materiales, el coeficiente de variación se redujo en un 20% desde la primera hasta la tercera ronda, siendo el resultado final 0.19. Asimismo, el coeficiente de variación del atributo Flexibilidad se redujo en 33%, desde 0.18 hasta 0.12,

valor muy cercano al requerido. Cabe destacar que la variabilidad de las respuestas de estos dos atributos no disminuyó de acuerdo al orden de las rondas. En el caso del atributo Materiales, en la primera ronda se obtuvo un coeficiente de variación de 0.22, el cual se incrementó hasta 0.24 en la segunda ronda. Después, disminuyó de nuevo hasta 0.19. Del mismo modo, el atributo Flexibilidad tuvo un coeficiente de variación inicial de 0.18, el cual disminuyó a 0.12 en la Ronda 2. Sin embargo, este valor se incrementó hasta 0.15 en la última ronda.

El atributo con mayor variedad en las valoraciones fue el Consumo energético. En la primera ronda, se determinó un coeficiente de variación de 0.89, el cual se redujo en 45 % hasta 0.48. De esto se infiere que no existe un valor aceptado de consumo de energía por habitante entre los expertos. Por otro lado, a diferencia de los dos atributos anteriores, el coeficiente de variación del Consumo energético disminuyó linealmente según al orden de las rondas.

Los atributos con un nivel de consenso intermedio fueron el Consumo hídrico y Tecnología pasiva y activa. La valoración del Consumo hídrico tuvo un coeficiente de variación en la última ronda de 0.28, valor que fue alcanzado después de una reducción del 49 % en la valoración inicial. Por otro lado, el análisis de importancia del atributo Tecnología inició con un coeficiente de variación de 0.53 para luego reducirse en 28 %, siendo 0.38 su coeficiente de variación final. En base a estos resultados, se afirma que la opinión del panel esta dividida en cuanto al nivel de influencia de estos dos atributos en la sostenibilidad de una vivienda.

Los coeficiente de variación de estos dos últimos atributos no disminuyeron linealmente según la secuencia de rondas. En el caso del Consumo hídrico, 0.55 fue el coeficiente de variación de la primera ronda, el cual disminuyó hasta 0.28 en la siguiente ronda. No obstante, el coeficiente de variación final resultó ser 0.31, 0.03 más grande que la ronda anterior. Asimismo, el coeficiente de variación inicial del atributo Tecnología pasiva y activa fue 0.53, el cual disminuyó a 0.38. Sin embargo, el coeficiente de variación de la última ronda fue 0.44, mayor al de la segunda ronda.

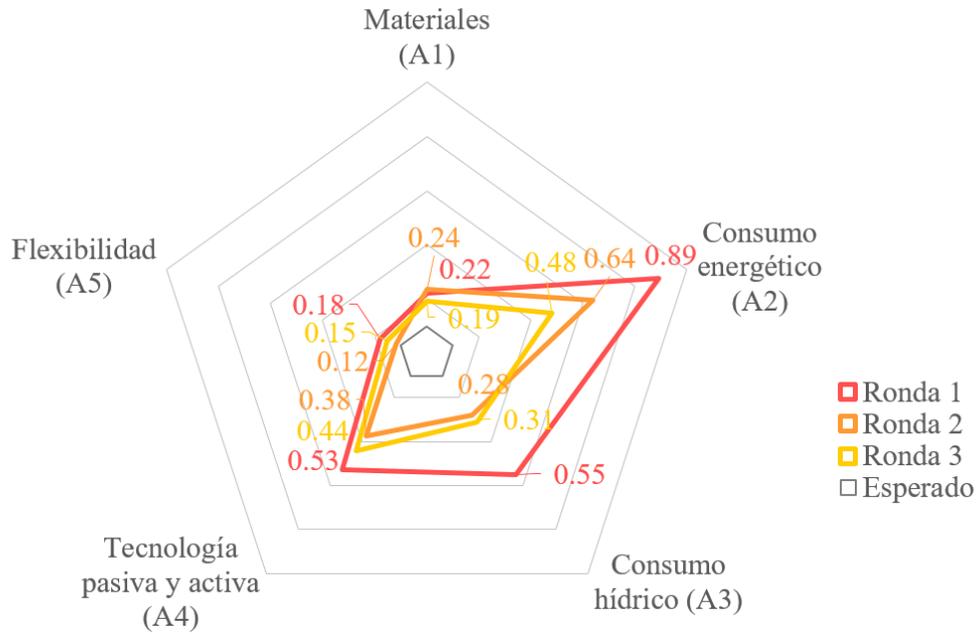


Figura 8.11
Coefficientes de variación de los primeros cinco atributos
Fuente: Elaboración propia

En la primera ronda, los expertos sugirieron tres nuevos atributos de una vivienda sostenible. Estos fueron sometidos a valoración en las siguientes dos rondas. En general, los resultados fueron más satisfactorios que los del resto de atributos, dado que sus coeficientes de variación fueron cercanos a 0.1. La figura 8.12 muestra los resultados de ambas rondas.

Las opiniones sobre el nivel de importancia del Entorno y el Confort térmico y lumínico fueron los de mayor unanimidad. Ambos atributos satisficieron el nivel de acuerdo esperado. La valoración final del atributo Entorno tuvo un coeficiente de variación de 0.09. Por otro lado, la valoración final del atributo Confort térmico y lumínico tuvo un coeficiente de variación de 0.10.

La opinión general sobre el nivel de incidencia del control de residuos también tuvo un alto nivel de acuerdo. En la segunda ronda, 0.21 fue el coeficiente de variación de la evaluación del atributo Residuos. Este valor se redujo en 33 %, siendo 0.14 el coeficiente de la última ronda.

Los coeficientes de variación de estos tres últimos atributos disminuyeron linealmente desde la segunda hasta la tercera ronda. Sin embargo, al poseer solo dos grupos de datos, no se pudo afirmar que la tendencia de los coeficientes fue disminuir acorde al desarrollo ordenado de las rondas. Como se apreció en los primeros cinco atributos, es posible que el coeficiente de variación aumente en la siguiente ronda. Por ello, es menester un análisis adicional para despejar estas suspicacias.

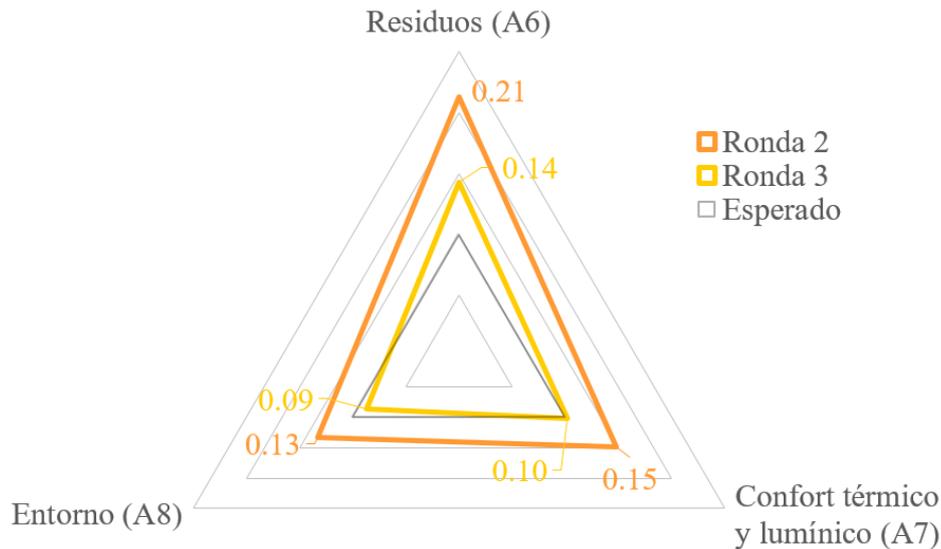


Figura 8.12
Coefficientes de variación de los tres atributos sugeridos
Fuente: Elaboración propia

8.2.2. Análisis de Monte Carlo

En la figura 8.13 se muestra en rojo la probabilidad del coeficiente de variación de cada atributo de ser menor a 0.1 y de naranja, la probabilidad del coeficiente de variación de cada atributo de ser menor a su respectivo valor de la Ronda 3. Los atributos fueron ordenados de mayor a menor probabilidad de obtener un coeficiente de variación menor a 0.1.

Las variabilidad del Entorno tuvo mayores posibilidades de disminuir en rondas de valoración posteriores. Este atributo tuvo 37.8% de probabilidad de que la desviación estándar fuera como máximo el 10% del promedio. Además, tuvo una probabilidad del 27.1% de que su coeficiente de variación fuera menor a 0.09. Ambos resultados corroboraron que la caracterización de este atributo tuvo alto nivel de consenso entre los panelistas, tal como los resultados de la tercera ronda del método Delphi sugerian.

De la misma manera, las valoraciones sobre el Confort térmico y lumínico tuvieron una probabilidad suficiente de cumplir con el consenso. La probabilidad que en rondas posteriores el coeficiente de variación de este atributo fuera menor a 0.1, valor obtenido en la tercera ronda de las valoraciones, fue 21.6%. Este valor posicionó al confort como el segundo atributo cuya valoración tuvo menor dispersión. Además, esta probabilidad fue lo suficientemente grande para considerar que el consenso satisfactorio que se obtuvo en la tercera ronda se presentará en las posteriores.

Los coeficientes de variación del atributo Residuos y Flexibilidad no cumplieron con la variabilidad máxima esperada por una reducida diferencia. La valoración de los Residuos tuvo un coeficiente de variación de 0.14 en la tercera ronda. Existió una probabilidad del 22.3% de obtener menor variabilidad en las respuestas en rondas posteriores. Sin embargo, la posibilidad de tener un coeficiente de variación menor que 0.10 fue solo del 5.6%. En comparación, la valoración del atributo Flexibilidad tuvo 51.1% de probabilidad de tener un coeficiente de variación menor a 0.15. Es decir, tuvo el 51.1% de posibilidades de disminuir el coeficiente de variación de la tercera ronda. No obstante, solo en el 5.3% de los casos, la Flexibilidad cumpliría con la variabilidad máxima exigida para este estudio. Si bien ambos atributos no cumplieron con las exigencias de exactitud del estudio, sus variabilidades fueron relativamente bajas y la posibilidad de obtener mejores resultados en posteriores rondas fue alta. El hecho de solo contar con tres rondas como fuente de datos limitó la exactitud de los resultados de la figura 8.13, ya que no existió suficiente data para obtener resultados considerablemente robustos. Por ello, se consideró que las valoraciones de los Residuos y la Flexibilidad tienen un nivel suficiente de consenso.

