



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA  
PRODUCCIÓN**

**“EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SISTEMAS ENVOLVENTES,  
PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO ENERGÉTICO EN VIVIENDAS  
UNIFAMILIARES EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL”**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Magister en Ciencias  
de la Ingeniería Mecánica.**

Presentado por José Alberto Macías Zambrano

Guayaquil - Ecuador

2017

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar a mis padres, hijos y esposa, quienes han brindado la paciencia, amor y apoyo incondicional a lo largo de esta etapa de formación. Un agradecimiento especial a mi mentor Guillermo Soriano, quien ha representado un ejemplo de vida en lo profesional y personal. De igual manera, deseo expresar mis sentimientos de consideración y respeto a todos mis maestros, directores y autoridades, quienes brindaron un aporte importante para la consecución de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

Para mis padres, hijos y esposa, por su apoyo incondicional.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Carlos Rodríguez Ph. D.  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL 1

Mauricio Cornejo Ph. D.  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL 2

Jorge Duque M. Sc.  
DECANO O DELEGADO

Guillermo Soriano I. Ph. D.  
DIRECTOR DE PROYECTO DE  
TITULACIÓN

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este proyecto de graduación, me corresponde exclusivamente, el patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

José Alberto Macías Zambrano

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ABREVIATURAS.....	x
Resumen .....	1
Capítulo 1 .....	2
ANTECEDENTES .....	2
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
Capítulo 2 .....	5
REVISIÓN LITERARIA.....	5
El Consumo Energético en el Sector Residencial.....	5
Actualidad Nacional .....	9
Capítulo 3 .....	12
METODOLOGÍA.....	12
Modelo Base.....	14
Métodos y Materiales de Construcción.....	15
Archivo de Clima .....	21
Simulaciones .....	24
Capítulo 4 .....	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
Caracterización de los tipos de envolvente.....	32
Rendimiento Energético Anual.....	33
Demanda de Energía Primaria.....	38
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	41
Bibliografía.....	43
Anexos .....	49
Anexo 1 .....	50
Anexo 2 .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Demanda Nacional de Electricidad, en el Ecuador. Categoría por sector.....	2
Figura 2. Etapas de consumo energético en edificaciones (LCE life cycle energy).....	3
Figura 3 Histórico del consumo de energía primaria por sectores en el Ecuador. Tomado con permiso (MEER Ministerio de Electricidad y Energía Renovable & BID Banco Interamericano de Desarrollo, 2016). .....	6
Figura 4.- Esquema de metodología de análisis para la obtención de la energía operacional y consumo eléctrico anual en vivienda de tipo social. ....	13
Figura 5.- Plano tipo de vivienda de 36 m <sup>2</sup> .....	15
Figura 6.- Registro fotográfico de modelos de vivienda social, utilizados en programas habitacionales en el Ecuador, (“RENDICIÓN DE CUENTAS-MIDUVI”, 2014).....	16
Figura 7.- Detalle constructivo de muros, para tres sistemas constructivos de acuerdo a la normativa ecuatoriana de la construcción. De izquierda a derecha: a) de muros portantes de hormigón armado LBW (load bearing walls), b) muros de mortero armado con alma de poliestireno ICF (insulated concrete forms), c) paredes de mampostería no reforzada CM (bloque hueco de hormigón ligero).....	17
Figura 8.- Detalle constructivo para losas de tres sistemas constructivos y cubierta metálica de acuerdo a la normativa ecuatoriana de la construcción. a) Losa para sistema de muros portantes de hormigón armado LBW (load bearing walls), b) Losa para sistema de muros de mortero armado con alma de poliestireno ICF (insulated concrete forms), c) Losa para sistema de paredes de mampostería no reforzada CM (bloque hueco de hormigón ligero), d) Cubierta metálica típica.....	18
Figura 9.- Secciones de pared simplificadas para análisis de resistencias por capas. a.- Sistema mampostería de bloques CM. b.- Esquema ICF de pared. c.- Sistema LBW. d.- Esquema ICF de cubierta.....	20
Figura 10.- Ejemplo de archivo climático típico para simulaciones en edificios.....	22
Figura 11.- Distribución mensual de temperatura de bulbo seco obtenida de un año meteorológico típico (TMY3) de Guayaquil (Remund et al., 2016). ....	23
Figura 12.- En barras se representa el promedio mensual de irradiación solar global y la curva constituye la temperatura promedio mensual, según año meteorológico típico (TMY3) de Guayaquil (Remund et al., 2016).....	23
Figura 13.- Esquema de interacción entre módulos en EnergyPlus, adaptado (U.S. Department of Energy, 2016).....	25
Figura 14.- Esquema de balance de energía en las superficies de la envolvente, adaptado (Hensen & Lamberts, 2012). ....	26

Figura 15.- Flujo de trabajo para simulaciones energéticas utilizando EnergyPlus.....	29
Figura 16.- Configuración de sistema mecánico de climatización aplicado sobre las zonas térmicas del modelo, adaptado (DOE, 2016).....	31
Figura 17.- Consumo de energía eléctrica anual bajo para los seis sistemas de envolvente bajo estudio.....	34
Figura 18.- Perfil de consumo de electricidad mensual para seis tipos de envolvente analizados.....	35
Figura 19.- Perfil de potencias pico de mensual en seis sistemas de envolvente analizadas.....	36
Figura 20.- Consumo anual de energía secundaria versus resultados reportados en la literatura especializada, ver tabla 1.....	37
Figura 21.- Consumo de energía operacional total versus resultados reportados en la literatura especializada, ver tabla 1.....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación literaria relevante al estudio de consumo energético en edificaciones residenciales. ....	9
Tabla 2 Contexto nacional de trabajos recientes en términos de mejoras del rendimiento energético en viviendas de tipo social. ....	11
Tabla 3.- Resumen de propiedades termo-físicas de los materiales de construcción utilizados en el presente trabajo. ....	14
Tabla 4.- Identificación de los seis sistemas de envolvente analizados en el presente trabajo. ....	30
Tabla 5.- Coeficientes U calculados mediante procedimiento estándar ISO 6946. ....	32
Tabla 6.- Promedios de consumo y demanda pico mensual para cada caso de estudio. ....	36
Tabla 7.- Demanda de energía primaria según la categoría de fuente energética, adaptada a la matriz productiva ecuatoriana (Macías et al., 2017). ....	40

## ABREVIATURAS

ARCONEL	Agencia de Regulación y control de la Electricidad
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
BEP	Barril Equivalente de Petróleo
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
CM	Confined Masonry
ED	Energía de Demolición
EE	Energía Embebida
EO	Energía Operacional
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
ICF	Insulated Concrete Forms
ISO	International Standard Organization
IWEC	International Weather for Energy Calculations
LBW	Load Bearing Walls
LCA	Life Cycle Assessment
LCE	Life cycle Energy
MEER	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable
MIDUVI	Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
PLANEE	Plan Nacional de Eficiencia Energética de Ecuador
TMY	Typical Meteorological Year

## **R e s u m e n**

Acorde a datos oficiales presentados en 2015 por la Agencia de Regulación de Electricidad el 35.6% de la demanda energética nacional corresponde al sector residencial, siendo el de mayor demanda nacional, seguido por las actividades industriales (27.7%) y comerciales (20.5%). Motivo que genera la implementación de nuevas líneas de investigación aplicadas a la eficiencia energética en edificaciones.

El presente trabajo propone el análisis de alternativas de sistemas de envolvente para determinar el rendimiento energético de viviendas unifamiliares, en el caso de la ciudad de Guayaquil. El trabajo se realizará mediante simulaciones utilizando el software EnergyPlus. Para la realización del modelaje o simulación se consideran las condiciones de la localidad, tales como: clima, perfiles ocupacionales, rangos de confort, propiedades termo-físicas de materiales, y además prácticas de construcción modernas. Se plantea estudiar diferentes configuraciones de sistemas de envolvente sobre la edificación, utilizando en su mayor parte materiales de fabricación nacional. El análisis del rendimiento energético se realizará mediante la estimación de consumos eléctricos por iluminación, equipamiento de uso doméstico, y climatización. El consumo debido a los sistemas mecánicos de climatización será estimado de acuerdo a un rango de temperatura programado para conservar un estado de confort al interior de la vivienda. El consumo por iluminación y equipos domésticos será basado en perfiles estadísticos o normados.

Finalmente se espera proponer un diseño de vivienda unifamiliar que permita reducir notablemente sus niveles de consumo energético anual, principalmente aquel que es generado por los elementos mecánicos de climatización.

## Capítulo 1

### ANTECEDENTES

Se conoce que a nivel mundial del 30 al 40% de la energía primaria está destinada al uso de las edificaciones en general, tanto para su construcción como para su uso (Huovila, 2007). En el contexto local la situación no es diferente, acorde a la Agencia Nacional de control de Electricidad ARCONEL, en el 2015, Ecuador tuvo una demanda de energía eléctrica de  $29 \times 10^6$  GJ ( $8.07 \times 10^6$  kWh), donde el sector de la construcción residencial y comercial consumen el 36% y 20.5% respectivamente, Figura 1 (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2015). Del porcentaje que corresponde al sector residencial, sólo la ciudad de Guayaquil demanda el 30% del total nacional. A esta información podemos añadir que las políticas públicas y prácticas de eficiencia energética se encuentran en edificaciones son aún insuficientes.

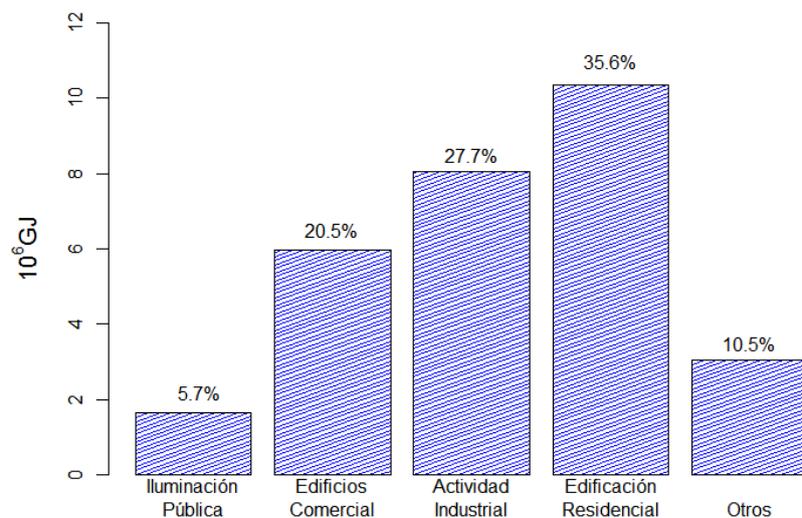


Figura 1. Demanda Nacional de Electricidad, en el Ecuador. Categoría por sector.

Habitualmente, los códigos de la construcción están enfocados en requerimientos de resistencia estructural y no a las condiciones de habitabilidad o confort de los ambientes interiores. Los métodos constructivos residenciales a nivel local, tradicionalmente están constituidos por estructuras de hormigón armado y confinamiento de ladrillo o bloque en paredes, y cubiertas metálicas o fibrocemento en techos, con bajos niveles de aislamiento. En- al ámbito de la vivienda social, la calidad de materiales y el nivel de aislamiento de las

envolventes se empobrece notablemente (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014).

Respecto de los métodos para estimar el consumo de energía en edificaciones, las referencias literarias indican que una práctica habitual es la valoración de consumo energético a lo largo del ciclo de vida de la edificación (LCE life cycle energy) (Ramesh, Prakash, & Shukla, 2010). Un análisis LCE considera la demanda energética de una edificación desde la extracción de los materiales para la construcción, durante el proceso de construcción en sí, su etapa de uso, concluyendo en la demolición y reciclado. La Figura 2 presenta un esquema típico de las etapas de consumo energético en viviendas.

Energía de Ciclo de Vida (Life Cycle Energy LCE)		
<b>Etapa Previa de Uso</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extracción de materiales</li> <li>• Producción de elementos constructivos.</li> <li>• Transporte de materiales al sitio de construcción.</li> <li>• Etapa de Construcción</li> </ul>	<b>Etapa de uso</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Uso de Electricidad</b></li> <li>• Consumo de Gas</li> <li>• Consumo de agua</li> <li>• Mantenimiento</li> </ul>	<b>Etapa posterior al uso</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Demolición</li> <li>• Transporte de desechos</li> <li>• Reciclaje</li> <li>• Manejo de desechos y relleno.</li> </ul>

Figura 2. Etapas de consumo energético en edificaciones (LCE life cycle energy).

Existen numerosos trabajos orientados a analizar el rendimiento energético de las edificaciones a lo largo de su ciclo de vida. De ello es reconocido que la etapa de uso representa alrededor del 80 y 90% del total de energía (Paulsen & Sposto, 2013; Praseeda, Reddy, & Mani, 2016; Ramesh et al., 2010). Por este motivo ha existido históricamente el propósito de disminuir la demanda energética mediante la mejora en los diseños, selección de materiales adecuados y el aprovechamiento de recursos naturales disponibles en el lugar de asentamiento. En Ecuador existe una tendencia reciente a la mejora y optimización de los diseños de vivienda social, algunos autores han trabajado y reportado progresos sobre las condiciones de habitabilidad y confort al interior de la vivienda, aplicando principalmente soluciones pasivas, tales como el uso materiales vernáculos, ventilación e iluminación natural (R. D. Beltran, Castillo, Miño-Rodríguez, Naranjo-Mendoza, & Ávila, 2015; Gallardo, Beltran, Palme, & Villacreses, 2016; Miño-Rodríguez, Naranjo-Mendoza, & Korolija, 2016). A pesar de lo mencionado, pocos trabajos han sido dirigidos al consumo de energía

operacional en la vivienda (principalmente eléctrica) y su potencial efecto en la demanda nacional.

