

# UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES

## Facultad de Medicina Humana

### Unidad de investigación



## INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**Título : “Ciclo de Vida Energético y Huella de Carbono en dos tipos de residencias familiares en la Ciudad de Lima”.**

### **Autores**

Apellidos y Nombres	Condición	Categoría	Dedicación
Dr. Muñoz Melgarejo, Mauricio	Docente Ordinario	Principal	D.E.
Mg. Muñoz Saenz, Jenny Caroline	Docente contratada		
Mg. Muñoz Saenz, Doris Marlene	Docente contratada		

**Línea de Investigación** : Transporte y urbanismo

**Resolución de aprobación** : No 0047-2018-R- Vrinv

**Fecha de inicio y final** : 24 de enero 2018 – 23 de enero 2019

Huancayo – Perú

2019

## **DEDICATORIA**

A mi esposa y madre MARTHA quien siempre estuvo acompañándonos en nuestros caminos, brindándonos su apoyo incondicional, sus grandes enseñanzas y su ejemplo de fortaleza y perseverancia; motivándonos en el logro de nuestros éxitos.

## **AGRADECIMIENTO**

Expresamos nuestro profundo agradecimiento en primer término a Dios por guiarnos, porque cada día nos bendice con la hermosa oportunidad de hacer realidad nuestros propósitos y en especial por la oportunidad de llevar a cabo esta investigación.

A las autoridades de la Universidad Peruana los Andes, por el financiamiento y el habernos facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta investigación.

Nuestro reconocimiento especial a la Facultad de Medicina Humana, que hicieron posible la realización de esta investigación.

## **PRESENTACIÓN**

El sector de la construcción actualmente es uno de los motores para el crecimiento de la economía peruana y para el desarrollo de la sociedad. Sin embargo, es uno de los principales responsables que contribuye en la emisión de gases de efecto invernadero a nivel mundial, en especial las edificaciones residenciales debido a que, durante el uso y la fabricación de materiales de construcción, requiere un elevado consumo energético, así como de recursos no renovables, encaminado a satisfacer las necesidades de confort de los usuarios.

Desde esta perspectiva, la presente investigación, tiene el propósito de realizar una evaluación del ciclo de vida de dos tipos de residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima, enfocado en dos principales categorías de impacto, el consumo energético (huella de energía) y huella de carbono (Impacto potencial calentamiento global); Para ello se aplicó la metodología de evaluación del ciclo de vida, de acuerdo a los estándares ISO 14040/44, que permite cuantificar impactos ambientales de una edificación durante todo su ciclo de vida, desde su origen (extracción de la materia prima), hasta su disposición final (residuo), realizando un inventario completo del consumo de recursos y emisiones asociados al ciclo de vida. En nuestro estudio, el análisis del ciclo de vida será evaluado, desde la fase de construcción, uso-mantenimiento y demolición con la finalidad de identificar la fase crítica que genere mayores impactos ambientales y proponer alternativas de mejora encaminadas a incrementar la eficiencia energética y la mitigación del cambio climático y sirva de ejemplo para el parque habitacional en la ciudad de Lima, mediante la aplicación de energías renovables como la energía solar, electrodomésticos eficientes y materiales de construcción ecológicos, que contribuyen significativamente en la reducción del consumo energético y la huella de carbono.

En este sentido, el estudio pretende aportar conocimientos sobre los potenciales impactos ambientales en materia de consumo energético y las emisiones GEI que se generan durante el ciclo de vida de las residencias y proporcionar alternativas, que ayuden ahorrar energía, mejorar la eficiencia energética y a minimizar los niveles de la huella de carbono de manera que pueda contribuir en la mitigación del cambio climático.

La presente investigación está constituida por los siguientes capítulos:

El capítulo I, es el planteamiento del problema, donde se precisa la formulación del problema, la justificación y el objetivo de la investigación.

Capítulo II, el marco teórico, desarrolla los antecedentes, las bases teóricas – científicas de la investigación sobre el ciclo de vida energético de una edificación, el cambio climático y la huella de carbono y la evaluación del ciclo de vida.

Capítulo III, Hipótesis, formulación de la hipótesis, se definen las variables, que han de analizarse y las relaciones que existen entre ellas, constituyendo la base de la investigación.

Capítulo IV, Método, presenta la metodología y diseño de la investigación, población y muestra del estudio, variables, instrumentos, técnicas y procedimiento de recolección de datos.

Capítulo V; Presentación de resultados, constituye el análisis e interpretación de resultados del estudio y contrastación de la hipótesis.

Análisis y Discusión de resultados; análisis crítico de los resultados del estudio y su contrastación con otros estudios de otros países, así como las alternativas de mejora enfocadas a la eficiencia energética y reducción de la huella de carbono;

Finalmente, las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

## CONTENIDO

PRESENTACIÓN

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

### CAPITULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	Descripción de la realidad problemática	1
1.2	Delimitación del problema	5
1.3	Formulación del problema	6
	1.3.1 Problema general	6
	1.3.2 Problemas específicos	6
1.4	Justificación	6
	1.4.1 Social	6
	1.4.2 Teórica	7
	1.4.3 Metodológica	7
1.5	Objetivos	8
	1.5.1 Objetivo general	8
	1.5.2 Objetivos específicos	8

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1	Antecedentes	9
2.2	Bases Teóricas o científicas	12
	2.2.1 Matriz energética del Perú	12
	2.2.2 Cambio climático y huella de carbono	14
	2.2.3 Análisis del ciclo de vida	17
	2.2.4 Metodología para la medición de la huella de carbono	20
2.3	Marco conceptual	23

### CAPÍTULO III

	HIPÓTESIS	25
--	-----------	----

3.1 Hipótesis general	25
3.2 Hipótesis específica	25
3.3 Variables	25

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA**

4.1 Método de Investigación	30
4.2 Tipo Investigación	31
4.3 Nivel de investigación	31
4.4 Diseño de la investigación	31
4.4.1 Tipo de diseño	32
4.4.2 Etapas de la investigación	32
4.5 Población y muestra	36
4.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	43
4.7 Técnicas de procesamiento y análisis de datos	44
4.8 Aspectos éticos de la investigación	45

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS**

5.1 Descripción de resultados	46
5.1.1 Energía incorporada y huella de carbono materiales de Construcción	46
5.1.2 Residuos sólidos de construcción, mantenimiento y demolición	50
5.1.3 Consumo energético y huella de carbono del ciclo de vida residencia unifamiliar y multifamiliar	53
5.2 Contrastación de hipótesis	57
5.2.1 Hipótesis general	58
5.2.2 Hipótesis específica 1	62
5.2.3 Hipótesis específica 2	65

<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	75
Análisis comparativo con otros estudios	77
Análisis comparativo con otros estudios de Europa	82
Análisis comparativo de alternativas 1 y 2	87
Análisis comparativo de alternativas 3 y 4	92
<b>CONCLUSIONES</b>	96
<b>RECOMENDACIONES</b>	98
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	99
<b>ANEXOS</b>	
Anexo 1: Matriz de consistencia	104
Anexo 2: Operacionalización de variables	105
Anexo 3: Matriz de operacionalización del instrumento	106
Anexo 4: Terma solar	107
Anexo 5: Sistema solar fotovoltaico	108

## CONTENIDO DE FIGURAS

No	Descripción	Página
1	Consumo energético nacional sector residencial y comercial 2011	2
2	Materiales predominantes de las viviendas en Lima	3
3	Fuentes de Emisiones de CO <sub>2</sub> del sector energía	4
4	Matriz Energética del Perú 2012	13
5	Recursos energéticos por fuentes para la generación de electricidad	13
6	Consumo Final de Energía por Sectores	14
7	Serie de Estándares ISO 14040 del ACV	18
8	Etapas de la Metodología del ACV - ISO 14040	19
9	Resumen de alcances y emisiones a través de la cadena valor	22
10	Etapas de la investigación	33
11	Alcance del estudio	35
12	Distribución de hogares en Lima metropolitana	37
13	Ubicación de la vivienda unifamiliar	39
14	Fachada principal vivienda unifamiliar	40
15	Planos vivienda unifamiliar - Primer y segunda planta	41
16	Ubicación de la vivienda multifamiliar	43
17	Fachada principal y plano del departamento vivienda multifamiliar	58
18	Distribución porcentual de materiales de construcción, energía incorporada y huella de carbono en la vivienda unifamiliar	48
19	Distribución porcentual de materiales de construcción, energía incorporada y huella de carbono en la vivienda multifamiliar	49
20	Distribución porcentual de ciclo de vida energético vivienda unifamiliar	54
21	Distribución porcentual huella de carbono vivienda unifamiliar	55
22	Distribución porcentual de ciclo de vida energético vivienda multifamiliar	55
23	Distribución porcentual huella de carbono en la vivienda multifamiliar	56
24	Comparación del estudio con otros estudios de diferentes países en análisis de ciclo de vida energético y potencial calentamiento global en edificaciones residenciales	61

25	Comparación del estudio con otros estudios de diferentes países de Europa en análisis de ciclo de vida energético y potencial calentamiento global en edificaciones residenciales	65
26	Alternativa 1: Comparación energético y huella de carbono sistemas constructivos concreto armado y madera.	69
27	Comparación energético y huella de carbono materiales de construcción convencional y ecológica	69
<b>28</b>	<b>Comparación energética, huella de carbono situación inicial, alternativa 1, 2,3 y 4</b>	<b>74</b>

## CONTENIDO DE TABLAS

No	Descripción	Página
1	Indicador de la huella de energía	36
2	Indicador Huella de carbono	36
3	Flujo, energía incorporada y huella de carbono de materiales de construcción vivienda unifamiliar	47
4	Flujo, energía incorporada y huella de carbono de materiales de construcción vivienda multifamiliar	48
5	Residuos sólidos de construcción, mantenimiento y demolición de vivienda unifamiliar	52
6	Residuos sólidos de construcción, mantenimiento y demolición de vivienda multifamiliar	53
7	Consumo energético y huella de carbono en las fases del ciclo de vida residencia unifamiliar	54
8	Consumo energético y huella de carbono en las fases del ciclo de vida residencia multifamiliar	55
9	Consumo de energía y huella de carbono fase construcción unifamiliar y multifamiliar	57
10	Consumo energético y huella carbono fase operación de la vivienda unifamiliar y multifamiliar	57
11	Investigaciones sobre análisis de ciclo de vida en edificaciones residenciales	60
12	Investigaciones sobre análisis de ciclo de vida en edificaciones residenciales en Europa	64
13	Comparación energético y huella de carbono sistemas constructivos de concreto armado y madera	67
14	Comparación energético y huella de carbono materiales de construcción convencional y ecológico	68
15	Comparación energética, huella de carbono y económico electrodomésticos convencionales eficientes	71
16	Comparación energética, huella de carbono y económico sistema eléctrico y sistema fotovoltaico	72
17	Comparación energética, huella de carbono y económico sistema eléctrico y sistema fotovoltaico	73

## **RESUMEN**

El objetivo principal del estudio es determinar la fase en el ciclo de vida de dos tipos de residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima que demanda mayor consumo energético y contribuye a los altos niveles de la huella de carbono, con la finalidad de reducir dichos impactos ambientales y proponer alternativas de mejora enfocadas a la eficiencia energética y la mitigación del cambio climático.

En el estudio se ha aplicado un método de evaluación del ciclo de vida (ECV) de acuerdo con los estándares ISO 14040 y 14044. Este modelo analiza las fases del ciclo de vida de la residencia, desde la fase de construcción, operación y demolición para estimar el consumo total de energía y la huella de carbono en 50 años de vida útil.

Los resultados muestran que tanto en la residencia unifamiliar y multifamiliar la fase de operación tiene la mayor demanda energética (56 y 80% respectivamente). La mayor contribución en la huella de carbono en la residencia unifamiliar es la fase de construcción (56%) y en la residencia multifamiliar es la fase de operación (69%), asociados al tipo, cantidad de material de construcción y las fuentes de energía que se usa para su producción y a la energía eléctrica para el uso de electrodomésticos, lo cual es significativamente influenciada por el consumo energético per cápita y el mix energético del país.

Las conclusiones revelan que la sustitución de los materiales de construcción convencionales por ecológicos, la implementación del sistema solar térmico y fotovoltaico, así como el uso de electrodomésticos eficientes demuestra ser una oportunidad que contribuye en la reducción del consumo energético y los niveles de la huella de carbono.

### **Palabras claves**

Huella de carbono, energía primaria, evaluación del ciclo de vida, residencia unifamiliar y multifamiliar

## **ABSTRACT**

The main aim of this research was to establish which phase in the life cycle of a single family house and multifamily buildings in the Lima city – Perú that major energy consumption demand and generates biggest carbon footprint, for the purpose to reduce environmental impacts and thereby alternatives focus on improving energy efficiency and the mitigation of climate change.

In the study, a practical life cycle assessment (LCA) method has been applied in accordance with ISO standards 14040 and 14044. This model focused on the phases of a residence life cycle that includes house construction, operation and demolition to estimate total energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions over a 50 year lifespan.

The results show that the operation phase has highest energy demand in the single family house and multifamily buildings (56 y 80% respectively). The largest contribution carbon footprint during the single family residence life cycle is the construction phase (56%) and in the multifamily buildings is the operation phase (69%), associated with the type, quantity of material construction and the energy sources used for its production and to the electric power by the use electrical appliance, which is principally influenced by the energy consumption per capita and the energy mix of the country.

The research findings reveal that the replacement of the traditional building materials for ecological, the implementation of thermal and photovoltaic solar system, as well as the use of efficient electrical appliances demonstrated to be an opportunity that contributes significantly in the reduction of energy consumption and the levels of carbon footprint.

### **Keywords**

Carbon footprint, primary energy, life cycle assessment, single family house and multifamily buildings

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

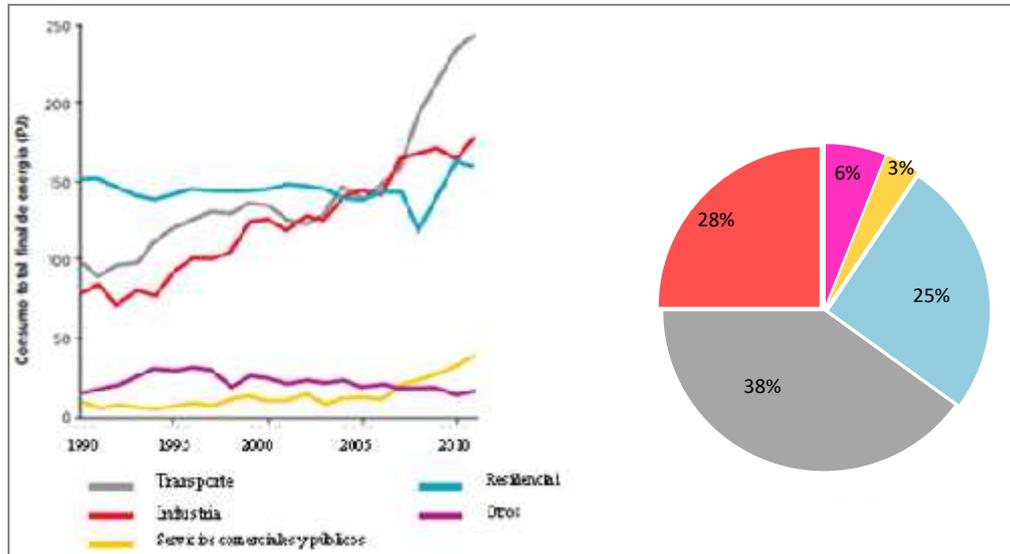
#### **1.1 Descripción de la realidad problemática**

El sector de la construcción es una de las actividades industriales de mayor importancia para el desarrollo socio- económico en la ciudad de Lima y a nivel nacional. Según el crecimiento del PIB nacional de los últimos 10 años, la construcción es uno de los sectores que más ha crecido de manera sostenida junto a la minería, ha tenido un crecimiento promedio anual del 10,5%. Así mismo para este año registró un crecimiento de 5,38%, reflejado en el aumento del consumo interno de cemento de 3,52% y al repunte del gasto de capital del sector público, así como por el crecimiento de la ejecución de importantes obras (9,60%), debido a la mayor demanda del sector privado (edificaciones residenciales), así como del sector público (MVCS, 2017).

A pesar de su importancia para el crecimiento en la ciudad de Lima, el sector de la construcción, en especial el sector residencial es una de actividades principales que requiere un consumo elevado de energía a lo largo de su ciclo de vida desde la producción de materiales, el transporte de los mismos, construcción de la vivienda, uso - mantenimiento y demolición, lo que esto implica el alto consumo de combustibles fósiles y otros recursos no renovables y la generación de gases de efecto invernadero (GEI), cuyo principal efecto es el calentamiento del planeta, contaminación atmosférica y alteración de los ecosistemas (MVCS, 2014, p. 14) .

Se estima que el sector residencial en el Perú ocupa el primer lugar en consumo de energía eléctrica (45,1%) y el tercer lugar en consumo de energía total (25%) (IRENA, 2014, p.22).

Ver figura 1.



**Figura 1.-** Consumo energético nacional sector residencial y comercial 2011, fuente: IRENA (2014) Informe Perú (pag. 22). Copyright © IRENA 2014

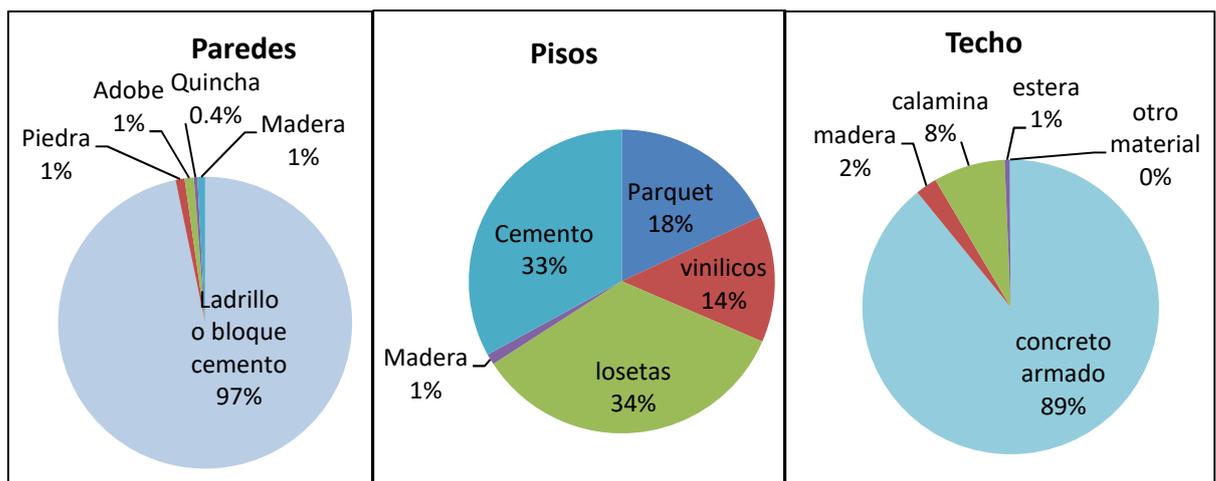
Según un análisis de las viviendas nacionales (MVCS, 2014, p.58), las viviendas de nivel socioeconómico A son las que consumen mayor energía con un promedio 1050,2 kWh/año, mientras que el nivel B y C consume 498,2 y 277,87 kWh/año y en cuanto a los niveles D y E tiene el menor consumo de energía de 129,55 y 52,95 kWh/año respectivamente.

Cabe destacar que el consumo energético del sector residencial, corresponde a la fase de uso de la residencia, por lo que en el Perú es poco conocido, en general la importancia del consumo energético en las demás etapas de está, ya que estas etapas también generan un impacto significativo sobre el medio ambiente.

La etapa de fabricación de materiales, es la etapa que también tiene un aporte significativo en el consumo energético y en las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que el

sistema constructivo que mayormente se emplea en las edificaciones unifamiliares y multifamiliares en Lima son de concreto armado o mampostería confinada, paredes de ladrillo o bloques de cemento, pisos de cemento o losetas y techos de concreto armado (Ver figura 2) que demanda una gran cantidad de materiales, que alcanza aproximadamente un peso total de 2,3 ton/m<sup>2</sup> de los cuales, los principales materiales como el cemento, ladrillos y el acero son los que contribuyen significativamente sobre el medio ambiente. La industria del acero, de aluminio y de cemento son los principales consumidores de energía y emisores de los gases de efecto invernadero (Salazar. J, 2012).

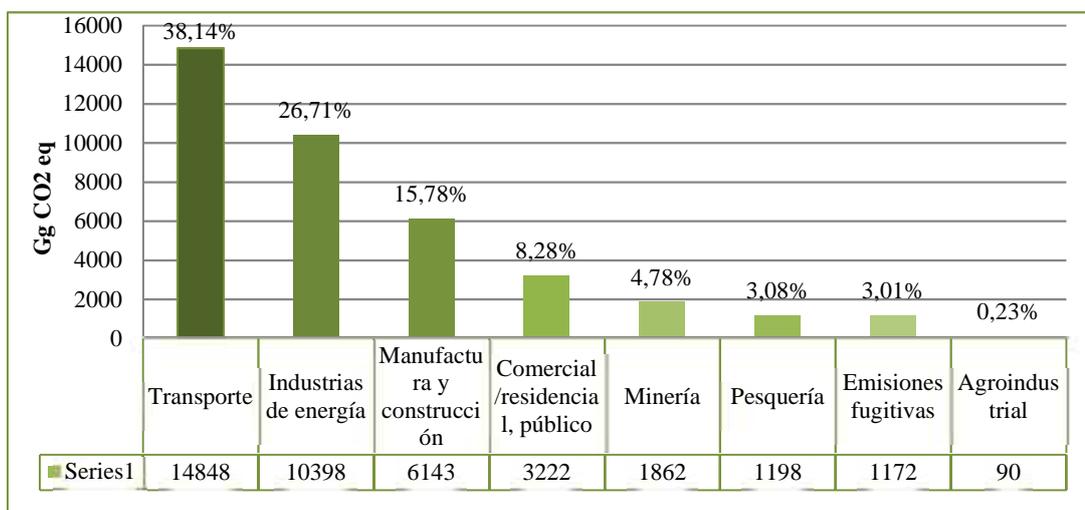
Para producir 1kg de aluminio se requiere un consumo de 155 MJ, cinco veces más del que se necesita para producir 1 kg de acero (35,5MJ) (Hammond & Craig, 2011, p.5). Esta información, corresponde a la base de datos de Reino Unido. En el caso de Perú se desconoce dicha información, no existe una base de datos sobre inventarios de ciclo de vida de materiales de construcción, lo que podría diferir de ésta o de otros datos disponibles, dado que la energía incorporada depende de la matriz energética de cada país, de la tecnología y del transporte.



**Figura 2.-** Materiales predominantes de las viviendas en Lima, fuente: adaptado de APEIM (2017) Niveles socioeconomicos (pag. 31).

En cuanto a las emisiones CO<sub>2</sub>, se estima que el sector comercial/residencial y público ocupa el cuarto lugar (8%) en contribución a las emisiones de CO<sub>2</sub> en el Perú, que provienen

principalmente del consumo de electricidad y del uso de diferentes combustibles fósiles (MINAM, 2013, p.84). Ver figura 3.



**Figura 3.-** Fuentes de Emisiones de CO<sub>2</sub> del sector energía, fuente: MINAM (2013, p.84)

Frente a esta problemática en lo que se refiere a las implicaciones que tiene el sector de construcción en el actual cambio climático muchos países y organismos internacionales han tomado medidas con el fin de asumir sus responsabilidades en los impactos que generan. Por ello la Unión Europea tiene entre sus objetivos mejorar la eficiencia energética y la producción de energías renovables para cumplir con el protocolo de Kyoto y el acuerdo de Paris (2015), de reducir sus emisiones globales en al menos 20% respecto a los niveles de 1990 para el año 2020 (IPCC, 2014)

El Perú en comparación con los países europeos no tiene problemas en temas de mitigación, debido a que no es un gran emisor de GEI, su contribución al cambio climático es menor (0,4%), pero sí es un país altamente vulnerable al cambio climático, por lo que viene desarrollando programas nacionales de conservación de bosques para la mitigación del cambio climático y proyectos de mecanismo de desarrollo limpio (MDL), sin embargo el sector residencial no están preparados para hacer frente a los efectos del cambio climático,

aún no existe una cultura de uso racional de la energía y los recursos naturales y a esto se suma la escasa aplicación de medidas efectivas y sostenibles para la reducción de emisiones, como el fomento del uso de energías renovables, la eficiencia energética y la promoción de los biocombustibles (MVCS, 2013, p.43).

## **1.2 Delimitación del problema**

La presente investigación está centrada en la evaluación de dos categorías de impactos; el consumo energético y la huella de carbono que se genera a lo largo del ciclo de vida de una residencia unifamiliar de nivel socioeconómico B, ubicada en el distrito de la Molina y multifamiliar de nivel socioeconómico, ubicada en el distrito de Surquillo en la ciudad de Lima.

El tipo de las residencias seleccionadas son representativas del parque habitacional de la ciudad de Lima, las que reúnen las características promedio de los hogares de 4 personas por familia, dado que la mayor distribución de los hogares se encuentra en los niveles socioeconómicos B y C. De esta manera el resultado obtenido nos permitió extrapolar al parque habitacional de la ciudad de Lima

Los límites del sistema se han considerado las fases del ciclo de vida de la residencia en estudio: fase de construcción que incluye las etapas de producción y construcción, fase de operación que incluye las etapas de uso y mantenimiento y la fase de demolición, para una vida útil de 50 años.

La unidad de referencia que se utilizará para cuantificar las entradas y salidas del sistema en estudio, es m<sup>2</sup> de superficie habitable.

## **1.3 Formulación del problema**

### **1.3.1 Problema general**

¿Qué fase del ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima demanda mayor consumo energético y genera mayor huella de carbono?