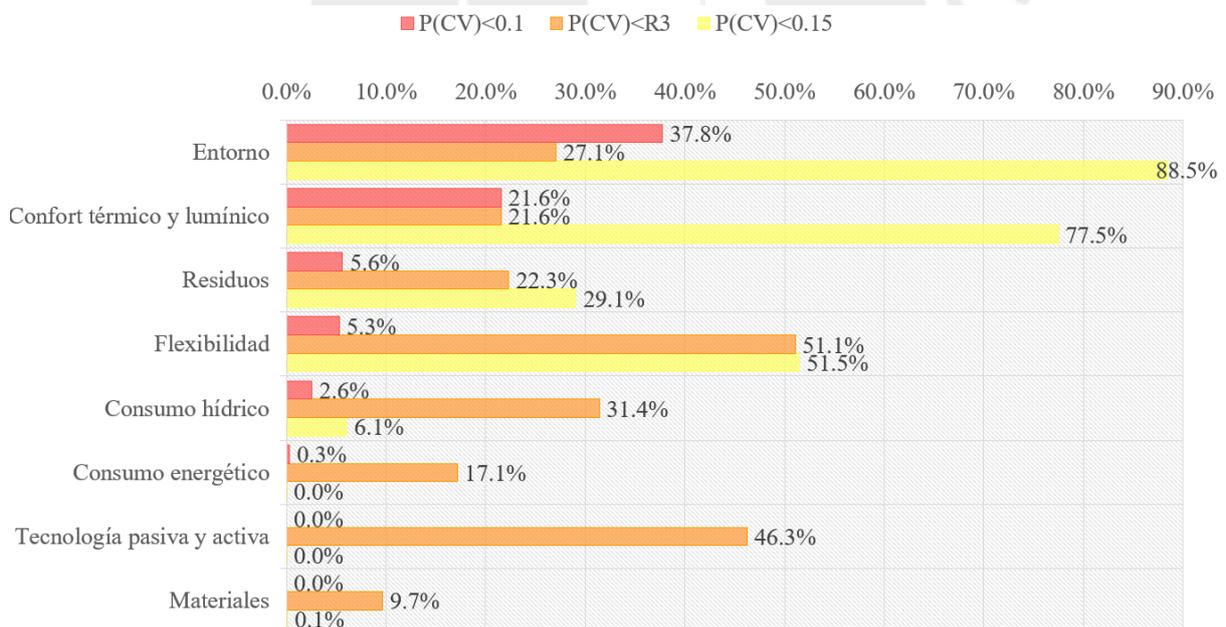


Figura 8.13
Probabilidad de disminución del coeficiente de variación
Fuente: Elaboración propia

La probabilidad de obtener un consenso respecto al atributo Consumo hídrico y Consumo energético fue muy baja. Solo en los 2.6% de los casos, el coeficiente de variación del atributo Consumo hídrico sería menor a 0.1. La probabilidad que el coeficiente de variación de este

atributo fuera menor a 0.31, coeficiente de la tercera ronda, fue 31.4%. Adicional a ello, se determinó la probabilidad de obtener un resultado menor a 0.15, el cual fue 5.4%. Se decidió analizar esta probabilidad adicional ya que 0.15 fue la nueva valla del consenso planteada para los atributos Residuos y Flexibilidad. Los resultados no fueron alentadores, puesto que en el 25% de los casos el coeficiente de variación se encontraría entre 0.15 y 0.31 y solo en el 2.5% de los rondas virtuales, el coeficiente estaría entre 0.10 y 0.15. Por otro lado, solo existió un 0.3% de probabilidad de que el coeficiente de variación del Consumo energético fuera menor a 0.1. Además, en el 17.1% de las rondas virtuales se obtuvo un coeficiente menor a 0.48. Adicionalmente, se determinó la probabilidad de obtener un coeficiente menor a 0.15. El resultado fue de 0.01%. En resumidas cuentas, las valoraciones del Consumo hídrico y del Consumo energético no fueron lo suficientemente precisas para afirmar la existencia de acuerdo sobre su caracterización.

La probabilidad que los coeficientes de variación de los atributos Tecnología pasiva y activa y Materiales cumplieron con el consenso es nula. Sus coeficientes de variación tuvieron casi 0% de probabilidad de ser menores a 0.15 y 0.10. Ambos atributos tuvieron probabilidad de tener menor variabilidad en rondas posteriores. En el caso de Tecnología pasiva y activa, la probabilidad de obtener un coeficiente de variación menor a 0.44 fue del 46.3%. Es decir, la variabilidad de las valoraciones de este atributo fue muy alta. Por otro lado, el coeficiente de variación del atributo Materiales tuvo aproximadamente un 9.7% de probabilidad de encontrarse entre 0.15 y 0.19. Por lo que estuvo en un nivel intermedio de consenso.

El consenso fue determinado tomando en cuenta el resultado de la tercera ronda del Método Delphi y la probabilidad del nivel de variabilidad obtenida del Análisis de Monte Carlo. La figura 8.14 muestra la relación de los resultados de ambos métodos. En líneas generales, el consenso sobre un aspecto de un atributo se definió como el conjunto de valoraciones que obtuvo un bajo coeficiente de variación en la tercera ronda y una alta probabilidad de baja variabilidad en las votaciones futuras del panel.

En concreto, solo cuatro de las ocho valoraciones se consideraron que llegaron al consenso. Estas fueron las valoraciones realizadas respecto al Entorno, Confort térmico y lumínico, Residuos y Flexibilidad. Además, el atributo Materiales fue el que alcanzó un nivel intermedio de consenso. Las valoraciones acerca del Consumo hídrico, el Consumo energético y la Tecnología pasiva y activa presentaron una alta variabilidad.

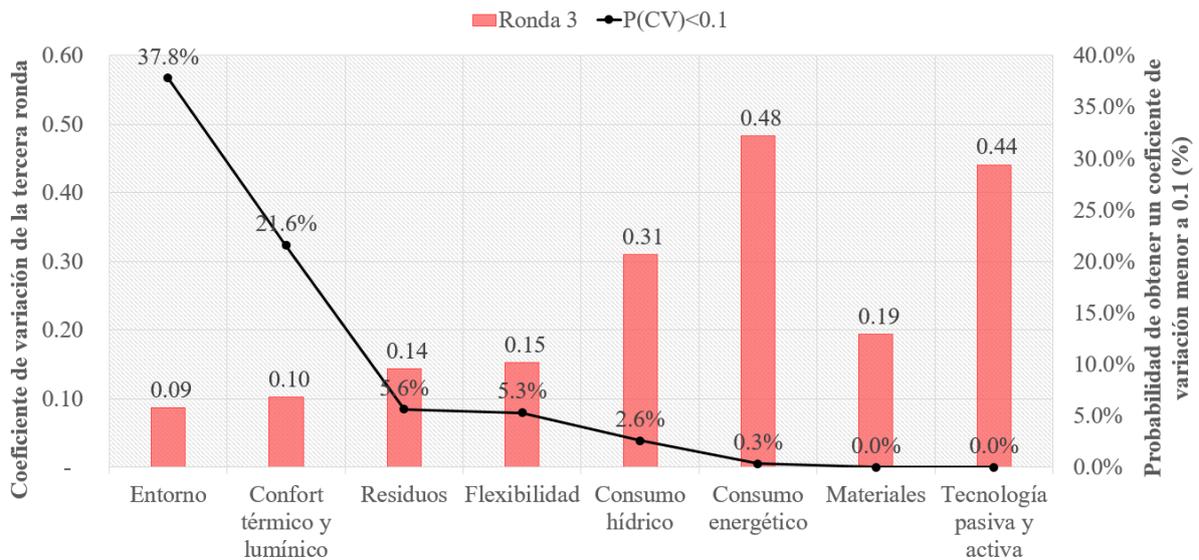


Figura 8.14
Características de la vivienda sostenible de acuerdo al nivel de consenso
 Fuente: Elaboración propia

8.2.3. Características de una vivienda sostenible en Lima

El siguiente paso fue identificar sobre qué afirmación los expertos estuvieron de acuerdo. La tabla 8.1 muestra los atributos separados en tres grupos acorde al nivel de consenso alcanzado. Se puede identificar que el atributo colocado arriba fue el que tuvo valoraciones más homogéneas, lo cual desencadenó que el promedio fuera altamente significativo. Es así que la significancia del promedio de las valoraciones perdió validez mientras el consenso disminuía.

Según los expertos, la característica más resaltante por su papel en la reducción de los impactos ambientales fue la relación del diseño, construcción y gestión de la vivienda con su entorno. Los expertos concluyeron que este atributo puede condicionar hasta el 87.1% de los impactos ambientales de una vivienda. Por lo cual, es menester aplicar estrategias bioclimáticas y crear ciudades compactas que reduzcan la distancia de viaje de los residentes.

En segundo lugar, los expertos opinaron que el control del confort térmico y lumínico de una vivienda puede reducir hasta el 80% de los impactos ambientales. También, acotaron que el objetivo de una vivienda es brindar un espacio cómodo y digno para sus residentes, lo cual está estrechamente relacionado con el confort. Para alcanzar el nivel deseado se puede emplear estrategias activas y pasivas que en su mayoría tienen mayor impacto en la etapa de uso de la vivienda: desde el uso de aparatos calefactores y aire acondicionado hasta envolventes aislantes.

En tercer lugar, el panel determinó que el control de los residuos de una vivienda puede

Tabla 8.1

Promedio y desviación estándar muestral de las valoraciones de la Ronda 3

Consenso		Atributo	Promedio	Desviación estándar	Unidad
Si	A8	Entorno	87.1	7.6	%
	A7	Confort térmico y lumínico	80.0	8.2	%
	A6	Residuos	70.0	10.0	%
	A5	Flexibilidad	72.9	11.1	%
Intermedio	A1	Materiales	65.7	12.7	%
No	A3	Consumo hídrico	60.7	18.8	lts/día/hab
	A4	Tecnología pasiva y activa	85.7	37.8	%
	A2	Consumo energético	64.3	31.0	kWh/mes/hab

Fuente: Elaboración propia

reducir hasta el 70 % de los impactos ambientales generados por esta. Ellos resaltaron que los residuos sanitarios y sólidos de la etapa de uso representan un gran problema ambiental.

En cuarto lugar, el panel concluyó que la flexibilidad de la vivienda es la cuarta característica más importante para reducir los impactos ambientales. La flexibilidad de una vivienda en cuanto a usos y climas podría reducir hasta el 72.9 % de los impactos. El objetivo principal es generar un edificio que pueda adaptarse a sus usuarios sin necesidad del uso de otros materiales. De esta forma, se mitiga los impactos ambientales de la manufactura y fin de vida.

El único atributo con un consenso intermedio fue Materiales. Por medio de las valoraciones del panel, se determinó que alrededor del 65.7 % de los impactos ambientales esta relacionado con las características de los materiales usados en la vivienda. Sin embargo, este valor no sería lo suficientemente significativo. Las valoraciones sobre este atributo no fueron homogéneas, lo cual se manifiesta en la desviación estándar obtenida que asciende a 12.7 %.

Finalmente, los valoraciones sobre el Consumo hídrico, Tecnología pasiva y activa y Consumo energético no fueron concluyentes. El conjunto de valoraciones de estos atributos presentaron una alta variabilidad. Por lo cual, los promedios que se obtuvieron en cada categoría no son significativos. Los promedios de las votaciones de estos atributos se encuentran en la tabla 8.1. No se pudo afirmar con suficiente validez que el consumo de agua ideal de una vivienda sostenible en Lima es 60.7 lts/día/hab ni que el consumo energético debería ser 64.3 kWh/mes/hab. Asimismo, no se tuvo claro el nivel de influencia del control de la tecnología pasiva y activa en la reducción de los impactos ambientales. Si bien, el promedio de las votaciones ubicaron a este atributo en el segundo lugar de importancia para la reducción de impactos de una vivienda, la alta desviación estándar del grupo de votaciones invalidó este resultado.

En síntesis, la planificación, construcción y gestión de una vivienda sostenible en el distrito de Jesús María debe considerar cinco aspectos. Como prioridad, la vivienda debe relacionarse con su entorno, asegurar el confort térmico y lumínico de sus usuarios, ser flexible y poseer infraestructura y sistemas de gestión de residuos, en ese orden de preferencia. Por otro lado, el uso de materiales sostenibles puede contribuir significativamente en la reducción de impactos, mas no tiene el alcance de los cuatro atributos previos. Desgraciadamente, la cantidad de agua y de energía que debe consumir una vivienda de Jesús María para ser considerada sostenible no están definidas. Tampoco es terminante el impacto que tiene la regulación de tecnología pasiva y activa en la reducción de impactos ambientales de una vivienda.

8.3. Consumo de energía primaria y transmitancia térmica de la vivienda

8.3.1. Comparación con el caso teórico

La envolvente del Edificio Rediseñado no cumplió con el estándar Passive House. En primer lugar, la transmitancia térmica de cada elemento de la envolvente fueron sumamente superiores a $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Como se aprecia en la tabla 8.2, los muros tuvieron una transmitancia térmica 14 veces superior al valor establecido; el techo, 16 veces; el piso, 13 veces; solo las ventanas superaron el límite por poco más del doble. Generalmente, son las ventanas las de peor comportamiento térmico, dado su función luminica y visual. Por ello, el modelo Passive House, establece la transmitancia térmica máxima de $0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$ para las ventanas, límite cinco veces superior al resto de los elementos de una envolvente. Sin embargo, el Edificio Rediseñado tuvo ventanas aislantes que tienen mejor comportamiento térmico que sus muros, techo y piso.

Tabla 8.2

Comparación entre el Edificio Rediseñado y el modelo Passive House

	U ($\text{W/m}^2\text{K}$)				Energía primaria ($\text{kW-h/m}^2\text{a}$)
	Muros	Pisos	Techos	Vanos	
Estándar Passive House	0.15	0.15	0.15	0.85	120.0
Edificio Rediseñado	2.13	2.4	2.01	1.91	125.4
Edificio Convencional	3.52	2.4	2.01	2.82	142.4

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el consumo de energía primaria del Edificio Rediseñado fue similar al de

una Passive House. El estándar especifica que el consumo por área construida anual de una vivienda no debe superar los 120 kW-h. Como se muestra en la tabla 8.2, el consumo del Edificio Rediseñado fue solo 4% superior a este valor. Según el modelo Passive House, las estrategias de eficiencia energética aplicadas al caso de estudio fueron satisfactorias. Como bien se mencionó anteriormente, el CTCS se enfoca en reducir el consumo energético por medio de aparatos de iluminación y refrigeración eficientes. Al parecer las exigencias energéticas de este estándar pueden ser fácilmente cumplidos solo con la regulación del consumo y/o eficiencia de los electrodomésticos.