En referencia a lo expuesto, el presente trabajo está centrado en el análisis energético de viviendas durante la etapa de uso, particularmente en el análisis del consumo eléctrico. Una cantidad considerable de investigaciones han sido encauzadas a disminuir las cargas de climatización de ambientes interiores, ya que constituyen los mayores consumos de energía operacional de una edificación (Ramesh et al., 2010; Synnefa, Santamouris, & Akbari, 2007). Adicionalmente, se puede señalar que al momento la normativa de climatización y eficiencia energética del Ecuador no considera las condiciones climáticas de los entornos. Así mismo, existe poca difusión de nuestra realidad en relación a los niveles de aislamiento de la envoltura de la vivienda y su impacto en el consumo de energía. En función de lo presentado el presente trabajo busca mejorar el desempeño energético de viviendas de tipo social, a través de la caracterización y desarrollo de alternativas de los sistemas envolventes en la edificación, ya que dichos parámetros son reconocidos como críticos en la demanda energética (Utama & Gheewala, 2008).

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar alternativas energéticamente sostenibles en sistemas de envolventes para edificaciones, con el fin de mejorar el desempeño energético de viviendas unifamiliares.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- i. Definir un modelo base para la estimación del rendimiento energético en edificaciones residenciales para la ciudad de Guayaquil.
- ii. Proponer mejoras sobre las envolventes de edificaciones residenciales en base de materiales de fabricación nacional.
- iii. Cuantificar potenciales mejoras en el rendimiento energético de viviendas unifamiliares de Guayaquil y su impacto en el consumo de electricidad a nivel nacional.

## Capítulo 2

### REVISIÓN LITERARIA

#### El Consumo Energético en el Sector Residencial

La demanda energética del sector de las edificaciones constituye una preocupación mundial para lograr la sostenibilidad energética global. Investigaciones recientes exponen que existen varias oportunidades de mejora en términos de eficiencia energética en edificios y su relación con los métodos de construcción. En general los edificios y las viviendas demandan entre el 30 y el 40% de la energía primaria mundial (Huovila, 2007). A todo lo expuesto podemos añadir que acorde a proyecciones presentadas por la Agencia Internacional de Energía (EIA), el incremento de la demanda energética tendrán mayores impactos en países en desarrollo, desde 2004 a 2030 corresponde un aumento del 46% al 58% (U.S. Energy Information Administration, 2016).

En el contexto local, el Plan Nacional de Eficiencia Energética del Ecuador (presentado en mayo del 2017) se reporta que el sector del transporte consume el 42% de la energía primaria nacional, seguida por los sectores Industrial, residencial y comercial con 18%, 12% y 6% respectivamente, Figura 3. Además, se reportan otras categorías como el sector de Agropecuaria y Minería que representa el 1%, mientras que las actividades de construcción y otros el 16.47%. Finalmente se contabiliza el consumo propio para la generación de energía, que demanda el 5% (MEER Ministerio de Electricidad y Energía Renovable & BID Banco Interamericano de Desarrollo, 2016).

Acorde a los datos presentados en el balance energético nacional para el año 2015, se estableció que el consumo final de energía en Ecuador alcanzó los 101 millones de BEP (barriles equivalentes de petróleo). Estos resultados revelan que se ha producido un aumento del 11% en relación al año precedente. Por otra parte, el petróleo se presenta en una proporción del 88% como el mayor contribuidor en la producción de energía primaria, seguido de la energía hidráulica y las renovables (MEER Ministerio de Electricidad y Energía Renovable & BID Banco Interamericano de Desarrollo, 2016). En una vivienda la necesidad de energía es cubierta principalmente por fuentes de energía secundaria, como lo son el gas y la electricidad. En el 2015 la producción de energía secundaria en el Ecuador alcanzó cerca de 65 millones de BEP, de ésta, el 24,8% corresponde a electricidad, mientras que el 75,2% restante concierne a productos derivados de petróleo (fuel-oil, diésel y gasolina) (El Telégrafo, 2017).

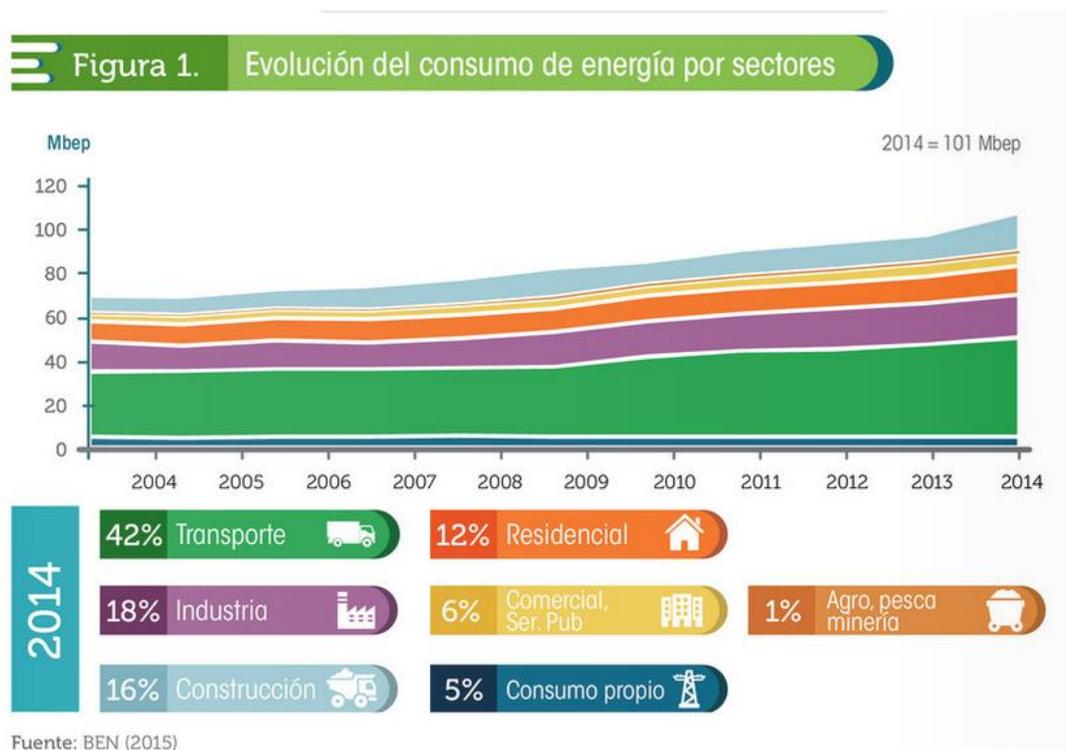


Figura 3 Histórico del consumo de energía primaria por sectores en el Ecuador. Tomado con permiso (MEER Ministerio de Electricidad y Energía Renovable & BID Banco Interamericano de Desarrollo, 2016).

De manera particular, en Ecuador el sector de las edificaciones residenciales, representa la mayor parte de la demanda nacional de electricidad con un 36% del suministro nacional, (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2015), Figura 1. El consumo de energía en edificaciones y viviendas está relacionado a una variedad de procesos ligados a cada etapa del ciclo de vida, partiendo de la extracción de materias primas, hasta finalizar en la demolición. Un análisis LCE se compone de tres fases. En primer lugar, la etapa de pre-operación de una edificación, que comienza por la extracción de la materia prima, siguiendo con la fabricación de elementos de construcción, transporte a la obra y el proceso de instalación en el sitio. Cada uno de estos procesos requiere cierta cantidad de energía, a la cual se denomina energía embebida (EE) de la construcción. Una segunda etapa es la de operación, la misma que se define por el uso y mantenimiento del edificio. Durante este periodo los usuarios de la edificación requieren el suministro principalmente de electricidad, gas y agua, a la energía ligada a estos componentes se los denomina energía operacional (EO). Otra actividad que contribuye al consumo energético en la etapa de operación es el

mantenimiento de la infraestructura, que al tratarse esencialmente de la reposición de materiales es considerada como aporte de energía embebida. Finalmente, la etapa posterior a la operación implica aquellas actividades como demolición, procesamiento de desechos, eliminación y reciclaje (energía de demolición ED). La última fase es la menos intensiva en consumo de energía y comúnmente insignificante (Koesling, Ruge, Fystro, Torp, & Hansen, 2015; Ramesh et al., 2010). Ramesh y sus colaboradores brindaron una visión general sobre el consumo de energía en edificios y residencias mediante LCE, (Ramesh et al., 2010). El mencionado estudio proporciona una revisión de 73 casos de estudio pertenecientes a 13 países, donde se involucran edificios residenciales y de oficinas. Este trabajo logra estimar que en las viviendas la demanda total de energía primaria varía entre 27 y 72 GJ/m<sup>2</sup>, para un ciclo de vida de 50 años. Praseeda y sus colaboradores presentaron una evaluación LCE de edificios residenciales en India, reportando demandas de energía (primaria) desde 2,54 a 12,54 GJ/m<sup>2</sup> (Praseeda et al., 2016). Del mismo modo, Paulsen y Sposto mostraron un análisis energético del ciclo de vida para una casa de tipo social ubicada en Brasilia, donde se obtuvo una demanda de energía (primaria) 17,5 GJ/m<sup>2</sup> (Paulsen & Sposto, 2013). En ambos casos el tiempo de vida útil de la vivienda fue de 50 años.

La contribución de la energía embebida y operacional al ciclo de vida de las edificaciones ha sido ampliamente evaluada. Las observaciones demuestran una relación que la misma varía de acuerdo a factores como la producción de materiales, el transporte, los métodos de construcción, los aparatos eléctricos y mecánicos, los patrones de ocupación y la ubicación geográfica (Gholamreza Heravi, Nafisi, & Mousavi, 2016; Jia Wen, Chin Siong, & Noor, 2015; Praseeda et al., 2016). Ramesh y sus colaboradores mostraron que la demanda de energía operacional se encuentra entre el 80% y el 90%, mientras que la energía embebida oscila entre el 10% y el 20% (Ramesh et al., 2010). Los resultados han permitido identificar que la energía operativa constituye la principal demanda de energía durante el ciclo de vida.

En favor de la conformación de prácticas de construcción sostenibles, la reducción del consumo energético durante la fase de operación de una edificación es uno de los objetivos más perseguidos. El método más común para su reducción consiste en mejorar el aislamiento de la envolvente de la edificación, acción que conlleva a incrementar notablemente la cantidad de energía embebida. A pesar de que la energía embebida usualmente representa proporciones bajas del consumo energético total en una edificación, éste componente incrementa su aportación considerablemente en casos donde los niveles de aislamiento se mejoran. Estudios realizados en Estados Unidos, Canadá, Suecia e Indonesia demuestran que la energía incorporada puede oscilar en rangos entre 9% hasta 50% de la demanda total de energía (Peuportier, 2001; Thormark, 2002; Utama & Gheewala, 2008).

El consumo de energía operacional se debe principalmente a las actividades de los usuarios de una edificación, específicamente las cargas generadas por iluminación, electrodomésticos, ventilación, calefacción, refrigeración, cocción y calentamiento de agua. En el común de los casos, la electricidad corresponde a la mayor contribución dentro de la energía operacional de la edificación (Paulsen & Sposto, 2013). Existen alternativas para estimar el consumo de energía operacional en viviendas, la opción de mayor frecuencia es la recolección estadística de facturas de consumo (Crespo, 2016; Paulsen & Sposto, 2013; Praseeda et al., 2016), o mediante simulación de energía (Dodoo & Gustavsson, 2016; Utama & Gheewala, 2008).

Los patrones de consumo en energía operacional dependen de los hábitos del usuario (horarios de actividad, cultura, condición socio-económica, educación, vestimenta, otras), condición climática, nivel de aislamiento en la envolvente, diseño y método de construcción aplicado. Dentro de este marco, Utama y Gheewala demostraron que la selección de materiales en la fase de diseño es crítica para el desempeño energético LCE del edificio (Utama & Gheewala, 2008). Además es importante señalar que habitualmente las necesidades de climatización de ambientes interiores generan la mayor cantidad de demanda en la energía operacional, en especial las derivadas del consumo eléctrico. Por esta razón, Dodoo y Gustavsson exploraron los futuros riesgos de sobrecalentamiento, uso de energía y cargas de pico para diferentes configuraciones arquitectónicas y energéticamente eficientes de edificios en Suecia (Dodoo & Gustavsson, 2016). Dichos autores revelaron aumentos potenciales en las demandas de enfriamiento para los próximos 80 años para edificios.

La tabla 1 presenta una recopilación de las referencias literarias, pertinentes al estudio de rendimiento energético en edificaciones residenciales. Para el presente análisis es necesario señalar que la energía operacional en su mayoría varía desde 7.6 GJ/m<sup>2</sup> hasta 74.6 GJ/m<sup>2</sup>. Estos resultados serán de utilidad a la hora de validar el presente trabajo.