### **1.3.2 Problema específico**

- a. ¿Cuál es la huella de carbono y consumo energético durante el ciclo de vida de la residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima?
- b. ¿Qué propuestas de mejora ambiental son las más adecuadas para reducir el consumo energético y los niveles de la huella de carbono en el ciclo de vida de la residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima?

## **1.4 Justificación**

### **1.4.1 Social**

La creciente necesidad de un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, el uso racional y eficiente de la energía así como la reducción de las emisiones contaminantes en las edificaciones residenciales con la intención de lograr una mejor calidad de construcción, mayor confort para los usuarios y que contribuya en menor medida a los impactos ambientales, requiere el desarrollo de estas investigaciones enfocadas en el análisis del ciclo de vida, que permite identificar y evaluar los impactos potenciales ocurridos durante el ciclo de vida de la edificación que contribuirá a identificar oportunidades de reducir las emisiones, minimizar el consumo energético y recursos dentro de la cadena valor de un edificio.

### **1.4.2 Teórica**

Actualmente en el Perú, muchos de los organismos involucrados en el sector de la construcción: arquitectos, ingenieros, constructores, agentes comerciales, inversionistas, administración municipal, ministerio de vivienda, construcción y saneamiento entre otros, realizan sus proyectos, en términos generales, bajo el modelo económico de la producción actual, dejando de lado el aspecto ambiental. Esto evidencia el poco compromiso que se tiene relacionado a los aspectos ambientales de este sector a pesar de que son los más grandes consumidores de energía y recursos y emite cantidades considerables de gases de efecto invernadero (GEI). Por lo que se cuenta con escasas investigaciones que analicen el comportamiento ambiental de la industria de la construcción.

Esta investigación contribuirá a generar nuevos conocimientos y proporcionar criterios de análisis y evaluación, eficaces y prácticos, para el desarrollo de proyectos de construcción que ayuden ahorrar energía y a minimizar los impactos ambientales y contribuir a la edificación sostenible.

### **1.4.3 Metodológica**

A pesar del elevado porcentaje de consumo energético que tienen los edificios en su fase de uso, es imprescindible analizar el resto de las etapas que también tienen una contribución significativa sobre el medio ambiente.

Esta investigación está centrada en la evaluación del consumo energético y la huella de carbono, desde una perspectiva integradora, basado en la metodología científica, análisis del ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar. Pretende proporcionar información de los impactos energéticos y medioambientales de los distintos materiales, de las etapas de construcción, uso y demolición para que los edificios se proyecten con mejores

criterios medioambientales y con una estrategia energética global a largo plazo, fomentando técnicas constructivas basadas en productos y procesos de menor consumo energético e impacto ambiental.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Determinar la fase del ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima que demanda mayor consumo energético y genera mayor huella de carbono.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- a. Determinar la huella de carbono y consumo energético durante el ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima.
- b. Proponer alternativas de mejora ambiental para reducir el consumo energético y los niveles de la huella de carbono en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes**

El sector de la construcción requiere un consumo elevado de materiales y energía, como consecuencia, genera grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello cada vez más se incrementa el interés de atribuir responsabilidad a la industria de construcción con el fin de que sus actividades contribuyan en menor proporción a los impactos ambientales (Rivela, 2012, p.63). En este sentido se han desarrollado en la esfera internacional más de 600 sistemas y diversas metodologías de evaluación del comportamiento ambiental en el sector de construcción, por lo que en el ámbito europeo y a nivel internacional se ha establecido metodologías de evaluación de referencia como el análisis del ciclo de vida ISO 14040 que evalúa un amplio espectro de aspectos ambientales, cuyos impactos son considerados de especial relevancia, tales como el comportamiento energético de la edificación, el análisis de la huella de carbono y la huella hídrica (Rivela, 2012, p.65)

A continuación se presentan las investigaciones relacionadas con el tema:

En el estudio desarrollado por Atmaca y Atmaca (2015), evalúa el ciclo de vida energético y las emisiones CO<sub>2</sub> en dos residenciales multifamiliares urbana y rural en Gaziantep - Turquía, aplicando la metodología del análisis del ciclo de vida en las fases del ciclo de vida

de la residencia: construcción, operación y demolición. Considerando una vida útil de 50 años, determinó que la fase de operación tiene la mayor contribución en ambas residencias urbana y rural del 76 – 73% del consumo total energético del ciclo de vida y el 59 – 74% de las emisiones CO<sub>2</sub> respectivamente. Los resultados muestran que la mayor demanda energética es en la residencia urbana debido a los estándares de vida y los hábitos de consumo.

Cihat Onat et al. (2014), analizaron la huella de carbono en una edificación residencial y comercial en los Estados Unidos, aplicando el enfoque de evaluación del ciclo de vida híbrido input – output y la metodología Greenhouse Gas Protocol. Los resultados señalan que la fase de uso de la edificación residencial y comercial genera las más altas emisiones GEI (91%) y la fase de disposición final tiene una contribución insignificante en todo el ciclo de vida en el consumo de energía y emisiones de carbono. En cuanto a las emisiones indirectas producto de la electricidad (alcance2) con 48%, representa la más alta huella de carbono comparado con las emisiones directas (alcance 1) con 20.4%, producto del uso de combustibles fósiles en la residencia.

En un estudio nacional realizado por García Torres (2014), realizó una evaluación ambiental del ciclo de vida de una residencia unifamiliar en la ciudad de Lima, aplicando la metodología análisis del ciclo de vida en el que se consideró las fases de preuso, uso y fin de vida. Concluye que el consumo total de energía primaria fue de 8210 GJ donde la etapa de uso es la etapa más significativa (55%). En cuanto al indicador potencial calentamiento global fue de 446 358 kg CO<sub>2</sub> eq, donde la etapa de preuso representa la mayor contribución en 58.4%, mientras que la etapa de uso representa el 38%, debido al alto consumo energético de los principales materiales de construcción.

En Lisbon Portugal, Bastos J. et al. (2013), evaluaron el ciclo de vida energético y las emisiones GEI en tres tipos de residencias multifamiliares (tipo 2 de 367m<sup>2</sup>, tipo 3 de 472m<sup>2</sup> y tipo 8 de 1041m<sup>2</sup>). El estudio se analizó las fases de construcción, mantenimiento y uso. Los resultados señalan que la fase de uso representa el mayor requerimiento (69 – 83%) de energía primaria y la mayor contribución emisiones GEI, mientras que la fase de construcción representa 14 – 25% del consumo energéticos y emisiones GEI en los tres tipos de residencias

Mosteiro – Romero. M et al. (2013), comparó el ciclo de vida energético y los impactos ambientales de dos residencias unifamiliares que cumplen con los estándares de eficiencia energética (sello verde), una residencia está ubicada en New Jersey – Estados Unidos implementado con los estándares LEED – H (Leadership in Energy and Environmental design for homes LEED - H) y la otra residencia ubicada en Chur – Suiza, implementado con los estándares Minergie-P. Los resultados señalan que el consumo de energía primaria para la residencia de New Jersey fue de 58954 MJ/m<sup>2</sup> y para la residencia de Suiza fue de 37753 MJ/m<sup>2</sup>. El mayor consumo energético para la casa de New Jersey fue asociado con la fase operacional (79,5%), mientras que para la casa de Suiza el consumo fue dividido entre la fase operacional (49,2%) y la fase de construcción (49,1%). En cuanto al potencial calentamiento global en el ciclo de vida para la casa de New Jersey fue 2730 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>, cuya mayor contribución fue de la fase operacional (78%), lo cual fue muchos más alto que la casa de Suiza que obtuvo 1386 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> y para Suiza un valor de 4,75 GJ/m<sup>2</sup>, cuyo mayor aporte fue de la fase de construcción (61,4%). Los resultados demuestran que Minergie edificaciones es superior en cuanto a la eficiencia energética debido al uso de energías renovables, solar y geotérmica.

## **2.2 Bases teóricas o científicas**

### **2.2.1 Matriz energética del Perú**

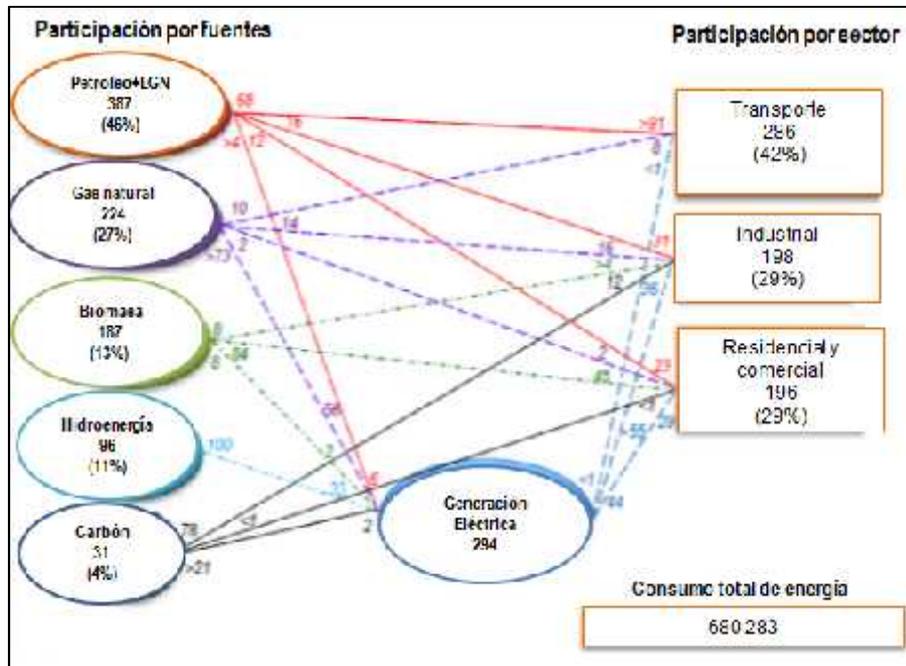
La demanda de energía del Perú ha mantenido una tendencia de crecimiento al nivel del crecimiento de la actividad económica y los ingresos de la población. Sin embargo, en la comparación del consumo energético por habitante (1308 Kw-h) es inferior al promedio de países de la región, pero con una tendencia de crecimiento (BM, 2014).

El Balance Energético Nacional aporta información sobre la composición de la matriz energética, desagregada por fuentes y consumo. Contabiliza el consumo de energía que ingresa al sistema socioeconómico, qué transformaciones sufre para su utilización (MINEM, 2012).

La energía final consumida por los sectores socioeconómicos (residencia, industria, transporte, agro, pesca, minería, comercio y servicios) está constituida por el total de la energía primaria y la energía secundaria. En el proceso de transformación de la energía, así como en su transporte se producen pérdidas, por lo que la energía final es menor (OLADE, 2012). Una aproximación a la dinámica de las transformaciones y usos de la energía se muestra en la matriz energética. Ver figura 4.

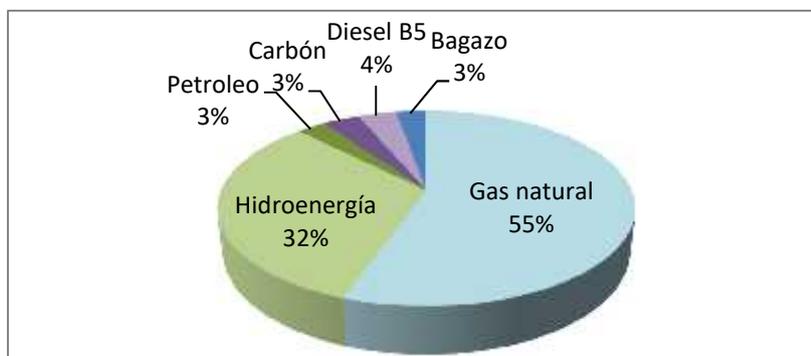
La estructura del consumo energético históricamente estuvo concentrada en el consumo de hidrocarburos, en particular petróleo y sus derivados. Muestra de ello es la evolución de su oferta de energía primaria que en los últimos años ha dado una mayor participación al gas natural y a la energía hidroeléctrica, debido a la explotación del gas de Camisea (2002), no obstante todavía tenemos una fuerte dependencia de petróleo. Durante el año 2012 (figura 5) el petróleo y líquidos del gas y el gas natural representaron la principal fuente de energía con 46% y 27% respectivamente, biomasa 13%, hidroenergía 11% y carbón 4% (MINEM,

2012). En cuanto a las energías renovables no convencionales, la energía solar y eólica, todavía cuenta con un porcentaje bajo de participación en la matriz energética, pero con perspectivas de incrementarse.



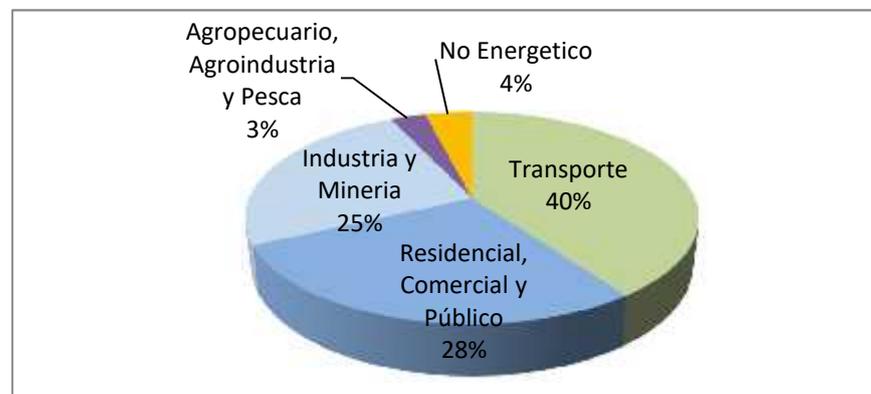
**Figura 4.** Matriz Energética del Perú 2012, fuente: MINEM (2012).

El consumo de los recursos energéticos, por fuente, para la generación de electricidad (Mix eléctrico) indica que en el año 2012 (figura 5), el gas natural tiene la mayor representación del 55,4 %, seguido de la hidroenergía 32,15%, Petróleo 2,72%, carbón mineral 3,36% completando con diesel y bagazo con porcentajes menores. El consumo del mix eléctrico fue 298 916000 GJ (MINEM,2012).



**Figura 5.** Recursos energéticos por fuentes para la generación de electricidad (Mix eléctrico), fuente : MINEM (2012)

El consumo final de energía por sectores en el año 2012 como se muestra en la figura No8, el sector transporte tiene el mayor porcentaje de participación con 40%, seguido del sector residencial, comercial y público 28%, el sector industrial y minero 25%. El consumo de los sectores Agropecuario, Agroindustrial y Pesca, representan el 3% y el rubro no energético el 4% que comprende a los derivados no energéticos del petróleo crudo y gas natural (aceites lubricantes, solventes, etc). El consumo de energía del sector transporte respecto al año anterior, se incrementó en 5% debido a un mayor crecimiento del parque automotor, reflejo del crecimiento económico en los últimos años (MINEM, 2012).



**Figura 6.** Consumo Final de Energía por Sectores (Balance Energético Nacional 2012, fuente: MINEM (2012).

## 2.2.2 Cambio climático y huella de carbono

El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (IPCC, 2014).

El problema radica en las múltiples y cada vez más evidentes transformaciones en el sistema climático. La causa de dicho fenómeno es originado por el progresivo incremento en las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera. Las emisiones de los seis gases de efecto invernadero cubiertos por el protocolo de Kioto han aumentado un 80 % desde 1970 y un 45 % desde 1990 alcanzando 54 Gt CO<sub>2</sub>eq en 2013 (ICE, 2016, p.13).

Este incremento en las concentraciones es provocado por emisiones antropogénicas a la atmósfera de estos mismos gases efecto invernadero, consecuencia de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y los cambios en el uso de suelo, así como diversos procesos industriales (IPCC, 2014, p.42).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático con sede en Ginebra-Suiza, ha indicado que el riesgo del cambio climático es severo y que su impacto aumentará notablemente con un incremento de las temperaturas global del planeta en 2 °C por encima de las registradas en la época preindustrial (IPCC, 2014, p.42).

Los principales efectos que el planeta está comenzando a experimentar como consecuencia del cambio climático son, la menor disponibilidad de agua y la mayor ocurrencia de catástrofes climáticas. América Latina y el Caribe deberá hacer frente a presiones adicionales sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, el incremento de los incendios forestales, mermas importantes de la productividad agrícola en algunas regiones, entre otros; todo lo cual afectará el desarrollo económico y social de los países (CEPAL, 2013, p.13).

El debate sobre el cambio climático ha trascendido al comercio internacional y, es liderado por los países de la Unión Europea y Estados Unidos que han implementado iniciativas públicas y/o privadas de etiquetado de huella de carbono de los productos. Mediante dicho

etiquetado se indica a los consumidores la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>/GEI liberadas en su ciclo de vida (proceso de producción, transporte y/o eliminación), ya sea producido localmente o importado (CEPAL, 2013, p.24).

A nivel internacional se ha implementado el Protocolo de Kyoto, cuyo mercado define los objetivos de reducción de emisiones de GEI de los países firmantes. Más allá de las reducciones que podrán efectivamente realizar, existen tres mecanismos que les permiten cumplir sus compromisos, uno de intercambio de cuotas de emisiones y dos de proyecto. La Implementación Conjunta (IC), está orientada a la relación entre los países firmantes, y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) les permite realizar proyectos de reducción de emisiones o de secuestro de emisiones de GEI en países no firmantes. Los IC generan Créditos ERU (Emissions Reduction Units) y los MDL, Créditos CER (Certified Emission Reduction). Estos tres mecanismos regulados utilizan metodologías precisas de inventarios de GEI (CEPAL, 2013, p.21).

En el caso de los países en vías de desarrollo , como es el caso de la mayoría de los países América Latina y el Caribe, un patrón exportador más acorde con las aspiraciones de desarrollo sostenible y menos vulnerable a las exigencias climáticas frente a la instalación de un concepto económico que considera la reducción de las emisiones contaminantes, exige a los sectores productivos realizar avances inmediatos en los proceso de cuantificación de sus emisiones y de disminución de los efectos climáticos, con el fin de resguardar su actual posición competitiva (CEPAL, 2013, p.30).

Esta situación ha provocado la aparición de nuevos temas en la agenda comercial, siendo la Huella de Carbono (HC) la que ha cobrado una mayor relevancia. La huella de carbono, según la definición, es un indicador que mide la cantidad de gases efecto invernadero,

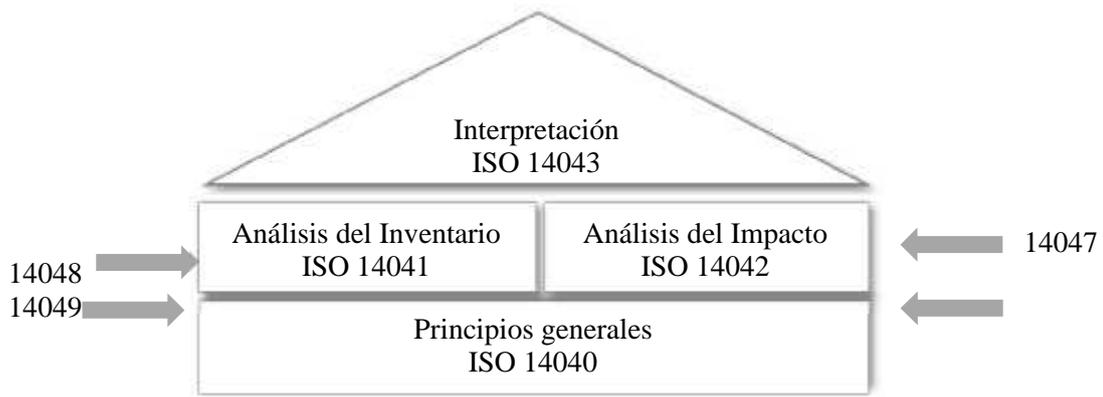
expresados en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, asociados a las actividades de una empresa, entidad, evento, producto/servicio o persona individual (Carbon Trust, 2012, p.4). Por lo tanto lo que mide la huella de carbono es la contribución de cada una de estas actividades al Calentamiento Global.

### **2.2.3 Análisis del ciclo de vida**

La norma ISO 14041 (1998), define el análisis de ciclo de vida como “una técnica para evaluar los aspectos medioambientales y los potenciales impactos asociados con un producto, proceso o actividad en todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de los recursos, proceso de producción, el uso del producto, su reúso, reciclado o disposición final (de la cuna a la tumba) (Hammond & Craig, 2011).

The Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) es la principal organización que ha desarrollado y liderado las discusiones científicas acerca del ACV. Posteriormente, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) apoyó este desarrollo para establecer una serie de estándares enfocados a la Gestión Ambiental, con el fin de contar con una nueva herramienta de gestión ambiental que se podrá ofrecer a las empresas para realizar la evaluación del ciclo de vida de sus productos (Sima Pro, 2016, p.7).

Estos estándares incluyen las series ISO-14040 sobre el ACV, representadas por las normas ISO14040, ISO14041, ISO14042 e ISO14043. Ver figura 7.



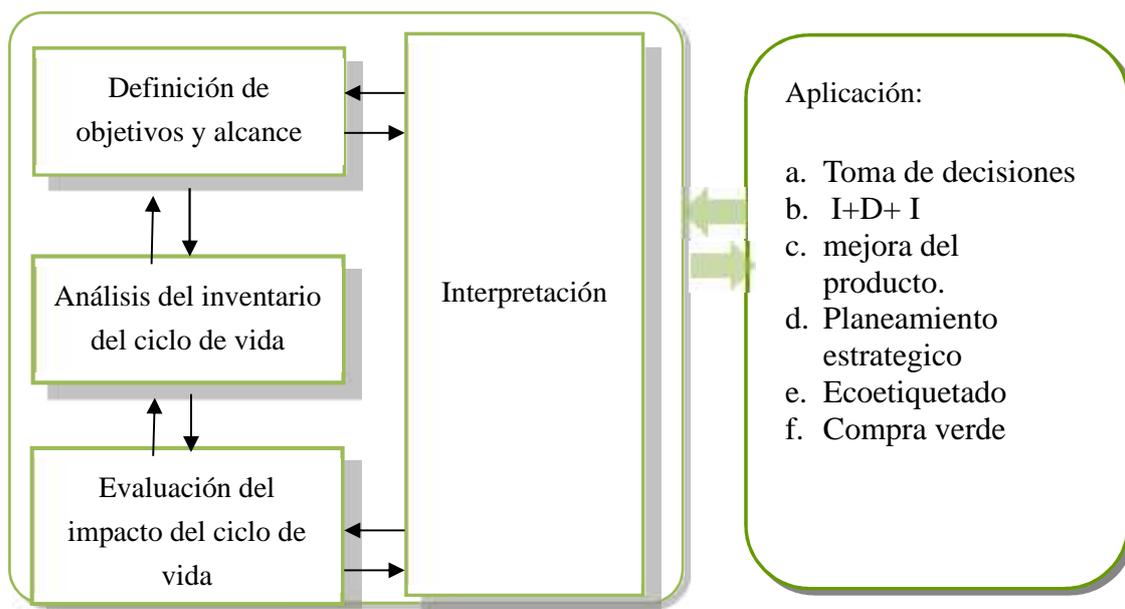
**Figura 7.** Serie de Estándares ISO 14040 del ACV, fuente: Adaptado (Sima Pro, 2016, p.7).

### Metodología del ACV

La metodología del ACV está basado en la serie de normas internacionales ISO 14040: 2006 e ISO 14044: 2006, consiste en 4 etapas: objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación. Ver figura 8.

#### ▪ Etapa 1: Objetivo y alcance del estudio

En esta fase, el primer paso es definir el propósito del estudio y luego definir el alcance del ACV. En el alcance del estudio, se incluye una definición adecuada del sistema o sistemas a estudiar y de sus límites así como las necesidades de búsqueda de datos y el nivel de detalle que se abordará (Rivela, 2012).



**Figura 8.** Etapas de la Metodología del ACV - ISO 14040, fuente DIN ISO 14040 (2006).

- **Etapa 2: Inventario del ciclo de vida (ICV)**

La ISO 14040:2006 (DIN ISO 14040, 2006), define el análisis del inventario “la colección de los datos y los procedimientos de cálculos para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema de producción en estudio”. Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculos de las entradas y salidas de energía y materias consumidas, las emisiones de gases contaminantes, efluentes de aguas, residuos sólidos y otros vertidos al medio ambiente durante el ciclo de vida del producto (Sima Pro, 2016, p. 15)

- **Etapa 3: Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).**

Esta tercera etapa, tiene por objetivo evaluar las categorías impactos ambientales como el potencial calentamiento global, potencial de acidificación, eutrofización, toxicidad entre otros a través de los resultados obtenidos del análisis del inventario del sistema. Esta etapa está estructurada por la ISO 14040: 1) Selección de las categorías de impactos, indicadores y modelos de caracterización, 2) Clasificación, asignación de los resultados del ICV y 3) Caracterización (DIN ISO 14040:2006)

- **Etapa 4: Interpretación**

La etapa de interpretación de un ACV, se analiza los resultados de análisis del inventario y la evaluación de impacto con la finalidad de identificar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las cargas ambientales más significativas (análisis de contribución) y las etapas críticas (Rivela, 2012, p.132)

#### **2.2.4 Metodologías para la medición de la Huella de Carbono**

Para el cálculo de la HC existen diversas normas y guías internacionales, unas con un enfoque de producto y otras con un enfoque corporativo. Todas estas herramientas tienen como objetivo dar credibilidad y aseguramiento a los informes de emisión de GEI. Dentro de las metodologías para el cálculo de la huella de carbono de la organización las más relevantes son: ISO 14064, GhG Protocol, Bilan Carbone y PAS 2050 (CEPAL, 2013, p.21).