8.3.2. Comparación con estudios prácticos

Para verificar los resultados previos, se decidió evaluar el grado de diferencia de los valores obtenidos con otros casos reales de Passive House construidas. En la figura 8.15, se ilustra cuatro diagramas de caja que representan la dispersión de las transmitancias térmicas de 15 Passive Houses más el Edificio Rediseñado. Ahí se puede identificar que la transmitancia de los muros, piso y techo del Edificio Rediseñado resultaron ser datos atípicos para el conjunto de la muestra recopilada. Sin embargo, en el caso de las ventanas, la vivienda ubicada en Taohai-China, presentó el peor aislamiento del grupo. El valor de la ventana de nuestro caso de estudio fue el valor máximo de la tendencia general del grupo.

Por otro lado, se muestra que el techo fue el elemento con mejor aislamiento térmico, seguido de los muros y, luego, los pisos. Asimismo, el 50% de las transmitancias térmicas de los techos estuvieron entre 0.08 y 0.20 W/m²K; en el caso de los muros, los valores se concentraron entre 0.12 y 0.21 W/m²K; y para los pisos, entre 0.1 y 0.23 W/m²K. También se debe precisar que la transmitancia térmica máxima aceptada, el que corresponde al bigote superior del boxplot, fue 0.288, 0.286 y 0.365 para los techos, muros y pisos respectivamente.

Asimismo, el aislamiento térmico de las ventanas fue apreciablemente inferior al resto de elementos de la envolvente. El 50% de los casos se concentraron entre 0.84 y 1.54 W/m²K, siendo el valor mínimo del grupo 0.6 W/m²K. Además, se identificó menos consenso sobre la capacidad térmica de las ventanas en los casos estudiados. Esto se evidenció debido a la mayor dispersión de los datos: el rango intercuartil fue mucho más amplio que de los otros elementos. Asimismo, se identificó una asimetría positiva; es decir, existió más viviendas con mejor aislamiento en vanos entre el grupo estudiado. La tendencia de la muestra fue de procurar un aislamiento bueno en ventanas, pero no al nivel del resto de elementos de la envolvente.

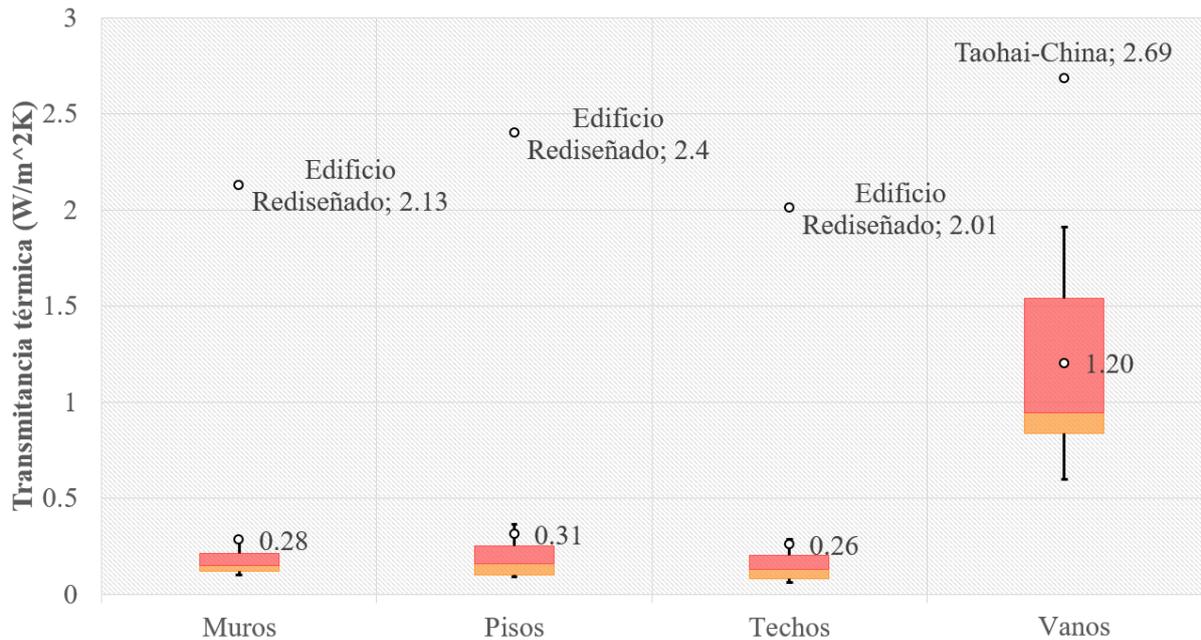


Figura 8.15
 Diagramas de caja de las transmitancias térmicas de la envolvente
 Fuente: Elaboración propia

Paralelamente, se determinó que existe diferencia significativa en la transmitancia térmica debido al elemento de la envolvente. Esto se realizó aplicando el test de Friedman para pruebas no paramétricas. Esta prueba fue elegida debido a las características de la muestra, ya que la distribución de datos no era normal. Los resultados determinaron que existió diferencia significativa entre los grupos con una significancia del 5%. Tal es el caso que el valor p fue 6.35×10^{-6} ; es decir, menor al valor α de 0.05.

Luego, se realizó el mismo procedimiento comparativo para el consumo de energía primaria. En este caso se identificó que el consumo del Edificio Rediseñado se encontraba dentro del grupo típico de datos. El diagrama de cajas de la figura 8.16 ubicó al consumo del caso de estudio ($125.4 \text{ kW-h/m}^2\text{-a}$) en el tercer cuartil. Por otro lado, la distribución de la muestra fue asimétrica negativa; por lo cual, la mayoría de los consumos se concentraron alrededor de $120 \text{ kW-h/m}^2\text{-a}$. Esto indicó que el consumo del Edificio Rediseñado fue típico entre las passive houses estudiadas. Cabe destacar, que el Edificio Rediseñado no fue diseñado bajo los criterios del modelo Passive House; sin embargo, casi cumplió con lo requerido.

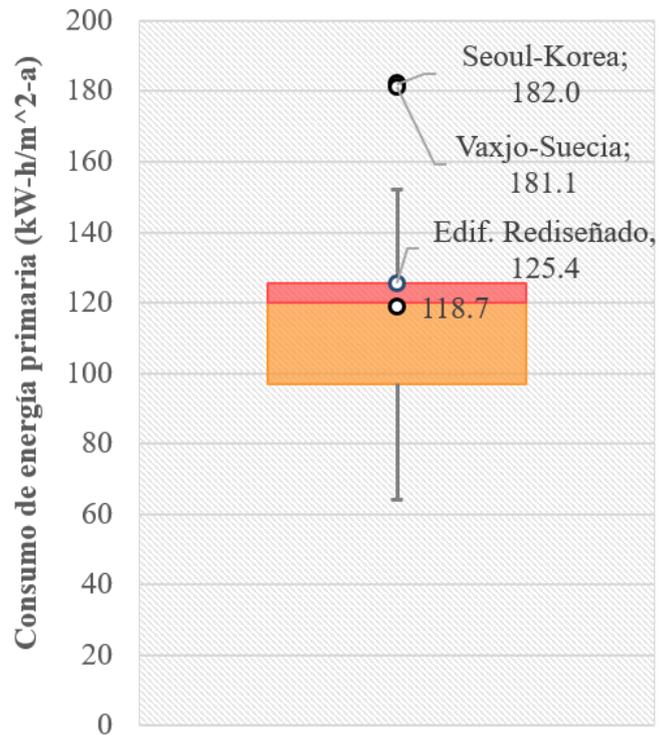
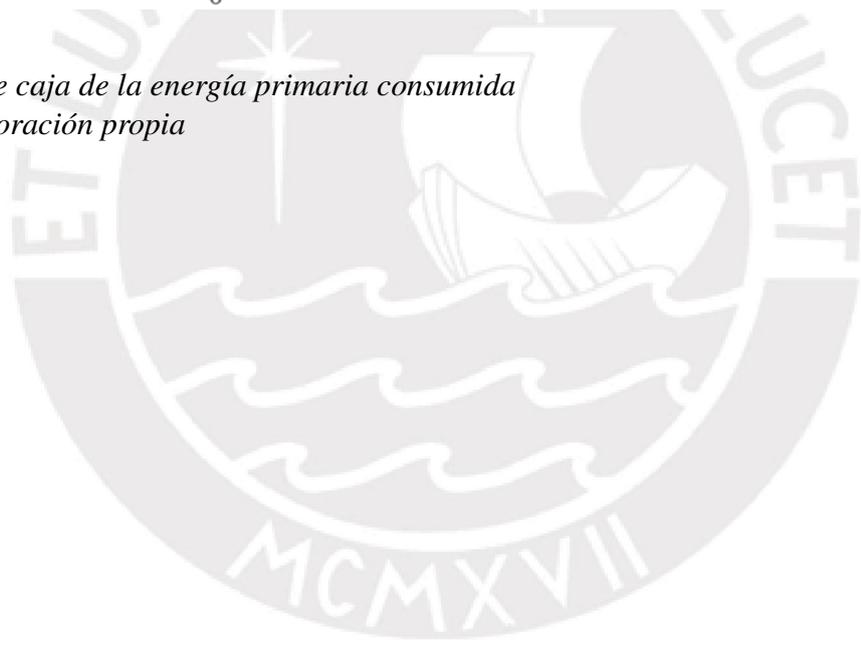


Figura 8.16
 Diagramas de caja de la energía primaria consumida
 Fuente: Elaboración propia



Capítulo IX

Discusión de Resultados

9.1. Capacidad del CTCS de reducir impactos ambientales

En términos globales, la ponderación de impactos determinó que el edificio logró mejorar su desempeño ambiental en 17 % gracias a la aplicación del CTCS. Desde un enfoque metodológico, la validez de este resultado dependerá si los factores de normalización y ponderación de la metodología BEES v 4.08 con pesos del panel de Stakeholder describen la realidad peruana. Por otro lado, desde un enfoque de eficiencia, la validez de este resultado dependerá de la reducción meta que se desee alcanzar. Si bien no se contó con estudios que respondan a cabalidad estas dos interrogantes, se pudo realizar un análisis genérico con la información disponible en el contexto de estudio.

Se presume que los factores de normalización de la metodología BEES v 4.08 no describirían la realidad peruana. Es así que al emplear estos valores en el análisis, se estaría sobrevalorando el rendimiento ambiental de los dos edificios estudiados. Esto se debe a que los impactos totales por categoría de los Estados Unidos son mayores que los impactos totales peruanos. Tal es el caso que en el 2000, los Estados Unidos emitió 23.1 ton de CO₂ eq/año/capita, mientras que el Perú emitió 4 ton de CO₂ eq/año/capita; esta diferencia se mantuvo en el tiempo, dado que en el 2016, los Estados Unidos emitió 18.2 ton de CO₂ eq/año/capita y el Perú tan solo 5.5 ton de CO₂ eq/año/capita (CAIT, 2016). Por otro lado, el consumo de agua total en el 2010 en el Estados Unidos fue de 1 543 m³/año/capita, mientras que en el Perú se consumió 453 m³/año/capita de agua (United Nations Food and Agricultural Organization, 2015).

El orden de importancia de las categorías de la etapa de ponderación fue compatible con las prioridades de la agenda ambiental peruana y los problemas ambientales de Lima urbana. Estas prioridades nacionales son la reducción de los gases de efecto invernadero, la adaptación a la variación de la temperatura global y la disponibilidad hídrica, debido a que el Perú es uno de

los países más sensibles a los efectos del Cambio Climático. Asimismo, uno de los principales problemas ambientales de Lima es la polución atmosférica. Estos cinco temas se alinean con tres de las categorías de impacto con mayor peso ponderado en la metodología BEES v 4.08 con pesos del panel de Stakeholder: el Calentamiento global, la Polución atmosférica y el Consumo de agua. Del resto de categorías no se contó con mayor información para corroborar su relevancia en el contexto peruano. De igual forma, solo se pudo realizar una apreciación cualitativa, ya que, por el momento, no se cuenta con una escala numérica de importancia nacional que pondere las categorías de impacto.