Tabla 1. Recopilación literaria relevante al estudio de consumo energético en edificaciones residenciales.

Autores (Ubicación)	Energía Embebida (GJ/m <sup>2</sup> )	Energía Operacional (GJ/m <sup>2</sup> )	Total para el Ciclo de Vida (GJ/m <sup>2</sup> )	Área de Construcción (m <sup>2</sup> )	Componentes de energía Considerados
(Praseeda et al., 2016). (India)	1.23 – 4.12	0.50 – 11.0	2.54 - 12.2	28 - 256	Extracción de materiales (EE). Producción de elementos (EE). Transporte de materiales (EE). Proceso de construcción (EE). Electricidad (OE)
(Paulsen & Sposto, 2013) (Brasil)	7.2	17.5	24.7	48	Extracción de materiales (EE). Producción de elementos (EE). Transporte de materiales (EE). Proceso de construcción (EE). Mantenimiento (EE). Electricidad (OE) Gas para cocción (OE) Demolición (EE). Transporte y manejo de desechos (EE).
(Ramesh et al., 2010).	1.0 – 15.4	7.6 – 74.6	14.0 – 80.1	50 - 1520	
(Utama & Gheewala, 2008). (Indonesia)	0.82 – 0.84	10.9 – 12.4	12.5 – 13.2	50 - 65	Extracción de materiales (EE). Producción de elementos (EE). Transporte de materiales (EE). Proceso de construcción (EE). Electricidad (OE)

### Actualidad Nacional

En atención a la problemática expuesta, el objetivo 7 del plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017, establece la necesidad de “Implementar tecnologías, infraestructuras y esquemas tarifarios para incentivar la eficiencia energética en los diferentes sectores de la economía”, así como “Promover patrones de consumo conscientes, sostenibles y eficientes con criterios de suficiencia dentro de los límites del planeta”. Debido a ello, el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables MEER, a través de su Plan Nacional de Eficiencia Energética del Ecuador 2016-2035 PLANEE busca fomentar los hábitos de consumo energético de la población, por medio de la implementación de prácticas de eficiencia energética en todos los sectores relacionados con la provisión y uso de la energía (MEER Ministerio de Electricidad y Energía Renovable & BID Banco Interamericano de Desarrollo, 2016).

Asimismo, Uno de los objetivos específicos del PLANEE es “establecer mecanismos de fiscalización y control para la implementación y ampliación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC (capítulos de eficiencia energética, climatización y energía renovable) a nivel de los Gobiernos Autónomos Descentralizados GAD”. Lo que implica que existe la necesidad de implementar prácticas más eficientes energéticamente en la construcción local. Los mecanismos de consumo de energía del sector residencial en Ecuador ofrecen excepcionales oportunidades de ahorro, tal como sucede en el escenario mundial. El panorama nacional propone iniciativas notables para incorporar tecnologías basadas en energías renovables en articulación con conceptos de sostenibilidad energética en el sector de la construcción, específicamente durante la última década. La tabla 2 muestra un breve resumen de trabajos recientes en el contexto nacional en el campo energético residencial. De los resultados obtenidos, se puede inferir que se han realizado esfuerzos considerables a introducir prácticas de construcción sostenibles. Sin embargo la mayor parte de los estudios se han concentrado directamente en el análisis de potenciales mejoras del confort térmico y no en los efectos sobre el consumo energético residencial (R. D. Beltran et al., 2015; Crespo, 2016; Gallardo et al., 2016; Miño-Rodríguez et al., 2016). De los trabajos locales se puede inducir que su enfoque principal ha sido sobre el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de la edificación, medido en relación a las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, así como el confort térmico. De la figura 1, se estima que la demanda de edificios residenciales es la de mayor participación, en el consumo de electricidad nacional. Por lo tanto el presente trabajo se centra en valorar el rendimiento energético de una vivienda de tipo social, considerando diferentes sistemas de envolvente, para las condiciones climáticas de Guayaquil.

Tabla 2 Contexto nacional de trabajos recientes en términos de mejoras del rendimiento energético en viviendas de tipo social.

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Resultados Destacados</b>
(Macías et al., 2017)	Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador.	2017 (Aceptado)	Comparación del rendimiento energético (LCE) aplicando diferentes métodos de construcción en una vivienda de tipo social. Se consideró dos condiciones climáticas representativas. Consumos eléctricos anuales en el rango de 153.0 MJ/m <sup>2</sup> a 729.7 MJ/m <sup>2</sup> .
(Miño-Rodríguez et al., 2016)	Thermal Assessment of Low-Cost Rural Housing—A Case Study in the Ecuadorian Andes.	2016	Investigación sobre el rendimiento térmico de vivienda de tipo social, para zonas rurales de la sierra Ecuatoriana. Los modelos fueron calibrados con observaciones experimentales. La valoración se realizó mediante la recolección de temperaturas interiores.
(Gallardo et al., 2016)	Analysis and Optimization of the Thermal Performance of Social Housing Construction Materials in Ecuador	2016	Evaluación y optimización del rendimiento térmico de viviendas sociales en base al número de horas de confort en la vivienda. Valoración hecha para diferentes condiciones climáticas.
(Crespo, 2016)	Análisis de Ciclo de Vida de una vivienda tipo media en la ciudad de Guayaquil.	2016	Análisis de ciclo de vida, caso de estudio para una vivienda de clase media en la ciudad de Guayaquil. Consumo eléctrico anual de 324MJ/m <sup>2</sup> .
(D. Beltran, Miño-Rodríguez, Lobato, Gallardo, & Naranjo-Mendoza, 2015)	Thermal comfort performance within heritage buildings subject to a change of use	2015	Valoración en horas de confort térmico. Los resultados demostraron que los niveles de aislamiento en techos y ventanas son críticos en el rendimiento térmico de las edificaciones.
(Macías, Soriano, Sánchez, & Canchingre, 2015).	Assessment of solar reflectance of roofing assemblies of dwellings in Guayaquil, Ecuador	2015	Estudio del efecto de la reflectividad solar de diferentes tipos de techos sobre el consumo energético de viviendas sociales. Consumos eléctricos anuales en el rango de 285.3 MJ/m <sup>2</sup> a 508.5 MJ/m <sup>2</sup> .

## Capítulo 3

### METODOLOGÍA

En favor de alcanzar los objetivos del presente trabajo, la figura 4 muestra el flujo de trabajo propuesto para el análisis del rendimiento energético de una vivienda tipo, enfocándonos en la estimación del consumo de electricidad anual. La valoración se direcciona al uso de una vivienda de una planta, comúnmente utilizada en programas de vivienda social en Ecuador. Es importante remarcar que según la bibliografía consultada en las tablas Tabla 1 y Tabla 2, la mayoría de los estudios realizados sobre viviendas de tipo social no superan los 60 m<sup>2</sup> de construcción, y los 200 m<sup>2</sup> en aquellos estudios que se concentran en edificaciones de tipo residencial en general. Como punto de partida será necesario definir un modelo de vivienda base, y los métodos de construcción a estudiar, seguido además por la definición de las condiciones climáticas. Una vez definida la información de entrada, acorde a la figura 4, se procederá a estimar el consumo anual de electricidad para diferentes configuraciones del sistema envolvente en la vivienda, es decir que para un mismo modelo de vivienda se obtendrán consumos de electricidad anuales bajo diferentes condiciones de aislamiento térmico en paredes y techo. Las configuraciones de los sistemas de envolventes y sus materiales estarán determinadas por las prácticas de la construcción local, basadas específicamente en las directrices de la norma ecuatoriana de la construcción NEC (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014). En cuanto a las propiedades termo-físicas de los materiales utilizados para cada caso, los valores serán definidos acorde al estándar ISO 10456 (B. E. ISO, 2007), la tabla 3 muestra un resumen de estas propiedades. Las condiciones de carga y ocupación del modelo serán precisadas acorde a la bibliografía consultada de la tabla 2. Finalmente los resultados serán validados por contraste contra resultados de investigaciones previas, las cuales se presentan en la tabla 1.

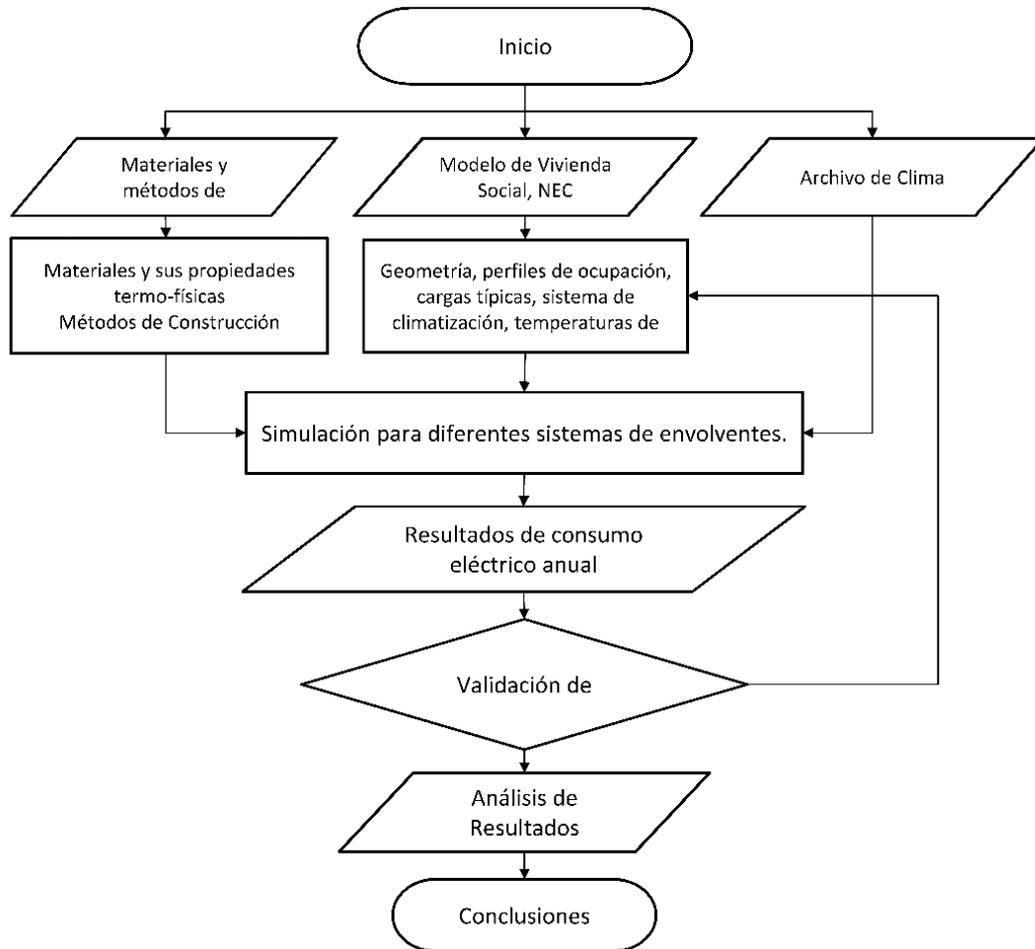


Figura 4.- Esquema de metodología de análisis para la obtención de la energía operacional y consumo eléctrico anual en vivienda de tipo social.

Tabla 3.- Resumen de propiedades termo-físicas de los materiales de construcción utilizados en el presente trabajo (ISO, 2007).

Descripción	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad (W/m-K)	Emisividad
Concreto convencional	2400.0	1.9	0.9
Acero	7850.0	50.0	0.3
Bloques de concreto ligero	1600.0	0.47	0.9
Mortero de concreto	2000.0	1.3	0.9
Aire (cavidades no ventiladas)	1.23	0.47	0.9
Poliestireno expandido	15.0	0.04	0.9

### Modelo Base

Esta sección se enfoca específicamente en la descripción del modelo de una vivienda de tipo social, comúnmente aplicados en los programas habitacionales gubernamentales. La figura 5 presenta el plano tipo para viviendas de dimensiones mínimas requeridas por la Normativa nacional NEC (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014). El esquema de vivienda se compone tres ambientes independientes, un área social y dos dormitorios, cubriendo una superficie total de 36 m<sup>2</sup>. Regularmente, el diseño es sismo-resistente y direccionado al uso de mampostería confinada (bloques de concreto hueco) por elementos estructurales de concreto reforzado (columnas cada 3 m). Adicionalmente, el diseño sugiere el uso de cubiertas metálicas con pendiente y no contempla el crecimiento modular.

La figura 6 muestra un registro fotográfico de programas habitacionales de tipo social, en diferentes ubicaciones del Ecuador.





Figura 6.- Registro fotográfico de modelos de vivienda social, utilizados en programas habitacionales en el Ecuador, (“RENDICIÓN DE CUENTAS-MIDUVI”, 2014).