La norma ISO 14064 e ISO 14065, tiene como objetivo dar credibilidad y aseguramiento a los informes de emisión de GEI y a las declaraciones de reducción o eliminación de GEI(en particular en el caso de empresas sometidas a obligaciones de reducciones de emisiones, en el marco del Protocolo de Kyoto, el EU-ETS). Estas normas pueden ser usadas por cualquier organización que participe en el comercio, en proyectos o mecanismos voluntarios de reducción de emisiones. Se pueden aplicar a todos los tipos de GEI, no estando limitadas al CO<sub>2</sub>. (Carbon Trust, 2012, p.8).

El Protocolo de Gases de efecto invernadero, es una iniciativa puesta en marcha por el World Resources Institut (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), apoyada por el USAID y el USEPA y por numerosas empresas, organizaciones no gubernamentales y administraciones públicas. El protocolo provee una guía minuciosa para empresas interesadas en cuantificar e informar de sus emisiones de GEI.

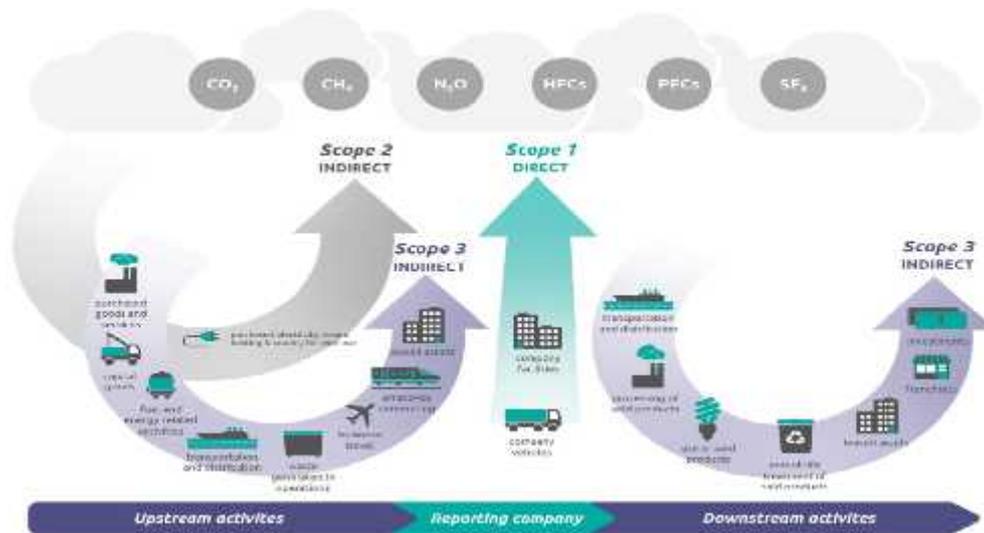
El Protocolo de Gases de efecto invernadero, además de constituirse como referente en términos de lineamientos generales, también ha desarrollado un conjunto de herramientas (*software*) para el cálculo de la Huella de Carbono inicialmente de empresas y luego de productos. La popularidad y el reconocimiento del GHG Protocol, y por supuesto el carácter

de gratuidad de las aplicaciones, ha concretado el éxito y alta demanda de ellas (CEPAL, 2013, p.22). En particular, los métodos Bilan Carbone y PAS 2050, que son los más importantes, siguen las líneas de recomendación del Protocolo GEI. Así también la norma ISO 14064, desarrollada por el International Organization for Standardisation (ISO), que apunta de nuevo a la definición de líneas generales de cuantificación de emisiones de GEI, retoma los resultados del Protocolo GEI.

La metodología del Protocolo GEI esta desarrolladas para calcular con exactitud las emisiones de cada sector y categoría de fuente. Como primer paso, una empresa debe identificar sus fuentes de emisión como combustión fija, móvil, emisiones de proceso o emisiones fugitivas y luego determina cuál es el alcance que quiere dar al cálculo de su huella de carbono (WRI, 2015b, p.30). Determinar el alcance significa establecer cuáles son las fuentes generadoras de GEI que se van a considerar para la huella de carbono. Para elaborar la huella de carbono habitualmente se establecen tres posibles alcances (Carbon Trust, 2012, p.6): ver figura 9.

- Alcance 1: emisiones directas de GEI. Las emisiones directas de GEI se producen por las fuentes que son propiedad de la empresa o están controladas por la empresa. Las empresas dueñas que operen un vehículo, o equipo de combustión, refrigeración o aire acondicionado.
  
- Alcance 2: emisiones indirectas de GEI asociadas a la adquisición de electricidad. Las emisiones del alcance 2 se generan físicamente en la planta que produce la electricidad pero la energía es consumida en las instalaciones y procesos de la empresa que calcula su huella de carbono.

- Alcance 3: son consecuencia de la actividad de la empresa, pero ocurren en fuentes que no son de su propiedad ni están controladas por ella. Este paso opcional implica la identificación de otras emisiones indirectas provenientes de las actividades corriente arriba o corriente abajo de una empresa. Por ejemplo el transporte, gestión de residuos, etc.



**Figura 9.** Resumen de alcances y emisiones a través de la cadena valor, fuente: WRI (2015) Guidance GHG Protocol (Pag, 30). Copyright © World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development

La norma PAS 2050: 2008 Sistema de certificación Británico creado con el fin de especificar los requisitos para la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de bienes y servicios. Estas especificaciones serán aplicables tanto a las organizaciones que evalúan las emisiones GEI de productos a lo largo de su ciclo de vida, como a organizaciones que evalúan esas emisiones desde la cuna a la puerta (cradle-to-gate) (CEPAL, 2013, p.27).

A través de este sistema se tiene en cuenta la categoría de impacto de calentamiento global y las emisiones GEI se miden en masa y se convierten a CO<sub>2</sub> eq usando los coeficientes de GWP (Global Warming Potential) que propone el IPCC.

### 2.3 Marco conceptual

**Energía primaria.-** Se entiende por energía primaria a las distintas fuentes de energía tal como se obtienen en la naturaleza, ya sea: en forma directa como en el caso de la energía hidráulica o solar, la leña y otros combustibles vegetales; o después de un proceso de extracción como el petróleo, carbón mineral, geoenergía, etc.

**Energía secundaria.-** Se denomina energía secundaria a los diferentes productos energéticos que provienen de los distintos centros de transformación y cuyo destino son los diversos sectores del consumo y/u otros centros de transformación.

**Energía incorporada.-** Consumo energético derivado de la fase de construcción del edificio. Corresponde al contenido energético de todos los materiales y equipos existentes en el edificio y sus instalaciones, así como al consumo de energía asociado a los procesos de construcción del mismo.

**Energía operativa.-** Consumo de energía durante la actividad ocupante o la energía total necesaria para la operación de un edificio

**Fases del ciclo de vida de una vivienda.-** Son procesos conectados entre sí en forma de flujo progresivo, en el que ocurre continuas interrelaciones entre el entorno ambiental, los flujos de material y energía y emisiones ubicados dentro o fuera de los límites de la residencia. Estas fases comprenden: fases de extracción y fabricación de materiales, uso y mantenimiento y demolición.

**Huella de carbono.**- indicadores de sostenibilidad ambiental medir “la totalidad de Gases de Efecto Invernadero emitidos a la atmósfera por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto, expresado en toneladas de CO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> equivalente.

**Materiales de construcción.**- son materias primas o productos manufacturados o elaborados que cumplen con las propiedades técnicas, empleado en la construcción de una edificación.

**Mix energético eléctrico.**- la transformación de la fuentes energéticas para generar energía eléctrica.

**Potencial de Calentamiento Global (PCC).**- el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce una liberación instantánea de 1kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el [CO<sub>2</sub>](#). De esta forma, se pueden tener en cuenta los efectos radiativos de cada gas, así como sus diferentes periodos de permanencia en la atmósfera.

**Técnicas constructivas.**- conjunto de elementos y materiales constructivos, *técnicas*, herramientas, procedimientos y equipos, según determinada tecnología para un tipo de edificación.

## **CAPÍTULO III**

### **HIPOTESIS**

#### **3.1 Hipótesis General**

La fase de operación del ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima, es la que demanda mayor consumo energético y genera mayor huella de carbono.

#### **3.2 Hipótesis Específica**

- a. El consumo energético y la huella de carbono durante el ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima es significativamente menor en comparación con las residencias europeas.
- b. Las propuestas de mejora ambiental involucran el uso de materiales de construcción ecológicos, electrodomésticos eficientes y el uso de energías renovables contribuyen a la reducción del consumo energético y los niveles de la huella de carbono en el ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima.

#### **3.3 Variables**

##### **3.3.1 Variable independiente**

Fases del ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima.  
Ver anexo 1

## **Definición conceptual**

Las fases del ciclo de vida de una residencia unifamiliar son procesos conectados entre sí en forma de flujo progresivo, en el que ocurre continuas interrelaciones entre el entorno ambiental, los flujos de material y energía y emisiones ubicados dentro o fuera de los límites de la residencia. Estas fases comprenden:

- Fase de construcción: los procesos asociados para la fabricación y transporte de los materiales de construcción hasta el lugar de ejecución, equipos e instalaciones que formarán parte del edificio una vez concluya esta etapa, así como los diferentes procesos constructivos necesarios para la ejecución del mismo.
- Fase de operación: Consiste en el conjunto de procesos derivados del uso diario de la edificación, así también se incluye el mantenimiento que consiste en las reparaciones, modificaciones, ampliaciones, adiciones y transformaciones posteriores.
- Fase de demolición. Es la última etapa del ciclo de vida del edificio, e incluye los procesos de demolición, la retirada de escombros hasta los vertederos.

## **Dimensiones**

- Técnica constructiva de la residencia
- Mix energético para la generación de electricidad
- Consumo energético de los habitantes de las residencias

## **Indicadores**

- Área de la residencia.
- Tipo y cantidad de materiales.
- Consumo energético de la familia

## **Definición operacional**

Es el balance de materiales, energético y de emisiones GEI en las fases de producción, uso y demolición del ciclo de vida de la residencia familiar

### **3.3.2 Variable Dependiente**

El consumo energético y la huella de carbono de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima.

## **Definición conceptual**

### **▪ Consumo energético**

El ciclo de vida de una edificación tiene asociada una cantidad de energía, consumida en cada una de sus fases: producción – fabricación, construcción, uso – mantenimiento y demolición, cantidad que se calcula en base a la metodología de análisis del ciclo de vida.

- **Energía embebida o incorporada materiales de construcción:** Es la energía necesaria para producir los materiales de construcción, contempla la energía empleada para la extracción de las materias primas, para su elaboración/fabricación y producto final.
- **Energía embebida o incorporada construcción:** Es el consumo energético de los equipos y maquinarias en la ejecución de los procesos de construcción y transporte de materiales al sitio de la obra.
- **Energía operacional:** energía consumida durante la vida útil de la edificación.
- **Energía de uso.** Energía consumida en el día a día de la edificación, esto es, el consumo derivado de los sistemas de iluminación, sistemas de agua caliente, enfriamiento, electrodomésticos, cocción entre otros.

- **Energía de mantenimiento.** Energía necesaria para ejecutar las labores de mantenimiento necesarias en el edificio: pintado de paredes, sustitución de acabados, etc.
- **Energía de demolición.** La energía consumida en la etapa final del ciclo, destrucción de la edificación y transporte de los residuos y escombros resultantes hasta vertederos o plantas de reciclaje.

### **Dimensiones**

- Energía embebida materiales construcción
- Energía embebida construcción
- Energía operacional
- Energía demolición

### **Indicadores**

Energía primaria total

### **Definición operacional**

Medición del contenido energético en ciclo de vida de la residencia: energía embebida de materiales, procesos Constructivos, energía del uso y demolición

### ▪ **Huella de carbono**

Indicador que cuantifica las emisiones de gases de efecto invernadero, expresados en kg de CO<sub>2</sub> equivalente, asociados a los consumos energéticos que derivan de las etapas del ciclo de vida de una edificación.

### **Dimensiones**

- Carbono incorporado materiales de construcción
- Huella de carbono construcción
- Huella de carbono uso y mantenimiento de la residencia

- Huella de carbono en demolición

### **Indicadores**

Potencial calentamiento global (GWP)

### **Definición operacional**

Medición de la huella de carbono en ciclo de vida de la residencia: carbono incorporado en materiales, huella de carbono construcción, uso y demolición

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA**

#### **4.1 Método de la investigación**

##### **4.1.1 Método general**

En el presente estudio, se aplicará el método científico, como método general, dado que este modelo, nos permite evaluar la problemática del sector residencial que consume un alto porcentaje de energía y por consiguiente emite grandes cantidades de gases de efectos invernadero que contribuye al cambio climático; y al mismo tiempo nos permite plantear soluciones, mediante la aplicación de procedimientos: planteamiento del problema; formulación de la hipótesis y su comprobación para la verificación de su validez, análisis e interpretación de los resultados, para luego arribar a conclusiones lógicas.

##### **4.1.2 Método específico**

El método que se aplicará, está basado en el enfoque inductivo – deductivo, en el que, a partir de las observaciones y análisis de casos particulares, la evaluación del consumo energético y huella de carbono de dos viviendas unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de

Lima se llega a conclusiones cuya aplicación es de carácter general en las viviendas de la ciudad de Lima.

## **4.2 Tipo de investigación**

El presente estudio se trata de una investigación aplicada - cuantitativa, mediante esta investigación se profundiza y analiza el problema, para determinar la fase de mayor consumo energético y la de mayor generación de huella de carbono en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar con la finalidad de identificar alternativas para optimizar el consumo energético y reducción de la huella de carbono.

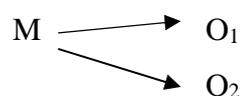
## **4.3 Nivel de investigación**

De acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación reúne por su nivel las características de un estudio exploratorio.

## **4.4 Diseño de la investigación**

### **4.4.1 Tipo de diseño**

El diseño que se aplicará en la investigación es no experimental exploratorio simple, en razón que no se manipularan, ni controlaran las variables. Se enfocará en la observación de las variables tal y como se dan en su contexto, el consumo energético y la huella de carbono en dos tipos de viviendas unifamiliar y multifamiliar, en el que se realizará un análisis cuantitativo y, posteriormente, su interpretación de los mismos.



Donde:

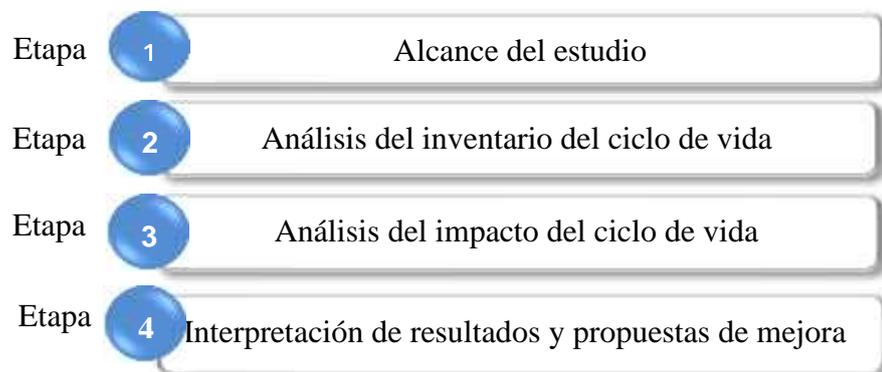
M: Representa la muestra: dos tipos de residencias unifamiliar y multifamiliar

O<sub>1</sub>: observación de la variable consumo energético en el ciclo de vida de las residencias.

O<sub>2</sub>: observación de la variable huella de carbono en el ciclo de vida de las residencias.

#### 4.4.2 Etapas de la investigación

Las etapas para la realización del estudio están basadas en la metodología de la norma internacional de las series ISO 14040:2006 e ISO 14042:2000 Análisis del Ciclo de Vida, que consiste en cuatro etapas que se describe a continuación: Ver figura 10



**Figura 10.** Etapas de la investigación, fuente: adaptado ISO 14040

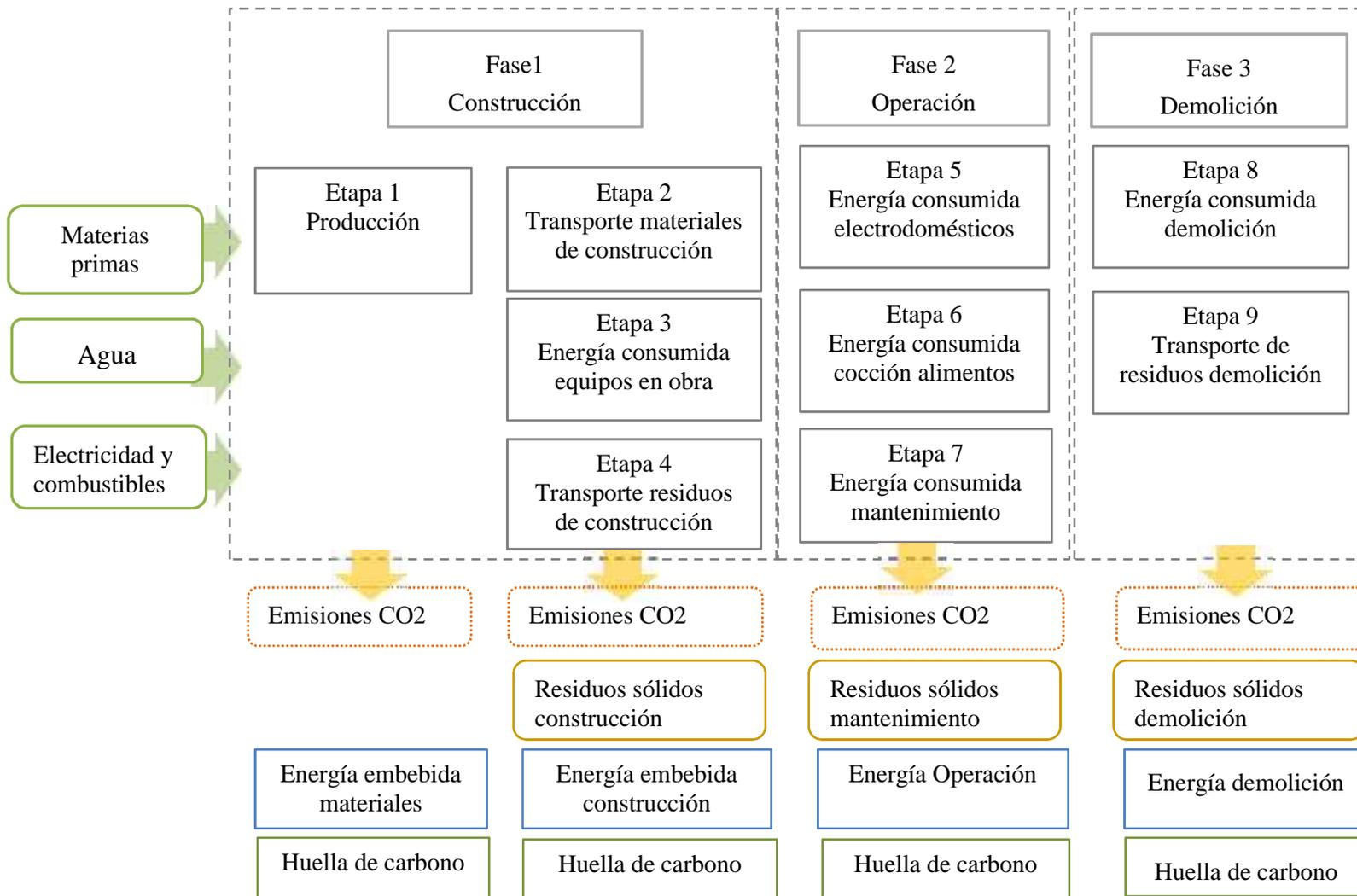
#### 4.4.3 Etapa 1: Alcance del estudio

En el alcance del estudio se ha considerado las fases y etapas del ciclo de vida de la residencia unifamiliar en estudio, que a continuación se describe, asociado al flujo de materiales, flujo de energía y las emisiones CO<sub>2</sub>, lo cual nos sirve de punto de partida para el desarrollo del inventario y evaluación del impacto del ciclo de vida como se muestra en la figura 11.

#### **4.4.4 Etapa 2: Análisis del inventario del ciclo de vida**

Esta etapa comprende la recolección de datos de entradas y salidas de materiales y energía y los procedimientos de cálculo para cuantificar el flujo de energía y materiales y las emisiones CO<sub>2</sub> del sistema durante todo su ciclo de vida. Esta etapa se desarrolló en las siguientes fases:

- A. Flujo de materiales: Cuantificación del consumo de materiales de construcción, residuos sólidos generados en las etapas de construcción, mantenimiento y demolición.
- B. Consumo energético durante el ciclo de vida de la residencia: calculo del flujo energético en cada fase del ciclo de vida:
  - Energía producción: Se asocia al consumo energético derivado de la fase de construcción del edificio. Corresponde al contenido energético de todos los materiales y equipos existentes en el edificio y sus instalaciones, así como al consumo de energía asociado a los procesos de construcción del mismo.
  - Energía de operación: consumo energético durante la vida útil de la residencia y de mantenimiento.
  - Energía de demolición: consumo energético en la demolición de la residencia y transporte de los residuos y escombros resultantes hasta vertederos.
- C. Huella de carbono en el ciclo de vida: La huella de carbono se estimará en función al consumo energético de las fases y etapas del ciclo de vida de la residencia



**Figura 11.** Alcance del estudio

#### 4.4.5 Etapa 3: Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

En esta investigación, la evaluación de los potenciales impactos está enfocada en dos principales categorías de impacto:

Huella de energía: cuantifica el consumo energético en el ciclo de vida de la residencia, cuyo indicador es la energía total del ciclo de vida expresado en MJ. Ver tabla 1.

**Tabla 1.** Indicador de la huella de energía

Indicador	Unidad
Energía total (ET)	MJ

Fuente: elaboración propia

Huella de carbono o potencial calentamiento global: cuantifica la suma de las emisiones directas e indirectas de los gases de efecto invernadero generados en el ciclo de vida de una residencia. No obstante el de mayor incidencia es el CO<sub>2</sub>, por lo que en este estudio, la huella de carbono se cuantificó en función a las emisiones de CO<sub>2</sub> y se tradujo al único indicador considerado en esta categoría, en este caso kg de CO<sub>2</sub> equivalente. Ver tabla 2.

**Tabla 2.** Indicador Huella de carbono

Indicador	Factor de caracterización	Unidad
Potencial calentamiento global (GWP)	1	kg CO <sub>2</sub> eq

Fuente: Hammond & craig (2011).

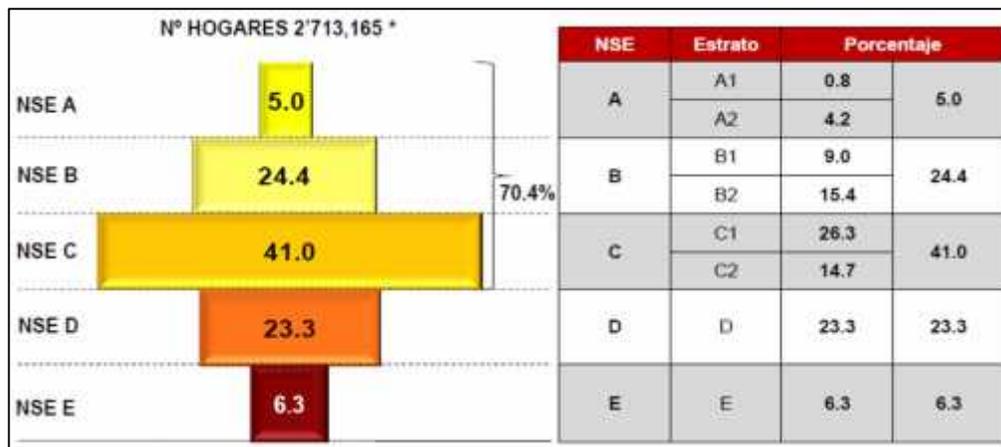
#### 4.4.6 Etapa 4: Interpretación de los resultados

En esta fase se analiza los resultados del inventario y de la evaluación de impactos, lo cual nos permitió identificar las etapas críticas de mayor consumo energético y huella de carbono en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar. Una vez determinado los puntos críticos, se definirá estrategias de mejora dirigidas a la optimización del consumo energético y reducción de la huella de carbono.

### 4.5 Población y muestra

#### 4.5.1 Población

La población del presente estudio es finita, conformada por dos tipos de viviendas unifamiliares y multifamiliares de los niveles socio economicos B y C de la ciudad de Lima. Está se determinó en base a que la mayor distribución de los hogares en Lima metropolitano se encuentra en el NSE C, con un 41% de la población, y el NSE B con un 24,4% (APEIM, 2017, p.9). Ver figura 12



**Figura 12.-** Distribución de hogares en Lima metropolitana, fuente: APEIM (2017) Niveles socioeconomicos (pag. 9).

En estos hogares el tipo de vivienda que predomina para el NSE C y B es independiente o unifamiliar (79,2 y 59,5% respectivamente) y departamento en edificio o multifamiliar (17,4 y 37,9% respectivamente) (APEIM, 2017, p. 31).

#### **4.5.2 Muestra**

##### **a. Tamaño de la muestra**

Las muestras representativas en el estudio es una vivienda unifamiliar del nivel socio económico B, ubicada en el distrito de la Molina, que cuenta con 662,012.26 viviendas y la residencia multifamiliar del nivel socio económico C, ubicada en el distrito de Surquillo, que cuenta con 987,267.69 viviendas

La elección de este tipo de residencias es representativa de la población, dado que responde a las características constructivas promedio de las viviendas del parque habitacional de los niveles socio económicos B y C de la ciudad de Lima, de tal manera que los resultados obtenidos de la muestra puedan extrapolarse a la población. A continuación, se describe las principales características de la residencia unifamiliar y multifamiliar objeto de estudio.