A la actualidad, el Perú no cuenta con una meta concreta y cuantificable de reducción de impactos del sector residencial. Esto se traduce en falta de indicadores oficiales que regulen la construcción sostenible. Tal es el caso que en el Informe N° 631-2015-VIVIENDA/OGAJ del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento indica que no es exigible un certificado ambiental en los proyectos de edificios multifamiliares. Por otro lado, los criterios de certificación del Fondo Mi Vivienda Verde buscan mejoras cualitativas de la vivienda convencional actual; es decir, solo se busca “reducir”, pero no se indica el “cuanto”. Por ello, como no se cuenta con un umbral mínimo y claro de desempeño ambiental que se requiere en los edificios multifamiliares, es complejo aseverar si la reducción en 17% los impactos del edificio estudiado es significativo: ¿Basta con reducir en 17% de los impactos del sector residencial para evitar los peores efectos del Cambio Climático en el Perú?

Las estrategias de optimización del CTCS se centran en el uso del edificio y este enfoque tiene ventajas hasta cierto punto. Multitud de estudios de ACV de edificios convencionales actuales en el país han demostrado que la etapa de Uso concentra la mayor carga ambiental. Así que plantear estrategias que principalmente, pero no exclusivamente, mitiguen los impactos involucrados en esta etapa, puede tener mayor impacto en el desempeño del edificio. Sin embargo, es necesario la regulación de los procesos del resto de etapas del edificio, ya que estas también pueden tener cargas ambientales considerables de acuerdo a las características de la vivienda.

Sin embargo, el CTCS no saca el mayor provecho de este paradigma para mitigar los dos impactos de su interés: el Calentamiento global y el Consumo hídrico. Las mejores estrategias planteadas en el CTCS son las de eficiencia hídrica; lo cual se reflejó en la reducción del 21% del consumo de agua en todo el ciclo de vida ($591\,273\text{ m}^3$), lo cual es en parte por la reducción del 47% en el consumo de agua de los usuarios durante el uso de edificio ($468\,050\text{ m}^3$). En

cambio, las estrategias para mitigar el Calentamiento global son laxas; es decir, las estrategias de eficiencia energética. La aplicación del CTCS redujo en 5.7% las emisiones de CO₂ eq, teniendo más éxito en categorías que el CTCS no trabaja directamente como la Ecotoxicidad, la Alteración del hábitat, la Salud humana y la Polución atmosférica.

Una parte del incremento del desempeño del edificio fue gracias a una redistribución de cargas ambientales en las etapas. Como se pudo verificar en el mapa de calor de la figura 8.8, el desempeño del edificio mejoró, en parte, porque se redujeron los impactos de la etapa de Uso a extensas del incremento del impacto de todas las categorías ambientales del resto de etapas. Esto se debe al uso de sistemas pasivos, los cuales reducen el consumo de agua y energía de la etapa de uso a cambio del incremento de cargas ambientales en el resto de etapas. Los sistemas pasivos usados en el caso de estudio fueron el aislamiento de la envolvente del edificio y la planta de tratamiento de aguas grises. Este incremento de las cargas ambientales de los sistemas pasivos no es más que los impactos del ciclo de vida de los materiales usados en la envolvente y la planta de tratamiento, los cuales se estarían sumando a los impactos del ciclo de vida del edificio. Cabe destacar que las cargas ambientales de los sistemas pasivos usados no compensaron la reducción de cargas ambientales en la etapa de uso, por lo cual fueron eficientes.

El ahorro de electricidad en el edificio de estudio tuvo un importante impacto en la disponibilidad del recurso hídrico y la reducción de gases de efecto invernadero. Esto se debe a que el 52% de la energía producida en nuestro país es de origen hidráulico y el 48% restante es de origen térmico. No obstante, para Lima la energía hidráulica es menos importante, pues solo el 30% de la energía de la provincia proviene de hidroeléctricas y el 70% restante de centrales térmicas. Este escenario se refleja en los procesos que conforman las categorías de impacto Consumo de agua y Calentamiento global, ya que para el Consumo de agua, la producción de electricidad representó más del 63% del total de los flujos de esta categoría; y, para el Calentamiento global, más del 75%.

Sin embargo, el CTCS no tuvo éxito en la reducción del consumo de electricidad del edificio a pesar de su importancia antes señalada. Tal es el caso que en la categoría Consumo de agua, el Edificio Convencional empleó 5 205 m³ de agua para la producción de energía de alto voltaje y el Edificio Rediseñado usó 4 848 m³, solo 7% menos. En la categoría Calentamiento global, el Edificio Convencional emitió 14.2 ton de CO₂ eq por el concepto de producción de energía eléctrica de fuentes no renovables, y el Rediseñado, 13.8 ton de CO₂ eq; es decir, 3% menos

(Ministerio de Energía y Minas, 2017).

Esto indicó la enorme deficiencia del CTCS en disminuir los impactos provocados por el consumo de electricidad del edificio, ya que las estrategias que emplea son insuficientes. Por un lado, no se cubre toda la gama de artefactos y equipos eléctricos. Además, no se promueve el uso extensivo de fuentes de energía renovable. Igualmente, no se controla el comportamiento de los usuarios, a pesar que el patrón de uso de los usuarios es un variable importante que define la cantidad de energía y agua que se emplea en un edificio. Por tanto, un enfoque holístico de esta norma, tal como la usada por certificaciones sostenibles que se manejan en nuestro país, es especialmente necesario.

9.2. Afinidad de los objetivos del CTCS con la opinión de los expertos

Los resultados de las características de una vivienda sostenible fueron comparados con un estudio independiente del Foro Ciudades para la Vida (2014). Este informe, titulado *Perú hacia la construcción sostenible en escenarios de Cambio climático*, establece siete indicadores que definen una vivienda sostenible: Calidad ambiental exterior (áreas verdes), Calidad Ambiental interior, Relación con la movilidad, Agua y eficiencia hídrica, Eficiencia energética, Residuos (orgánicos y de la construcción) y Materiales.

Las características definidas por este estudio fueron en general compatibles con los resultados del panel de expertos. Ambos coincidieron en la relevancia de cuatro características que definen a una vivienda sostenible. Estas son el diseño bioclimático, el efecto de las edificaciones en la movilidad urbana, el manejo de residuos y el uso de ecomateriales. Asimismo, el uso de tecnología pasiva fue considerado como un aspecto secundario que potencia los atributos más relevantes del edificio.

No obstante, se encontró cuatro diferencias. En primer lugar, el Estudio del Foro consideró necesario evaluar la cantidad de áreas verdes por habitante como una medida de la calidad ambiental exterior, lo cual no fue sopesado por el panel. En segundo lugar, la flexibilidad del edificio no fue considerado como un atributo de la vivienda sostenible por el Foro. En tercer lugar, el Foro no estableció un orden de importancia de atributos a diferencia de los resultados del panel, el cual determinó la importancia relativa de cada atributo en base al nivel de consenso alcanzado en la ronda final. Finalmente, si bien ambos mencionaron la valía de la eficiencia

hídrica y energética de los edificios, el Foro estableció reducciones claras del consumo para alcanzar los objetivos en el sector; este estudio sugiere que es necesario alcanzar un ahorro de energía entre el 40% y 60% y un ahorro de consumo de agua entre 30% y 53% en los edificios sobre los consumos actuales para propiciar que el sector este adaptado al Cambio Climático para el 2045. En cambio, el panel no fue capaz de llegar a esos resultados por falta de consenso.

La evaluación analítica del CTCS se realizó por cada una de los atributos estudiados por el panel. El análisis se extendió, en primer lugar, a evaluar el nivel de promoción de los cinco atributos que definen una vivienda sostenible en Lima por parte del CTCS; y, en segundo lugar, a identificar el tratamiento que ofrece el CTCS a tres atributos que generan debate entre los expertos de sostenibilidad, tal como se presenta en los siguientes párrafos.

El CTCS procura que las viviendas construidas acorde a él tengan relación con su entorno, mas no como lo definió el panel de expertos. Esta norma, junto a la NTP EM.110, introdujo el diseño bioclimático a la legislación de la construcción peruana. De esta forma, procura que las viviendas sean diseñadas bajo el criterio del clima donde se ubican y así asegurar el confort térmico de los usuarios con tecnología pasiva. Sin embargo, el panel definió la necesidad de generar ciudades compactas y multifuncionales como otra definición de la relación del entorno. Esto no ha sido tratado en el CTCS, ya que este se limita a diseñar cada vivienda de forma aislada.

El CTCS legisla el confort térmico y lumínico débilmente. Esta norma emplea la transmitancia térmica de la envolvente y el diseño de vanos como sus estrategias para asegurar la comodidad de los usuarios dentro de la vivienda. Sin embargo, la transmitancia térmica máxima que define resultan ser sumamente superior a los valores que en los países del primer mundo emplean y también los de la región sudamericana. Por otro lado, no existe un apartado en el CTCS que especifique la temperatura y sus variaciones a lo largo del año a las que se debe llegar con el diseño de la envolvente. Tampoco se exige estudios de estanqueidad del aire ni estudios térmicos para la aprobación del proyecto.

El CTCS no regula la flexibilidad de los edificios. Sin embargo, la construcción peruana está incorporando este concepto por su gran ventaja competitiva. Por un lado, encontramos que la construcción de concreto armado esta adoptando elementos prefabricados. Por otro lado, también existen diferentes investigación que proponen módulos multifuncionales y compactos como una alternativa social y de mercado. Se puede decir, que esta característica se encuentra

en una etapa incipiente en el Perú.

El CTCS regula el tratamiento de residuos sanitarios. En el apartado de eficiencia hídrica, el CTCS regula la instalación de sistemas de agua residuales domésticas tratadas. En particular, el enfoque está dirigido al tratamiento de aguas grises en la vivienda. Por otro lado, la gestión de desechos sólidos como basura no está siendo manejado por esta norma, mas el panel de expertos consideró este aspecto como importante con el fin de reducir los impactos ambientales del sector residencial.

El CTCS no promueve el uso de materiales sostenibles. A diferencia de algunos estándares de sostenibilidad de edificios que se emplean en nuestro país, el CTCS no opta por regular el uso de material local o producidos bajo estándares responsables. Asimismo, el panel de expertos consideró que el uso de materiales sostenibles en la vivienda no es un factor determinante como lo es el entorno, el confort, el control de residuos y la flexibilidad. En resumidas cuentas, los impactos de los materiales no son cuantitativamente importantes como otros factores de la vivienda.

El CTCS no regula el uso de tecnología pasiva en edificaciones de alta densidad como viviendas multifamiliares. Si bien esta norma estipula el uso de termas solares para cubrir la demanda de agua caliente, esto solo es aplicable para viviendas de baja y media densidad. Por otro lado, el CTCS no aprovecha el uso de otras tecnologías pasivas para disminuir la dependencia a las fuentes de energía convencionales, tales como paneles solares. Cabe recordar que los panelistas no emitieron un juicio homogéneo sobre la influencia de la regulación de la tecnología en la reducción de impactos. Por lo cual, esta falencia del CTCS no tiene la significancia que las descritas en los párrafos anteriores. Sin embargo, no debe dejarse de lado la posibilidad de explorar diferentes tipos de tecnología como la solar, siendo nuestra región caracterizada por su altos niveles de irradiancia.

Finalmente, el CTCS promueve la reducción del consumo energético e hídrico, mas no establece una meta cuantificable. El objeto central de esta norma es la eficiencia energética e hídrica en las viviendas. La efectividad que tiene en estos aspectos fue estudiada en el apartado de ACV. La importancia de marcar una cantidad de consumo máximo es sumamente importante para establecer las estrategias adecuadas. Por más que el CTCS estipule el uso de accesorios de grifería con una reducción del consumo del 30%, este no asegura el uso adecuado del recurso, pues aun así se puede estar usando más agua de la necesaria. Cabe destacar que no existe un consumo de agua y energía ideal para la ciudad de Lima: el panel de expertos no llegó a un

consenso sobre ello. Esta situación dificulta aun más la implementación de nuevas estrategias, ya que al no tener claro estos valores no se puede diseñar infraestructura para alcanzar un determinado caudal o exigir mayor eficiencia de los sistemas de transmisión y aparatos eléctricos que permitan un determinado consumo de energía. Al no contar con una meta cuantificable, la evaluación de la eficiencia de las estrategias implementadas para reducir el consumo de agua y de energía no son rigurosas.