Con base en la información presentada, el modelo de vivienda según la NEC utilizando un sistema estructural compuesto de columnas y vigas (hormigón armado), confinado por paredes de mampostería no reforzada CM (Confined masonry, bloque hueco de hormigón ligero) servirá de punto de partida para el análisis del consumo anual de electricidad en la vivienda. Seguidamente se repetirán las observaciones aplicando otras condiciones en paredes y techos, acorde al diseño de dos técnicas de construcción alternativa. Estos métodos son conocidos como sistema de muros portantes de hormigón armado LBW (load bearing walls) y sistema de muros de mortero armado con alma de poliestireno ICF (insulated concrete forms). Cabe indicar que dichas técnicas son aplicadas para diseño

antisísmico, acorde a la normativa ecuatoriana de la construcción NEC (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014).

La Figura 7 presenta el detalle del diseño de paredes de cada sistema constructivo. Es importante recordar que para el caso de los programas de vivienda social, es común encontrar diseños con cubierta de tipo metálica, debido principalmente a su bajo costo, sin embargo, la NEC considera para cada sistema constructivo sus lineamientos para la conformación de viviendas con techo de losa de hormigón; el detalle se ilustra en la figura 8. El sistema LBW consiste de estructuras de concreto monolítico, reforzado con acero, se constituye de muros de 10 cm de espesor para techos y paredes. Por otro lado el sistema ICF se compone de paneles con un núcleo de poliestireno, unidos por capas de mortero reforzado con malla electro-soldada, formando paredes con 14 cm de espesor, mientras que el espesor del techo es 24 cm.

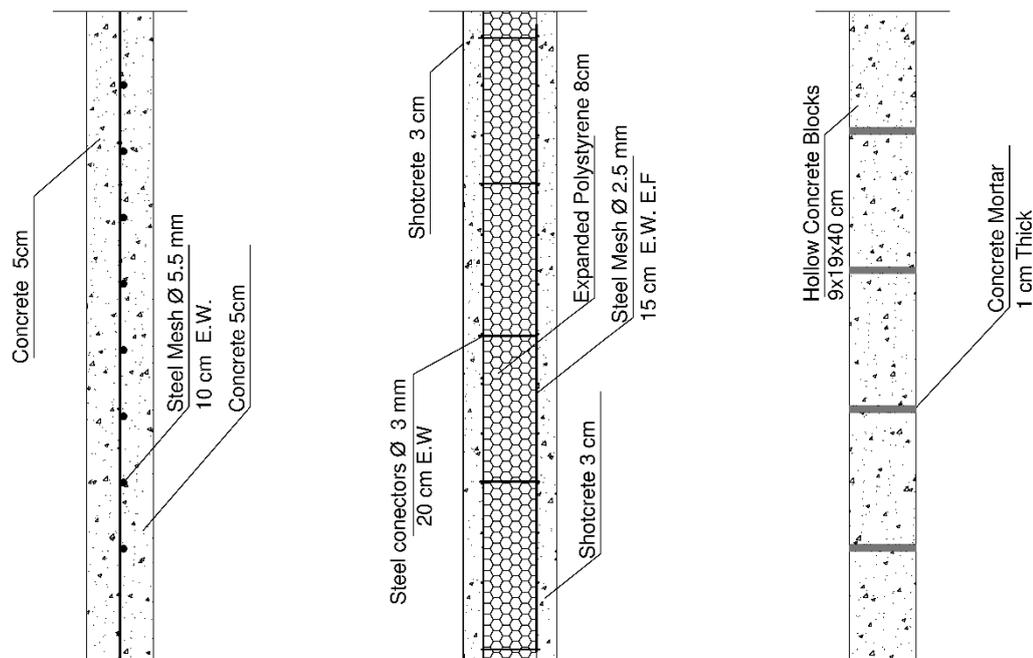


Figura 7.- Detalle constructivo de muros, para tres sistemas constructivos de acuerdo a la normativa ecuatoriana de la construcción. De izquierda a derecha: a) de muros portantes de hormigón armado LBW (load bearing walls), b) muros de mortero armado con alma de poliestireno ICF (insulated concrete forms), c) paredes de mampostería no reforzada CM (bloque hueco de hormigón ligero).

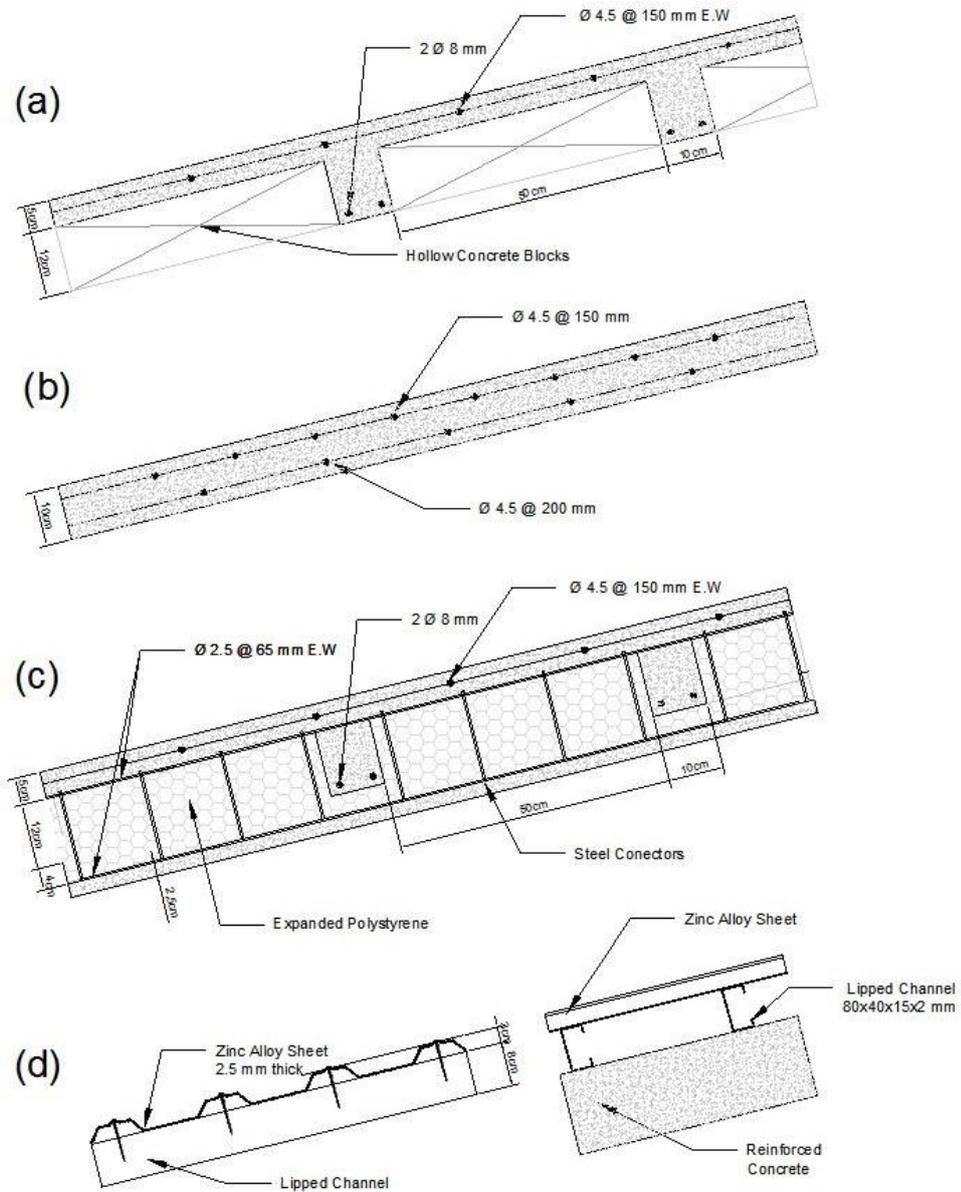
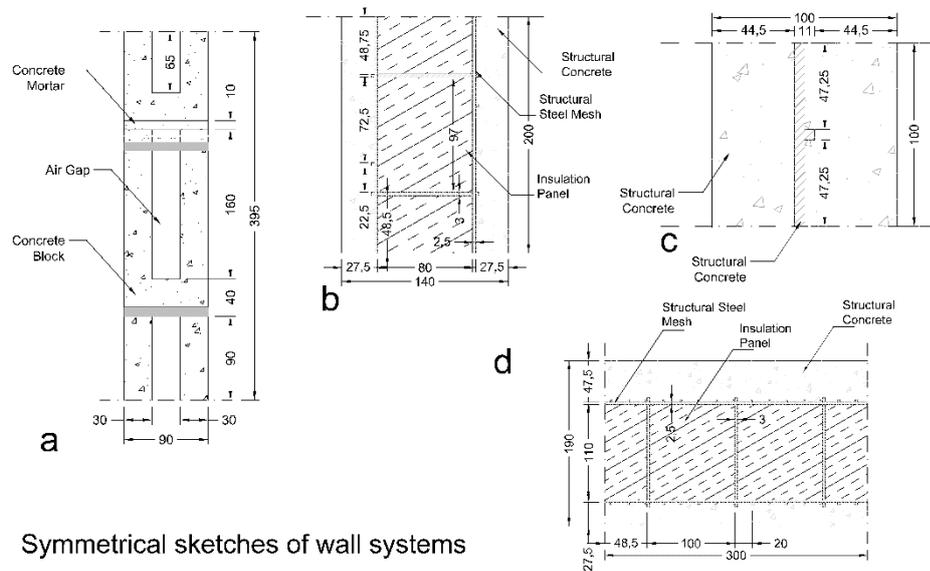


Figura 8.- Detalle constructivo para losas de tres sistemas constructivos y cubierta metálica de acuerdo a la normativa ecuatoriana de la construcción. a) Losa para sistema de muros portantes de hormigón armado LBW (load bearing walls), b) Losa para sistema de muros de mortero armado con alma de poliestireno ICF (insulated concrete forms), c) Losa para sistema de paredes de mampostería no reforzada CM (bloque hueco de hormigón ligero), d) Cubierta metálica típica.

Es importante notar que el presente análisis sólo valora el efecto de los niveles de aislamiento en paredes y techos de tres sistemas constructivos validados estructuralmente por la NEC. En otras palabras no se estima el efecto del aislamiento en pisos, contrapisos, cimentaciones y elementos de carpintería (puertas y ventanas) en el rendimiento energético de la vivienda, debido principalmente a que es posible usar los mismos elementos en cada sistema de envolvente (Macias et al., 2017).

El estándar ISO 6946 es un método de cálculo para la estimación del coeficiente global de transferencia de calor o valor U en cerramientos verticales y horizontes, considerando principalmente la conductividad térmica individual por cada material. Es importante recordar que el método de cálculo aplica para sistemas de envolvente compuestos por materiales de propiedades térmicas homogéneas, y no incluye el efecto combinado del transporte de calor y humedad en los sistemas. Autores como dos Santos y Mendes abordaron esta temática, concluyendo diferencias importantes en el transporte de energía de los cerramientos compuestos específicamente por materiales porosos, estos efectos deben ser considerados en el futuro (dos Santos & Mendes, 2009).

El procedimiento ISO 6946 es apropiado para obtener un valor de resistencia térmica equivalente para paredes compuestas por capas de propiedades homogéneas, dichas capas pueden tener una geometría uniforme o irregular, acorde a los diseños de paredes propuestos por la NEC. En este caso los sistemas de muros portantes de hormigón armado (LBW) y muros de mortero armado con alma de poliestireno (ICF) puede representarse como una geometría de capas uniformes, como lo muestra la figura 9 (a y c), mientras que el caso de paredes de mampostería no reforzada CM se debe representar como geometría de capas heterogénea, figura 9 b. En el caso de las geometrías heterogéneas el procedimiento brinda valores aproximados. Este método no aplica a elementos de carpintería (puertas y ventanas), muros cortina, muros ventilados, pisos o sobre-pisos. Es importante mencionar que para el caso de las paredes ICF existen elementos de montaje metálico, que sirven de conectores pero forman puentes térmicos que disminuyen la resistencia térmica global y su efecto debe ser cuantificado, el estándar ISO 6946 ofrece una sección para la estimación de la corrección.



Symmetrical sketches of wall systems

Figura 9.- Secciones de pared simplificadas para análisis de resistencias por capas. a.- Sistema mampostería de bloques CM. b.- Esquema ICF de pared. c.- Sistema LBW. d.- Esquema ICF de cubierta.

La ecuación 1 representa la resistencia térmica total para geometría compuesta de capas uniformes, donde  $R_{si}$  y  $R_{se}$  constituyen las resistencias térmicas por convección interna y externa, sus valores son 0.13 y 0.04 respectivamente en el caso de flujo de calor horizontal (pared). Por otro lado las resistencias  $R_1, R_2, \dots, R_n$  representan las resistencias térmicas de cada capa, ecuación 2, donde  $d_n$  es el espesor de la capa  $n$ , y  $\lambda_n$  es la conductividad térmica correspondiente.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$R_n = \frac{d_n}{\lambda_n} \quad \text{Ecuación 2}$$

En el caso de mampostería no reforzada CM (bloque hueco de hormigón ligero), que constituyen paredes de geometría heterogénea, será estimado de acuerdo a la ecuación 3 hasta la ecuación 6. Dónde  $R'_T$  y  $R''_T$  representan límites de resistencia térmica superior e inferior, ponderando las proporciones de resistencias acorde a la superficie de secciones individualizadas. Por otro lado,  $R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tq}$  son las resistencias térmicas de cada

entorno local correspondiente a la sección calculada según la ecuación 1, mientras que  $f_a$ ,  $f_b$ , ...,  $f_q$  representan la fracción de superficie de cada sección.