##### **b. Descripción de la vivienda unifamiliar**

###### **▪ Ubicación**

La vivienda unifamiliar está ubicada en Calle la Punta No 810 urbanización Sol de la Molina distrito la Molina - Lima como se muestra en la figura 13.



**Figura 13.** Ubicación de la vivienda unifamiliar Calle La Punta No810 - Urbanización Sol de la Molina distrito la Molina – Lima, fuente: Imagen extraída de Google maps(s.f)

#### ▪ Descripción

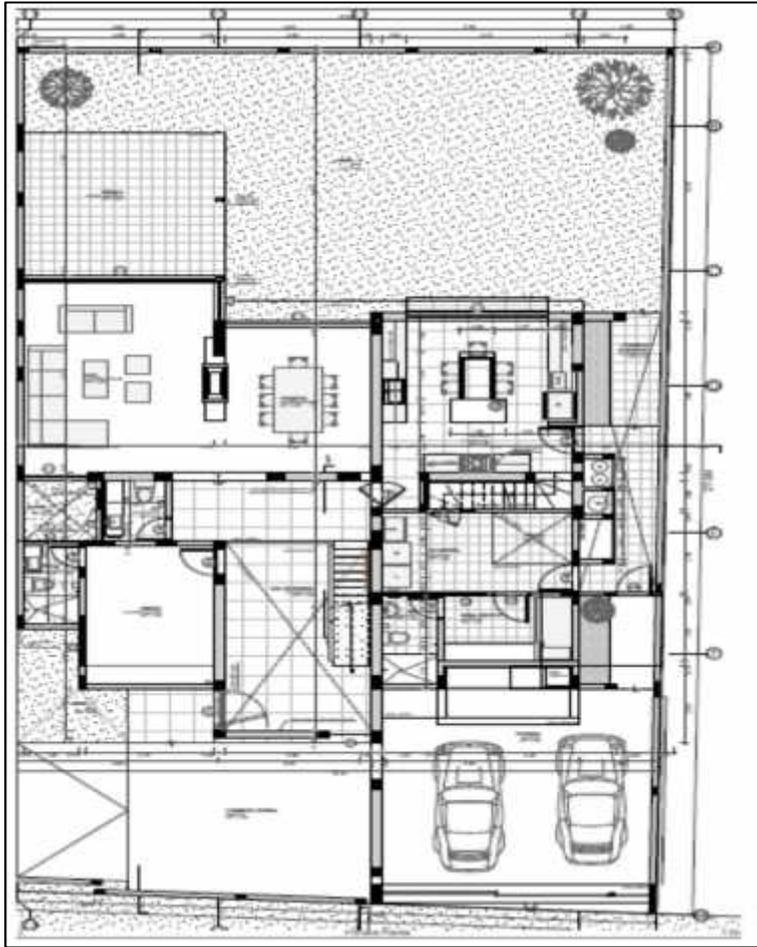
La vivienda, está diseñada para una sola familia de 4 personas de nivel socioeconómico B, cuenta con un área total construida de 250 m<sup>2</sup>, cuya expectativa de vida útil es aproximadamente de 50 años. Compuesta por: ver figura 14 y 15

Primer piso: sala comedor, biblioteca, cocina, cochera, lavandería, dormitorio de servicio, baño de visitas, jardín y patio de servicio.

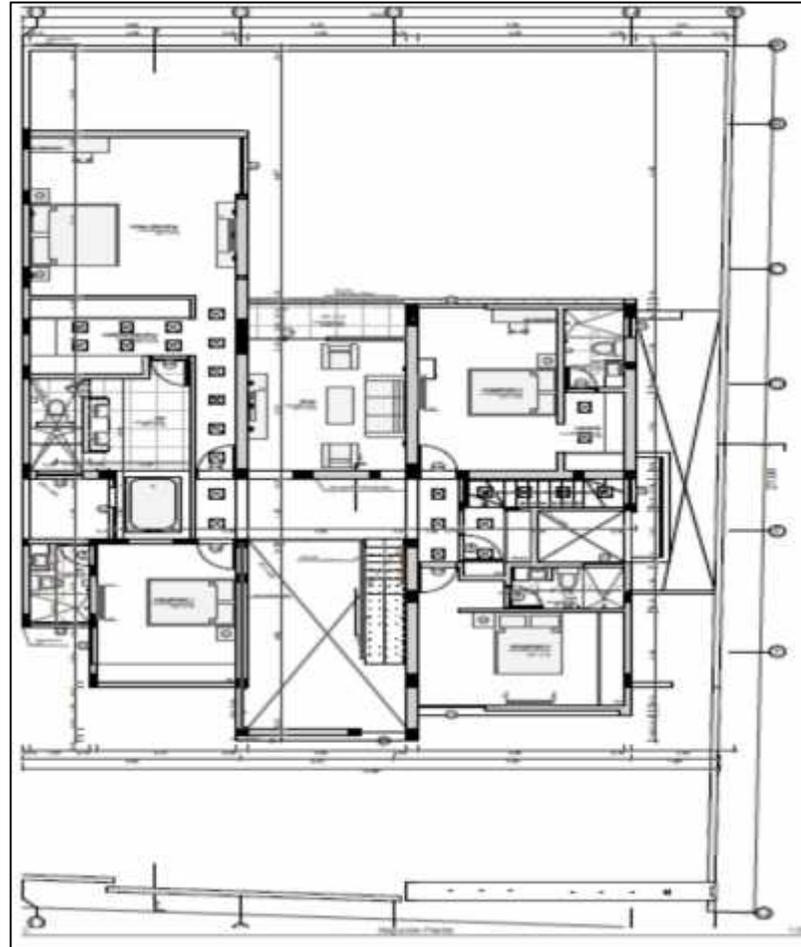
Segundo piso: 4 dormitorios, 4 baño completos, una sala de estar y terraza.



**Figura 14.** Fachada principal vivienda unifamiliar, fuente: BG Arquitectos



**Primera Planta**



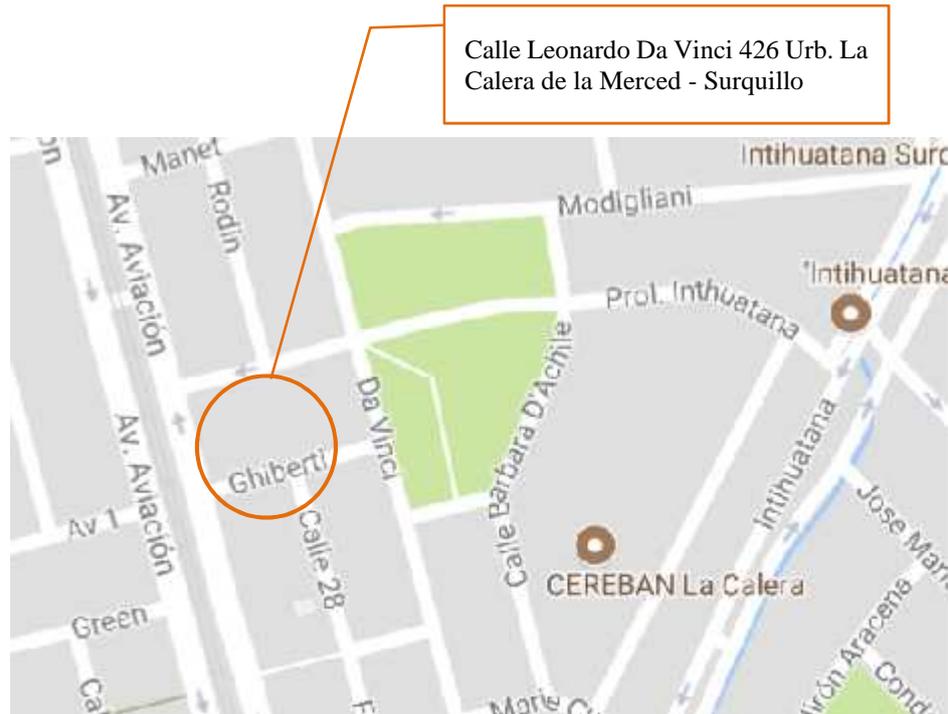
**Segunda Planta**

**Figura 15.** Planos vivienda unifamiliar - Primer y segunda planta, fuente: BG Arquitectos

### c. Descripción de la vivienda multifamiliar

#### ▪ Ubicación

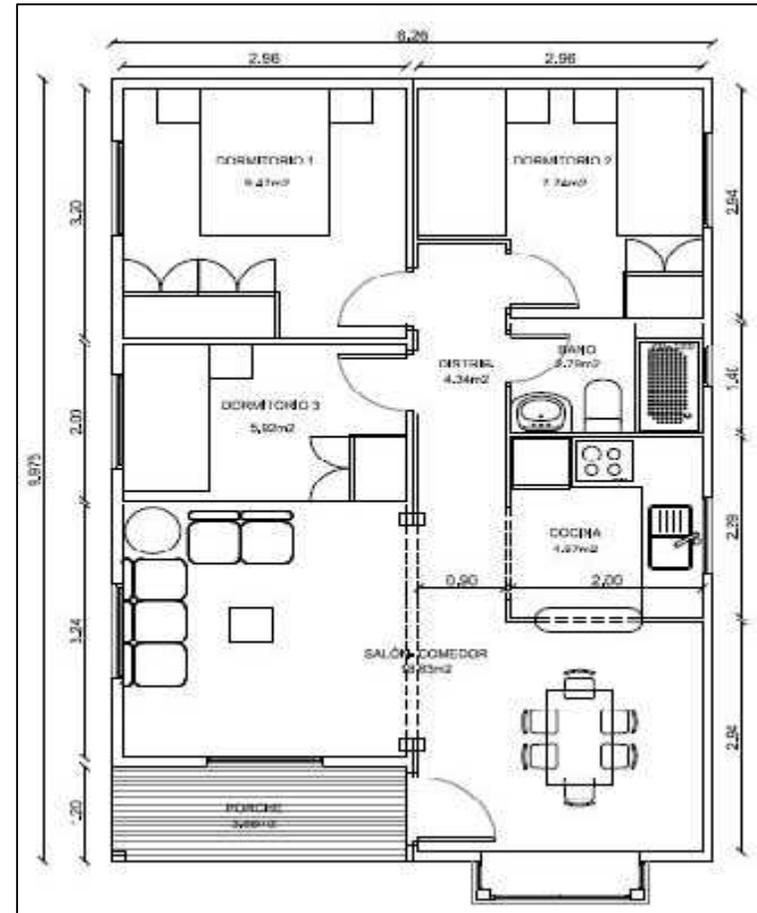
La vivienda multifamiliar está ubicada en Calle la Leonardo da Vinci No 426 urbanización la Calera de la Merced distrito Surquillo – Lima. Ver figura 16.



**Figura 16.** Ubicación de la vivienda multifamiliar, Calle Leonardo Da Vinci No 426 - Urbanización La Calera de la Merced distrito de Surquillo – Lima, fuente: Imagen extraída de Google maps(s.f)

#### ▪ Descripción

La vivienda, está diseñada para 14 familias de 4 personas por hogar de nivel socioeconómico C, cuenta con un área total construida de 1024 m<sup>2</sup>, cuya expectativa de vida útil es aproximadamente de 50 años. Compuesta por: ver figura 17



**Figura 17.** Fachada principal y plano del departamento vivienda multifamiliar, fuente: BG Arquitectos

Primer piso: cochera para 7 autos.

Segundo piso – octavo piso: 14 departamentos: cada departamento tiene un área de 64 m<sup>2</sup>, cuenta con una sala comedor, cocina-lavandería, 3 dormitorios, 1 baño de visita y 1 baño completo.

Noveno piso: azotea

## **4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **4.6.1 Materiales de construcción**

Para la recolección de información sobre la energía embebida y carbono embebido de los materiales de construcción se consultaron las siguientes fuentes:

- Software S10: Programa de metrados, costos y presupuestos en edificaciones.
- Inventory of Carbon and Energy (ICE) – departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Bath Reino Unido: Base de datos inventario de energía y carbono de materiales.

### **4.6.2 Etapa de construcción**

Para la recolección de información en esta etapa, se emplearon las siguientes fuentes:

- Software S10: Programa de metrados, costos y presupuestos en edificaciones.
- Base de datos del balance energético peruano (2012) – Ministerio de Energía y Minas: factor de emisión de CO<sub>2</sub> atribuible al suministro eléctrico.
- Inventario de flota y opciones – Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA): factor de emisión de CO<sub>2</sub> atribuible al suministro combustibles fósiles.
- Entrevistas a los profesionales expertos y visitas a las obras.

### **4.6.3 Etapa de Uso y Mantenimiento**

Para la recolección de información en esta etapa, se emplearon las siguientes fuentes:

- Inventory of Carbon and Energy (ICE) – departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Bath Reino Unido: Base de datos inventario de energía y carbono de materiales
- Se realizará la recolección de facturas de consumo eléctrico, consumo de gas natural ó GLP, entrevista a los residentes de las viviendas seleccionadas.
- Base de datos del mix energético peruano – Ministerio de Energía y Minas: factor de emisión de CO<sub>2</sub>
- Base de datos Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories -Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC siglas en inglés): factor de emisión de CO<sub>2</sub> atribuible al suministro combustibles fósiles.

### **4.6.4 Etapa de demolición**

Para la recolección de información en esta etapa, se emplearon las siguientes fuentes:

- Inventario de flota y opciones – Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA): factor de emisión de CO<sub>2</sub> atribuible al suministro combustibles fósiles.
- Se realizaron entrevistas a los profesionales expertos.
- Base de datos de las empresas constructoras, visitas in situ y notas de campo.

## **4.7 Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

El procesamiento de datos se aplicará:

- Software S10 Programa de metrados, costos y presupuestos en edificaciones para estimar la cantidad y tipo de materiales utilizados en las edificaciones, el consumo de combustibles en obra.

- Hojas de cálculo Excel y software de referencia análisis de ciclo de vida Sima Pro versión 7.1 para estimar el consumo energético y emisiones CO<sub>2</sub> en ciclo de vida de las viviendas, que consiste en 3 etapas:
  - a) Inventario. Se cuantifica el consumo energético y las emisiones CO<sub>2</sub> generadas en cada fase del ciclo de vida de las viviendas
  - b) Evaluación. Los resultados del inventario se evalúan de acuerdo a los indicadores de las categorías definidas, energía y huella de carbono.

Para el análisis de datos. Los resultados obtenidos, se analizaron y se identificaron las etapas críticas que demandan mayor consumo energético y mayor generación de huella de carbono.

Los resultados obtenidos de consumo energético y huella de carbono en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar se compararán con investigaciones enfocados a la evaluación la huella de carbono y consumo energético y evaluación del ciclo de vida en viviendas unifamiliares en países de Europa y América Latina, lo cual nos permitió contrastar las diferencias y similitudes.

#### **4.8 Aspectos éticos de la investigación**

Los investigadores se comprometen a respetar la propiedad intelectual, asegurar la veracidad de los resultados y la confiabilidad de los datos suministrados por las bases de datos internacionales de ICE, PNUMA y MINEM, expertos en construcción y los residentes de las viviendas, para el desarrollo de la presente investigación.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS

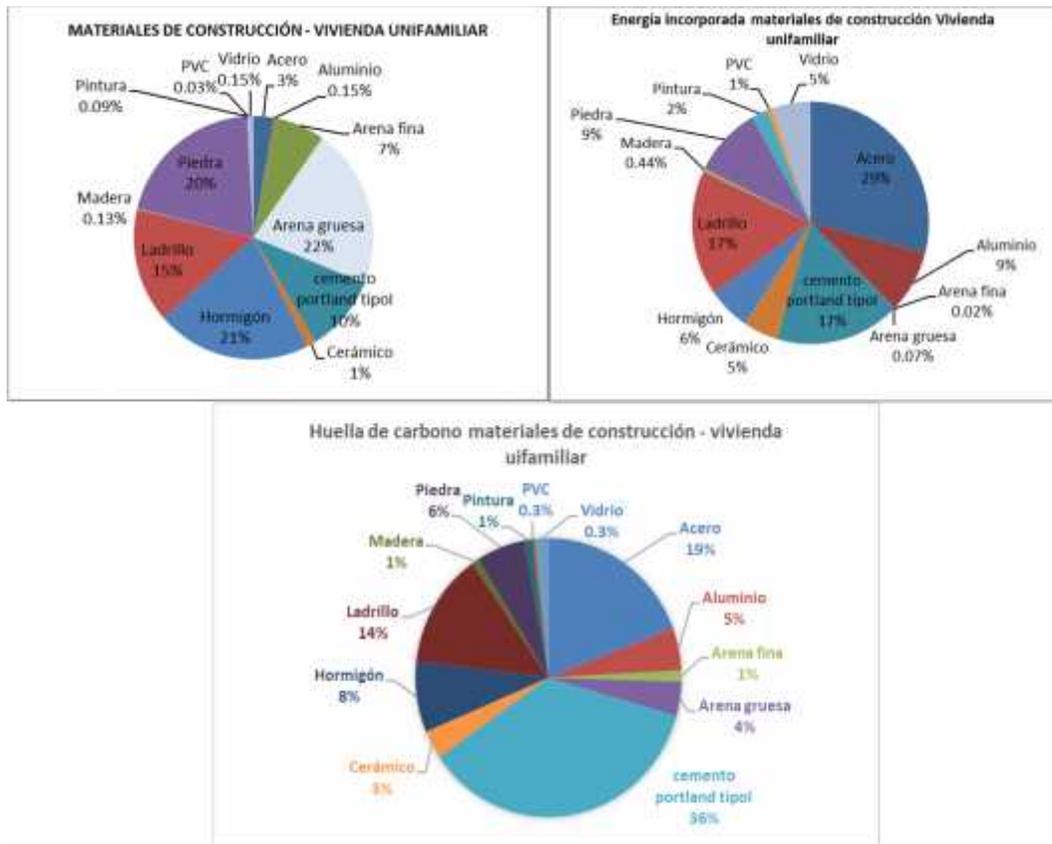
#### 5.1 Descripción de resultados

##### 5.1.1 Energía incorporada y huella de carbono materiales de Construcción

En la tabla 3 y la figura 18 se muestra la tipología y distribución porcentual de los materiales de construcción utilizados en la edificación de la vivienda unifamiliar y multifamiliar, característico de las técnicas constructivas de mampostería confinada que se emplea generalmente para la edificación de una vivienda en el Perú.

**Tabla 3.** Flujo, energía incorporada y huella de carbono de materiales de construcción vivienda unifamiliar

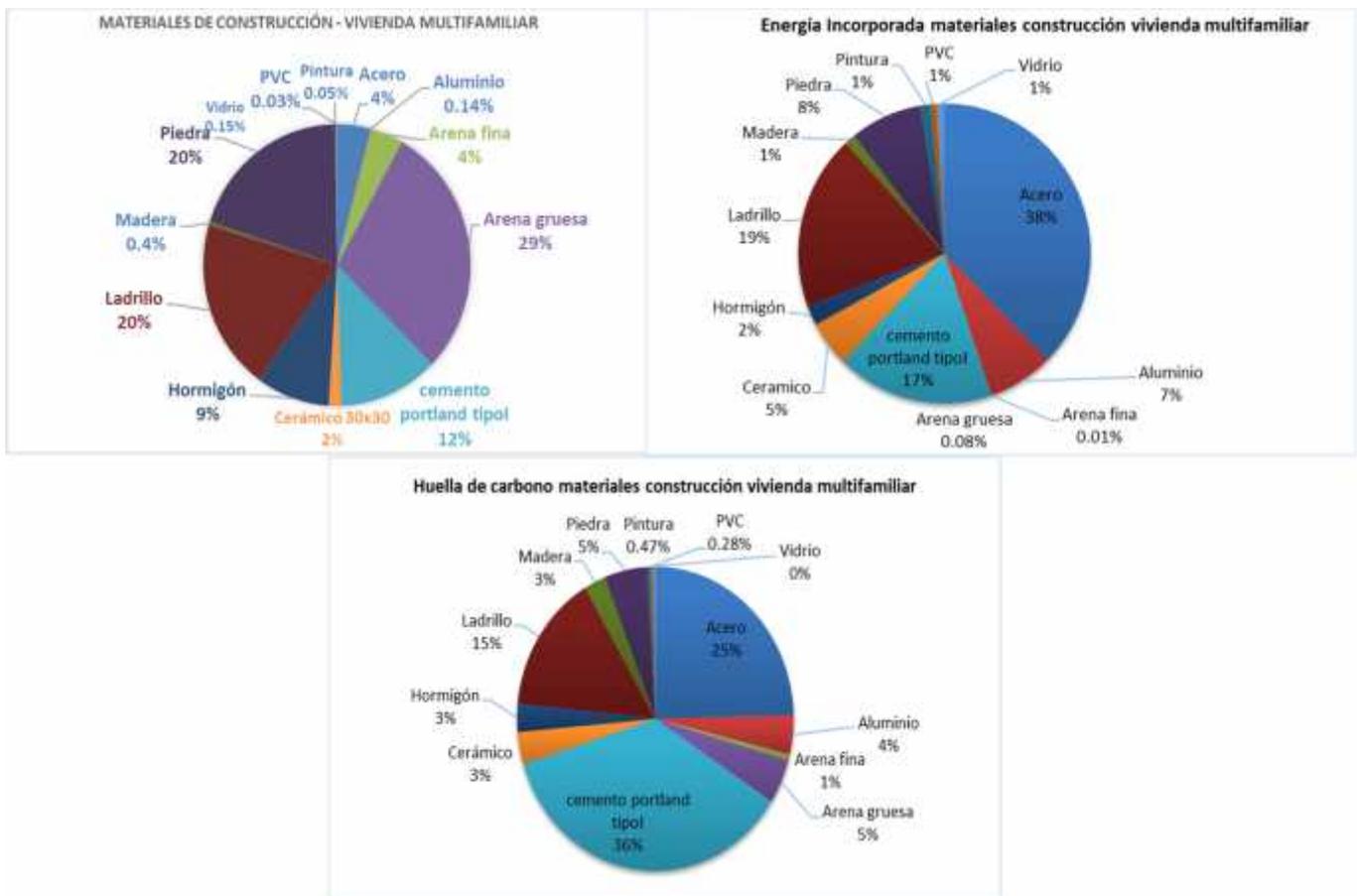
No	Materiales de construcción vivienda Unifamiliar	(Kg/m <sup>2</sup> )	MJ/m <sup>2</sup>	Huella de carbono (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )
1	Acero	71.95	2112.53	140.31
2	Aluminio	3.91	614.30	35.82
3	Arena fina	185.93	1.51	9.48
4	Arena gruesa	572.66	4.64	29.21
5	cemento portland tipoI	275.23	1241.28	261.47
6	Cerámico	34.78	347.81	24.35
7	Hormigón	560.19	420.14	59.94
8	Ladrillo	407.98	1223.94	97.92
9	Madera	3.57	30.38	6.40
10	Piedra	544.16	685.64	42.99
11	Pintura	2.32	162.57	6.76
12	PVC	0.80	55.40	2.49
13	Vidrio	20.52	379.64	12.11
Total		2684.01	9691.50	729.22



**Figura18.** Distribución porcentual de materiales de construcción, energía incorporada y huella de carbono en la vivienda unifamiliar

**Tabla 4.** Flujo, energía incorporada y huella de carbono de materiales de construcción vivienda multifamiliar

No	Materiales de construcción	(Kg/m2)	MJ/m2	Huella de carbono (kgCO2 eq/m2)
1	Acero	65.50	1923.00	127.72
2	Aluminio	2.34	368.25	21.47
3	Arena fina	64.38	0.52	3.28
4	Arena gruesa	481.59	3.90	24.56
5	cemento portland tipo I	196.92	888.12	187.08
6	Cerámico	25.23	252.31	17.66
7	Hormigón	145.87	109.40	15.61
8	Ladrillo	322.86	968.58	77.49
9	Madera	7.26	61.70	12.99
10	Piedra	323.32	407.39	25.54
11	Pintura	0.83	58.33	2.42
12	PVC	0.46	32.05	1.44
13	Vidrio	2.46	45.52	1.45
Total		1639.02	5119.06	518.72



**Figura19.** Distribución porcentual de materiales de construcción, energía incorporada y huella de carbono en la vivienda multifamiliar

La cantidad de materiales que se requiere para la construcción de la vivienda unifamiliar y multifamiliar es de 2684 y 1639 kg/m<sup>2</sup> respectivamente. Los materiales de mayor predominancia para la vivienda unifamiliar son arena gruesa, hormigón, piedra, ladrillo, y cemento, cuya contribución porcentual son 22, 21, 20,15 y 10% respectivamente, a diferencia de la vivienda multifamiliar los materiales de mayor predominancia son arena gruesa, ladrillo y cemento en 29, 20 y 12% respectivamente, esto se debe al diseño y el área de construcción, lo cual se traduce que la vivienda unifamiliar requirió la mayor cantidad de materiales que la vivienda multifamiliar por metro cuadrado.

Los materiales de construcción de mayor consumo energético y huella de carbono en ambas residencias son el acero, cemento y ladrillo. El material de mayor predominancia es el acero o fierro corrugado, elemento esencial en las estructuras de la edificación que, en combinación con el concreto, forman el concreto armado, una combinación apta para resistir las fuerzas generadas por los sismos y las causadas por el peso de la estructura. Su consumo energético en las residencias unifamiliar y multifamiliar es de 29 y 25 % respectivamente y contribuye en las emisiones GEI en 19 y 25%. Se sabe que la contribución de la industria de acero en las emisiones GEI es significativa en comparación con la industria cementera, la huella de carbono para la producción de 1 kg de acero es de 1,95 kg CO<sub>2</sub> eq y para la producción de 1 kg de cemento es de 0,95 kg CO<sub>2</sub> eq (ICE, 2011), sin embargo, la cantidad de cemento que se requiere es grande que las cifras de emisiones son significativas.