9.3. Nivel de eficiencia energética que promueve el CTCS

El CTCS no cumplió con los estándares de una Passive House. Las transmitancias térmicas que plantea son sumamente superiores a las que exige el modelo. Esto provocó que el edificio dependa de fuentes externas de energía para regular el confort térmico de la vivienda, lo cual, como se planteó anteriormente, provoca la producción de CO₂ eq y consumo de agua. Por otro lado, al comparar nuestro modelo con otras viviendas adaptadas a los climas y normativas de su país, se reiteró la gran brecha que existe entre la norma peruana y el modelo internacional. Sin embargo, esto no es del todo desolador.

El aislamiento del modelo Passive House no varió considerablemente según el clima. La tendencia general de los casos prácticos recopilados fue alcanzar en su envolvente el valor 0.15 W/m²K a pesar de las temperaturas. En cambio, el CTCS computa diferentes transmitancias para cada elemento de la envolvente y para cada clima. La variación de este valor puede ser necesaria, ya que dependiendo de la estabilidad del clima durante el año, la temperatura promedio, el tipo de ventilación y la iluminación será necesario variar los límites máximos de transmitancia para asegurar el confort. Tal es el caso que la Passive House asegura un superaislamiento debido a que incorpora sistemas mecánicos de ventilación que aseguran el intercambio de aire en la vivienda a pesar de la hermeticidad. En el caso de Lima, es posible adaptar un sistema de ventilación mecánico a las viviendas junto al aislamiento. Sin embargo, dadas las características de nuestro sistema de energía y el patrón de uso de los usuarios de nuestra capital, esto provocaría un impacto ambiental considerable. Además que la apuesta por la sostenibilidad es aprovechar sistemas pasivos de energía como la energía solar. Otra diferencia en cuanto a la transmitancia fue la variación de este valor de acuerdo al elemento de la envolvente. Si bien el modelo exige que muros, techo y pisos tengan la misma capacidad de aislar, los casos recopilados demostraron que la tendencia general es que la transmitancia térmica varíe entre los

elementos.

El CTCS genera un modelo de vivienda sostenible fragmentado en comparación con una Passive House. La Passive House es un modelo que relaciona diferentes aspectos de una vivienda: arquitectura, estructura, instalaciones eléctricas y mecánicas. Entiende a la vivienda como un organismo de sistemas unidos entre ellos. Por lo cual, las especificaciones técnicas que se realiza en uno de estos sistemas está relacionado con los demás. De tal forma que en conjunto se consiga disminuir el consumo de energía. En cambio el CTCS, plantea un modelo de vivienda que resulta solo la reunión de diferentes características sin ninguna relación entre sistemas.

El patrón de consumo de energía del caso de estudio fue afín a lo que pide el modelo Passive House. Si bien se cuestionó la poca efectividad del CTCS para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en su ciclo de vida, el CTCS asegura que cada departamento del edificio consuma como una Passive House. Para comprobar el verdadero alcance de esta medida es necesario detallar el patrón de consumo estándar con el cual se proyecta consumir 120 kW-h/m²-a. Es decir, especificar la calidad de vida que se espera cubrir con esta cantidad de energía: actividades, electrodomésticos y tiempo de uso. Por otro lado, es importante detallar las fuentes de energía y su eficiencia desde la producción hasta la distribución. En el caso de una Passive House, se considera dentro del sistema a la energía solar, la cual cuenta con una eficiencia general del 20%. Esto provoca que la energía final que llega a la vivienda sea muy inferior a los 120kW-h /m²-a. En cambio, para el cálculo de la energía primaria del edificio se tomó en cuenta la red de distribución peruana con sus diferentes fuentes de energía y eficiencias. Una vez más es necesario identificar el patrón de consumo que se pretende cubrir con dicha cantidad de energía. Este resultado no es suficiente para asegurar que la vivienda diseñada según el CTCS cumple con el modelo internacional.

Conclusiones y recomendaciones

El CTCS redujo el impacto ambiental del caso de estudio en 17% de acuerdo a la ponderación de la metodología BEES v 4.08 con pesos del panel de Stakeholders. Cabe destacar que los tres rediseños tuvieron prácticamente el mismo desempeño ambiental. A pesar que la diferencia fue mínima, se pudo identificar que el uso del corcho expandido impacta seis veces más que emplear la lana de vidrio, el aislante más contaminante por kilogramo de producción.

El desempeño ambiental de ambos edificios en cada categoría fue semejante, con una ligera tendencia a la mejora en el Edificio Rediseñado en 11 de las 12 categorías ambientales. Hubo una sola categoría donde se presentó una mejora clara en el desempeño debido a la aplicación del CTCS: el Consumo de agua, ya que hubo una reducción de impacto de 21%. Por otro lado, la única categoría donde el CTCS resultó más perjudicial fue el Agotamiento de ozono.

En cuanto a la influencia de cada categoría, el Consumo de agua y el Calentamiento global fueron las categorías más trascendentes. Debido a que concentraron más del 80% del impacto global en cada edificio. En particular, el 99% de la variación del Consumo de agua se debió principalmente a la producción de agua y la generación de electricidad; y, el 75% de los flujos del Calentamiento global dependió de la producción de energía eléctrica de alto voltaje de fuentes no renovables.

En ambos edificios, la etapa de Uso fue la que reunió las mayores salidas de los procesos y en la mayoría de categorías, la etapa de Construcción fue la que poseyó menor influencia en el resultado global. Además, el impacto de la etapa de Uso fue el único que disminuyó debido al CTCS y la etapa de Construcción fue la fase de mayor variación.

El análisis de la validez del resultado de ponderación y normalización del ACV del caso de estudio arrojó dos resultados. Primero, los factores de normalización no describirían la realidad peruana; por ello, al emplear estos valores en el análisis, se estaría sobrevalorando el rendimiento ambiental de los dos edificios estudiados. Por otro lado, los factores de ponderación describirían parcialmente el orden de importancia de las categorías ambientales en el Perú y Lima. Segundo, lamentablemente, a la actualidad, el Perú no cuenta con una meta concreta,

cuantificable, oficial y obligatoria de reducción de impactos del sector residencial. Por lo cual, fue complicado determinar si el incremento del desempeño del edificio en 17% fue suficiente para contribuir en la mitigación de los impactos de interés según las necesidades del país.

Por otro lado, las estrategias de optimización del CTCS se centraron en el uso del edificio. Esto implica que se aplaque la mayor fuente de cargas ambientales del edificio en su ciclo de vida. Sin embargo, los criterios técnicos fueron insuficientes para reducir significativamente los dos impactos de mayor trascendencia en esta etapa: el Calentamiento global y el Consumo hídrico.

Una parte del incremento del desempeño del edificio fue gracias a una redistribución de cargas ambientales en las etapas. Esto fue producido por el uso de sistemas pasivos, como el aislamiento de la envolvente y la planta de tratamiento de aguas grises. Estos produjeron la mitigación de impactos de la etapa de Uso con un ligero incremento de cargas ambientales en las etapas de Producción, Construcción y Fin de vida.

El ahorro de electricidad en el edificio de estudio tuvo una importante influencia en la disponibilidad del recurso hídrico y la reducción de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el CTCS no tuvo éxito en la reducción del consumo de electricidad del edificio, debido a tres fallencias. Primero, no se controló la eficiencia energética de toda la gama de artefactos y equipos eléctricos. Segundo, no se promovió el uso extensivo de fuentes de energía renovable. Tercero, no se controló el comportamiento de los usuarios.

Una vivienda sostenible en Lima estaría definida por cinco características. Estas están divididas en dos grupos: las primordiales, compuestas por cuatro atributos, y la secundaria, el atributo restante. La primera característica primordial es la relación de la vivienda con su entorno durante el diseño, la construcción y la gestión; la segunda es el confort térmico y lumínico dentro de la vivienda; la tercera es la flexibilidad de la vivienda en cuanto a usos y climas; la cuarta es el control de los residuos sanitario y sólidos producidos por los usuarios. La característica secundaria es el uso de materiales con reducido impacto ambiental durante su manufactura. La elección de materiales sostenibles contribuyen con la reducción de impactos ambientales, pero en un acotado número de casos y en menor medida que los atributos primordiales.

Por otro lado, se determinó que una vivienda multifamiliar diseñada según el CTCS no cumple a cabalidad con las cinco características de una vivienda sostenible. Es así que la primera falencia es que el CTCS no genera ciudades compactas y multifuncionales como parte de su relación con el entorno. Por otro lado, el confort térmico y lumínico no está regulado

adecuadamente, ya que hace falta incluir definiciones clave y pruebas de calidad. En la misma línea, la flexibilidad de las viviendas no es tratada en ningún sentido en esta norma. Asimismo, el CTCS no regula el tratamiento de todos los residuos sanitarios, se circunscribe al reuso de aguas grises. Sumado a esto, esta norma no promueve el uso de materiales de origen sostenible. Esta comparación comprobó que la sostenibilidad de una vivienda no se limita a la reducción del consumo de energía y agua: asegurar la sostenibilidad de una vivienda implica articular diferentes elementos de origen arquitectónico, ambiental, ingenieril y logístico. Por ello, el actual CTCS ofrece estrategias superficiales que no toman en cuenta la complejidad de la sostenibilidad de una vivienda que en esta oportunidad se trató de resumir en cinco características.

La comparación de los resultados del panel de expertos con el estudio del 2014 del Foro Ciudades para la Vida comprobó la validez de las características obtenidas. Ambos documentos coincidieron en el papel del diseño bioclimático, el efecto de las edificaciones en la movilidad urbana, el manejo de residuos y el uso de ecomateriales. Sin embargo, son aspectos como la flexibilidad, la calidad del ambiente exterior, la ponderación de los atributos y el nivel de eficiencia energética e hídrica temas de discrepancia y que merecen un estudio más profundo para determinar conclusiones contundentes.

El Edificio Rediseñado cumple parcialmente con las recomendaciones evaluadas del modelo Passive House. El requisito que no se cumplió fue la transmitancia térmica en la envolvente del edificio. Es así que la transmitancia térmica de la envolvente del Edificio Rediseñado fue 13 veces superior al valor recomendado. Es así que el aislamiento de muros, techos y pisos se encontró fuera del rango típico de valores de viviendas construidas bajo este modelo; aunque las ventanas se encontraron dentro de lo común. Por otro lado, el requisito con mejores resultados fue el consumo de energía primaria. Tal es el caso que el consumo del edificio fue muy similar al de una Passive House. Asimismo, se determinó que su consumo se encuentra entre el rango de consumo típicos de diferentes passives houses alrededor del mundo.

Es así que se identificaron tres puntos importantes para mejorar el CTCS. Primero, la diversidad de climas y estilos de vida entre la población de nuestro país requiere un modelo de vivienda adaptativo. El modelo Passive House sugiere una vivienda aislada con sistemas mecánicos de ventilación. Si bien es posible lograr estos objetivos para algunos sectores limeños, es necesario optar por un modelo alternativo de vivienda que adopte la mayor cantidad de estrategias pasivas para asegurar el confort. Segundo, es necesario realizar un estudio de identificación del patrón de consumo eléctrico para cada distrito e identificar el proceso de

transformación desde la energía primaria hasta la final. De esta forma, se espera plantear un consumo de energía por vivienda focalizado que responda a la realidad. Para así, implementar las estrategias más idóneas para incrementar la eficiencia dentro de la vivienda. Finalmente, se debería optar por un modelo de vivienda integral. Se ha comprobado que es necesario un proceso de diseño integral de la vivienda donde se relacionan todas las especialidades. Para así crear una vivienda coherente y eficiente, características que se reflejan durante el tiempo de vida de la edificación.

Para condensar, la evaluación del CTCS concluyó que esta norma requiere la mejora de los criterios técnicos aplicados al sector residencial de alta densidad en Lima. Los tres métodos de evaluación concuerdan en ello, especialmente respecto a tres ejes. Primero, se requiere que los criterios técnicos profundicen en la relación de la vivienda con el exterior en lo relativo al clima, elementos urbanos y usuarios. Segundo, es necesario que el CTCS plantee estrategias que aborden todo el ciclo de vida de la vivienda, no solo su uso. Tercero, es imprescindible estudios del sector residencial sobre energía, indicadores de sostenibilidad e impactos ambientales, que permitirán plantear estrategias eficientes para cada realidad. En concreto, se comprobó que proyectar una vivienda sostenible de alta densidad en el distrito de Jesús María exige un enfoque holístico.