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$R''_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Finalmente el valor U se estima acorde a la ecuación 7. Se debe recordar que el alcance del presente trabajo no incluye una descripción detallada para la estimación de los valores U en las envolventes. Por este motivo, el análisis de resistencia térmica total en cerramientos quedará en este punto. Sin embargo, cabe señalar que elementos metálicos que sirven de conectores y cavidades de aire sin ventilar son factores que tienen consideraciones separadas, y al estar presentes en los sistemas de muros por analizar, deberán ser contemplados. Para una mejor referencia direccionarse al estándar ISO 6946.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{Ecuación 7}$$

### Condiciones Climáticas

La figura 4 describe la necesidad de contar con la información climática de la zona de estudio, previo a la ejecución de las simulaciones energéticas del modelo. Un archivo de clima contiene un arreglo de parámetros ambientales que son indispensable para establecer las condiciones de frontera en la edificación sujeto de análisis. El arreglo del clima y las variables contenidas en el documento, dependen principalmente de los principios de simulación de cada software, el formato más común es el uso de promedios horarios a lo largo del año, es decir 8760 reglones de datos, uno por cada hora (Barnaby & Crawley, 2011). La figura 10 muestra un ejemplo del arreglo de dichos parámetros, entre los cuales se puede encontrar temperatura ambiental de bulbo seco, humedad relativa o equivalente, irradiancia solar (directa y difusa), iluminación solar, cobertura por nubosidad, velocidad y dirección de viento, otros. Idealmente el archivo del clima debe ser elaborado a partir de datos medidos en el lugar de observación, sin embargo los altos costos instrumentales y el tiempo de

inversión hacen de esta una alternativa poco atractiva. Una opción es el uso de un archivo de clima generado por bases de datos libres o comerciales (Synnefa et al., 2007), algunas de ellas son Meteonorm software, International Weather for Energy Calculations (IWEC), ASHRAE Design weather Data WDVView 4.0, eosweb.larc.nasa.gov, u otros (“Climate Data Center | ashrae.org”, s/f; Remund, Kunz, METEOTEST, & of Energy, 2016). Para un detalle extendido sobre las características, funciones, historia y aplicaciones de los archivos climáticos direccionarse a la referencia (Barnaby & Crawley, 2011).

AÑO	MES	DIA	HORA	T_dry	T_dew	RH	P_atm	(W/m2)	Wind_Dir	Wind_Sp (m/s	precip_wtr	
2005	1	1	1	60	26,3	20,8	72,00	101306,00	0,00	128,00	0,3	40,00
2005	1	1	2	60	26,1	20,9	73,00	101306,00	0,00	117,00	0,2	40,00
2005	1	1	3	60	25,9	20,3	72,00	101306,00	0,00	159,00	0,2	38,00
2005	1	1	4	60	25,7	20,1	71,00	101306,00	0,00	175,00	0,4	38,00
2005	1	1	5	60	25,6	19,8	70,00	101306,00	0,00	128,00	0,3	37,00
2005	1	1	6	60	25,5	20,6	74,00	101306,00	0,00	117,00	0,4	39,00
2005	1	1	7	60	25,7	20,2	72,00	101306,00	11,00	141,00	0,2	38,00
2005	1	1	8	60	27,2	19,9	64,00	101306,00	235,00	147,00	1,0	37,00
2005	1	1	9	60	29	20,4	60,00	101306,00	506,00	124,00	0,7	39,00
2005	1	1	10	60	30,7	19,3	51,00	101306,00	740,00	163,00	3,6	36,00
2005	1	1	11	60	32,3	18	43,00	101306,00	940,00	140,00	2,6	33,00
2005	1	1	12	60	32,5	18,1	43,00	101306,00	563,00	181,00	2,6	33,00
2005	1	1	13	60	32,6	18,3	43,00	101306,00	557,00	145,00	3,3	33,00
2005	1	1	14	60	32,3	18,2	43,00	101284,00	431,00	103,00	4,1	33,00
2005	1	1	15	60	32	18,6	45,00	101262,00	382,00	145,00	3,0	34,00
2005	1	1	16	60	31,6	19,3	48,00	101240,00	307,00	176,00	5,4	36,00
2005	1	1	17	60	30,8	23	63,00	101218,00	165,00	126,00	2,8	46,00
2005	1	1	18	60	30,2	20,2	55,00	101197,00	56,00	155,00	3,3	38,00
2005	1	1	19	60	29,4	20	57,00	101175,00	3,00	142,00	1,7	38,00
2005	1	1	20	60	29,1	20,9	61,00	101153,00	0,00	146,00	1,4	40,00

Figura 10.- Ejemplo de archivo climático típico para simulaciones en edificios.

El presente análisis será realizado bajo condiciones climáticas de Guayaquil. La ciudad se extiende en unos 340 km<sup>2</sup> aproximadamente, está ubicada sobre el golfo de Guayaquil en las costas del Pacífico Sur, geográficamente a 2°19' de latitud Sur y 79°53' de longitud Oeste y su altura promedio de 3.80 msnm (Interagua LTDA, 2015), además es la más poblada del Ecuador con 2 366 902 de habitantes (Censos, 2010). En resumen el clima de Guayaquil puede describirse como un cálido y húmedo constante a lo largo del año, con una estación lluviosa que se extiende desde diciembre hasta abril y otra seca que empieza desde mayo hasta noviembre normalmente. Con una temperatura ambiental que fluctúa entre 18°C y 33°C se tiene una temperatura media anual de 27°C, y una humedad relativa promedio de 77%. A través de la figura 11 se muestra la distribución mensual de temperatura de bulbo seco, mientras que la figura 12 ilustra una distribución de irradiación solar y temperatura promedio mensual, dichos datos fueron extraídos de un año meteorológico típico generado mediante Meteonorm (Remund et al., 2016).

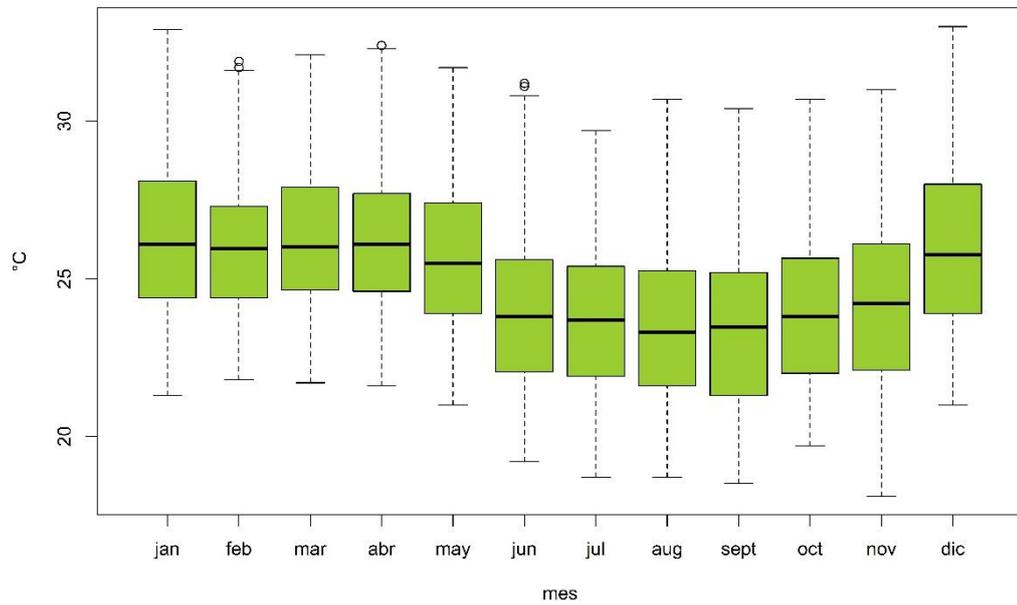


Figura 11.- Distribución mensual de temperatura de bulbo seco obtenida de un año meteorológico típico (TMY3) de Guayaquil (Remund et al., 2016).

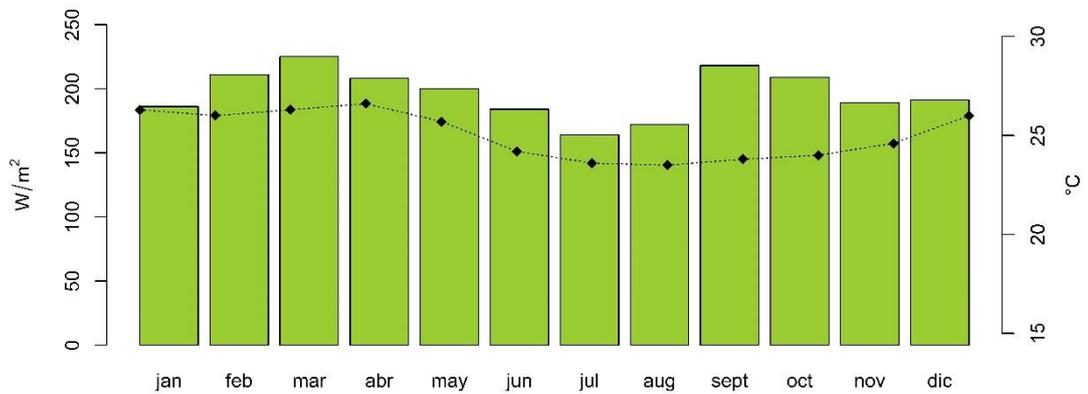


Figura 12.- En barras se representa el promedio mensual de irradiación solar global y la curva constituye la temperatura promedio mensual, según año meteorológico típico (TMY3) de Guayaquil (Remund et al., 2016).

## Simulaciones

De acuerdo con la figura 4, el procedimiento de estimación del consumo de electricidad anual será realizado mediante simulación. Existe una variedad considerable de herramientas de simulación aplicables tanto a nivel académico como profesional, Crawley en colaboración de otros autores provee un análisis comparativo de 20 programas “maduros” para simulación energética de edificios (Crawley, Hand, Kummert, & Griffith, 2008), dicho trabajo resume las características y capacidades más relevantes de cada uno, además se encontró mucha ambigüedad entre las herramientas. Los autores recomiendan iniciar con los simuladores de menor complejidad y profundizar acorde a la exigencia del proyecto. En cuanto a la validez de los resultados, cada software debe ser contrastado por medio del procedimiento BESTTEST o métodos de cálculo normados, ISO 13789 e ISO 13790 (Crawley et al., 2008; E. ISO, 2007, 2008).

Con base en los resultados por Crawley y sus colaboradores, el presente trabajo se utilizará EnergyPlus como herramienta de simulación, desarrollado por el departamento de energía de Estados Unidos (US Department of Energy). La selección fue realizada basándonos en sus capacidades para predecir temperaturas de operación, dimensionar sistemas de climatización, controlar el flujo de aire entre zonas y emular el funcionamiento de elementos eléctricos. Otra ventaja importante es que EnergyPlus es una herramienta de uso libre. Este software se constituye en un código estructurado basado en las capacidades y características de sus predecesores BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) y DOE-2.1E (Crawley et al., 2008; Sailor, 2008). El motor de cómputo tiene la capacidad de calcular espacios de tiempo tan cortos como 15 minutos y brinda predicciones de temperatura ambiente con gran exactitud. Las características del EnergyPlus incluyen: resultados de análisis por hora o menor, soluciones simultáneas para los balances de calor al interior y exterior, análisis en estado transitorio, análisis de confort térmico, inclusión de elementos acristalados avanzados, control de iluminación natural y contaminación en ambientes (Sailor, 2008). Además es específicamente adecuado para el dimensionamiento de sistemas mecánicos de enfriamiento y calentamiento (climatización). Otras de sus capacidades relevantes es la valoración de sistemas de control en elementos de adsorción y desorción, calentamiento y enfriamiento radiante, y el intercambio de aire en ambientes interiores (Crawley et al., 2008).

La figura 13 muestra que EnergyPlus es una herramienta de simulación integrada. De funcionamiento modular, donde dichos módulos deben ser resueltos simultáneamente mediante el integrador principal “Integrated Solution Manager”. A su vez, el mencionado controlador principal está constituido por tres subsistemas. El primero se encarga del balance de energía en la envolvente del edificio, considerando los mecanismos tradicionales de conducción, convección y radiación, “Surface Heat Balance Manager”. El segundo

computa los balances energéticos para la masa de aire al interior de cada zona en análisis, se denomina “Air Heat Balance Manager”, aquí se contabilizan los cambios de aire, infiltraciones o fugas de la envolvente, este controlador es relevante para el análisis de carga en los sistemas mecánicos de climatización (HVAC Heating, ventilating and air conditioning). Por último el denominado “Building System Simulation Manager” es un subsistema para el control y análisis de los equipos eléctricos y HVAC. Acorde al objetivo del presente trabajo, los principios de funcionamiento de cada módulo no serán detallados, sin embargo se debe mencionar que la guía de ingeniería del software brinda extensamente el soporte técnico necesario (U.S. Department of Energy, 2016).