El segundo material predominante es el cemento, elemento básico del concreto que conforma la parte estructural de las residencias unifamiliar y multifamiliar, cuyo consumo energético reporta (17 y 36 % respectivamente) y contribuye significativamente en la huella de carbono (36%) en comparación con los otros materiales.

El tercer material predominante son los productos cerámicos como es el ladrillo por ser uno de los principales elementos que conforman las estructuras de la edificación, por lo que reporta un alto consumo energético (14 y 19%) y contribuye en la huella de carbono en (14 y 15 %).

Cabe resaltar que el aluminio es el material que tiene la mayor contribución en las emisiones GEI en comparación con todos los materiales utilizados en la edificación de la residencia, la huella

de carbono para la producción de 1 kg de aluminio es de 9,22 kg CO<sub>2</sub> eq (ICE, 2016), sin embargo, la cantidad utilizada es pequeña, por lo que las cifras no son significativas.

### **5.1.2 Residuos sólidos de construcción, mantenimiento y demolición**

En la tabla 5 y 6, se muestran la caracterización cuantitativa y cualitativa los residuos sólidos generados en las etapas de construcción, mantenimiento y demolición del ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar.

La cantidad de residuos sólidos generados en la etapa de construcción por m<sup>2</sup> construido en la vivienda unifamiliar y multifamiliar es de 508 y 132 kg respectivamente, destacando que la mayor generación de residuos es en la vivienda unifamiliar debido a su diseño y sus acabados. Los residuos se caracterizan por un alto contenido de áridos (tierra, arena y piedra) tanto en la vivienda unifamiliar y multifamiliar en 94 y 82% respectivamente, como resultado de las actividades de excavación, cimentación y estructuras, seguido de los residuos de ladrillos (1.84 y 5%), generadas por el almacenamiento y corte de las unidades de ladrillo y los residuos de concreto (1 y 6% ) y de madera (1.18 y 3.88%), generadas en los vaciados de pisos, techos y encofrado; mientras que el resto de los materiales representan el 3 y 4% . Es de destacar que los residuos que logran reciclarse es muy baja, apenas un 4% debido a la falta de gestión de los residuos sólidos de construcción, lo poco que se puede reciclar son los embalajes (bolsas de cemento y cajas de cartón), envases de pintura y restos de madera. El resto, un 96% del material, tiene destino en botaderos informales.

**Tabla 5.** Residuos sólidos de construcción, mantenimiento y demolición de vivienda unifamiliar

No	Residuos de construcción	Cantidad (Kg)	Contribución relativa (%)	Residuos mantenimiento	Cantidad (Kg)	Contribución relativa (%)	Residuos de demolición	Cantidad (Kg)	Contribución relativa (%)
1	Aridos	178379.6	93.87	Envases de pintura	68.1	0.80	cables eléctricos	554.4	0.046
2	Papel/cartón	233.49	0.12	Ventanas	7673.6	89.56	Loza de sanitarios	387.1	0.032
3	plastico	715.72	0.38	Residuos de ceramico y porcelanato	692.9	8.09	Madera	1336.50	0.111
4	Metales	234.52	0.12	Bolsas de cemento	1.28	0.01	Metales	204954.69	16.977
5	Ladrillo	3500	1.84	Cajas de cartón	5.1	0.06	Mezcla de concreto, fierro ladrillos y ceramicos	992070.19	82.174
6	Cerámicos	962.5	0.51	Tuberías PVC	36.2	0.42	Plastico	300.47	0.025
7	madera	2250	1.18	Loza de sanitarios	90.9	1.06	Vidrio	7674.12	0.636
8	Residuos concreto	3750	1.97						
Total		190025.83	100.00		8568.10	100.00		1207283.23	100
			508.14 kg/m2		22.9kg/m2			1391.08 kg/m2	

**Tabla 6.** Residuos sólidos de construcción, mantenimiento y demolición de vivienda multifamiliar

No	Residuos de construcción	Cantidad (Kg)	Contribución relativa (%)	Residuos mantenimiento	Cantidad (Kg)	Contribución relativa (%)	Residuos de demolición	Cantidad (Kg)	Contribución relativa (%)
1	Aridos	94868.9	81.72	Envases de pintura	88.539756	1.31	cables eléctricos	1031.184	0.085
2	Papel/cartón	396.25	0.34	Ventanas	1555.2	22.95	Loza de sanitarios	1327.2	0.110
3	plastico	1414.45	1.22	Residuos de ceramico y porcelanato	3794.18	55.99	Madera	1336.50	0.111
4	Metales	234.52	0.20	Bolsas de cemento	1.5946	0.02	Metales	204954.69	16.957
5	Ladrillo	5250	4.52	Cajas de cartón	29.23	0.43	Mezcla de concreto, fierro ladrillos y ceramicos	992070.19	82.078
6	Cerámicos	1925	1.66	Tuberías PVC	35.86	0.53	Plastico	300.47	0.025
7	madera	4500	3.88	Loza de sanitarios	1272.32	18.77	Vidrio	7674.12	0.635
8	Residuos concreto	7500	6.46						
	Total	116089.1326	100.00		6776.93	100		1208694.36	100
		131.149709kg/m2			7.65kg/m2			1467.03 kg/m2	

### 5.1.3 Consumo energético y huella de carbono del ciclo de vida residencia unifamiliar y multifamiliar

En la tabla 7, 8 y en la figura 19 y 20, se muestra el consumo energético y la huella de carbono y su contribución porcentual de las fases del ciclo de vida de la residencia unifamiliar y multifamiliar durante los 50 años de vida útil. El consumo de energía primaria total en el ciclo de vida de la residencia unifamiliar es de 16977.53 MJ/m<sup>2</sup> y la huella de carbono es de 1326.77 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>, mientras que en la vivienda multifamiliar es de 81046.26 MJ/m<sup>2</sup> y 1677.63 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>.

**Tabla 7.** Consumo energético y huella de carbono en las fases del ciclo de vida residencia unifamiliar

Fases	Consumo energético		Huella de carbono	
	MJ	MJ/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> eq	kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>
Contrucción	2780740.75	7435.93	276814.99	740.23
Operación	3541371.03	9469.92	201420.09	538.61
Demolición	26803.65	71.68	17924.35	47.93
	6348915.43	16977.53	496159.44	1326.77



**Figura 20.** Distribución porcentual de ciclo de vida energético vivienda unifamiliar



**Figura 21.** Distribución porcentual huella de carbono vivienda unifamiliar

**Tabla 8.** Consumo energético y huella de carbono en las fases del ciclo de vida residencia multifamiliar

Fases	Consumo energético		Huella de carbono	
	MJ	MJ/m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> eq	kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>
Contrucción	4614095.37	5212.70	464990.22	525.31
Operación	18117805.11	20468.28	1017650.18	1149.67
Demolición	33993.91	38.40	2518.95	2.85
	22765894.38	25719.38	1485159.35	1677.83



**Figura 22.** Distribución porcentual de ciclo de vida energético vivienda multifamiliar



**Figura 23.** Distribución porcentual huella de carbono en la vivienda multifamiliar

Los resultados reflejan que el mayor consumo energético es en la vivienda multifamiliar que la vivienda unifamiliar, dado por el mayor número de familias que habitan.

Ambas residencias muestran que la fase de mayor consumo energético es la fase de operación en 56 y 80%, mientras que en la contribución en la huella de carbono existe una marcada diferencia, en la vivienda unifamiliar la mayor contribución es en la fase de construcción (56%) y en la vivienda multifamiliar es la fase de operación (69%), dado que en la vivienda unifamiliar demanda mayor cantidad de materiales de construcción en la etapa de producción (7279.77Mj/m<sup>2</sup>) como se muestra en la tabla 8, de alto consumo energético tales como los ladrillos, cemento y acero, cuyas principales fuentes energéticas en su producción son los combustibles fósiles que contribuye significativamente en las emisiones GEI.

**Tabla 9.** Consumo de energía y huella de carbono fase construcción unifamiliar y multifamiliar

Etapas	Vivienda unifamiliar		Vivienda multifamiliar	
	Consumo de Energía	Huella de carbono	Consumo de Energía	Huella de carbono
	MJ/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>
Producción	7279.77	729.22	5119.06	518.72
Transporte materiales construcción	26.30	1.95	18.72	1.39
Equipos en obra	116.66	8.07	70.62	4.89
Transporte de residuos construcción	13.21	0.98	4.29	0.32
Total	7435.93	740.23	5212.70	525.31

En el caso de la vivienda multifamiliar la mayor contribución de la fase de operación se debe al alto consumo de energía eléctrica (12131.55 comparado 4802.71 Mj/m<sup>2</sup>) que demanda por el uso de electrodomésticos, sumado a ello el ascensor y las bombas de agua que comparado con la vivienda unifamiliar que no las utiliza, su mayor contribución es en el uso de electrodomésticos. Ver tabla 9

**Tabla 10.** Consumo energético y huella carbono fase operación de la vivienda unifamiliar y multifamiliar

Etapas	Vivienda unifamiliar		Vivienda multifamiliar	
	Consumo de Energía	Huella de carbono	Consumo de Energía	Huella de carbono
	MJ/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>
electrodomesticos	4802.71	260.14	12131.55	657.11
cocción de alimentos y ducha	3725.99	235.85	7345.97	465.00
mantenimiento	941.22	42.62	990.76	27.57
Total	9469.92	538.61	20468.28	1149.67

En suma las fases de construcción y operación en ambas viviendas reúnen el 99.6 y 99.8% del total de energía y aportan el 96.4 y 99.83% del total de la huella de carbono en el ciclo de vida de las residencias

La fase de demolición representa el mínimo aporte en 0.42 y 0.149 % del consumo de energía el 3,6 y 0.17% en las emisiones como resultado del uso de combustibles fósiles. El consumo energético en estas etapas está en función a las distancias que recorre el transporte, que generalmente son distancias cortas.

## **5.2 Contrastación de hipótesis**

### **5.2.1 Hipótesis general**

#### **Planteamiento de la hipótesis general:**

La fase de operación del ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima, es la que demanda mayor consumo energético y genera mayor huella de carbono.

#### **Método comparativo para contrastar la hipótesis**

Se utilizó el método comparativo para contrastar la hipótesis, mediante la comparación con diferentes investigaciones enfocadas a la evaluación de la huella de carbono y consumo energético en viviendas aplicando la herramienta de análisis de ciclo de vida.

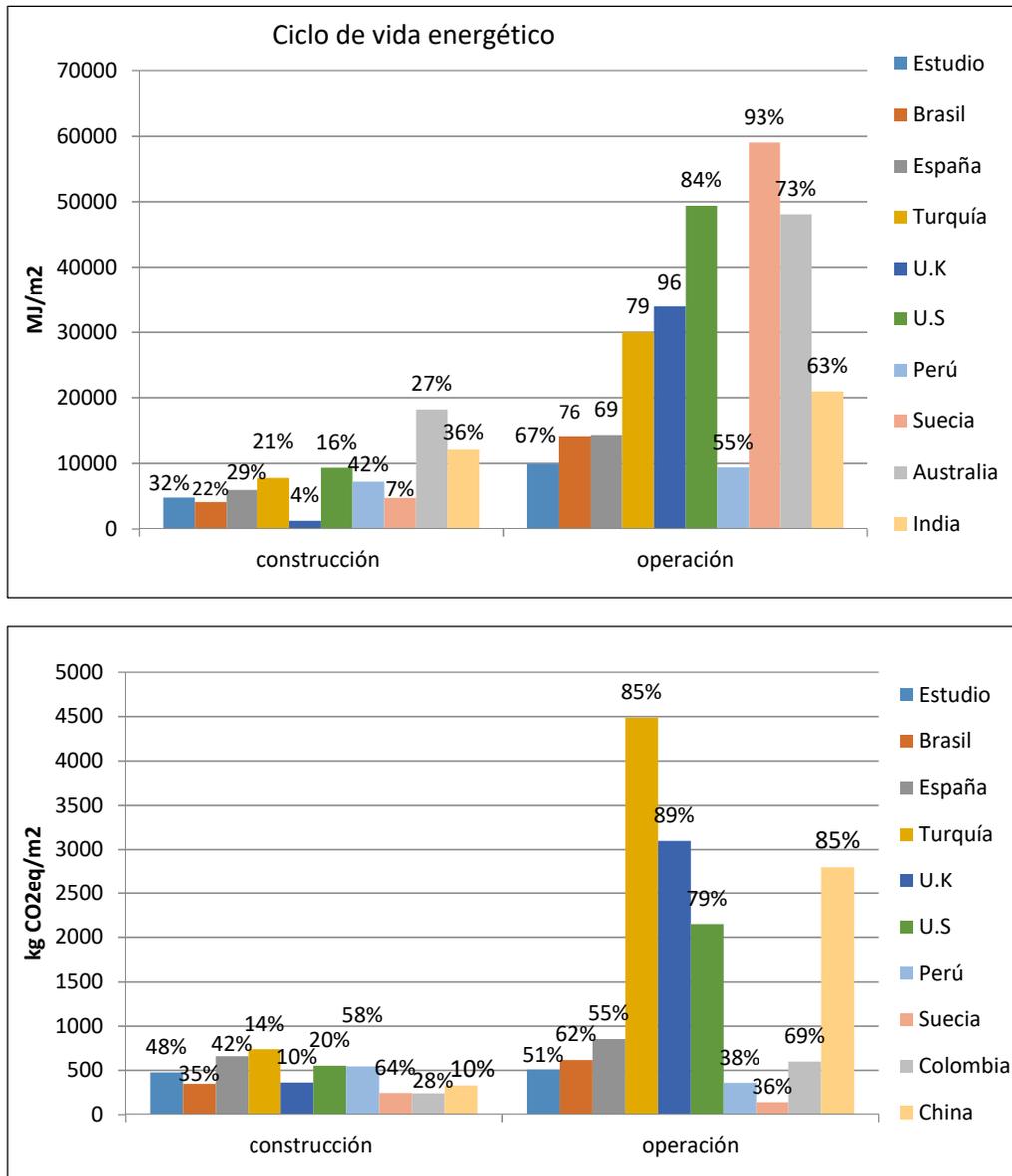
Se trabajó con los resultados consolidados de las variables de estudio, el consumo de energía y la huella de carbono en las fases del ciclo de vida de una vivienda unifamiliar y

se realizó la comparación con otros estudios similares desarrollados en diferentes países, lo que nos permitió aseverar la validación de la hipótesis de la investigación.

En la tabla 11 y la figura 24, muestran los estudios de referencia de evaluación del ciclo de vida energético y las emisiones CO<sub>2</sub> y el potencial calentamiento global (GWP) en residencias familiares y multifamiliares que se han desarrollado en diferentes países, en el que se presenta las principales características, como la tipología de las viviendas, superficie construida, los materiales estructurales y los resultados del consumo energético y el potencial calentamiento global en las fases de construcción, operación y demolición.

**Tabla 11.** Investigaciones sobre análisis de ciclo de vida en edificaciones residenciales

No	Autor	Año	País de estudio	Análisis	Área (m2)	Estudio de caso	Material estructural	Vida útil (años)	Consumo energético(MJ/m <sup>2</sup> )				Emisiones CO <sub>2</sub> /GWP (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )			
									Cons	Op	Dem	Ciclo de vida	Cons	Op	Dem	Ciclo de vida
	Estudio	2018	Perú	CVE y HC	374	Unifam	concreto	50	7436	9970	72	16978	740	539	47.9	1327
	Estudio	2018	Perú	CVE y HC	885	Multifam	concreto	50	5213	20468	38	25719	525	1149	2.85	1678
1	Tavares	2006	Brasil	CVE y CO <sub>2</sub>	252	Unifam	concreto	50	4120	14080	340	18550	347	618	27	1055
2	Wadel, G	2009	España	ACV	1280	Multifam	concreto	50	5939	14274	516	20730	659	854	41	1116
3	Atmaca y Atmaca	2015	Turquía	ACV	1997	Multifam	concreto	50	7800	30000	76	37876	737	4485	45	5267
4	Cuéllar-Franca y Azapagic	2012	U.K	ACV	130	Unifam	concreto	50	1240	33892	112	35244	362	3100	39	3500
5	Mosteiro – Romero, M et al.	2014	U.S	ACV	317	Unifam	concreto	50	9346	49378	230	58952	553	2147	30	2730
6	García	2014	Perú	ACV	478	Unifam	concreto	50	7179	9372	435	16987	545	358	31	934
7	Rossi, B et al.	2012	Suecia	ACV	190	Unifam	Acero	50	4712	59002		63714	245	139		384
8	Fay et al.	2010	Australia	CVE	128	Unifam	concreto	50	18180	48060		66240				
9	Pinky y Palaniappan	2014	India	CVE	2960	Multifam	concreto	50	12100	20900	363	33363				
10	Ortiz	2009	Colombia	ACV	107.5	Unifam	concreto	50					238	599	26	862
11	Fang et al	2010	China	Emisiones carbono	100	Unifam	concreto	50					329	2802	165	3296



**Figura 24.** Comparación del estudio con otros estudios de diferentes países en análisis de ciclo de vida energético y potencial calentamiento global en edificaciones residenciales.

Como se muestra algunos estudios no han incluido la última fase de demolición, debido a que su aporte es mínimo en los resultados globales. Cabe destacar que se ha incluido los resultados correspondientes del estudio expuesto.

De los estudios analizados en comparación con en el presente estudio para el indicador de energía en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar, muestra que los 9 estudios de caso coinciden con los resultados obtenidos en el estudio, la fase de operación es la fase de mayor demanda de energía primaria, cuyo rango de valores se encuentra entre 9 – 59 GJ/m<sup>2</sup> (0,18 – 1,180 GJ/m<sup>2</sup>.año) durante la vida útil de 50 años, que representa un rango entre 55 - 96% del consumo total de energía, mientras que la demanda de energía embebida en la fase de construcción se encuentra en un rango de entre 4 – 7 GJ/m<sup>2</sup>, representando en un rango de entre 3 – 42% del total de energía y la fase final de demolición es la que requiere el mínimo consumo energético en un rango de entre 0,3 – 2,5%.

Como se muestra en los diferentes estudios analizados, presentan un alto rango de variación en los datos de energía y emisiones GEI, debido a que este tipo de estudios se encuentran fuertemente influenciados por la ubicación geográfica, tipología de vivienda, mix energético y otros factores que se explicaran posteriormente.

Para el indicador potencial calentamiento global (GWP, siglas en inglés) o huella de carbono, indicador que cuantifica las emisiones GEI, muestra de los 9 estudios de caso, 7 coinciden con los resultados del estudio, la fase de operación es la fase más significativa en contribución a las emisiones GEI, cuyo rango de valores fluctúa entre 600 - 4500 kgCO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> durante los 50 años de vida de la residencia, representa entre 54 – 89% del total de las emisiones GEI y la fase de construcción contribuye en un menor porcentaje entre 9 - 47%. La última fase del ciclo de vida, la fase de demolición, su contribución es mínima comparado con las otras fases entre 0,8 – 5% del total de las emisiones. Contrariamente en dos estudios, la fase de construcción es el de mayor contribución entre 58 - 63% de las

emisiones totales y la contribución de la fase de operación es menor entre 36 – 38% de las emisiones totales. Estas diferencias se deben principalmente a la cantidad y tipo de materiales de construcción y al mix energético del país.

### **5.2.2 Hipótesis específica 1**

#### **Planteamiento de la hipótesis específica 1:**

El consumo energético y la huella de carbono durante el ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima es significativamente menor en comparación con las residencias europeas.

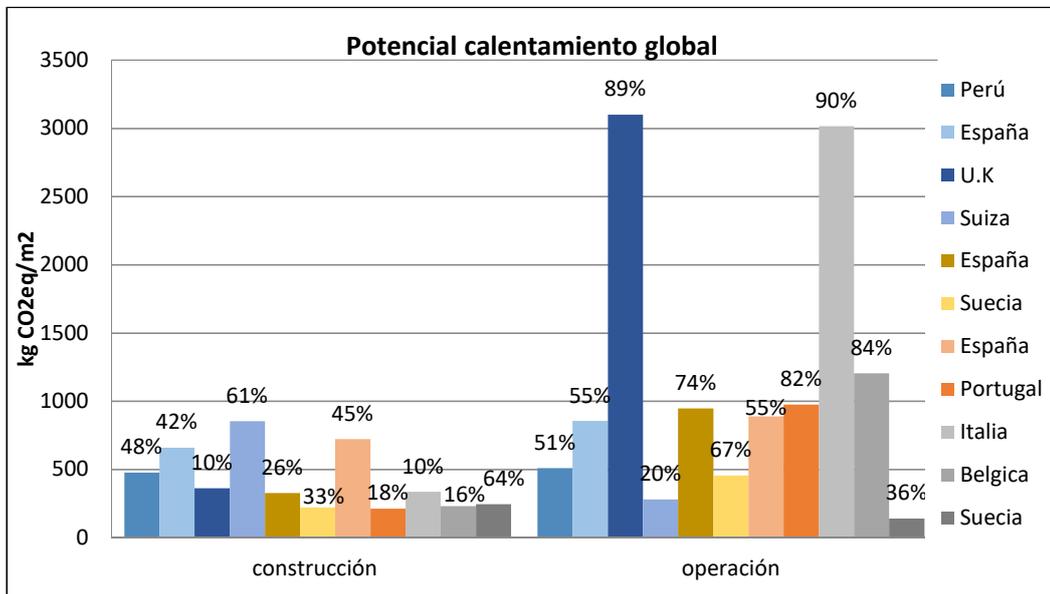
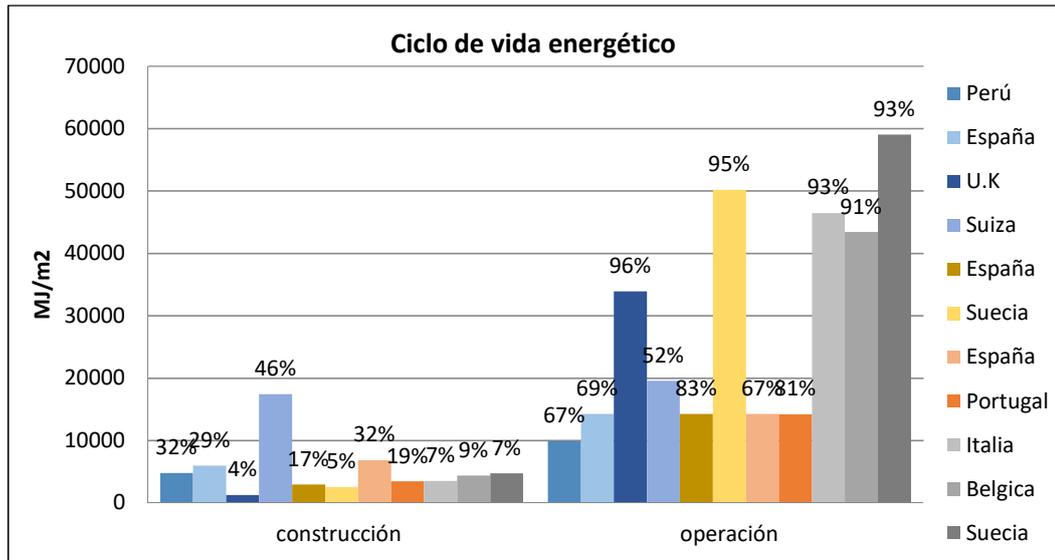
#### **Método comparativo para contrastar la hipótesis**

Se utilizó el método comparativo para contrastar la hipótesis, mediante la comparación con diferentes investigaciones desarrolladas en países de Europa enfocadas a la evaluación de la huella de carbono y consumo energético en viviendas aplicando la herramienta de análisis de ciclo de vida.

En la tabla 12 y la figura 25 muestran los estudios de referencia de evaluación del ciclo de vida energético y las emisiones GEI en residencias familiares y multifamiliares que se han desarrollado en diferentes países.

**Tabla 12.** Investigaciones sobre análisis de ciclo de vida en edificaciones residenciales en Europa.

Autor	Año	País de estudio	Análisis	Superficie (m <sup>2</sup> )	Estudio de caso	Material estructural	Vida útil (años)	Consumo energético(MJ/m <sup>2</sup> )				Emisiones CO <sub>2</sub> /GWP (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )				
								Cons	Op	Dem	Ciclo de vida	Cons	Op	Dem	Ciclo de vida	
E	Estudio	2018	Perú	CVE y HC	374	Unifam	concreto	50	7436	9970	72	16978	740	539	47.9	1327
	Estudio	2018	Perú	CVE y HC	885	Multifam	concreto	50	5213	20468	38	25719	525	1149	2.85	1678
1	Wadel	2011	España	ACV	1280	Multifam	Concreto	50	5939	14274	516	20730	659	854	41	1554
2	Cuéllar-Franca & Azapagic	2012	U.K	ACV	130	Unifam	Concreto	50	1240	33892	112	35244	362	3100	38,5	3500
3	Mosteiro-Romero et al.	2013	Suiza	ACV	406	Unifam	Concreto	50	17410	19559	785	37753	852	279	255	1386
4	Wadel	2009	España	ACV	1280	Multifam	Madera	50	2932	14264	58	17682	327	947	4,61	1279
5	Dodoo y Gustavson, L	2013	Suecia	CVE y HC	1190	Multifam	Madera	50	2524	50155	22	52700	220	454	2	676
6	Wadel, G	2011	España	ACV	1280	Multifam	Acero	50	6855	14236	58	21149	722	888	4,61	1615
7	Bastos et al.	2013	Portugal	ACV	367	Unifam	concreto	50	3433	14178		17611	212	974		1186
8	Blengini	2009	Italia	ACV	250	Unifam	Concreto	50	3496	46454		49949	335	3015		3350
9	Rossi et al.	2011	Bélgica	ACV	192	Unifam	Acero	50	4390	43394		47784	231	1205		1436
10	Rossi et al.	2011	Suecia	ACV	190	Unifam	Acero	50	4712	59002		63715	244.5	139,5		384



**Figura 25.** Comparación del estudio con otros estudios de diferentes países de Europa en análisis de ciclo de vida energético y potencial calentamiento global en edificaciones residenciales. E = Presente estudio

Para el indicador de consumo de energía primaria, el consumo energético total del ciclo de vida de la vivienda unifamiliar y multifamiliar del presente estudio es significativamente menor comparado con los estudios desarrollados en los países de Europa. Estas diferencias radican principalmente por la ubicación geográfica, condiciones climáticas, tipología de vivienda, mix energético y hábitos de consumo.