Bibliografía

- Aguilar, D., y Loo, F. (2017). *Análisis de Eco-Eficiencia de la demolición de una edificación en Lima* (Tesis Doctoral no publicada).
- Alajmi, A., Rodríguez, S., y Sailor, D. (2018). Transforming a passive house a net-zero energy house: a case study in the Pacific Northwest of the U.S. *Energy Conversion and Management*, 172(June), 39–49.
- Almeida, R., Peicoto de Freitas, V., y Delgado, J. (2015). *School building rehabilitation*. Springer International Publishing. doi: 10.1787/9789264112308-6-en
- Alvarez-Riso, A., Rosen, M., Del Aguila Arcentales, S., y Marinova, D. (2020). *Building Sustainable Cities*. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45533-0>
- Arzoumanidis, I., D'Eusanio, M., Raggi, A., y Petti, L. (2020). Functional Unit Definition Criteria in Life Cycle Assessment and Social Life Cycle Assessment: A Discussion. , 1–10. doi: 10.1007/978-3-030-01508-4_1
- Baixas, J. (2012). Envoltantes: La piel de los edificios. *Cuadernillo de la Técnica ARQ82(82)*, 2–5. Descargado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962012000300016&lng=en&nrm=iso&tlng=en doi: 10.4067/S0717-69962012000300016
- Balaban, O., y Puppim de Oliveira, J. A. (2017). Sustainable buildings for healthier cities: assessing the co-benefits of green buildings in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 163, S68–S78. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.086> doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.086
- Belpoliti, V., Calzolari, M., Davoli, P., Altan, H., y Nassif, R. (2020). Desing optimization to enhance passive energy strategies. The KNOW HOWse project for Solar Decathlon Middle East 2018. *Procedia Manufacturing*, 44, 302–309.
- BREEAM. (s.f.). Building Research Establishment Enviromental Assessment Methodology.
- Bruno, R., Arcuri, N., y Carpino, C. (2017). Study of innovative solutions of the building envelope for passive houses in Mediterranean areas. *Energy Procedia*, 140, 80–92.
- Burllard, E. (2019). Passive house. *Salem Press Encyclopedia of Science*. Descargado de <http://eds.b.ebscohost.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/eds/detail/detail?vid=0&sid=9b02c72d-6f1b-43cd-9876-f72391d211e5%40sessionmgr101&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbG12ZSszY29wZT1zaXRl{#}db=ers&AN=119214366>
- CAIT. (2016). *GHG Emissions*. Descargado 2021-06-16, de <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- Cayeros, D. (2016). *Adecuación Bioclimática y Eficienci Hídrica Sustentable para Edificios de Vivienda Multifamiliar, en Tepic, Nayarit* (Maestria en Proyectos y Edificios Sustentables). Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Occidente.
- Centro de Conservación de Energía y Ambiente. (2017, apr). *Efectos del cambio climático en el Perú*. Descargado de <https://cenergia.org.pe/blog/efectos-del-cambio-climatico-peru/>

- Cisneros, C. (2016). *Perú: Diseñan viviendas bioclimáticas contra heladas en Puno*. Descargado 2020-07-01, de <https://fondecyt.gob.pe/ciencia-al-dia/cientificos-utilizan-tecnicas-naturales-para-mejorar-la-produccion-del-frijol-peruano-3>
- Dastbaz, M., y Strange, I. (2015). Building Sustainable Futures: Design and the Built Environment. En M. Dastbaz, I. Strange, y S. Selkowitz (Eds.), *Building sustainable futures: Design and the built environment* (pp. 1–351). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-19348-9
- Dirección General de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas. (2015). *NTP 370.110-2 Etiquetado de eficiencia energética para lámparas fluorescente compactas, circulares, lineales y similares de uso doméstico* (Vol. 2008).
- Dirección General de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas. (2017). *NTP 399.483 Eficiencia energética en artefactos refrigeradores y congeladores para uso doméstico. Clasificación y requisitos* (n.º Lima 27).
- Dodoo, A., y Gustavsson, L. (2013). Life cycle primary energy use and carbon footprint of wood-frame conventional and passive houses with biomass-based energy supply. *Applied Energy*, 112, 834–842.
- EcoHouses. (s.f.). *¿Qué es un puente térmico y cómo funciona?*. Descargado 2020-07-17, de <http://www.ecohouses.es/que-es-un-puente-termico-y-como-funciona/?lang=es>
- Ekstrom, T., y Blomsterberg, A. (2016). Renovation of Swedish single-family houses to passive house standard-Analyses of energy saving potential. *Energy Procedia*, 96, 134–145.
- Elsarrag, E., y Alhorr, Y. (2012). Modelling the thermal energy demands of a Passive-House in the Gulf Region: The impact of thermal insulation. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1, 1–15.
- Erazo, R., y Cárdenas, J. L. (2000). *Planta de tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú*. Descargado 2020-12-23, de <https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/ing{ }quimica/v03{ }n1/planta.htm>
- Farhan, S. L., Hashim, I. A. J., y Naji, A. A. (2019). The sustainable house: Comparative analysis of houses in Al Kut neighborhoods-Iraq. *Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE, October-20*, 1031–1036. doi: 10.1109/DeSE.2019.00191
- Frischknecht, R., Balouktsi, M., Lützkendorf, T., Aumann, A., Birgisdottir, H., Ruse, E. G., ... Vancso, D. (2019). Environmental benchmarks for buildings: needs, challenges and solutions—71st LCA forum, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 18 June 2019. En *International journal of life cycle assessment* (Vol. 24, pp. 2272–2280). Zurich. doi: 10.1007/s11367-019-01690-y
- García, A. (2010). *Análisis del ciclo de vida* (Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla). Descargado de <https://portal.camins.upc.edu/materials{ }guia/250504/2013/AnalisisdelCiclodeVida.pdf>
- García, M., y Suárez, M. (2013). El método Delphi para la consulta a expertos en la investigación científica. *Revista Cubana de Salud Pública*, 39(2), 253–267. Descargado de <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci{ }arttext{ }&pid=S0864-34662013000200007>
- Georges, L., y Mathisen, H. M. (2015). Convective Heat Transfer between Rooms in Nordic Passive Houses. *Energy Procedia*, 78, 2941–2946.
- Gestión. (2015, oct). *La sostenibilidad en el Perú: el perfecto equilibrio*. Lima: NOTICIAS

- GESTIÓN. Descargado de <https://gestion.pe/economia/sostenibilidad-peru-perfecto-equilibrio-106168-noticia/>
- Gloria, T. P., Lippiatt, B. C., y Cooper, J. (2007). Life cycle impact assessment weights to support environmentally preferable purchasing in the United States. *Environmental Science and Technology*, 41(21), 7551–7557. doi: 10.1021/es070750+
- Gorse, C., Smith, M., Glew, D., Thomas, F., Shenton, D., y Farmer, D. (2016). Building Sustainable Futures. En M. Dastbaz, I. Stange, y S. Selkowitz (Eds.), *Building sustainable futures* (cap. Surveying). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-19348-9
- Hasim, A., Hajibandeh, M., Tabet Aoul, K. A., y Akash, D. (2016). ZEMCH: Toward the Delivery of Zero Energy Mass Custom Homes. En M. Noguchi (Ed.), . Descargado de <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-31967-4> doi: 10.1007/978-3-319-31967-4
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., y Olsen, S. I. (2017). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3
- Huppés, G., y Van Oers, L. (2011). Evaluation of Weighting Methods for Measuring the EU-27 Overall Environmental Impact. *Joint Research Centre*. Descargado de <http://www.jrc.ec.europa.eu/> doi: 10.2788/88465
- Ihobe. (2009). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. *Gobierno Vasco*, 1–53. Descargado de <http://www.comunidadism.es/wp-content/uploads/downloads/2012/10/PUB-2009-033-f-C-001{ } analisis-ACV-y-huella-de-carbonoV2CAST.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Información. (2020). *Perú: Anuario de estadísticas ambientales 2020* (Inf. Téc.). Instituto Nacional de Estadística e Información.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2013). Empadronamiento Distrital de Población y Vivienda. , 31–61.
- Internacional, C. F. (2013). Excellence in Design For Greater Efficiencies (EDGE). *EDGE*, 369(1), 1689–1699. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003>{ }0Ahttps://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001{ }0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.018{ }0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.005{ }0Ahttp://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.902757{ }0Ahttp://dx. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Internacional Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006(es), Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*. Descargado de <https://www.iso.org/obp/ui/{#}iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Internacional Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:2006(es), Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices*. Descargado de <https://www.iso.org/obp/ui/{#}iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- Iordache, V., Teodosiu, C., Teodosiu, R., y Catalina, T. (2016). Permeability measurements of a passive house during two construction stages. *Energy Procedia*, 85, 279–287.
- Jacquemin, L., Pontalier, P. Y., y Sablayrolles, C. (2012). Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: A review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 1028–1041. doi: 10.1007/s11367-012-0432-9
- Lee, J., Shepley, M. M., y Choi, J. (2020). Exploring the localization process of low energy residential buildings: A case study of Korean passive houses. *Journal of Building Engineering*, 30(October 2019).
- Leupen, B. (2006). *Frame and Generic Space* . Rotterdam: Publishers. Descargado de <https://books.google.com.pe/books?id=EmkcvDUAD4kC{ }printsec=frontcover{ }hl=es{ }source=gbs{ }ge{ }summary{ }r{ }cad=0{ }#v=>

onpage{&}q{&}f=false

- Li, F., Wichmann, K., y Otterpohl, R. (2009, may). *Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses* (Vol. 407) (n.º 11). doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.02.004
- Liang, X., Wang, Y., Royapoor, M., Wu, Q., y Roskilly, T. (2017). Comparison of building performance between Conventional House and Passive House in the UK. *Energy Procedia*, 142, 1823–1828.
- Liang, X., Wang, Y., Zhang, Y., Jiang, J., y Chen, H. (2017). Analysis and optimization on energy performance of a rural house in northern China using passive retrofiting. *Energy Procedia*, 105, 3023–3030. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.618
- Linares, P. (2009). Eficiencia Energética y Medio Ambiente. *Economía y Medio Ambiente*(847).
- Lippiatt, B. (2007, 2007-08-01). *Bees 4.0: Building for environmental and economic sustainability. technical manual and user guide*. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Descargado de https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860108
- Mastrucci, A., Marvuglia, A., Leopold, U., y Benetto, E. (2017). Life Cycle Assessment of building stocks from urban to transnational scales: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(February), 316–332. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.060> doi: 10.1016/j.rser.2017.02.060
- Meijer, E. (2014). Weighting: applying a value judgment to LCA results. *PRé Sustainability*. Descargado de <https://pre-sustainability.com/articles/weighting-applying-a-value-judgement-to-lca-results/>
- Ministerio de Energía y Minas. (s.f.). *Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético* (Inf. Téc.). Lima.
- Ministerio de Energía y Minas. (2017). *MAPA DE POTENCIA INSTALADA Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA 2017* (Inf. Téc.). Descargado de <http://www.minem.gob.pe>
- Ministerio de Vivienda, C. y. S. (2006). *NORMA TÉCNICA I.S. 010 INSTALACIONES SANITARIAS PARA EDIFICACIONES*.
- Ministerio de Vivienda, C. y. S. (2014). *EM. 110 Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética* (Vol. 1). Descargado de <http://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo3/04{ }EM/DS006-2014{ }EM.110.pdf>
- Ministerio de Vivienda, C. y. S. (2015). *Código Técnico de Construcción Sostenible*. Descargado de <http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios{ }Normalizacion/Normalizacion/normas/DS015-2015-VIVIENDA.pdf>
- Ministerio de Vivienda, C. y. S. (2018). *Norma Técnica E0.30 Diseño Sismorresistente* (Inf. Téc.).
- Ministerio del Ambiente. (s.f.). *Indicador: Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero*. Descargado 2021-06-25, de <https://sinia.minam.gob.pe/indicador/931>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2009). Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales. *Manual para municipios ecoeficientes*(511), 179. Descargado de <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39054>
- Miranda, L., Neira, E., Torres, R., y Valdivia, R. (2014). *Perú hacia la construcción sostenible en escenarios de Cambio Climático* (Inf. Téc.). Lima: Foro Ciudades para la Vida.
- Miranda, L., Neira, E., Torres, R., y Valdivia, R. (2018). Construcción sostenible en el Perú. En *Foro ciudades para la vida* (pp. 38–47). Lima: Economía&Sociedad. Des-