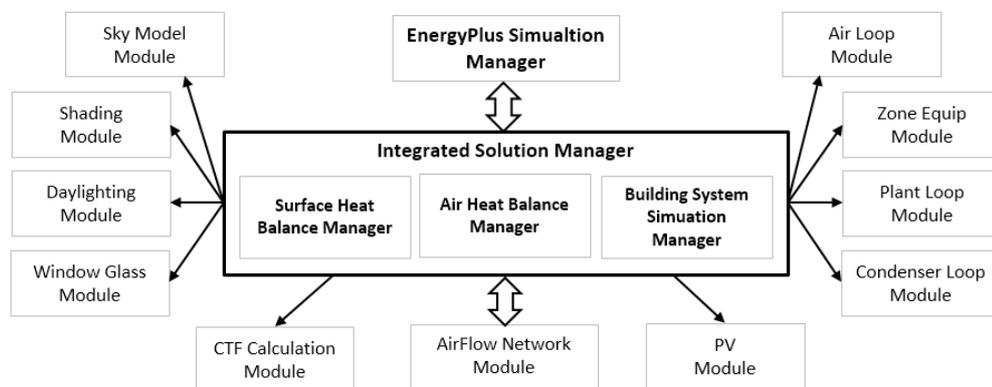


Figura 13.- Esquema de interacción entre módulos en EnergyPlus, adaptado (U.S. Department of Energy, 2016).

El presente trabajo no se enfoca en el detalle de los principios de funcionamiento y cálculo del software utilizado, sin embargo a continuación se describirá brevemente los fundamentos técnicos aplicados por el EnergyPlus. Para una referencia extendida se recomienda consultar la bibliografía pertinente (Hensen & Lamberts, 2012). La Figura 14 ilustra un esquema pertinente al balance de energía en las superficies de la envolvente, correspondiente al principio de cálculo del “Surface Heat Balance Manager” o SHBM.

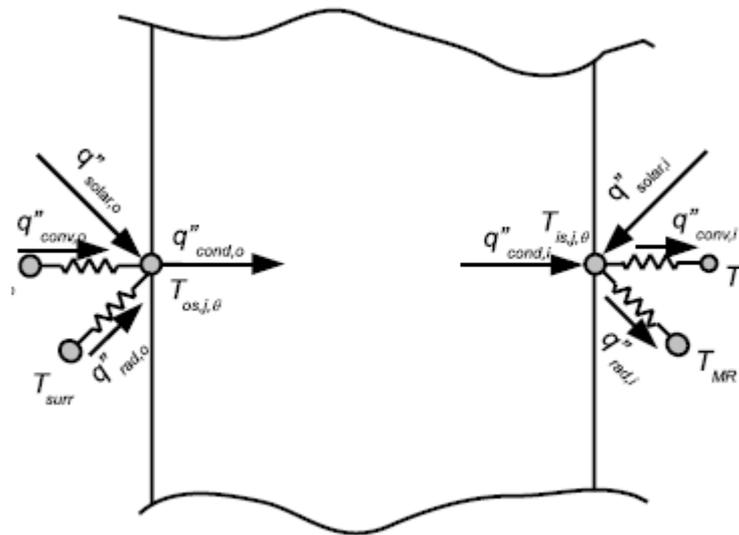
En términos de conducción, el flujo de calor en la envolvente es considerado un problema de conducción unidireccional bajo régimen no estacionario. La ecuación 8 es una diferencial parcial de segundo orden que describe la difusión de calor unidireccional a través de un medio homogéneo, donde  $k$  es la conductividad térmica,  $\rho$  la densidad,  $c_p$  el calor específico,  $T$  la temperatura en función del tiempo  $t$  y la posición  $x$ , (Hensen & Lamberts, 2012; Hittle, 1981). Por otro lado, el flujo de calor para cualquier posición y tiempo se describe por la ecuación 9.

$$\frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$q(x, t) = -k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad \text{Ecuación 9}$$

La no linealidad del problema, sumado a la condición dinámica en el tiempo de la frontera, así como la composición no homogénea de la envolvente, dificulta la solución para las ecuaciones 8 y 9 (Hensen & Lamberts, 2012). Por lo común el problema no estacionario de conducción de calor en la envolvente es resuelto por los siguientes mecanismos:

- i. Método de la Transformada Z.- Basado en la teoría de la transformada Z, incluye los denominados “factores de respuesta” y “funciones de transferencia de conducción CTF”. Se constituye en el método más usado debido a su buena precisión y eficiencia computacional. EnergyPlus aplica este mecanismo.
- ii. Métodos Numéricos.- Consiste en la aplicación de métodos de diferencias finitas o elementos finitos. Mecanismo de alta precisión pero de mayor costo computacional. Su ventaja principal descansa en la flexibilidad de análisis para problemas que incluyen materiales de cambio de fase o radiación en cápsulas de aire.
- iii. Método de parámetros agrupados.- Mecanismo que trata la envolvente como un sistema de resistencias y capacitancias discretas, normalmente este método es aplicado en conjunto con modelos de capacitancia agrupada para la zona térmica.



iv.

Figura 14.- Esquema de balance de energía en las superficies de la envolvente, adaptado (Hensen & Lamberts, 2012).

### El método de la Transformada Z.

Por su buena combinación de precisión y eficiencia computacional, es el método preferido para la determinación de las cargas de diseño y análisis energético de edificios. Los métodos de la transformada Z son aplicados en tres formulaciones diferentes: Factores de Respuesta, Funciones de Transferencia para Conducción (CTF), y Factores de Respuesta Periódica (PRF). Otra característica importante de mencionar es que el método utiliza pasos de tiempo fijo, normalmente son una hora.

El motor de simulación EnergyPlus utiliza Funciones de Transferencia para Conducción (CTF) para el análisis de energía en la envolvente, ya que es el método de mejor rendimiento para pasos de tiempo de una hora, aunque su precisión disminuye en pasos de tiempo más cortos. Este método sustituye la necesidad de contar con el historial de temperaturas con el historial del flujo de calor (DOE, 2016; Hensen & Lamberts, 2012; Hittle, 1981). La formulación de CTF para el flujo de calor en la frontera interior y exterior se presenta en las ecuaciones 10 y 11.

$$q_i''(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{ki,t-j\delta} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$q_o''(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{ko,t-j\delta} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

- $X_j$  Es el coeficiente CTF en la cara exterior para  $j = 0, 1, \dots, nz$ .
- $Y_j$  Es el coeficiente CTF a través de la pared para  $j = 0, 1, \dots, nz$ .
- $Z_j$  Es el coeficiente CTF en la cara interior para  $j = 0, 1, \dots, nz$ .
- $\Phi_j$  Es el coeficiente CTF debido al flujo de calor para  $j = 0, 1, \dots, nq$ .
- $T_i$  Es la temperatura de superficie interior.
- $T_o$  Es la temperatura de superficie exterior.
- $q_o''$  Flujo de calor por conducción ingresando en superficie exterior.
- $q_i''$  Flujo de calor por conducción saliendo en superficie interior.

- $t$  Es el tiempo
- $\delta$  Es la duración de los pasos de tiempo.

Parte del transporte de energía que fluye a través de la envolvente es transmitida por convección. La ecuación 12 representa la expresión general para este mecanismo, donde  $h$  es el coeficiente de convección,  $T$  es la temperatura del fluido en contacto con la superficie,  $T_s$  es la temperatura de la superficie interior o exterior, y  $A$  es el área de la superficie. En este caso los coeficientes de convección son estimados mediante correlaciones experimentales, pertinentes a cada tipo de superficie (DOE, 2016; Hensen & Lamberts, 2012).

$$\dot{q} = hA(T - T_s) \quad \text{Ecuación 12}$$

Otro fragmento importante de la energía térmica que atraviesa la envolvente es la energía transportada por radiación. Este factor depende específicamente de las propiedades superficiales de los materiales, absorptancia ( $\alpha$ ), emitancia ( $\epsilon$ ), reflectancia ( $\rho$ ) y transmitancia ( $\tau$ ). Para el presente análisis los elementos de carpintería, tales como puertas y ventanas no se incluyeron y serán valoradas en la misma condición para todos los casos. Es decir que sólo se consideró las superficies opacas no especulares de la envolvente (superficies grises), por lo tanto el análisis de radiación se simplifica considerablemente. La ecuación 13 representa el caso general para el flujo de calor por radiación entre dos superficies a diferente temperatura (Hensen & Lamberts, 2012):

$$\dot{q}_{1-2} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Es importante recordar que la cantidad de energía transportada por radiación depende del espectro de las ondas (rango de longitud de onda) y su dirección, por esta razón, sumado a las temperaturas de operación de los materiales, la radiación en la envolvente del edificio se divide en dos categorías, radiación de onda corta (espectro UV y visible), y radiación de onda larga (IR). Es decir que existe materiales donde la cantidad de radiación absorbida puede ser simultáneamente alta y baja para los diferentes espectros.

Es importante recordar que el EnergyPlus es un motor de simulación y no cuenta con interface de usuario propia, así que es común utilizar una plataforma que facilite el trabajo, en este trabajo se utilizó OpenStudio. La figura 15 presenta el flujo de trabajo típico en un procedimiento de simulación utilizando esta plataforma.

El archivo del clima es un arreglo de datos en formato de texto, el mismo fue obtenido mediante la base de datos Meteonorm (Remund et al., 2016), y sus características fueron

descritas en la sección previa. En segundo lugar, una densidad de ocupación (0.1 persona/m<sup>2</sup>) y el horario de ocupación de la vivienda fue dispuesto de acuerdo a la directrices de trabajos previos realizados por investigadores locales (Gallardo et al., 2016).

Seguidamente se debe definir la envolvente del modelo, este paso será clave en el presente trabajo, ya que el resto de parámetros se mantendrán invariables y las simulaciones serán ejecutadas para las seis configuraciones de envolvente descritas en la tabla 4. Los sistemas de envolventes han sido configurados de acuerdo a las directrices de la normativa ecuatoriana para la construcción (NEC) y sus características fueron descritas en las secciones previas (Métodos y Materiales de Construcción). Cada sistema de envolvente ha sido abreviado individualmente, de tal manera que facilite su identificación al presentar los resultados, ver tabla 4, figura 7 y figura 8.

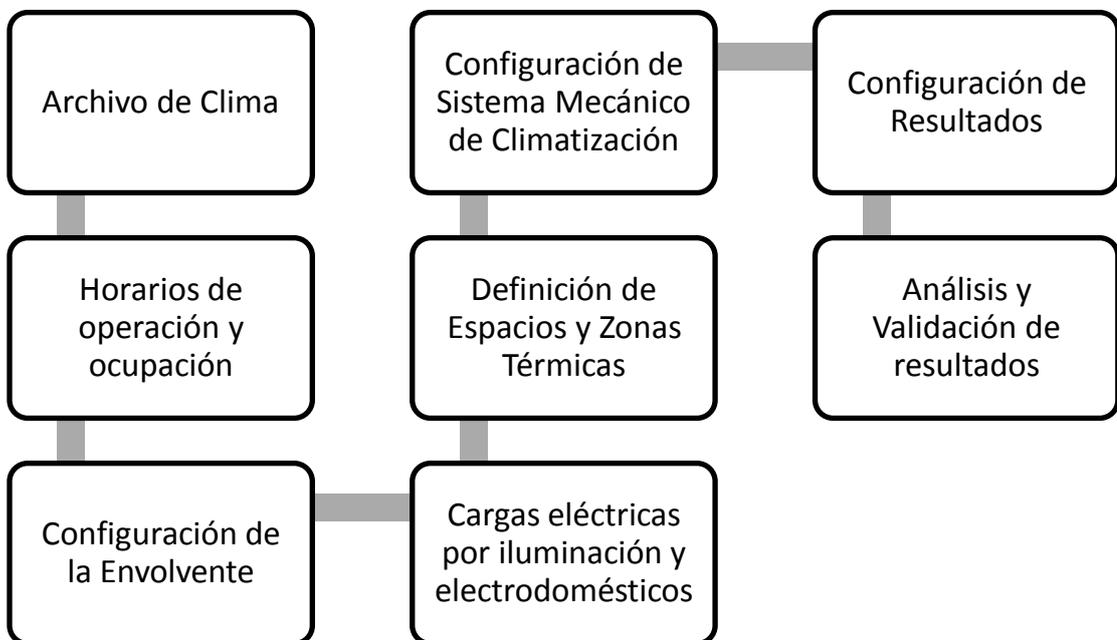


Figura 15.- Flujo de trabajo para simulaciones energéticas utilizando EnergyPlus.

En términos de consumo eléctrico por el uso de electrodomésticos e iluminación fueron definidas acorde a la literatura consultada (Miño-Rodríguez et al., 2016), 9.0 W/m<sup>2</sup> por iluminación y 5.0 W/m<sup>2</sup> por electrodomésticos.

Acorde al flujo de trabajo (figura 15), se debe definir las zonas térmicas de estudio. El concepto de “zona”, en este caso es térmico y no geométrico, es decir que representa un

volumen de aire a temperatura uniforme más todas las superficies de transferencia y almacenaje de calor que delimita la frontera del volumen de aire. EnergyPlus se encarga de calcular la energía requerida para mantener la temperatura programada a cada hora del día. Las zonas deben ser simplificadas al menos número posible (U. DOE, 2016). En este caso se creó una zona para cada tipo de ambiente, es decir una zona térmica corresponde al área social y otra que corresponde a las habitaciones. En otras palabras, las zonas térmicas además sirven para diferenciar patrones de ocupación, uso y los requerimientos de climatización mecánica. En el presente análisis la única diferencia es el horario de ocupación de las zonas, el resto de parámetros se mantienen invariables.