Como se puede apreciar, los estudios presentan un amplio rango de variación a pesar de encontrarse casi en similares condiciones climáticas, en cuanto al consumo energético total del ciclo de vida, cuyo rango varía entre 17,6 y 63,7 GJ/m<sup>2</sup>, donde la fase de operación representa la mayor demanda de energía entre el 52 y 95% del total de energía, mientras que la energía embebida en la fase de construcción se sitúa entre el 3 y 46% y menos del 3% corresponde a la energía consumida en la fase de demolición.

Para el indicador potencial calentamiento global en el ciclo de vida de una residencia familiar y multifamiliar, los resultados del estudio presentan la menor contribución en comparación con los estudios de Reino Unido e Italia, mientras que en comparación con los estudios de Portugal y Suecia es mayor, siendo el rango de variación para los estudios de mayor contribución entre 1600 y 3500 kgCO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> y para los de menor contribución es entre 384 y 980 kgCO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>. Los resultados de los diferentes estudios indican que la fase de operación representa la mayor contribución entre 54 y 90% del total de las emisiones en el ciclo de vida. Si bien es cierta esta fase aporta un importante índice de potencial, contrariamente ocurre en los estudios de Suiza y Suecia, la contribución de la fase de operación resulta ser sensiblemente inferior a la fase de construcción, aproximadamente entre 20 y 30% y la fase de construcción representa la mayor contribución entre 61 y 63%.

### **5.2.3 Hipótesis específica 2**

#### **Planteamiento de la hipótesis específica 2:**

Las propuestas de mejora ambiental involucran el uso de materiales de construcción ecológicos, electrodomésticos eficientes y el uso de energías renovables contribuyen a la reducción del consumo energético y los niveles de la huella de carbono en el ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima

## Alternativa 1

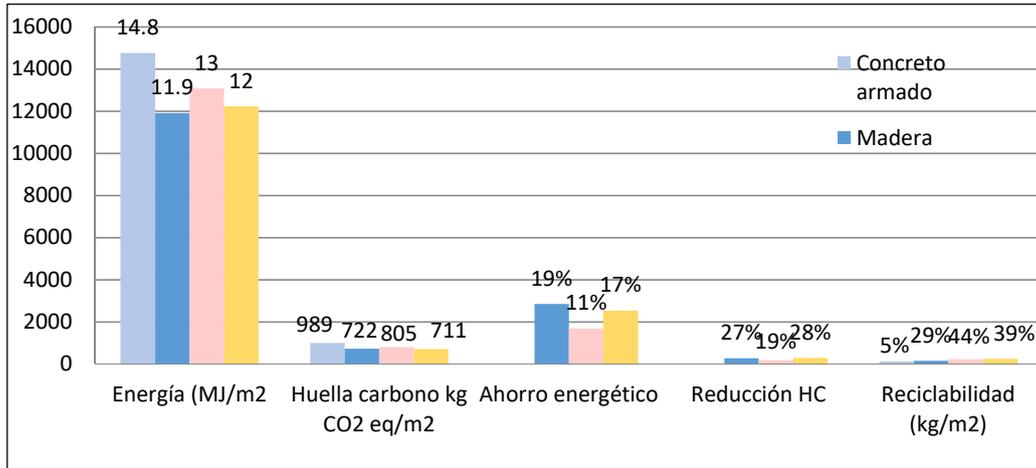
**Tabla 13.** Comparación energético y huella de carbono sistemas constructivos de concreto armado y madera

Estudio	País	Sistema constructivo	Energía incorporada	Huella de carbono	Fase construcción		Ciclo de vida		Ahorro energético	Reducción HC
			(MJ/m <sup>2</sup> )	kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	E.I (MJ/m <sup>2</sup> )	H.C (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	E.I (MJ/m <sup>2</sup> )	H.C (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>
v.unifamiliar	Perú	Concreto armado	9691	729	7435	740	16977	1327	-	-
v. multifamiliar	Perú	concreto	5119	518	5212	525	25719	1677	-	-
Punhagui, 2014	Brasil	Madera	1768	209	1921,38	219,7	11906,89	721,92	2846,04	267,39
Wadel, 2010	España	Madera	2932	293	3085,82	303,5	13071,33	805,77	1681,60	183,54
Dodoo, 2011	Suecia	Madera	2084	198	2237,78	208,7	12223,29	710,92	2529,64	278,39

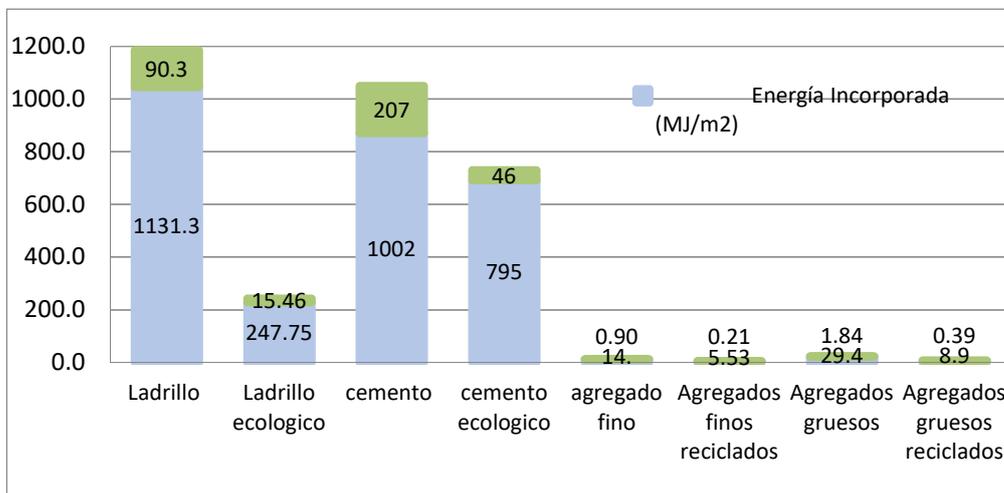
## Alternativa 2

**Tabla 14.** Comparación energético y huella de carbono materiales de construcción convencional y ecológico

Materiales de construcción convencional								
No	Material convencional	Flujo material	Energía Incorporada	Huella carbono	Ciclo de vida		Ahorro energético	Reducción HC
		(kg/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	EI (MJ/m <sup>2</sup> )	HC (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )
1	Ladrillos	407,98	1223,9	97,9				
2	Cemento	275,23	1241,9	261,47				
3	Agregados finos	172,76	14,3	1,51	14752,9	989,3	–	–
4	Agregados gruesos	354,22	29,40	4,64				
Materiales de construcción ecológicos								
No	Material ecológico	Flujo material	Energía Incorporada	Huella carbono	Ciclo de vida		Ahorro energético	Reducción HC
		(kg/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	EI (MJ/m <sup>2</sup> )	HC (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	(MJ/m <sup>2</sup> )	(kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )
1	Ladrillos sin cocción	377,09	247,75	15,46				
2	eco cemento	217,81	795,23	45,85				
3	Agregados finos reciclados	172,76	5,53	0,21	13633,4	751,2	1119,6	238,1
4	Agregados gruesos reciclados	354,22	8,86	0,39				



**Figura 26.** Alternativa 1: Comparación energético y huella de carbono sistemas constructivos concreto armado y madera.



**Figura 27.** Comparación energético y huella de carbono materiales de construcción convencional y ecológica

En la alternativa 1, se propone la implementación de sistemas constructivos de madera en lugar de sistemas constructivos de concreto armado (mampostería confinada) y la alternativa 2, el uso de materiales de construcción ecológicos en sustitución a los materiales de construcción convencionales en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar en la ciudad de Huancayo, demuestra que son opciones que contribuyen al ahorro energético, la mitigación del cambio climático al reducir la huella de carbono y la reducción del consumo de materiales naturales al sustituirlos por materiales reciclados que genera un bajo impacto ambiental.

Los resultados muestran en la fase de construcción, para la alternativa 1, que obtuvo en promedio un ahorro energético del 49% y la alternativa 2 un 23% y en la contribución en reducción de los niveles de la huella de carbono, la alternativa 1 en promedio obtuvo un 48% y la alternativa 2 un 50%. En el ciclo de vida de la residencia unifamiliar para la alternativa 1, se obtuvo 16% en ahorro energético y la alternativa 2 un 8%, y en la reducción de la huella de carbono, la alternativa 1 en 25% y la alternativa 2 en 24%.

La propuesta para el uso de fuentes de energías renovables, en la alternativa 3 el uso de la energía solar térmica y electrodomésticos eficientes y la alternativa 4 el uso de la energía solar fotovoltaica para el funcionamiento de electrodomésticos de baja potencia en la fase de operación en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar, durante los 50 años de vida útil, demuestra que es una opción que permite reducir el uso de energías convencionales, contribuyendo al ahorro energético, económico y la mitigación del cambio climático. Los resultados muestran en la fase de operación, para la alternativa 3, que obtuvo un 36% en ahorro energético y la alternativa 4 en un 23%, en la contribución a los bajos niveles de la huella de carbono, la alternativa 3 en 28% y la alternativa 4 en 25% y en el ahorro económico, obteniéndose para la alternativa 3 en 43% (347\$ anual), con un periodo de amortización de 4.4 años y la alternativa 4 en 48% (393\$ anual) con un periodo de amortización de 7.4 años. En el ciclo de vida de la residencia unifamiliar se obtuvo para la alternativa 3, un 24% en ahorro energético y la alternativa 4 un 16%, y en la reducción de la huella de carbono, la alternativa 3 en 14% y la alternativa 4 en 13%.

### Alternativa 3

**Tabla 15.** Comparación energética, huella de carbono y económico electrodomésticos convencionales y eficientes residencia unifamiliar

No	Equipos	Electrodomésticos convencionales				Electrodomésticos eficientes				Ahorro energético (MJ)	Ahorro (\$)	Reducción huella de carbono (kgCO <sub>2</sub> eq)
		Consumo energético (kWh/año)		Coste (\$/año)		Consumo energético (kWh/año)		Coste (\$/año)				
		Equipos	Total	Equipos	Total	Equipos	Total	Equipos	Total			
1	Terma eléctrica	1080		210		Terma solar	*					
2	Lámpara LFC	307		59,7		Focos LED	108,4		21,08			
3	Refrigeradora	630		122,5		Refrigeradora	270		52,5			
		2017	3143	392	803,2		378	1504	74	485	1504	318
Ciclo de vida de la residencia unifamiliar												
1	Energía primaria	14752.9 MJ/m <sup>2</sup>				11183 MJ/m <sup>2</sup>				1002933	15900	
2	Huella carbono	989 kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>				848,8 kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>						39461

Nota \* Energía solar

**Tabla 16.** Comparación energética, huella de carbono y económico electrodomésticos convencionales y eficientes residencia multifamiliar

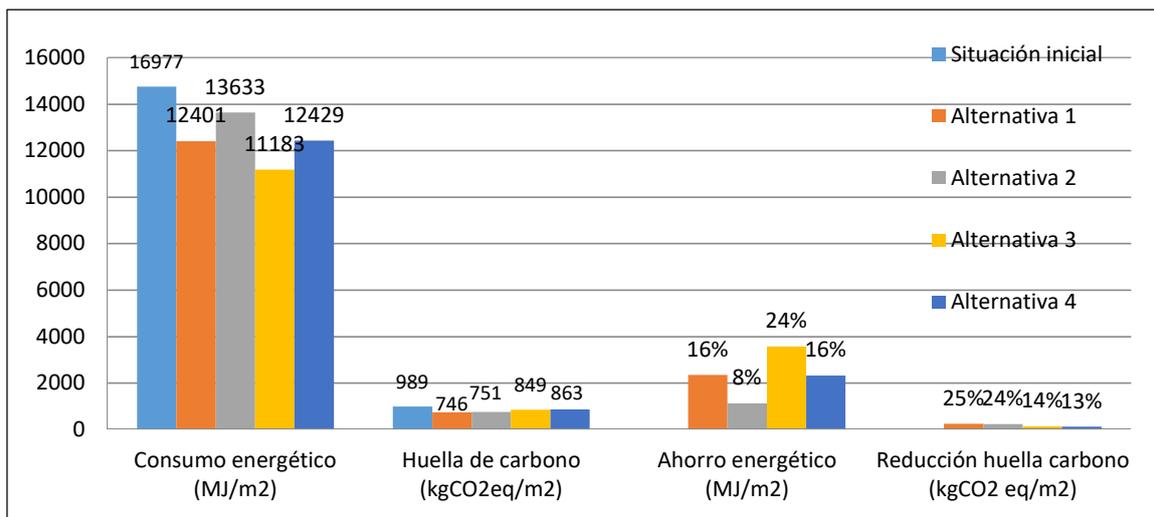
		Electrodomésticos convencionales				Electrodomésticos eficientes				Ahorro energético (MJ)	Ahorro (\$)	Reducción huella de carbono (kgCO <sub>2</sub> eq)		
No	Equipos	Consumo energético (kWh/año)		Coste (\$/año)		Equipos	Consumo energético (kWh/año)		Coste (\$/año)					
		Equipos	Total	Equipos	Total		Equipos	Total	Equipos	Total				
1	Terma eléctrica	453600		88173		Terma solar	*							
2	Lámpara LFC	124992		24296		Focos LED	75894		14753					
3	Refrigeradora	441000		85724		Refrigeradora eficiente	189000		36739					
		1019592	1673475	198193	327928			264894	918777	51491	181226	754698	146702	
Ciclo de vida de la residencia unifamiliar														
1	Energía primaria	25719.38	MJ/m <sup>2</sup>			15284	MJ/m <sup>2</sup>			10435.38		146702		
2	Huella carbono	1678	kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>			1112.6	kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>							565.4

Nota \* Energía solar

#### Alternativa 4

**Tabla 17.** Comparación energética, huella de carbono y económico sistema eléctrico y sistema fotovoltaico

		Sistema eléctrico				Sistema Fotovoltaico			Ahorro energético (MJ)	Ahorro (\$)	Reducción huella carbono (kgCO <sub>2</sub> eq)
No	Equipos	Consumo energético (kWh/año)		Costo (\$/año)		Consumo energético (kWh/año)		Costo (\$/año)			
		Equipos	Total	Equipos	Total	Equipos	Total				Total
1	Refrigeradora	630		122		270					
2	Iluminación	307		60		307					
3	TV	130		25		130					
		1067	3143	207	803,2	761	2076	417,42	1067	386	
No Ciclo de vida de una residencia unifamiliar											
1	Energía primaria	16977 MJ/m <sup>2</sup>				12429 MJ/m <sup>2</sup>			53340	19289	
2	Huella de carbono	1326 kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>				863kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>					35364
No Ciclo de vida de una residencia multifamiliar											
1	Energía primaria	25719 MJ/m <sup>2</sup>				12429 MJ/m <sup>2</sup>			125340	45350	
2	Huella de carbono	1677 kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>				863kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>					55250



**Figura 28.** Comparación energética, huella de carbono situación inicial, alternativa 1, 2,3 y 4

La propuesta para el uso de fuentes de energías renovables, en la alternativa 3 el uso de la energía solar térmica y electrodomésticos eficientes y la alternativa 4 el uso de la energía solar fotovoltaica para el funcionamiento de electrodomésticos de baja potencia en la fase de operación en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar, durante los 50 años de vida útil, demuestra que es una opción que permite reducir el uso de energías convencionales, contribuyendo al ahorro energético, económico y la mitigación del cambio climático. Los resultados muestran en la fase de operación, para la alternativa 3, que obtuvo un 36% en ahorro energético y la alternativa 4 en un 23%, en la contribución a los bajos niveles de la huella de carbono, la alternativa 3 en 28% y la alternativa 4 en 25% y en el ahorro económico, obteniéndose para la alternativa 3 en 43% (347\$ anual), con un periodo de amortización de 4.4 años y la alternativa 4 en 48% (393\$ anual) con un periodo de amortización de 7.4 años. En el ciclo de vida de la residencia unifamiliar se obtuvo para la alternativa 3, un 24% en ahorro energético y la alternativa 4 un 16%, y en la reducción de la huella de carbono, la alternativa 3 en 14% y la alternativa 4 en 13%.

En el caso de la residencia multifamiliar la implementación el uso de la energía solar térmica y electrodomésticos eficientes permite reducir el consumo energético en ciclo de vida en 40% (de 25719.38 a 15284 MJ/m<sup>2</sup>), la reducción de la huella de carbono en 34% (de 1678 a 1112.6 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>) y un ahorro económico de 45%

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta investigación presenta la evaluación del consumo energético y la huella de carbono durante el ciclo de vida de dos tipos de residencias familiares; unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima, cuyos resultados nos permitió demostrar la fase del ciclo de vida que demanda mayor consumo de energía y genera los mayores niveles de huella de carbono.

Los resultados muestran en la tabla 6, 7 y la figura 19, 20 en términos del indicador consumo de energía primaria en las residencias unifamiliar y multifamiliar que la fase de operación es la de mayor demanda de consumo energético 9469.92 Mj/m<sup>2</sup> y 20468.28 Mj/m<sup>2</sup> (56 y 80% respectivamente), asociado al mayor consumo de electrodomésticos, refrigeración, e iluminación en el caso de la residencia unifamiliar, mientras que en la residencia multifamiliar está asociado el mayor consumo al uso del ascensor, bombas de agua y duchas eléctricas. Si comparamos estos resultados con un estudio nacional, evaluación ambiental en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar, desarrollado por García (2014), muestra resultados similares, quien determinó que la fase de mayor consumo es la fase de operación (9372Mj/m<sup>2</sup>) y en el caso de una residencia multifamiliar, nuestros resultados son similares a un estudio realizado en el sur de la India por Pinky. et al (2014), quien determino que la fase de operación es la de mayor consumo 20935.34 Mj/m<sup>2</sup> . Dichos consumos están asociada a los hábitos de consumo de los habitantes de la vivienda, la zona climática y el nivel socioeconómico.

A diferencia de la fase de operación, la fase de construcción en ambas residencias demanda menor consumo de energía (multifamiliar en 20 y unifamiliar en 44%). La mayor contribución energética en esta fase está asociada a la etapa de producción de materiales de

construcción en el que se utiliza materiales de alto consumo energético (ver figura 18), acero (25 -29%), cemento (17 – 36 %) y los ladrillos (14 – 19 %).

La energía consumida durante la fase de demolición es mínima (0,42 – 0,47%) comparada con las otras fases, debido al bajo consumo de combustibles en el transporte por las cortas distancias de recorrido hacia los vertederos.

Para el indicador potencial calentamiento global (GWP) o huella de carbono, como se muestra en la tabla 7, 8 y la figura 21 y 23, en el caso de la vivienda unifamiliar, la fase de construcción es la de mayor contribución en 56% y la fase de operación contribuye en un 40%. En esta fase el cemento, acero, y el ladrillo son los principales contribuidores en la huella de carbono en 36, 19 y 14% respectivamente, debido al alto consumo de combustibles fósiles en su fabricación y en el caso del cemento también es debido al proceso de calcinación para la producción de Clinker. Un análisis similar en un estudio llevado a cabo en Colombia (Salazar, 2012), concluye que en un sistema constructivo de mampostería confinada, el ladrillo, cemento y el acero son los tres materiales significativos en una residencia que contribuyen en 87% de la energía embebida de los materiales y contribuyen en las emisiones CO<sub>2</sub> en 92% .

En el caso de la residencia multifamiliar, los resultados reflejan que la fase de mayor contribución a las emisiones GEI es la fase de operación en 69% y la fase de construcción en 31%, debido al alto consumo de energía eléctrica por el uso del ascensor, las bombas de agua y las duchas eléctricas que se utiliza en las 14 familias que habitan en la residencia. Las fuentes de energía que son utilizados en el mix energético del país para la generación de

electricidad, se caracteriza por la mayor participación del gas natural en 54% e hidroenergía 32% (MINEM, 2012).

En comparación la residencia unifamiliar y multifamiliar, el mayor consumo energético y contribución a los niveles de la huella de carbono es notablemente influenciado por el número de habitantes que reside en las viviendas, la elección y la cantidad de un material de construcción. Resulta entonces, posible que el incremento de materiales principalmente cemento, ladrillos y acero puede generar mayores emisiones CO<sub>2</sub> en la fase de construcción, dando lugar a la menor contribución en la huella de carbono en la fase de operación.

### **Análisis comparativo con otros estudios**

En el presente apartado se analizan los resultados obtenidos por el estudio en comparación con otros estudios de diferentes países enfocados a la investigación y evaluación del consumo energético y el potencial calentamiento global (huella de carbono) en el ciclo de vida de una residencia familiar y multifamiliar, aplicando la herramienta de análisis del ciclo de vida, cuyos resultados nos permitió aseverar la validación de la hipótesis general de la investigación.

Como se aprecia en la tabla 11 y la figura 24, de los 11 estudios analizados en comparación con los resultados del estudio para el indicador energía primaria, existe concordancia entre los resultados. Todos los estudios coinciden que la fase de mayor demanda de energía primaria es la fase de operación, cuyo aporte es entre 9 a 59 GJ/m<sup>2</sup> durante la vida útil de 50 años (entre 55 a 96% ), mientras que al aporte de la energía embebida en la fase de construcción fue menor ( 3 a 42%). Esto también nos muestra que existe una relación lineal entre la energía operacional y la energía total en todos los casos a pesar de las diferencias de

climas, tipología de residencia, materiales y técnicas constructivas entre otros, la tendencia general es correlativa.

En el análisis de los 11 estudios, se observa que existe un alto rango de variación en el ciclo de vida energético de las residencias, esto se debe a la significativa influencia, principalmente por la ubicación geográfica, tipología de la residencia y los hábitos de consumo de los residentes.

Los consumos más altos en ciclo de vida energético son de los estudios que corresponde a los países de Suecia, Estados Unidos y Australia, esto se debe al aporte significativo de la fase de operación en el consumo total de energía, cuyos valores son 59, 49.4 y 48 GJ/m<sup>2</sup> (Fay et al., 2010; Martín et al., 2013; Rossi et al., 2011) respectivamente. Estos resultados deriva del alto consumo de gas o petróleo principalmente para el uso de calefacción en 67 – 70% (Rossi et al., 2011), refrigeración, ventilación, cocina así como también el uso de electricidad para iluminación y electrodomésticos, dado que estos países se encuentran ubicadas en regiones de climas muy fríos y en especial Suecia que se caracteriza por un clima polar.

El consumo de energía en la fase de operación depende principalmente del consumo de energía per cápita, el número de persona por hogar, el área de ocupación y el tiempo de vida útil de la residencia. Las tendencias en el consumo energético per cápita son muy altos en el caso de Suecia, Estados Unidos y Australia en 215, 290 y 234 GJ/año respectivamente (Banco Mundial, 2013) y el ratio de ocupación decrece de 4 a 2 habitantes por hogar (Bastos, et al., 2013).

A diferencia de Suecia, Estados Unidos y Australia, la energía operacional es menor en España, Turquía y Reino Unido, cuyos valores son 14, 30 y 33 GJ/m<sup>2</sup> (Atmaca & Atmaca, 2015; Cuéllar-Franca & Azapagic, 2012; Wadel, 2009) respectivamente, debido a la menor demanda de energía para calefacción en 32 – 59% (Cuéllar-Franca y Azapagic, 2012), en especial España tiene la menor participación en 32% (Wadel, 2009). Esto explica por las condiciones climáticas, donde las temperaturas son un poco más altas, características de climas templados. El consumo de energía per cápita es menor cuyo rango se estima entre 65 - 115 GJ/año (Banco Mundial, 2013).

La energía operacional en los estudios de Brasil y de la India son relativamente menores comparado con los estudios anteriores, en 14 y 20 GJ/m<sup>2</sup> (Tavares, 2006; Pinky & Palaniappan, 2014) respectivamente y para el caso del estudio nacional, cuyos resultados son similares al presente estudio, en el caso de la residencia unifamiliar, representan el mínimo consumo en 9,37 (García, 2014) y 9,9 y GJ/m<sup>2</sup> comparado con todos los estudios analizados, esto se ve reflejado por la mayor participación de energía eléctrica en 41 - 65% para iluminación, electrodomésticos, aire acondicionado y GLP para cocción en 25 – 37% (Tavares, 2006), dado por las condiciones climáticas donde las temperaturas son mucho más altas, característico de climas tropicales.

El consumo de energía per cápita en Brasil es de 60 GJ/año (Banco Mundial, 2013), uno de los países con los más altos consumo de energía en Latinoamérica esto se debe a la diversificación de fuentes de energía y por los altos niveles de ingreso y en el caso del Perú, el consumo de energía per cápita es 29 GJ/ año (Banco Mundial, 2013), es uno de los países con los más bajos consumos energéticos, dado por la baja producción de petróleo, el lento

desarrollo del sistema de distribución del gas natural y el bajo nivel de ingresos de la población (MINEM, 2012).

Para el indicador potencial calentamiento global se muestra en la tabla 11 y la figura 24 que existe una relativa concordancia entre los resultados de diferentes estudios en comparación con el presente estudio, 8 de los 11 estudios coinciden, en que la fase de mayor contribución para este indicador es la de operación, cuyo aporte es entre 139 – 4500 kgCO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> (54 – 89%), durante los 50 años de vida de la residencia y la fase de construcción contribuye en menor porcentaje entre 9 y 47%. Mientras que, en dos estudios de Suecia y Perú, la mayor contribución es en la fase de construcción (63 y 58 % respectivamente) y la fase de operación contribuye en menor porcentaje 36 y 38% respectivamente (García, 2014; Rossi et al., 2011), un resultado similar que muestra el estudio en la residencia unifamiliar. Estas diferencias se deben principalmente a la cantidad y tipo de materiales de construcción y al mix energético del país.