- cargado de http://www.cies.org.pe/sites/default/files/files/articulos/economiaysociedad/la_{ }construccion_{ }sostenible_{ }en_{ }el_{ }peru.pdf
- Najarian, J. (2020). *Monte Carlo Techniques*. Descargado de <http://eds.b.ebscohost.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/eds/detail/detail?vid=0{&sid=a86ad986-18d8-4298-ace1-d750e689033e{ }40sessionmgr102{&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbG12ZSszY29wZT1zaXRl{#}AN=89317099{&db=ers>
- National Institute of Standards and Technology. (2018). *BEES | NIST*. Descargado 2020-12-23, de <https://www.nist.gov/services-resources/software/bees>
- Neyestani, B. (2017, may). A Review on Sustainable Building (Green Building). *SSRN Electronic Journal*. Descargado de <https://papers.ssrn.com/abstract=2968885> doi: 10.2139/ssrn.2968885
- Organización Internacional de Normalización. (2006). *ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*. Descargado 2020-07-17, de <https://www.iso.org/obp/ui{#}iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Organización Mundial de la Salud (OMS), y Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). (2019, jun). *Agua*. Descargado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Osinergmin. (2016). *La industria de la electricidad en el Perú*.
- Passivhaus Institut. (2019). *What is a Passive House?* Descargado 2020-07-03, de <https://passipedia.org/basics/what{ }is{ }a{ }passive{ }house>
- Piña Hernández, E. H. (2018). Prototipo de vivienda vertical social sustentable, enfoque en resistencia al cambio climático. *Revista INVI*, 33(92), 213–237. doi: 10.4067/s0718-83582018000100213
- Piccardo, C., Dodoo, A., y Gustavsson, L. (2020). Retrofitting a building to passive house level: A life cycle carbon balance. *Energy and Buildings*, 223.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2009). Viene de las alturas: disponibilidad y usos del agua. En *Informe sobre desarrollo humano Perú 2009: Por una densidad del estado al servicio de la gente* (pp. 57–79). Descargado de <http://www.pe.undp.org/content/peru/es/home/library/poverty/InformeDesarrolloHumano2009.html>
- Quadri, N. (2011). *Sistemas de aire acondicionado*. (I ed.). Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina. Descargado de <https://books.google.com.pe/books?hl=es{&lr={&id=J-iWDwAAQBAJ{&oi=fnd{&pg=PA62{&dq=aire+acondicionado{&ots=n4gQrqpbt{&sig=96wqQ0e30JSsRtD6zwJrDHPxCd8{#}v=onepage{&q=aireacondicionado{&f=false>
- Ramon, G., Green, M., Semiat, R., y Dosoretz, C. (2004, nov). Low strength graywater characterization and treatment by direct membrane filtration. *Desalination*, 170(3), 241–250. doi: 10.1016/j.desal.2004.02.100
- Reguant-Álvarez, M., y Torrado-Fonseca, M. (2016). El método Delphi. *REIRE: Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 9(1), 87–102. doi: 10.1344/reire2016.9.1916
- Rehab, I., Andre, P., Aparecida Silva, C., Massy, G., Hannay, J., y Lebrun, J. (2015). Verification of the energy balance of a passive house by combining measurements and dynamic simulation. *Energy Procedia*, 78, 2310–2315.
- Rey, F., y Velasco, J. (2006). *Eficiencia energética en edificios. Certificación y auditorías energéticas* (E. Paraninfo, Ed.). Madrid. Descargado de <https://books.google.com.pe/books?hl=es{&lr={&id=3LykBainW7kC{&oi=fnd{&pg=PR3{&dq=eficiencia+energ{é}tica{&ots=>

- {_}t{_]Pst3VqF{&}sig=bvK9qOszJDb6y{_]0agZP2r-Lt1Xw{#}v=onpage{&}q=eficienciaenerg{é}tica{&}f=false
- Ritchie, H., y Roser, M. (2017). Water Use and Stress. *Our World in Data*. Descargado de <https://ourworldindata.org/water-use-stress>
- Rondinel-Oviedo, D. R., y Schreier-Barreto, C. (2018). Methodology for selection of sustainability criteria: A case of social housing in Peru. *The Palgrave Handbook of Sustainability: Case Studies and Practical Solutions*, 385–409. doi: 10.1007/978-3-319-71389-2_21
- Sanjuan, M. N. (2018). *Análisis de inventario de ciclo de vida*. Descargado 2021-06-24, de <https://www.youtube.com/watch?v=kaSWPwQeiBo>
- Schlanbusch, R. D., Fufa, S. M., Häkkinen, T., Vares, S., Birgisdottir, H., y Ylmén, P. (2016). Experiences with LCA in the Nordic Building Industry - Challenges, Needs and Solutions. *Energy Procedia*, 96(1876), 82–93. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.106> doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.106
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. (s.f.). *Productos ahorradores*. Descargado 2020-12-23, de <https://www.sedapal.com.pe/paginas/productos-ahorradores>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (s.f.). *Datos hidrometeorológicos a nivel nacional*. Descargado 2020-12-23, de <https://www.senamhi.gob.pe/?{&}p=estaciones>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2003). *Atlas de Energía Solar del Perú*.
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., y García-Martínez, A. (2017). Critical review of bim-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*, 136, 110–120. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009> doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.009
- STEEEP. (2014). *Eficiencia Energética* (Inf. Téc.). Autor.
- Stephan, A., Crawford, R. H., y Myttenaere, K. D. (2013). A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. *Applied Energy*, 112, 23–34.
- Torabi, F., y Ahmadi, P. (2020, jan). Battery technologies. En *Simulation of battery systems* (pp. 1–54). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-12-816212-5.00005-2
- Truong, H., y Garvie, A. (2017). Chifley Passive House: A case Study in Energy Efficiency and Comfort. *Energy Procedia*, 121, 214–221.
- United Nations Food and Agricultural Organization. (2015). *Total Water Withdrawal Per Capita*. Descargado 2021-06-16, de <https://ourworldindata.org/water-use-stress{#}water-withdrawals-per-capita>
- U.S. Green Building Council. (2013). *LEED v4 for HOMES DESIGN AND CONSTRUCTION*.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., y Weidema, B. (2016, sep). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. Descargado de <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8> doi: 10.1007/s11367-016-1087-8
- Wieser, M. (2011). *Consideraciones Bioclimáticas en el Diseño Arquitectónico: El caso peruano* (Vol. 10; Inf. Téc.). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Yan, Y., Kong, Q., Cao, Y., Zhang, X., Ai, J., y Meng, X. (2017). Investigation on Passive Energy-saving Technologies of Demonstration Houses in Taohai Pasture. *Procedia Engineering*, 205, 2910–2917.
- Yarke, E. (2005). *Ventilación natural de Edificios* (I ed.). Buenos Aires: Nobuko. Descargado de <https://books.google.com.pe/books?hl=es{&}lr={&}id=Z4cUzMGDpl8C{&}oi=fnd{&}pg=PA7{&}dq=aire+acondicionado+y+ventilaci{ó}n{&}ots=YpEwTeSZKr{&}sig=0txFaFrUpt-6MekFxFwiFKseodJ0{#}v=onpage{&}q=aireacondicionadoyventilaci{ó}n{&}f=false>

Anexos



Anexo A

Producción de aguas grises

El gasto probable total de la batería de aparatos sanitarios que produjeron aguas grises fue de 50.22 m³/día. El caudal de agua tratada que requirieron todos los inodoros de la edificación fue de 3.01 m³/día. Estos valores fueron determinados empleando el Método de Hunter y asumiendo un patrón de uso diario de los inodoros.

En la tabla A.1 se puede verificar el conteo total de los aparatos instalados en el edificio que producen aguas grises y las unidades de descarga (UD) por cada tipo. Cabe destacar que el gasto probable en lt/seg fue determinado por tipo de aparato y este valor fue multiplicado por la cantidad de horas al día que se espera usar en cada salida de agua gris, para así obtener el consumo de agua en m³ por día (m³/día). De ahí que se obtiene un caudal de 50.22 m³/día de producción de aguas grises.

Sumado a esto, en la tabla A.2 se ilustra las unidades de descarga y gasto probable de los aparatos demandantes de aguas grises. Es importante mencionar que a diferencia de los inodoros del Edificio Convencional, todos los aparatos usados en este nuevo diseño fueron de descarga reducida, ya que el CTCS estipula que los inodoros deberán tener válvulas de doble accionamiento de descargas de 6 lts y 3 lts. Considerando ello, se siguió el procedimiento del párrafo anterior, asumiendo una descarga de 15 minutos al día por aparato. De esta forma se obtiene un consumo de 3.01 m³/día de caudal para abastecer la demanda de agua tratada de los inodoros.

Tabla A.1

Unidades de descarga y gasto probable de los aparatos de producción de aguas grises

Aparato	Cantidad (und)	Unidades de descarga (UD)	Gasto probable (lps)	Horas de uso (h/día)	Consumo de agua (m³/día)
Lavatorio	136	136	1.95	0.5	3.51
Lavadero de cocina	68	136	1.95	2	14.04
Lavadero de ropa	136	272	3.87	0.5	6.97
Ducha privada	136	272	3.87	1.5	20.90
Sumidero	204	612	5.34	0.25	4.81
Total	-	1428	9.66	-	50.22

Fuente: Elaboración propia

Tabla A.2

Unidades de descarga y gasto probable de los aparatos demandantes de aguas grises

Aparato	Cantidad (und)	Unidades de descarga (UD)	Gasto probable (lps)	Horas de uso (h/día)	Consumo de agua (m³/día)
Inodoro con tanque de descarga reducida	204	306	3.34	0.25	3.01

Fuente: Elaboración propia

Los caudales obtenidos fueron cotejados con el consumo de agua distrital de Jesús María presentado por el Sedapal en el 2017. El valor proporcionado para el distrito fue de 222 litros/hab/día. Es así que consideró un promedio de cuatro personas por vivienda, para así obtener un consumo total de 60 m³/día. Dicho número es cercano al valor de 50.22 m³/día, que resulta de la suma de los caudales de todos los aparatos productores y demandantes de agua gris. Por tanto, se consideró dicho valor para los análisis posteriores.

Anexo B

Caracterización química y selección del tratamiento del efluente

La caracterización del efluente se dio a partir de la consulta a dos fuentes bibliográficas sobre aguas grises, ya que no se contó con el estudio de composición de las aguas residuales producidas en el edificio. La fuente principal fue el artículo académico *Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses* (Li et al., 2009) de la Hamburg University of Technology, en el cual se caracteriza las aguas grises de acuerdo al aparato sanitario del que provienen. La segunda fuente fue el estudio *Composición promedio de agua residual de la Ciudad Universitaria de San Marcos* (Erazo y Cárdenas, 2000). De este modo se comparó la información encontrada en ambas fuentes (Tabla B.1), para así determinar un perfil tentativo de la composición de las aguas grises domésticas que se producirían en el edificio en estudio.

Tabla B.1
Caracterización de las aguas grises y residuales según fuente de consulta

Parámetro	Unidad	Valor según fuente	
		Hamburg	San Marcos
pH	-	6.3 - 8.1	6.0 - 9.0
SST	mg/l	25 - 183	240
Turbidez	NTU	29 - 375	-
DBO	mg/l	47 - 466	220
DQO	mg/l	100 - 700	-

Fuente: Li et al. (2009), Erazo y Cárdenas (2000)

La determinación de los niveles de tratamiento de agua para el edificio en estudio se basó en las recomendaciones de Li et al. (2009). Este autor, después de una revisión bibliográfica

extensa, sugiere el esquema de la figura B.1 para determinar el tipo de tratamiento pertinente, el cual depende de la resistencia del agua gris. Acorde a Ramon et al. (2004), la resistencia del agua se define según los parámetros descritos en la tabla B.2.