Tabla 4.- Identificación de los seis sistemas de envolvente analizados en el presente trabajo.

Descripción del sistema	Abreviación
Viga-Columna confinado de mampostería no reforzada, con losa de hormigón reforzado en cubierta.	CM+Sa
Viga-Columna confinado de mampostería no reforzada, con teja metálica en cubierta.	CM+Z
Sistema de muros portantes de hormigón armado en paredes y cubierta.	LBW+Sb
Sistema de muros portantes de hormigón armado en paredes, con teja metálica en cubierta.	LBW+Z
Sistema de muros de mortero armado con alma de poliestireno en paredes y cubierta.	ICF+Sc
Sistema de muros de mortero armado con alma de poliestireno en paredes, con teja metálica en cubierta.	ICF+Z

La figura 16 bosqueja el sistema de climatización simulado (U. S. DOE, 2016). El conjunto emula el comportamiento de un sistema unitario con capacidad de calentamiento y enfriamiento. El sistema está constituido por un ventilador de flujo constante (on/off), un intercambiador eléctrico tipo serpentín para enfriamiento y otro para calentamiento, un serpentín para recalentamiento es opcional en caso de requerir control de humedad, finalmente un difusor para cada zona térmica debe ser establecido. En resumen se tiene equipamiento de control simple, tipo “on/off”, que se enciende en base a la necesidad de cumplir un rango de temperaturas preestablecido para cada zona térmica, el rango requerido para el confort de las zonas es de 21°C hasta 24°C, (Van Geem & Marceau, 2006).

Para finalizar los resultados fueron configurados para obtener principalmente demanda mensual de electricidad, y en consecuencia los consumos anuales de electricidad. Con la finalidad de validar las observaciones, estas deberán ser contrastadas acorde a resultados de la bibliografía de referencia y discutidas en la siguiente sección.

En términos de las limitaciones del modelo, el modelaje no ha sido configurado para identificar características del entorno urbano, tales como ventilación natural, sombras, efectos de evo-transportación por vegetación e isla de calor. Además otra carencia del modelo es despreciar el efecto de puentes térmicos en esquinas 2D (aristas) y vértices 3D.

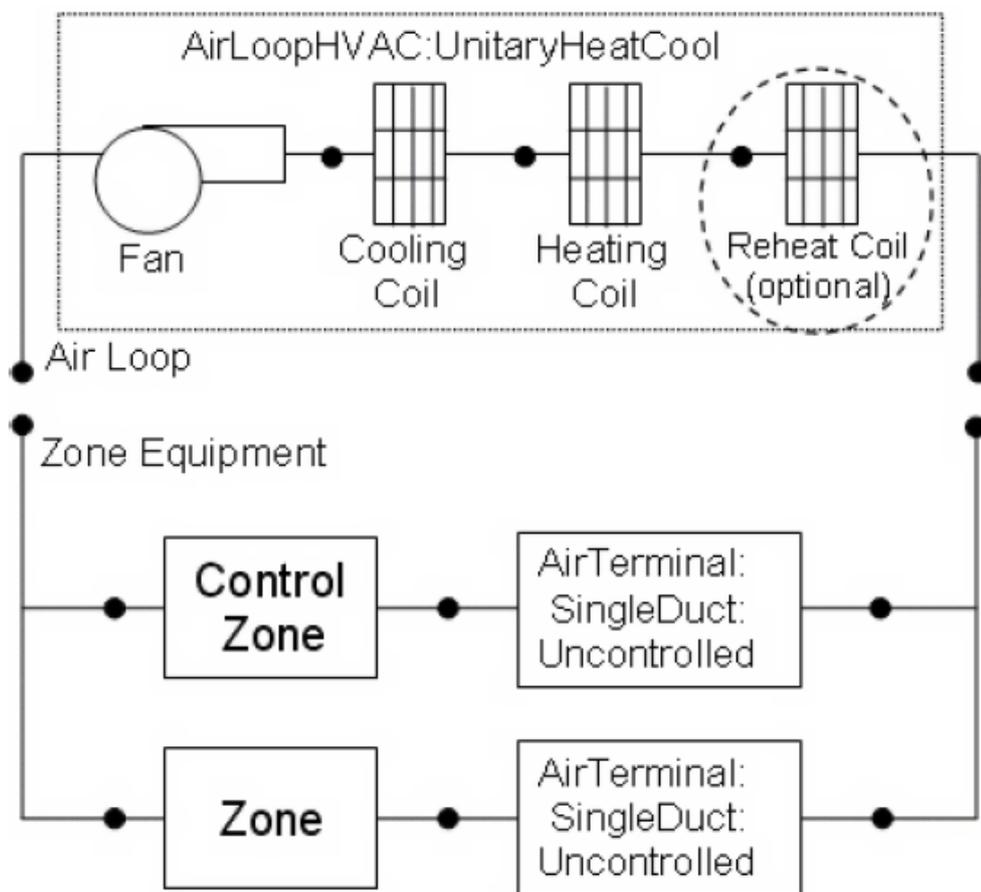


Figura 16.- Configuración de sistema mecánico de climatización aplicado sobre las zonas térmicas del modelo, adaptado (DOE, 2016).

## Capítulo 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Caracterización de los tipos de envolvente.

En base al modelo de vivienda seleccionado y las prácticas de construcción identificadas en la normativa de la construcción ecuatoriana, la tabla 5 presenta el coeficiente global de transmitancia térmica global para cada tipo de cerramiento en paredes y cubierta. Los coeficientes fueron obtenidos mediante el procedimiento de cálculo estándar ISO 6946. De los resultados se observa que el sistema de muros de mortero armado con alma de poliestireno en paredes y cubierta (ICF+Sc) obtuvo los menores valores de transmitancia, en consecuencia mayor resistencia térmica. Por otro lado los sistemas de pared Viga-Columna confinado de mampostería no reforzada (CM) y de muros portantes de hormigón armado (LBW) reportan valores U tres y seis veces mayores al sistema ICF. Se debe recordar que el cálculo de U para el sistema ICF incluye el efecto de puente térmico generado por la presencia de elementos de anclaje y sujeción metálicos, la presencia de dichos componentes incrementaron el coeficiente U en el 40% de su cálculo original.

Tabla 5.- Coeficientes U calculados mediante procedimiento estándar ISO 6946.

<b>Tipo de pared</b>	<b>Coeficiente U W/m<sup>2</sup> K</b>
Confinado de mampostería no reforzada (CM)	2.41
Muro portante de hormigón armado (LBW)	4.57
Muros de mortero armado con alma de poliestireno (ICF)	0.72
<b>Tipo de cubierta</b>	
Losa tipo a (Sa), particular al caso de pared CM	4.42
Losa tipo b (Sb), particular al caso de pared LBW	5.27
Losa tipo c (Sc), particular al caso de pared ICF	0.57
Teja metálica (Z).	7.14

En general, los coeficientes globales  $U$  calculados en la tabla 5 son relativamente altos respecto de los que se reportan en la literatura, por ejemplo, el código técnico de la edificación española recomienda la aplicación de cerramientos en paredes con valores  $U$  entre 0.57 hasta 0.94  $W/m^2K$  (Ministerio de Fomento, 2013), mientras que el manual técnico chileno sugiere implementar paredes con coeficientes desde 0.6 hasta 4.0  $W/m^2K$ , acorde a la zona climática (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Gobierno de Chile, 2006). En otros casos específicos de edificaciones residenciales en República de Korea y Reino Unido se han aplicado sistemas de pared con coeficientes  $U$  en el rango de 0.18 a 0.42  $W/m^2K$  (Lee, Kim, & Na, 2015; Monahan & Powell, 2011). En referencia a los niveles de aislamiento en cubiertas y techo las diferencias son más notorias. En resumen, en Ecuador actualmente no existen códigos o manuales oficiales que promuevan las buenas prácticas sobre el uso de aislamientos en la envolvente de una edificación.

En la siguiente sección se expondrán las demandas energéticas anuales, dónde para un mismo diseño de vivienda se probó seis tipos de construcción. Así que, tal como Utama y Gheewala concluyeron, se espera observar que la selección de los materiales en las etapas de diseño de una vivienda sea crucial para el desempeño a lo largo de su vida útil (Utama & Gheewala, 2008). Dicha conclusión converge a la deducción de otros autores, dónde se define al nivel de aislamiento en la envolvente de una edificación, como un factor crítico para su rendimiento energético, específicamente cuando se requiere alcanzar condiciones de habitabilidad o confort (G. Heravi & Qaemi, 2014).

### **Rendimiento Energético Anual**

La figura 17 muestra la demanda de energía anual producida por el consumo de electricidad por iluminación, electrodomésticos, y sistemas de climatización. Los resultados se estimaron configurando seis diferentes sistemas de envolvente (tabla 4), bajo el mismo modelo de vivienda (figura 5), considerando además las condiciones climáticas de Guayaquil. Los valores de consumo eléctrico se presentan en GJ y kWh, los mismos mostraron variaciones importantes de acuerdo al nivel de aislamiento de cada práctica constructiva. En resumen, el mejor rendimiento fue observado aplicando en paredes y techo el sistema de mortero armado con alma de poliestireno (ICF +Sc), con una demanda anual de 7.6 GJ o 211 MJ/m<sup>2</sup> (58.3 kWh/m<sup>2</sup>). Por lo contrario el sistema de muros portantes de hormigón armado en paredes, con teja metálica en cubierta (LBW +Z) obtuvo el consumo de energía más alto 26.3 GJ o 731 MJ/m<sup>2</sup> (202.7 kWh/m<sup>2</sup>).

Para el presente estudio, si establecemos el mejor rendimiento energético del sistema ICF+Sc como un caso de referencia, podemos indicar que la aplicación de las prácticas CM+Z y LBW +Z obtuvieron un gasto 3.5 veces mayor, mientras que los casos CM +Sa y

LBW +Sb requieren 2.5 y 3.2 veces la energía anual de la condición de referencia (ICF +Sc). Finalmente el nivel de aislamiento en techos mostró ser un factor determinante en el análisis, el caso ICF +Z que utiliza una teja metálica como material de cubierta, mostró un consumo de electricidad 3.1 veces el de ICF +Sc, que aplica una losa de concreto con alma de poliestireno. El caso CM +Z demandó 29.4% más electricidad que CM +Sa, mientras que la aplicación del sistema LBW +Z obtuvo un consumo mayor en 7.7% al producido por la configuración LBW +Sa.

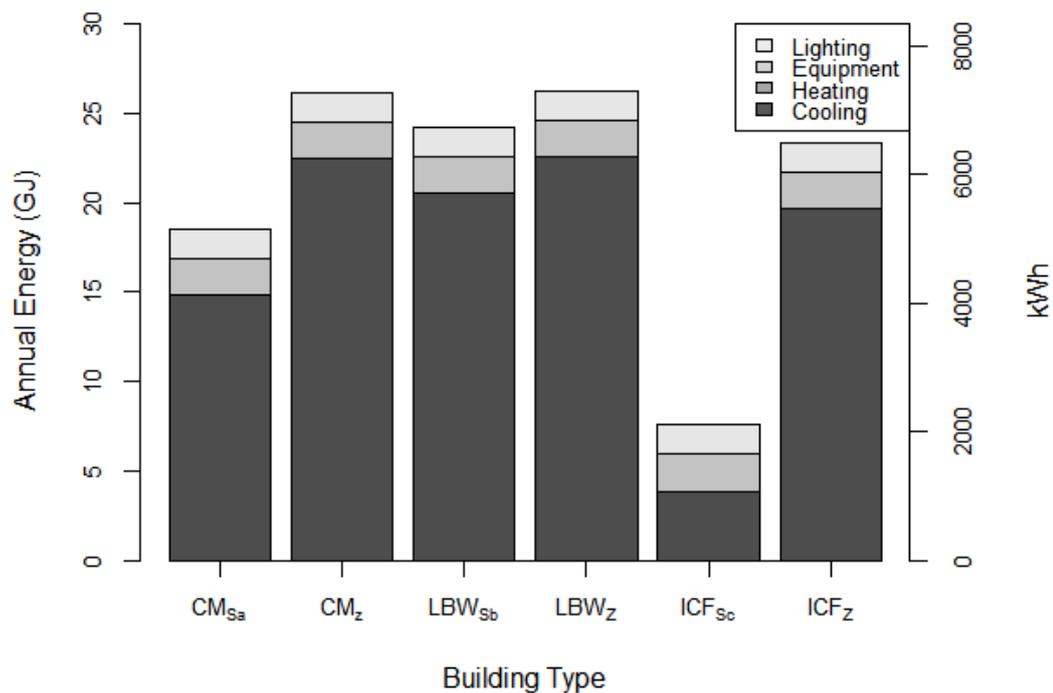


Figura 17.- Consumo de energía eléctrica anual bajo para los seis sistemas de envoltorio bajo estudio.