En los estudios analizados de Turquía, Reino Unido, China y Estados Unidos, se aprecia que tienen las contribuciones más significativas emisiones GEI en la fase de operación, cuyos aportes fluctúan entre 2100 – 4500 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> (79 - 89%), asociado al uso del gas natural, petróleo y carbono, principales fuentes energéticas (60 - 84%) para el uso de calefacción y agua caliente doméstica (Cuéllar-Franca & Azapagic, 2012; Fang et al, 2010) y para la generación de energía eléctrica (53%) para cocción de alimentos y electrodomésticos (Cuéllar-Franca & Azapagic, 2012). Para el estudio de Turquía, presenta las más altas emisiones (4485 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>), por el consumo de calefacción e iluminación dado por el tamaño de la residencia multifamiliar (área construida = 7445m<sup>2</sup>), que en comparación con residencias unifamiliares, el consumo es mayor. Sin embargo, si comparamos con el estudio de una residencia multifamiliar de España, su consumo es mucho más alto, esto explica por

el número de ocupantes por hogar (4 a 6 habitantes/hogar) que es mayor en comparación con el estudio de España (4 a 1.5 habitantes/por hogar), por lo que genera mayor consumo de combustibles fósiles en el uso de agua caliente, cocina y electrodomésticos (Atmaca & Atmaca, 2015). Además España utiliza el 57% de energías renovables (Eólica, nuclear e hidráulica) y 31% de gas natural para la generación de electricidad (Ortiz, 2009).

En comparación con los estudios anteriores, los estudios de Brasil, Colombia y el presente estudio es menor la contribución al potencial calentamiento global en la fase de operación, cuyo aporte es entre 500 – 618 kgCO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> (52-69%). Dado que las principales fuentes de energía para la generación de electricidad es la energía hídrica y gas natural. Para el caso de Brasil y Colombia el mayor aporte proviene de la energía hídrica 65,2 y 79,69% respectivamente y gas natural en 17,5 y 12,5% respectivamente (Tavares, 2006; Ortiz, 2009) y en el caso del Perú, la mayor participación es de gas natural en 55,4% y la energía hídrica en 32% (MINEM, 2012). Estos resultados nos reflejan el bajo índice de emisiones CO<sub>2</sub> por kWh de electricidad en Brasil, Colombia y Perú (81,6; 120 y 195 gCO<sub>2</sub>/kWh respectivamente) (IEA, 2013).

En comparación con los estudios anteriores, el estudio de Suecia presenta la menor contribución al potencial calentamiento global, a pesar de ser uno de los países Europeos con los más altos consumos energéticos, donde la fase de mayor contribución es la fase de construcción (63%) y la fase de operación de menor contribución (36%) (Rossi et al, 2011). Esta diferencia de resultados comparado con los estudios anteriores nos confirma que Suecia cuenta con estándares de eficiencia energética muy altos que se caracteriza por utilizar sistemas de calefacción urbana para el uso de calefacción y agua caliente, cuyas fuentes energéticas son de origen renovable, biomasa (aprovechamiento de la basura como combustible) y energía nuclear y para la generación de electricidad, cerca del 78 % proviene

de energía nuclear e hidroeléctrica, energías que no generan emisiones de carbono por lo que presenta los más bajos índices de emisiones 43.14 gCO<sub>2</sub>/kWh (IEA, 2013).

Por otro lado para el estudio de Suecia y Perú, la mayor contribución es en la fase de construcción esto se debe al material estructural de acero galvanizado y concreto armado utilizado en el sistema constructivo de acero en la residencia de Suecia, que resulta en emisiones superior a una construcción convencional (708 respecto de 600 KgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) (Rossi et al, 2011; Wadel, 2009) y para el caso del estudio nacional se debe a los materiales estructurales utilizados en el sistema constructivo de mampostería, que se caracteriza por un alto consumo de cemento, ladrillos y acero, los cuales contribuyen significativamente en las emisiones GEI (García, 2014).

### **Análisis comparativo con otros estudios de Europa**

A continuación se discuten los principales resultados obtenidos por el estudio en comparación con otros estudios de países europeos enfocados a la evaluación del consumo energético y el potencial calentamiento global en el ciclo de vida de una residencia familiar y multifamiliar aplicando la herramienta de análisis del ciclo de vida, cuyos resultados nos permitió aseverar la validación de la hipótesis específica 1 de la investigación.

Para el indicador de consumo de energía primaria se muestra en la tabla 12 y la figura 25, que el consumo energético total del ciclo de vida de una residencia unifamiliar del presente estudio es menor (16,9GJ/m<sup>2</sup>) comparado con los estudios europeos (17 – 64GJ/m<sup>2</sup>), siendo los más altos consumos energéticos de los estudios de Suecia, Bélgica e Italia (64, 50 y 48 GJ/m<sup>2</sup> respectivamente) y el consumo energético total del ciclo de vida de una residencia multifamiliar del estudio (25,7GJ/m<sup>2</sup>) es relativamente alto con 4 estudios europeos (14 – 20 GJ/m<sup>2</sup>) y menor 7 estudios (35 – 63 GJ/m<sup>2</sup>) . La principal diferencia se debe al elevado

consumo energético en la fase de operación de las residencias europeas durante 50 años de vida útil, cuyo rango fluctúa de 14 a 59 GJ/m<sup>2</sup> (52 – 96%). Estos resultados están asociados al mayor porcentaje de consumo de energía para el uso de calefacción y agua caliente (59 – 84%) (Cuéllar – Franca, 2012; Mosteiro – Romero et al., 2014; Rossi et al.), dado que estos países se encuentran ubicadas en regiones con predominio de climas muy fríos que en comparación con el estudio, se encuentra ubicada en la región de clima tropical. Así en el estudio destaca el mayor porcentaje de consumo de energía en la fase de operación por el uso de electrodomésticos (69%) y cocina (17%).

De esta forma, las diferencias observadas en el consumo de energía en la fase de operación del estudio y los estudios europeos, no sólo está asociado a las diferencias climatológicas, si no a la influencia en el nivel de desarrollo del país. La tendencia del consumo de energía per cápita es significativamente mayor para los países europeos considerados, se sitúa en un rango de 4 a 14kWh/hab comparado con el Perú, que se caracteriza por el menor consumo de energía per cápita 1,136 kWh/hab (Banco Mundial, 2013).

Las principales fuentes de energía utilizadas para calefacción y agua caliente en la mayoría de los estudios europeos son de origen fósil (gas natural y petróleo) (Cuellar-Franca & Azapagic,2012; Rossi et al.,2012) excepto para los estudios de Suecia que cuenta con sistemas de calefacción urbana, en el que el 90% de la energía utilizada para tal fin son energías renovables (biomasa e hidroenergía) y para el caso de Suiza cuenta con sistemas de bomba de calor en el que utiliza también energías renovables (energía geotérmica) (Dodo & Gustavsson, 2011; Mosteiro-Romero et al., 2013).

Las fuentes energéticas más utilizadas en el mix eléctrico para la generación de electricidad en las residencias de los estudios europeos, predominan los combustibles fósiles (59%),

principalmente carbono y gas natural y en menor aporte la energía nuclear (19%) y la energía hidroeléctrica (13%) (IEA, 2008). Las fuentes energéticas renovables aún tienen baja representatividad comparado con el mix eléctrico peruano que tiene mayor participación de la energía hidroeléctrica (32%). Sin embargo en los últimos años ha predominado como fuente principal el gas natural (55%) (MINEM, 2012).

Por otra parte, la fase de construcción tiene una contribución relevante en el consumo energético del ciclo de vida de las residencias tanto para el presente estudio como para la mayoría de los estudios europeos, cuyo porcentaje de aporte es de 4 a 46%, dado a la mayor participación de la etapa de producción de materiales de construcción y en menor medida la etapa de construcción.

Como se puede apreciar en la tabla 12, las residencias unifamiliares y multifamiliares presentan diferentes sistemas constructivos basado en mampostería o concreto armado, en madera y en acero. Wadel (2011) pone de manifiesto la gran variabilidad en las ratios de energía incorporada en la fase de construcción que depende de los materiales constructivos empleados y de las características constructivas de la residencia. Los sistemas constructivos de mayor consumo energético son el de acero (4712 - 6855 MJ/m<sup>2</sup>) y el de concreto armado (3433 - 5939 MJ/m<sup>2</sup>), si bien es cierto el sistema en acero es mucho más ligero que la construcción de concreto (408 kg/m<sup>2</sup> contra 1400 - 2400 kg/m<sup>2</sup>) (Rossi et al., 2012; Wadel, 2011) es superior en energía y emisiones CO<sub>2</sub>, debido al uso intensivo del acero que consume cantidades significativas de energía eléctrica, gas natural, diesel y oxígeno en sus procesos de producción (Casañas, 2011) y en el caso del sistema en concreto armado utilizado en la residencia en estudio, el mayor consumo energético, se concentra en tres materiales, el ladrillo, cemento y acero que en suma representa el 62% de la energía

embebida de los materiales de construcción y contribuyen en las emisiones GEI en 75%, cuya principal fuente de energía para su producción son los combustibles fósiles.

El sistema constructivo en madera, similar a los de acero representa los más bajos rangos en peso ( $500 - 700 \text{ kg/m}^2$ ), con respecto al consumo energético y emisiones para la madera, los valores son significativamente menores ( $2500 - 3000 \text{ MJ/m}^2$  y  $220 - 327 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ), puesto que representa el 50% menos comparado con los sistemas constructivos de acero y concreto (Dodoo & Gustavsson, 2013; Wadel, 2011).

En cuanto al reciclaje de materiales de los diferentes sistemas constructivos, está tiene una directa relación con los materiales empleados y la cantidad generada de residuos. El sistema constructivo concreto genera 63% más de residuos que la madera y un 70% más que el acero. Según Wadel (2011), sólo el 5% de los residuos generados en el sistema constructivo concreto se puede reciclar, dado por la dificultad y los altos costos de reciclaje, mientras que los sistemas de madera y acero, alcanzan entre el 25 y 50% de aprovechamiento de los materiales.

Respecto al indicador potencial calentamiento global en el ciclo de vida de una residencia familiar, la tabla 12 y la figura 25 muestran que el presente estudio representa la menor contribución ( $1327$  y  $1678 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ) comparado con los estudios de Reino Unido e Italia, cuya contribución es entre  $3350$  y  $3500 \text{ kgCO}_2 \text{ eq/m}^2$ . Está marcada diferencia se debe a la más significativa contribución en la fase de operación de las residencias europeas durante 50 años de vida útil, representando entre 54 y 90% del total de las emisiones en el ciclo de vida, como consecuencia a las altas tasas de emisiones GEI producto de la combustión de combustibles fósiles, gas natural, petróleo y carbono, principales fuentes energéticas de los

mix energéticos de estos países para el uso de calefacción (34 – 51%) y agua caliente doméstica (6 -19%) y el mix eléctrico para la generación de energía eléctrica para cocción de alimentos (3 -22%) y electrodomésticos e iluminación (27 -30%) (Dodoo & Gustavsson, 2013; Mosteiro-Romero et al., 2013; Wadel, 2011; Bastos et al., 2013; Rossi et al., 2011). En comparación con el estudio las principales fuentes de energía en el mix eléctrico para la generación de electricidad en el Perú son gas natural (55,4%) y la energía hidráulica (32%). Esto nos refleja el bajo índice de emisiones en el Perú 195 gCO<sub>2</sub>/kWh comparado con los altos índices de emisiones de los países europeos, cuya tendencia es entre 218 y 450 gCO<sub>2</sub>/kWh (IEA, 2013).

Contrariamente a los estudios analizados anteriormente, en los estudios de Suiza y Suecia, la mayor contribución es en la fase de construcción (62 y 64% respectivamente), mientras que la fase de operación contribuye en menor porcentaje (20 y 36% respectivamente). Estos resultados están asociados a las características constructivas de las residencias, dado que los materiales estructurales de acero utilizados en el sistema constructivo de la residencia de Suecia y los materiales estructurales (acero, cemento y ladrillos) utilizados en el sistema constructivo de concreto armado de la residencia de Suiza son los que tiene el mayor impacto significativo en la huella de carbono en el ciclo de vida de la residencia. Si comparamos los dos estudios de Suecia que se diferencian en el sistema constructivo de las residencias uno de acero y el otro de madera. La residencia de madera tiene la mayor contribución en la fase de operación y la menor contribución en la fase de construcción, debido a que la madera genera los menores impactos de emisiones, mientras que la residencia de acero tiene los mayores impactos en la fase de construcción.

De esta forma, las diferencias observadas en los resultados anteriores no sólo están asociadas con las características constructivas de las residencias, sino también por el mix energético

de Suiza y Suecia que influyen considerablemente en la fase de operación. Estos países utilizan energías renovables como principal fuente de energía en el mix energético, para el uso de calefacción y agua caliente. Suiza utiliza energía geotérmica y Suecia utiliza biomasa (aprovechamiento de la basura como combustible) por lo que caracteriza en especial a Suecia las más bajas contribuciones en la huella de carbono (384 – 676 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>) comparado con los estudios europeos y el presente estudio, esto nos explica por qué Suecia representa los más bajos índices de emisiones 43,14 gCO<sub>2</sub>/kWh (IEA, 2013).

### **Análisis comparativo de alternativas 1 y 2**

A continuación, se analizarán, las alternativas de uso de materiales de construcción ecológicos en la fase de construcción en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar.

La alternativa 1 propone implementar sistema constructivo a base de madera en sustitución al sistema constructivo de concreto armado para la residencia unifamiliar. Como se puede apreciar en la tabla 13 y la figura 26, los estudios realizados en los países de Brasil y España muestran, las ventajas que tiene el sistema constructivo en madera frente al sistema constructivo de concreto armado. Con respecto al indicador energía y huella de carbono, los valores son menores en este sistema de 1768 a 2932 MJ/m<sup>2</sup> y de 209 a 293 kgCO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> (Punhagui, 2014; Wadel, 2011), debido a que el consumo energético es bajo en la extracción y fabricación de la madera (Wadel, 2011), mientras que el sistema mampostería del estudio es mayor 5119 y 9691 MJ/m<sup>2</sup> y la huella de carbono en 525 y 740 kgCO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> como consecuencia del uso de materiales con mayor consumo energético, como el acero, cemento y ladrillos.

Los resultados muestran al implementar el sistema constructivo en madera en las dimensiones de superficie construida  $373,96\text{m}^2$  de la residencia unifamiliar y la residencia multifamiliar de superficie construida  $885,65\text{ m}^2$  en el estudio, se obtendría un ahorro energético en el ciclo de vida de la residencia de 11 a 19% y la reducción de los niveles de huella de carbono de 19 a 28%

En términos económicos, los costes para un sistema constructivo en madera (Oxapampa) por  $\text{m}^2$  de superficie construida es menor, de \$ 250 - 400, comparado con en el sistema constructivo mampostería, cuyo costo por  $\text{m}^2$  de superficie construida es \$ 500 a  $700/\text{m}^2$  (Lima) (FABRIX, 2013). Cabe mencionar que los costos pueden incrementarse por el transporte de materiales en función a la distancia de recorrido de los materiales del almacén hacia el lugar de la obra, en este caso las distancias recorridas son cortas y no se ha considerado las distancias de la fábrica hacia el almacén. Un análisis similar en un estudio llevado a cabo en Colombia (Osorio, 2011), concluye que los costos en el sistema constructivo en madera es menor entre \$379. 075 a 412. 95 por  $\text{m}^2$  construido, comparado con los costos en sistema mampostería que es entre \$ 649.775 y 657. 776 por  $\text{m}^2$  construido.

Desde el punto de vista de reciclaje de los materiales, el sistema constructivo en madera tiene la mayor ventaja en la reutilización de sus componentes constructivos, en el que se puede reciclar el 25%, mientras que el sistema mampostería sólo el 5% de los materiales se puede reciclar (Wadel, 2011). Es importante mencionar que en el caso del Perú, no se cuenta con un sistema de gestión de residuos sólidos de construcción y demolición para el tratamiento y reciclaje de los mismos, como se realizan en otros países Europeos.

De esta forma el uso de la madera en los sistemas constructivos podría contribuir en el ahorro energético y la mitigación del cambio climático, siempre en cuando provenga de fuentes sostenibles, es decir de bosques bien gestionados y su cosecha sea realizada de manera sostenible (Dodoo & Gustavsson, 2013). Según Punhagui (2014), al duplicar el incremento medio anual de viviendas de madera en sustitución a casas de albañilería y considerando la vida útil de la vivienda entre treinta y setenta años, las emisiones GEI del sector habitacional brasileño podrían disminuir entre el 13% y el 22% si solo se utiliza madera plantada (madera sostenible) y podrían aumentar entre el 11% y el 17% si solo se usa madera nativa. Sin embargo estos sistemas tienen algunas limitaciones, la vida útil es menor (37 años sin mantenimiento) que una vivienda de concreto, lo cual está depende del mantenimiento, de las condiciones climáticas y del uso (Osorio, 2011). A pesar de que la ciudad de Huancayo cuenta con las reservas de madera (concentrados principalmente en la selva central) y las condiciones climáticas (clima seco), estos sistemas no cuentan con la mayor preferencia por el consumidor por motivos culturales y la falta de incentivo, promoción para el uso de la madera como sistema constructivo.

La alternativa 2, propone sustituir los principales materiales de construcción convencionales utilizados en los sistemas constructivos de concreto armado por materiales de construcción ecológicos. En la tabla 14 y la figura 27, muestran que al sustituir los ladrillos convencionales por ladrillos ecológicos (ladrillos sin cocción), el cemento portland tipo I por cemento ecológico y la sustitución de agregados finos y gruesos por agregados finos y gruesos reciclados, se obtendría un ahorro energético en el ciclo de vida de 8% y la reducción de la huella de carbono en 24%.

Los ladrillos de arcilla cocida (ladrillos convencionales) es uno de los principales materiales que conforma las estructuras de la residencia en estudio y el que genera un alto impacto ambiental por su utilización intensiva, representa el 25% de la energía y contribuye en 19% en la huella de carbono, debido a que en sus procesos de fabricación, durante la etapa de cocción se generan altos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso de biomasa (leña, aserrín, viruta y abono) como principal fuente de energía (Casañas, 2011). El sustituir este material convencional por ladrillos sin cocción se reduciría el consumo energético en 7,32%, obteniéndose un ahorro energético en 78% y la reducción de la huella de carbono en 83%, dado que el material tiene una baja energía embebida producto de la eliminación del proceso de cocción en la fabricación de los mismos y además posee óptimas características mecánicas, resistencia a compresión y a inmersión en agua, por los aditivos naturales del que está compuesto, como la cal hidráulica, cenizas de cáscaras de arroz y cascarillas de arroz ( Cabo, 2011) .

El cemento es otro de los materiales principales que conforma las estructuras de la residencia y el que genera un alto impacto ambiental, consume el 22% de energía y es el que tiene la mayor contribución en la huella de carbono 44%, debido a que la energía embebida (4,6 MJ/kg) y los niveles de carbono embebido (0,95 kgCO<sub>2</sub>eq) son altos (ICE, 2016), producto de los procesos de fabricación del Clinker y del alto consumo de combustibles fósiles como principal fuente de energía. Al sustituir el cemento convencional por el cemento ecológico, se obtendría un ahorro energético en 78% y la reducción de los niveles de la huella de carbono en 78%, dado que este material se caracteriza por su baja energía embebida (3,65MJ/kg) y su reducido carbono embebido (0,21 kgCO<sub>2</sub>eq/kg) (Salazar, 2012), asociado a los procesos de fabricación que emplean combustibles alternativos (residuos de aceites y

lubricantes) para la generación de energía. De esta manera también contribuye a reducir los costos de producción (Wendell de Queiroz et al., 2012).

Los agregados es uno de los materiales de uso más intensivo en la edificación de la residencia en estudio, representa el 23% del total de materiales, característico de los sistemas constructivos mampostería, que genera significativos impactos ambientales, principalmente el agotamiento de los recursos naturales de la región. Una alternativa para minimizar este impacto es el uso de agregados reciclados a base de residuos de construcción y demolición (Cihat et al., 2014). El sustituir los agregados finos y gruesos por agregados finos y gruesos reciclados se lograría obtener un ahorro energético en 61 y 70 % respectivamente y se lograría reducir los niveles de la huella de carbono en 77 y 79% respectivamente ya que contribuiría ahorrar energía en la extracción, transformación y fabricación de nuevos materiales (Borsani, 2011).

Los resultados obtenidos en la alternativa 2, nos demuestra que el uso de materiales de construcción ecológicos es la respuesta más favorable para el ahorro energético, económico y la mitigación del cambio climático. Diversas investigaciones así lo han demostrado como el estudio desarrollado por Cabo (2011) que proponen el uso de ladrillos sin cocción, el uso de cemento ecológico propuesto por Wendell de Queiroz et al. (2012) y el uso de agregados reciclados propuesto por Faleschini et al (2016). En el caso de un estudio llevado a cabo en Colombia (Salazar, 2012), determinó un ahorro energético del 33,02% (de 47434.4 a 3177 MJ/m<sup>2</sup>) y una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en 38,57% (de 505,3 a 310,4 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) al sustituir los materiales de construcción convencionales por materiales de construcción ecológicos (cemento, bloques, ladrillos y agregados).

### **Análisis comparativo de alternativas 3 y 4**

En el presente apartado se analizarán, las alternativas de uso de fuentes de energías renovables, energía solar térmica y fotovoltaica en la fase de operación en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar, durante los 50 años de vida útil.

Como se puede apreciar en las tablas 15, la alternativa 3 propone sustituir electrodomésticos convencionales que contribuyen significativamente en el consumo energético y los niveles de la huella de carbono por electrodomésticos eficientes. Los resultados muestran que al reemplazar la terma eléctrica que consume 1080 kWh/año por una terma solar que consume 120 L de agua/día (producción anual 1004,6 kWh/ año), las lámparas LFC que consumen 307 kWh/año por focos LED que consumen 108,4 kWh/año y una refrigeradora convencional que consume 630 kWh/año por una refrigeradora con etiqueta de eficiencia energética C que consume 270kWh/año, se podría lograr un ahorro energético anual aproximadamente de 1639 kWh/año, generando un ahorro energía primaria en el ciclo de vida de la residencia unifamiliar en 24% y la reducción de los niveles de huella de carbono en 14%. Este ahorro energético se traduce en un ahorro económico anual aproximado de \$318 (\$15900/ 50 años), representando un 43%, con una inversión inicial de \$1795 para los primeros 15 años y un periodo de amortización de 5 años y para los 50 años de vida útil de la residencia, considerando el tiempo de vida útil de la terma solar de 15años, focos LED 15 años y la refrigeradora 11 años, se estimó una inversión total de \$5385.

En el caso de la residencia multifamiliar, los resultados muestran que al reemplazar la terma eléctrica que consume 1080 kWh/año y en 50 años 453600 kWh por una terma solar que consume 1500 L de agua/día (producción anual 1004,6 kWh/ año), las lámparas LFC que consumen 307 kWh/año (124992kWh/50 años) por focos LED que consumen 108,4 kWh/año y una refrigeradora convencional que consume 630 kWh/año por una refrigeradora

con etiqueta de eficiencia energética C que consume 270kWh/año, generando un ahorro energía primaria en el ciclo de vida de la residencia unifamiliar en 41% y la reducción de los niveles de huella de carbono en 34%. Este ahorro energético se traduce en un ahorro económico anual aproximado del 45% (\$146702/ 50 años).

En un proyecto realizado en la ciudad de Piura por el Ministerio de Energía y Minas, se ha implementado termas solares en un hotel que consume 2400 L de agua/día, cuyo coste fue de \$12120 en los 15 años de vida útil de la terma solar comparado con el costo de la terma eléctrica que fue de \$58176.75, obteniéndose un ahorro económico anual de \$3070,45 (\$ 46056,75/15 años) que representa el 79%, con un tiempo de recuperación de inversión de 2,76 años y un período de amortización de 3,5 años (MINEM, 2010). Estos resultados revela que a grandes escalas es significativamente rentable comparando entre las residencias unifamiliar y multifamiliar, si solo se implementará el sistema solar térmico que es a pequeña escala (120 L/día), el ahorro anual sería aproximadamente de \$223 y el período de amortización sería de 5 años, debido a los altos costos de instalación del sistema solar, y en el caso de la residencia multifamiliar el ahorro anual es de \$ 2943 por lo que se considera que la implementación de termas solares a grandes escalas es rentable

Para el caso de la alternativa 4, se puede apreciar en las tablas 17, la simulación de un sistema fotovoltaico aislado que abastecerá a electrodomésticos de baja potencia como iluminación, un televisor y un refrigerador eficiente. Se estima que el sistema tiene la capacidad de producir en promedio 3.kWh/día (1080kWh/año), es decir aproximadamente 1.44 veces la energía consumida, considerando que el consumo energético es de 2,11 kWh/día (ver anexo No3), por lo que el sistema puede cubrir los requerimientos de energía a lo largo del año, incluso los meses de más bajos niveles de irradiación (mayo, junio y julio), generando un ahorro energético en el ciclo de vida de la residencia unifamiliar del 16% y la reducción de la huella de carbono 13%. Este ahorro energético generará un ahorro

económico anual aproximadamente de \$ 386 (\$ 19289/ 50 años), representando un 48%, con una inversión inicial de \$ 2912 para los primeros 25 años, con un periodo de amortización de 7 años y para los 50 años de vida útil de la residencia, considerando el tiempo de vida útil del sistema de 25 años, se estimó una inversión total de \$5172.