Tabla B.2
Resistencias del agua gris

Parámetro	Unidad	Resistencia	
		Baja	Alta
DQO	mg/l	210 - 501	1079 - 1815
TSS	mg/l	54 - 200	165 - 235

Fuente: Ramon et al. (2004)

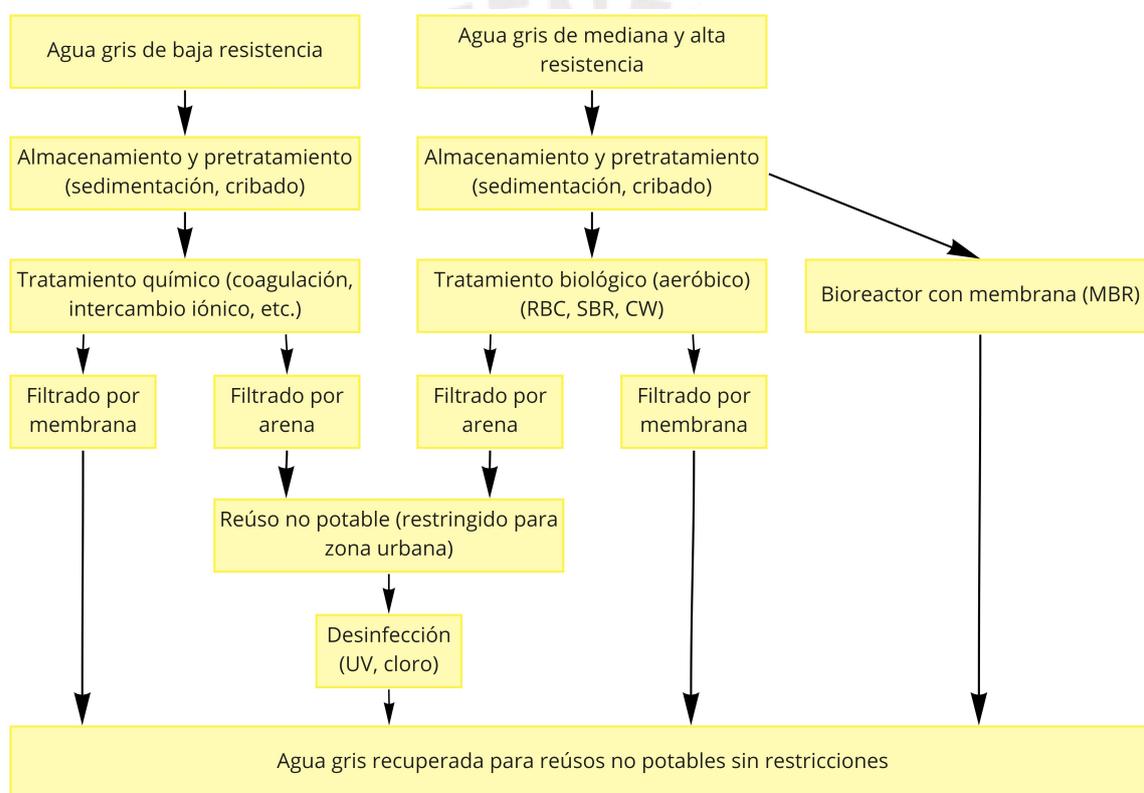


Figura B.1
Esquema de agua gris reciclada para usos urbanos no potables
Fuente: Li et al. (2009)

Con todo lo anterior, se consideró que el agua gris producida por la edificación tuvo características similares a las propuestas por la Hamburg University of Technology, por lo cual es clasificada como agua gris de baja resistencia. Por ende, el sistema de tratamiento de aguas grises del nuevo diseño de la Residencial constó de una etapa de tratamiento primario por sedimentación, una etapa de tratamiento secundario por floculación - coagulación, una etapa de tratamiento terciario de infiltración con arena y de una etapa de desinfección por cloro.

Anexo C

Dimensionamiento de la planta de tratamiento de aguas grises

El primer nivel de tratamiento fue el sedimentador que corresponde al tratamiento primario. Es así que este fue dimensionado empleando la Ley de Stokes, la cual se muestra en la ecuación 3.1. Para ello, se consideró los valores de densidad, diámetro de partícula y viscosidad que se visualizan en la tabla C.1. Así se determinó que la velocidad de cimentación de las partículas de suspensión fue de 0.01 m/s. Por otro lado, el largo mínimo del sedimentador quedó definido por la ecuación 3.2, con la cual se determinó el valor de 4.54 m, tal como lo muestra la tabla C.2. Finalmente, las dimensiones del sedimentador fueron 2 m de ancho, 4.5 m de largo y 1.3 m de alto. Cabe destacar que se eligió una altura de 1.3 m de acuerdo a las recomendaciones del Sistema Nacional de Información Ambiental del Ministerio del Ambiente en su guía *Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales* (2009), donde se recomienda una altura libre adicional de 0.3 m.

$$V_s = \frac{(\rho_g - \rho_f) * d_g^2 * g}{18 * \mu} \quad (3.1)$$

Tabla C.1
Características de las aguas grises

Característica	Unidad	Componente		
		Agua	TSS	Coloide
Densidad	kg/m ³	997	1 500	1 000
Diámetro de la partícula	mm	-	0.02	0.3
Viscosidad	kg/cm.s	0.001	-	-

Fuente: Elaboración propia

$$L_{min} = \frac{Q}{B_e * V_s} \quad (3.2)$$

Tabla C.2
Dimensionamiento sedimentador 1

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Volumen de producción de aguas grises	V_{prod}	m ³ /día	50.22
Horas de producción de aguas grises promedio	H_p	h	14
Caudal	Q_1	m ³ /h	3.59
Ancho del sedimentador elegido	B_e	m	2
Velocidad de sedimentación	V_s	cm/s	0.01
Largo del sedimentador mínimo	L_{min}	m	4.54
Tirante de agua en el sedimentador elegido	h_{sed}	m	1.0
Capacidad del sedimentador	V_{sed}	m ³	9.09

Fuente: Elaboración propia

La etapa de tratamiento secundario contó del proceso químico de coagulación - floculación. El diseño de esta etapa se realizó a partir del caudal de salida del tanque de sedimentación, el cual fue determinado usando la ecuación de conservación de la masa. Es decir, se consideró que el caudal de ingreso Q_1 en un tiempo T es igual al volumen de agua acumulada en el tanque V_{sed} más el caudal de salida Q_2 en el mismo tiempo T , lo cual se ilustra en la ecuación 3.3. Al completar esta ecuación con la siguiente información: capacidad del tanque de sedimentación de 9.09 m³ y caudal de entrada de 3.59 m³/h, se obtuvo la ecuación 3.4.

$$Q_1 * T = V_{sed} + Q_2 * T \quad (3.3)$$

$$Q_2 = 3,59 - 9,09/T \quad (3.4)$$

Acorde a las recomendaciones de Sedapal, el tiempo de coagulación deber ser como máximo de 60 segundos. Las condiciones del tanque y caudal del tratamiento primario no permitieron que se realice la coagulación en un sistema mecánico. Por lo tanto, se optó por un sistema hidráulico de difusores en tubería. El diámetro de la tubería fue elegido de tal forma que asegurará un flujo turbulento: necesario para obtener una mezcla óptima entre el agua gris y el coagulante. Para ello, se empleó el número de Reynolds Re (Ecuación 3.5) y los datos mencionados en la tabla C.3. Cabe destacar que el caudal Q_2 de salida del sedimentador depende del tiempo, por lo cual se tabuló este parámetro y el número de Reynolds correspondiente. Luego,

se seleccionó el diámetro que aseguró un flujo turbulento durante todo el tiempo de operación ($Re > 4000$). Entonces, se seleccionó una tubería de 3" de diámetro y de 3 m de longitud.

$$Re = \frac{\rho * v_s * D}{\mu} \quad (3.5)$$

Tabla C.3
Diámetro de la tubería del sistema hidráulico de difusores

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Velocidad característica del fluido	v_s	m/s	variable
Viscosidad dinámica (agua)	ν	Pa.s	0.001
Densidad del líquido (agua)	ρ	kg/m ³	997
Diámetro de la tubería	D	pulgadas	3

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el sistema de floculación fue mecánico. Este estuvo compuesto por un tanque de 0.25 m³ de capacidad y un agitador BMA-150 de motor 0.25 kW. El volumen del tanque (V_{flocu}) fue determinado por medio de la ecuación de conservación de la masa (ecuación 3.6), con la condición que el tiempo de floculación esperado sea de 15 minutos y que el caudal variable de salida Q_3 (ecuación 3.7) sea mayor a 1 m³/h después de las 6 horas de funcionamiento de la planta.

$$Q_2 * \Delta T = V_{flocu} + Q_3 * \Delta T \quad (3.6)$$

$$Q_3 = 2,58 - 9/\Delta T \quad (3.7)$$

Conjuntamente, las dimensiones del sedimentador 2, necesario para sedimentar los flóculos formados gracias a los dos procesos anteriores, fue calculado siguiendo la metodología del primer sedimentador. La información sobre la composición del agua tratada por floculación-coagulación se encuentra en la tabla C.4. Asimismo, el caudal considerado para el cálculo fue de 2.58 m³/h. De esta forma, se obtuvo una velocidad de sedimentación de 1.1×10^{-4} m/s y un sedimentador de capacidad 6.54 m³ como se visualiza en la tabla C.5. Por lo cual, las dimensiones del sedimentador son 3.3 m de largo, 2.0 m de ancho y 1.3 m de altura (1.0 m de tirante de agua y 0.3 m de espacio libre).

Tabla C.4
 Agua tratada por coagulación-floculación

Característica	Unidad	Componente	
		Agua	Flóculo
Densidad	kg/m ³	997	1000
Diámetro de la partícula	mm	-	1x10 ⁻³
Viscosidad	kg/cm.s	1x10 ⁻³	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.5
 Dimensionamiento del sedimentador 2

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Caudal	Q_3	m ³ /h	2.58
Ancho del sedimentador elegido	B_e	m	2.00
Velocidad de sedimentación	V_s	m/s	1.1x10 ⁻⁴
Largo del sedimentador mínimo	L_{min}	m	3.27
Tirante de agua en el sedimentador elegido	h_{sed}	m	1.00
Capacidad del sedimentador	V_{sed}	m	6.54

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se determinó el filtro de arena para el tratamiento terciario del agua. El procedimiento se basó en calcular el área superficial de infiltración mínima; para así, elegir un filtro a presión que satisfaga la demanda. Es así que el área mínima requerida fue de 0.03 m². El valor anterior fue determinado considerando un caudal diario Q de 3.59 m³. Por ello, al aplicar la ecuación de Morrill y Wallace (ecuación 3.8) se pudo determinar que la cantidad de filtros necesarios n era 1. Además, se decidió emplear un filtro rápido de arena a presión para usar el menor espacio posible. Por ende, se trabajó con una tasa de infiltración de arena $v_i(t)$ de 120 m/día. De esta forma, se obtuvo, empleando la ecuación 3.9 y 3.10, el área superficial mínima A_i de 0.03 m².

$$n = 0,044 * Q^{1/2} \quad (3.8)$$

$$A_i = \frac{q_u}{v_i(t)} \quad (3.9)$$

$$q_u = \frac{Q}{n} \quad (3.10)$$

Finalmente, se determinó el volumen del tanque y la cisterna de almacenamiento del agua tratada. Las dimensiones de la cisterna fueron 2.3 m de altura, ancho de 2 m y largo de 4 m. Por otro lado, el tanque tuvo 1.45 m de altura y $3 \times 2 \text{ m}^2$ de base. Sumado a ello, se requiere una bomba de 1.84 HP con tubería de succión de 1" y tubería de impulsión de 3/4". Las dimensiones fueron determinadas considerando un flujo de agua tratada de $3.59 \text{ m}^3/\text{h}$, que resultan del caudal diario de agua gris de 50.22 m^3 procesada en 14 horas de operación (Tabla C.6). Asimismo, se proyectó que la cisterna fuera llenada en 4 horas y el tanque en 1.5 horas. El resumen de las dimensiones de las estructuras de almacenamiento se visualizan en la tabla C.7.

Tabla C.6
Caudal del agua tratada

Parámetro	Unidad	Valor
Flujo diario	$\text{m}^3/\text{día}$	50.22
Horas de operación	$\text{h}/\text{día}$	14.00
Flujo tratado	$\text{m}^3/\text{día}$	3.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.7
Estructuras de almacenamiento de agua tratada

Características	Unidad	Estructura	
		Cisterna	Tanque
Volumen	m^3	14.30	5.40
Tirante de agua	m	1.85	1.00
Altura	m	2.30	1.45
Ancho	m	2.00	2.00
Largo	m	4.00	3.00
Horas de llenado	h	4	1.5

Fuente: Elaboración propia