Un estudio llevado a cabo en Lima, se ha implementado un sistema fotovoltaico aislado para iluminación en un módulo sanitario ecológico en la Universidad Agraria la Molina (Piriz, 2013), con capacidad de producción de 5,97 kWh/día (2150 kWh/año), cuyo coste fue de \$4744 en los 25 años de vida útil del sistema, obteniéndose un ahorro económico anual de \$678 (\$16950/25 años) y un periodo de amortización de 7 años. Estos resultados nos confirman al comparar con la alternativa 2 de nuestro estudio, que a mayor escala, se genera mayor rentabilidad. Según Romaní & Arroyo (2012), afirma que es poco probable obtener un resultado económicamente atractivo con este tipo de sistema a pequeña escala por los altos costos de adquisición y de instalación frente a los menores costos de electricidad disponible en la red nacional de origen principalmente hidráulico.

Las alternativas 3 y 4 (figura 28) han demostrado ser las soluciones más apropiadas a corto plazo para lograr la eficiencia energética y la reducción de los niveles de la huella de carbono durante el ciclo de vida de la residencia en estudio con la finalidad de mitigar el cambio climático, dado que el Perú cuenta con un gran potencial en energías renovables como la energía solar, que podría satisfacer la creciente demanda energética del sector residencial. Las zonas de mayor potencial se ubican en la zona sur y en la sierra, tales como es el caso de Huancayo, lo que hace atractivo la implementación de tecnologías de sistemas solar térmico y fotovoltaico. No obstante el costo/beneficio aún es alto, por lo que se requiere la participación activa del gobierno y de los actores clave involucrados (MINEM, ONGs, empresas privadas, organismos gubernamentales, entidades financieras y otros) para el

financiamiento de estas tecnologías a pequeña escala en las viviendas de Huancayo, la creación de incentivos en las industrias de manera que promueva el uso de dichas tecnologías y se intensifique logrando la reducción de los costos.

Por otro lado la eficiencia energética involucra el uso de electrodomésticos eficientes, equipos que cumplen con los estándares de eficiencia energética, para lo cual es importante que el Gobierno implemente programas de financiamiento para la adquisición de estos equipos y realice acciones coordinadas con las instituciones involucradas para el cumplimiento del etiquetado de eficiencia energética obligatorio, vigente en la Ley N° 27345 Promoción del uso eficiente de la energía.

Finalmente las alternativas 1 y 2 (figura 28), podría ser las soluciones a largo plazo, frente a los impactos ambientales que generan los materiales de construcción convencionales, siempre en cuando se cuente con la participación activa y articulada de los sectores involucrados para la promoción y el financiamiento de líneas de investigaciones enfocados a los impactos ambientales generados en el ciclo de vida de los materiales de construcción en especial el consumo energético y la huella de carbono de manera que se pueda crear una base de datos en energía y carbono en materiales de producción nacional, así como también es importante promover las líneas de investigación en materiales de construcción ecológicos, es decir materiales que aporten a la eficiencia de los recursos, el cierre de ciclo de los materiales en lugar de generar residuos, de baja energía incorporada, bajos niveles de huella de carbono como la madera, o productos a partir de la reutilización de materiales o el uso de los residuos de construcción y demolición como materia prima.

## CONCLUSIONES.

1. La fase de mayor demanda energética en el ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar, es la fase de operación, en la cual se consume 9469.92 y 20468.28 MJ/m<sup>2</sup> respectivamente que representa (56% y 80%) y la fase de mayor contribución en la huella de carbono en la residencia unifamiliar es la fase de construcción (56%) y en la residencia multifamiliar es la fase de operación (69%) siendo relevante el consumo asociado a la energía eléctrica por el uso del ascensor, bombas de agua y ducha eléctrica. Esta fase es principalmente influenciada por el consumo energético per cápita y el mix energético peruano, que se caracteriza por la mayor participación del gas natural en 54% e hidroenergía 32%. se genera 508 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> (51.4%), y
2. El consumo total de energía primaria y la huella de carbono durante 50 años el ciclo de vida de la residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima fue de 16977.53 y 25719.38 MJ/m<sup>2</sup> y la huella de carbono 1326.77 y 1677.83 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> respectivamente. Los resultados nos muestran que son menores comparado con los estudios desarrollados en los países europeos (España, Suecia, Portugal, Reino Unido, Suiza, Bélgica e Italia), cuyo consumo energético se encuentra en un rango de 17000 – 64000 MJ/m<sup>2</sup> y el potencial calentamiento global de 384 – 3500 kgCO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>, donde el 100% de los estudios confirman que la fase de operación tiene la mayor demanda energética (54 – 90%) y el 80% la mayor contribución en las emisiones GEI, mientras que el 20% confirma que la fase de construcción es el de mayor contribución. Estas diferencias comparadas con el estudio se deben principalmente por las condiciones climáticas, tipología de vivienda, mix energético y el consumo energético per cápita.

3. La implementación de un sistema constructivo en madera en lugar de sistema constructivo en concreto armado y la sustitución de materiales de construcción convencionales por ecológicos en la fase de construcción, demuestran ser oportunidades para lograr una significativa reducción del consumo energético del 8 – 16% y los niveles de la huella de carbono del 24 – 25% en las residencias unifamiliar y multifamiliar.
  
4. La implementación de energía solar térmica y electrodomésticos eficientes y la implementación de un sistema fotovoltaico en la fase de operación es un gran potencial para lograr una significativa reducción de consumo energético de la residencia unifamiliar y multifamiliar en 36 y 40% y los niveles de la huella de carbono del 28 y 34%, generando un ahorro económico del 43% (aproximadamente \$352/ año) y 45% (\$ 2943/año) respectivamente.

## RECOMENDACIONES

1. Con el objetivo de reducir la huella de carbono y el consumo energético durante la fase de uso de las residencias unifamiliares, se requieren realizar campañas educativas, permanente, publicitarias e informativas destinadas a la sensibilización de la población para la formación de una cultura de uso eficiente de la energía y la mitigación del cambio climático, así como la promoción e introducción de equipos energéticamente eficientes con etiquetado o sello de garantía de eficiencia energética.
2. Con la finalidad de reducir el consumo energético y la huella de carbono en el ciclo de vida de las residencias unifamiliares, se sugiere utilizar materiales de construcción alternativos como los materiales ecológicos, materiales sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, para dar soluciones viables a los altos índices de energía incorporada, la reducción de huella de carbono y explotación de recursos naturales que generan los materiales de construcción convencionales.
3. Reducir los impactos ambientales y mejorar el uso eficiente de los recursos naturales en las residencias unifamiliares y multifamiliares, desarrollando proyectos basados en criterios bioclimáticos, como es el aprovechamiento de energías renovables como la energía solar, implementando sistemas solares fotovoltaicos y térmicos, dado que la región cuenta con este gran potencial.
4. Se debe continuar desarrollando este tipo de investigaciones en la región Junín y a nivel nacional en residencias multifamiliares, hoteles, hospitales y otras edificaciones de manera que sirva como referencia para futuros proyectos de construcción basados en los parámetros de sostenibilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Asociación Peruana de Empresas de Investigación de Mercados APEIM (2017). Niveles Socioeconomicos 2017. Perú
2. Atmaca A & Atmaca N (2015). Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO2A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey.
3. Banco Mundial (2014). Consumo de energía eléctrica percapita. [en línea]. [Consultado 5 noviembre 2017]. URL disponible en <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?locations=PE>
4. Bastos J., Battermanb Stuart A, Freire F (2013). Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon Portugal. Energy and Buildings; 69: 344-353.
5. Cabo Laguna M (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción. Departamento de proyectos e ingeniería rural. Universidad Pública de Navarra. España.
6. Carbon Trust. (2012). Carbon footprinting. Management guide. London - UK. [en línea]. [fecha de acceso 1 de agosto 2016]. URL disponible en [https://www.carbontrust.com/media/44869/j7912\\_ctv043\\_carbon\\_footprinting\\_aw\\_int\\_eraive.pdf](https://www.carbontrust.com/media/44869/j7912_ctv043_carbon_footprinting_aw_int_eraive.pdf)
7. Casañas. V (2011). La energía como indicador del impacto ambiental en los sistemas Constructivos, conformados a partir de materiales de producción Nacional. [Tesis Postgrado]. Universidad Federal de Rio Grande del Sur. Montevideo.
8. Cihat Onat N, Kucukvar M, Tatari O (2014). Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input-output hybrid life cycle assessment approach. Building and Environment; 72:53-62.
9. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL (2013). Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático. Copyright © Naciones Unidas. Santiago de Chile.
10. Cúellar – Franca. R y Azapagic. A (2012). Environmental impacts of the UK residential sector: life cycle assessment of houses. Building and Environment; 54: 86 – 99.
11. Dadoo A y Gustavsson L (2011). 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
12. Fay, R; Treloar, G; Iyer-Raniga, U (2000). Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. Rout ledge. Building Research and Information. London, 28 (1) p.31- 41

13. Fang You, Dan Hua, Haitao Zhang, Zhen Guo, Yanhua Zhao , Bennan Wang, Ye Yuan (2011). Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China—A case study of residential buildings. *Ecological Complexity*; 8: 201 – 212
14. García Torres. S (2014). Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar. [Tesis de pregrado]. Perú: Facultad de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú.
15. Google maps. Mapa de la vivienda Multifamiliar Urb la Calera de la Merced. distrito Surquillo. Lima [en línea]. [Consultado 3 de abril de 2016]; URL disponible en: <https://www.google.com.pe/maps/search/calle+leonardo+da+vinci+urb+la+calera+de+la+merced+surquillo+lima/@-12.1169825,-76.9998597,17z/data=!3m1!4b1>
16. Google maps. Mapa de vivienda unifamiliar. Urb Sol de la Molina III etapa. distrito La Molina departamento Lima. [en línea]. [Fecha de acceso 3 de setiembre 2017]; URL disponible en: <https://www.google.com.pe/maps/place/Calle+La+Punta,+Sol+de+la+Molina+Lima+15026/@-12.0830996,-76.9026339,17z/data>
17. Hammond G & Craig J (2011). Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0. Sustainable Energy Research Team (SERT). Department of Mechanical Engineering. University of Bath, UK.
18. International Energy Agency IEA (2008). Deploying Renewables. Principles for Effective Policies, OECD/IEA, París.
19. Institute for Climate Economics ICE (2016). Cifras claves del clima Francia y Mundo. Conferencia de las Partes sobre el cambio climático (COP 21) – Paris 2015.
20. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2014). Climate Change. Mitigation of Climate Change. Fifth report assessment [en línea], [Consultado 25 de febrero 2015]. URL disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
21. International Organization for Standardization ISO 14040: 2006. DIN EN ISO (2006). Environmental management — life cycle assessment — principles and framework. Germany.
22. International Renewable Energy Agency - IRENA (2014). Perú evaluación del estado de preparación de las energías renovables 2014.
23. Ministerio de Energía y Minas- MINEM (2012). Balance nacional de energía. Lima. Perú.
24. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento MVCS (2014). Perú hacia la construcción sostenible en escenarios de cambio climático. [en línea]. [Consultado 3 de marzo de 2016]; URL disponible en: [http://cies.org.pe/sites/default/files/investigaciones/edicion\\_final\\_estudio\\_construccion\\_sostenible.pdf](http://cies.org.pe/sites/default/files/investigaciones/edicion_final_estudio_construccion_sostenible.pdf)

25. Ministerio del Ambiente – MINAM (2013). Informe Nacional del Estado del Ambiente 2012 – 2013.. Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de Gestión Ambiental.
26. Ministerios de Vivienda Construcción y Saneamiento MVCS (2017). Información estadística del sector construcción. [en línea]. [Consultado 4 de noviembre de 2017]; URL disponible en: <http://www3.vivienda.gob.pe/Destacados/estadistica.aspx>
27. Mosteiro-Romero. M, Krogmanna. U, Wallbaumb. H, Ostermeyer Y, Senickc S. J, Andrews J. C (2014). Relative importance of electricity sources and construction practices in residential buildings: A Swiss-US comparison of energy related life-cycle impacts. *Energy and Buildings*; 68: 620 – 631.
28. Organización Latinoamericana de Energía – OLADE (2012). Manual de estadísticas energéticas año 2011.
29. Ortiz Rodríguez O (2009). Sustainability assessment within the residential building sector: A practical life cycle method applied in a developed and developing country. [Tesis doctoral]. Universitat Rovira I Virgili. Spain.
30. Osorio Cardona J (2011). El consumo sostenible de los materiales usados en la construcción de vivienda. [Tesis Postgrado]. Maestría en medio ambiente y desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Colombia
31. Pinky Devi. L & Sivakumar. P (2014). A case study on life cycle energy use of residential building in Southern India. *Energy and Buildings*; 80: 247 – 259.
32. Piriz Sagahon I (2013). Energía solar térmica y fotovoltaica aislada para pequeñas comunidades en Perú. [Tesis Postgrado]. Maestría Ingeniería Ambiental. Universidad Agraria la Molina. Perú
33. Punhagui Garcia K (2014). Potencial reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera. [Tesis de postgrado]. Programa de Postgrado Ingeniería civil Universidad de Sao Paulo. Brasil
34. Rivela Carballal. B (2012). Propuesta metodológica de aplicación sectorial de análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de la edificación en España. [Tesis doctoral]. Facultad Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. España
35. Romaní Aguirre J y Arroyo Chalco. V (2012). Matriz energética en el Perú y energías renovables. V Eficiencia energética: Políticas públicas y acciones pendientes en el Perú Fundación Friedrich Ebert. Primera Edición
36. Rossi B, Francoise M A y Reiter S (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. *Building and Environment*; 51: 402 - 407

37. Salazar Jaramillo A. (2012). Determinación de propiedades físicas y, estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones colombianas. Eco ingeniería SAS. Colombia
38. SimaPro (2016). Introduction to Life Cycle Assessment with SimaPro. [en línea]. [Consultado 3 de octubre de 2017]; URL disponible en: <https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>.
39. Tavares Sérgio F (2006). Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. [tesis maestría] Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil
40. Wendell de Queiroz L, Fortes Palau J, Rubens de Camargo J. (2011). Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. University of Taubate, Brazil.
41. World Resource Institute WRI. (2015a). Accelerating Building Efficiency: Eight Actions for Urban Leaders. [en línea]. [Consultado 4 de junio 2017]. URL disponible en:<http://publications.wri.org/buildingefficiency/#sec>

## **ANEXOS**

## ANEXO1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	METODOLOGÍA	VARIABLES E INDICADORES
<p><b>Problema General</b> ¿Que fase del ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima demanda mayor consumo energético y genera mayor huella de carbono?</p>	<p><b>Objetivo General</b> Determinar la fase del ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima que demanda mayor consumo energético y genera mayor huella de carbono</p>	<p><b>Hipótesis General</b> La etapa de operación del ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima, es la que demanda mayor consumo energético y genera mayor huella de carbono.</p>	<p><b>Tipo de Investigación</b> Es de carácter exploratorio – cuantitativo</p>	<p><b>Variable independiente</b> Fases del ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima</p>
<p><b>Problemas específicos</b> a. ¿Cuál es el consumo energético y la huella de carbono durante el ciclo de vida de la residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima?. b. ¿Qué propuestas de mejora ambiental son las más adecuadas para reducir el consumo energético y los niveles de la huella de carbono en el ciclo de vida de la residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima?</p>	<p><b>Objetivos Específicos</b> a. Determinar el consumo energético y la huella de carbono durante el ciclo de vida de la residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima. b. Proponer alternativas de mejora ambiental para reducir el consumo energético y los niveles de Huella de carbono en el ciclo de vida de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima</p>	<p><b>Hipótesis específico</b> a. El consumo energético y la huella de carbono durante el ciclo de vida de la residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima es significativamente menor en comparación con las residencias europeas b. Las propuestas de mejora ambiental involucran el uso de materiales de construcción ecológicos, electrodomésticos eficientes y el uso de energías renovables que contribuyen a la reducción del consumo energético y los niveles de la huella de carbono en el ciclo de vida de la residencia unifamiliar en la ciudad de Huancayo.</p>	<p><b>Población</b> Las residencias unifamiliares y multifamiliares de la ciudad de Lima</p> <p><b>Muestra</b> Residencia unifamiliar de 250 m<sup>2</sup> superficie construida, ubicada en la residencial Sol de la Molina distrito Molina</p> <p>Residencia multifamiliar de 1024m<sup>2</sup> superficie construida, ubicada urb. la Calera de la Merced distrito de Surquillo</p>	<p><b>Indicadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Área y diseño de la residencia.</li> <li>• Tipo y cantidad de materiales de construcción.</li> <li>• Hábitos de consumo energético de la familia</li> </ul> <p><b>Variable Dependiente</b> Consumo energético y huella de carbono de una residencia unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima</p> <p><b>Indicadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energía total</li> <li>• Potencial calentamiento global (GWP)</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 2**  
**OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

<b>Variable</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidad medida</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Variable independiente</b> Fases del ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima	Es el balance de materiales, energético y de emisiones GEI en las fases de producción, uso y demolición del ciclo de vida de la residencia familiar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Técnica constructiva</li> <li>- Mix energético para la generación de electricidad</li> <li>- Hábitos de consumo de los habitantes de la residencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Área y diseño de la residencia.</li> <li>- Tipo y cantidad de materiales</li> <li>- Consumo energético de la familia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>m<sup>2</sup></li> <li>kg/m<sup>2</sup></li> <li>MJ/m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planos</li> <li>Software S10</li> <li>Recibos de consumo energético, entrevista a los residentes</li> </ul>
<b>Variable dependiente</b> Consumo energético	Medición del contenido energético en ciclo de vida de la residencia: energía embebida de materiales, procesos Constructivos, energía del uso y demolición	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energía incorporada materiales construcción</li> <li>- Energía construcción</li> <li>- Energía operacional</li> <li>- Energía demolición</li> </ul>	Energía primaria total	<ul style="list-style-type: none"> <li>MJ/</li> <li>m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Base de datos ICE.</li> <li>- Entrevistas</li> <li>- Recibos de consumo energético</li> </ul>
Huella de carbono	Medición de la huella de carbono en ciclo de vida de la residencia: carbono incorporado en materiales, huella de carbono construcción, uso y demolición	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbono incorporado materiales de construcción</li> <li>- Huella de carbono construcción</li> <li>- Huella de carbono uso y mantenimiento</li> <li>- Huella de carbono en demolición</li> </ul>	Potencial calentamiento global (GWP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>KgC</li> <li>O<sub>2</sub></li> <li>eq/m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Base de datos ICE.</li> <li>- Entrevistas</li> <li>- Inventario de flota PNUMA</li> <li>- Mix energético eléctrico.</li> <li>- Base de datos IPCC</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 3**  
**MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DEL INSTRUMENTO**

<b>Variable</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Items</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Variable independiente</b> Fases del ciclo de vida de las residencias unifamiliar y multifamiliar en la ciudad de Lima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Técnica constructiva</li> <li>- Mix energético para la generación de electricidad</li> <li>- Consumo de energía de las familias de las viviendas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Área y diseño de la residencia.</li> <li>- Tipo y cantidad de materiales</li> <li>- Consumo energético equipo y transporte de construcción y demolición</li> <li>- Consumo energético de la familia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseño de las viviendas</li> <li>- Técnica constructiva empleada en las viviendas del estudio</li> <li>- Tipo y cantidad de materiales en la construcción de las viviendas.</li> <li>- Procedencia de los materiales de construcción</li> <li>- Equipos y transporte empleados en la construcción y demolición de las edificaciones</li> <li>- Hábitos de consumo energético de las familias</li> <li>- Frecuencia de mantenimiento de las viviendas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planos</li> <li>- Software S10</li> <li>- Entrevista a los expertos en construcción</li> <li>- Visita in situ a la obra</li> <li>- entrevista a los residentes</li> </ul>
<b>Variable dependiente</b> Consumo energético	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energía incorporada materiales construcción</li> <li>- Energía construcción</li> <li>- Energía operacional</li> <li>- Energía demolición</li> </ul>	Energía primaria total	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumo energético para la extracción y/o fabricación de los materiales de construcción</li> <li>- Consumo energético utilizado en las viviendas</li> <li>- Consumo energético en equipos y transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Base de datos ICE.</li> <li>- Recibos de consumo energético.</li> <li>- entrevista a los residentes</li> </ul>
Huella de carbono	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbono incorporado materiales de construcción</li> <li>- Huella de carbono construcción</li> <li>- Huella de carbono uso y mantenimiento</li> <li>- Huella de carbono en demolición</li> </ul>	Potencial calentamiento global (GWP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuentes de energía para la extracción y/o fabricación de los materiales de construcción</li> <li>- Fuentes de energía utilizado en las viviendas</li> <li>- Fuentes de energía para equipos y transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Base de datos ICE.</li> <li>- Entrevistas</li> <li>- Inventario de flota PNUMA</li> <li>- Mix energético eléctrico.</li> <li>- Base de datos IPCC</li> </ul>

**ANEXO 4**  
**TERMA SOLAR**

**Especificaciones técnicas**

**Consumo energético equipos**

	Capacidad	Uso normal		Consumo energético		
	l/día	Horas/día	día/mes	kWh/día	kWh/mes	kWh/año
Terma solar	120	3	20	4.19	83.72	1004.64

**Radiación solar incidente**

Radiación solar incidente promedio	5,6 kWh/m <sup>2</sup>	Distrito	Huancayo
Horas sol pico (HSP) promedio	5,6 h	Departamento	Junín
Nivel de radiación estándar	1 kWh/m <sup>2</sup>	Latitud distrito	12 °

**Terma solar**

Colector	Plano	superficie (m <sup>2</sup> )	1,02
Tamaño colector	1.31 x 0.78	Cantidad colector	1
Temperatura agua fría	15°C		
Temperatura de uso	45°C		

**Termotanque**

material	acero inoxidable	Capacidad	90 litros
material aislante	poliuretano		
Diámetro	360mm	longitud	720 mm

Coste total \$ 1015\*

Nota: \* precios de referencia

Fuente: GEOENERGÍA

## ANEXO 5

### SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

#### 1. Consumo energético

<b>Consumo energético equipos</b>								
No	Electrodomésticos	Potencia	Cantidad	Uso normal		Consumo energético		
		kW	unidad	Horas/día	día/mes	kWh/día	kWh/mes	kWh/año
1	Refrigeradora	0.15	1	6	30	0.9	27	324
2	Iluminación	0.0265	11	6	30	0.85	25.6	307.2
3	Televisores	45	2	4	30	0.36	10.8	129.6
Total						2.11	63.4	760.8
<b>Demanda energética</b>								
Promedio		2.11	kWh/día		63.40	kWh/mes		760.80 kWh/año
<b>Energía necesaria</b>								
Energía máxima requerida		2.72	kWh/día		coeficientes de perdidas		0,777	
<b>Radiación solar incidente</b>								
Radiación solar incidente promedio		5,6	kWh/m2		Distrito		Huancayo	
Horas sol pico (HSP) promedio		5,6	h		Departamento		Junín	
Nivel de radiación standard		1	kWh/m2		Latitud distrito		12 °	
<b>Sistema fotovoltaico</b>								
Energía generada por un panel FV		200	Wp		Rendimiento del panel FV		0,9	
Numero de paneles FV		3			Tipo de panel FV		Policristalino	
Energía disponible del sistema promedio		3,06	kWh/día		Factor de cobertura		1,19	
<b>Batería</b>								
Días de autonomía		2			Capacidad de banco baterías		604,8 Ah	
Profundidad de descarga de la batería		0,7			Numero de baterías		2	
Capacidad de batería		250	Ah		Voltaje		12 V	

Fuente: Elaboración propia

## 2. Irradiación solar mensual y horas solar pico (HSP) en la ciudad de Huancayo

No	Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	Irradiación solar (kWh/m <sup>2</sup> )	5.1	5.2	5.1	5.1	4.6	4.4	4.6	5	5.5	6	6	5.6
2	HSP	5.1	5.2	5.1	5.1	4.6	4.4	4.6	5	5.5	6	6	5.6

\*Nota: las horas solar pico se determinó en base al nivel de radiación estándar 1kW/m<sup>2</sup>

Fuente: Senahmi, 1990.

## 3. Cobertura energética y factor de cobertura por el sistema fotovoltaica

No	Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
1	Energía disponible (kWh/día)	2.8	2.8	2.8	2.8	2.5	2.4	2.5	2.7	2.97	3.24	3.24	3.02	3
2	Factor de cobertura	1.30	1.33	1.30	1.30	1.18	1.12	1.18	1.28	1.41	1.53	1.53	1.43	1.32
	Consumo real	2.720 kWh/día		Rendimiento		0.777								

Fuente: Elaboración propia

#### 4. Especificaciones y costos del sistema fotovoltaico

No	Equipo	Descripción	Capacidad	Unidad	Cantidad	Costo unit (\$)	Total (\$)
1	Paneles FV	Paneles policristalinos. 72 celdas (6X12), 1580x808x40 m, 15kg	200	wp	3	270	810
2	Baterías	Banco de baterías monoblock 12 V, plomo ácido, descarga profunda	250	Ah	2	213,4	426,8
3	Inversor	Inversor onda pura schneider 1800 w 24Vdc - 230Vac (2900 wp)	1800	w	1	700	700
4	Regulador	Regulador de carga Steca 20A/24V LED	20	A	1	89,96	89,96
5	Conectores	3 juegos de conectores para conexión de paneles			3	77,5	232,5
6	Caja de protección	Caja de protección contra tensión con seccionador de 3 entradas - 1 salida 50V dc/40A			1	364	364
7	Estructuras de aluminio	Estructuras de aluminio inclinado 45 - 55°			3	63	189
8	Otras instalaciones						100
						<b>Total</b>	<b>2912,26*</b>

Nota: \* precios de referencia

Fuente: TECHNO SUN