Otro aspecto importante que la figura 17 revela son las diferencias en el consumo eléctrico debido al tipo de uso. Se debe recordar que las cargas eléctricas y por iluminación fueron fijadas acorde a los valores razonables reportados en la bibliografía especializada (CIBSE, 2006; Gallardo et al., 2016; Miño-Rodríguez et al., 2016), mientras que los sistemas de climatización fueron programados para activarse acorde a la necesidad de confort por temperatura interior, en el rango 21°C - 24°C (Van Geem & Marceau, 2006). De las observaciones se puede decir que el sistema mecánico de climatización genera más del 80% de la carga eléctrica, en la mayor parte de los casos estudiados, exceptuando el caso ICF +Sc

dónde la contribución de la carga alcanzó un 51% del total anual. En contraste, un trabajo presentado por Utama y Gheewala señala que los equipos de climatización contribuyen en más del 40% a la demanda de electricidad en las edificaciones. En resumen, los resultados demuestran la importancia sobre los niveles de aislamiento en la envolvente de una edificación (Ramesh et al., 2010).

En términos de la demanda mensual, la figura 18 presenta el perfil de consumo eléctrico para cada configuración de envolvente propuesta en la tabla 4. Los resultados muestran un comportamiento notablemente favorable mediante el uso de un sistema de envolvente ICF +Sa, con una media mensual de 0.63 GJ (175.1 kWh) y una desviación estándar de 0.04 GJ (10.5 kWh), se contempla un patrón de consumo con fluctuaciones leves a lo largo del año, tabla 6. Por otro lado, el resto de casos muestran menos uniformidad en el consumo y valores de consumo mensual considerablemente altos, con un rango de medias desde 1.54 a 2.19 GJ (428.2 – 608.2 kWh), y desviaciones estándar de 0.12 hasta 0.18 GJ (33.8 – 49.7 kWh).

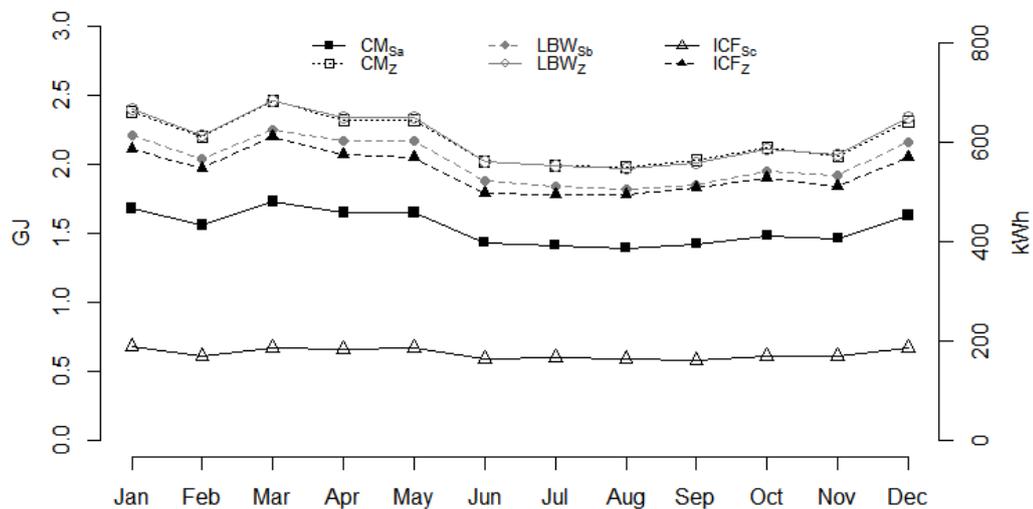


Figura 18.- Perfil de consumo de electricidad mensual para seis tipos de envolvente analizados.

Tabla 6.- Promedios de consumo y demanda pico mensual para cada caso de estudio.

Sistema de Envolverte	Consumo mensual en GJ		Demanda pico mensual en kW	
	Media (kWh)	Desv. Estd. (kWh)	Media	Desv. Estd.
MC +Sa	1.54 (428.2)	0.12 (33.9)	2.56	0.12
MC +Z	2.18 (606.3)	0.17 (46.8)	3.61	0.22
LBW +Sb	2.02 (561.7)	0.16 (45.2)	3.26	0.19
LBW +Z	2.19 (608.2)	0.18 (49.9)	3.33	0.20
ICF +Sc	0.63 (175.1)	0.04 (10.5)	1.27	0.03
ICF +Z	1.95 (540.7)	0.15 (40.5)	3.24	0.22

Respecto de la demanda pico mensual, la figura 19 ilustra los valores obtenidos para cada sistema de envolvente propuesto. La tabla 6 resume los valores promedios estimados y de forma similar al patrón de consumo mensual, la práctica de construcción ICF +Sa mostró un rendimiento considerablemente mejorado en comparación a las demás alternativas. Un aspecto remarcable es el hecho de que el uso de losas disminuye las demandas picos considerablemente, exceptuando el caso de LBW +Sb, dónde la mejora es mínima. Este hecho tiene un mejor impacto en climas templados o fríos (Macias et al., 2017), debido principalmente a la capacidad de la losa para almacenar la energía proveniente del sol durante el día, para ser liberada por la noche, efecto que se conoce como inercia térmica.

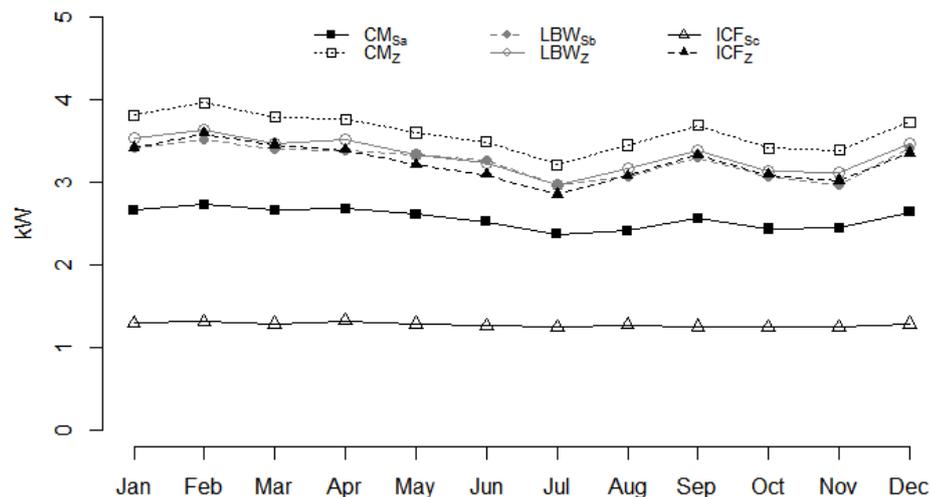


Figura 19.- Perfil de potencias pico de mensual en seis sistemas de envolvente analizadas.

Finalmente, la figura 20 muestra un diagrama de cajas con la distribución de los resultados obtenidos para el presente análisis en términos del consumo anual de energía secundaria (electricidad). Adicionalmente se muestra la distribución de resultados adquiridos de aquellos trabajos con información disponible en términos de demanda de energía secundaria, la bibliografía consultada fue presentada en las tablas 1 y 2 (Adalberth, 1997; Crespo, 2016; Paulsen & Sposto, 2013; Utama & Gheewala, 2008). Los datos ilustrados muestran que los valores estimados en el presente trabajo son relativamente altos respecto de la referencia bibliográfica, sin embargo este efecto pudo ser causado debido a la estricta zona de confort propuesta, especialmente porque el análisis es realizado sobre viviendas de tipo social. Además debe recordarse que las regulaciones para la construcción en otros países, tienen mayores exigencias respecto al nivel de aislamiento de la envolvente, aspecto que marcó notables diferencias en el rendimiento energético de la edificación, tal como se observa en la práctica de construcción ICF +Sc, dónde se obtuvo un valor de consumo incluso menor a la mayoría de los resultados reportados por trabajos previos. Para mayor detalle, los datos utilizados para generar la figura 20 se adjuntan a este documento.

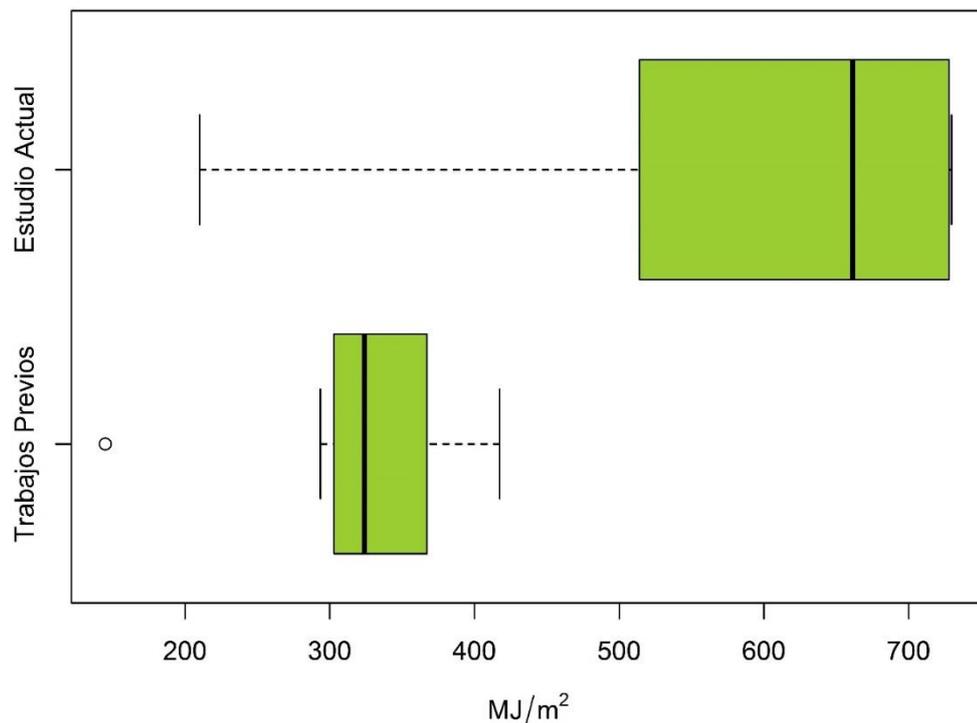


Figura 20.- Consumo anual de energía secundaria versus resultados reportados en la literatura especializada, ver tabla 1

### **Demanda de Energía Primaria.**

Finalmente, una medida referencial que permite validar los resultados del trabajo expuesto es la comparación directa de los resultados obtenidos contra los valores reportados como demanda de energía primaria durante el uso de la vivienda, datos extraídos de la literatura especializada presentada en las tablas 1 y 2. En primer lugar, para realizar el contraste es necesario estimar el gasto de energía operacional anual para los datos reportado en la literatura, normalmente basta con dividir el total para el número de años de vida útil de la vivienda (50 en este caso). Adicionalmente se deben extrapolar los consumos de energía de una fuente secundaria (electricidad) obtenidos en el presente trabajo, hacia su valor en términos de energía primaria. La tarea se la realizó usando el software SimaPro, mayores detalles de la metodología referirse a trabajo presentado por Macías y colaboradores (Macias et al., 2017). Es importante remarcar que el trabajo de transformar la fuente de energía eléctrica a una primaria ha considerado la composición de la matriz productiva actual en Ecuador (Macias et al., 2017).

La figura 21 ilustra mediante diagramas de caja los resultados de consumo de energía operacional primaria para todos los casos de estudio de la tabla 1 y los valores encontrados en el presente trabajo. En este caso todos los resultados extraídos de la bibliografía sólo consideraron residencias con superficies hasta 200 m<sup>2</sup>, las mismas que podrían categorizarse como construcciones residenciales similares. La figura muestra que la demanda anual de energía primaria varió desde 210.0 hasta 729.7 MJ/m<sup>2</sup> para los seis casos de estudio presentados, mientras que los resultados de los trabajos previos consultados se ubicaron en el rango de 117.4 a 1051.2 MJ/m<sup>2</sup>. En términos de gasto de energía operacional para el ciclo de vida útil, el presente análisis se ajustó entre 18.9 y 65.2 GJ/m<sup>2</sup>, de dónde se puede observar que la mayor parte de los resultados concuerdan con los rangos descritos para viviendas, específicamente el trabajo de Ramesh y sus colaboradores reporta variaciones de gasto de energía primaria desde 11.7 hasta 52.6 GJ/m<sup>2</sup>, para edificaciones de tipo residencial (Ramesh et al., 2010).

Desde la perspectiva de la vivienda de tipo social, sólo los resultados del sistema ICF +Sc se localizaron en el rango de resultados previos para viviendas de bajo presupuesto. Un ejemplo es el caso de estudio sobre un programa de viviendas sociales en Brasil, presentado por Paulsen y Sposto, dónde los autores cuantificaron una demanda total de energía de 11.6 GJ/m<sup>2</sup> por consumo de electricidad para una vivienda de 48 m<sup>2</sup> de construcción, resultado que muestra una marcada diferencia respecto del presente análisis, un posible motivo es la metodología de estimación, mientras el trabajo de Paulsen y Sposto se estima el consumo basado en datos estadísticos oficiales, el presente considera un sistema mecánico de climatización, activado según la necesidad de confort en la vivienda, hecho que sumado a

los bajos niveles de aislamiento en la envolvente, constituyen factores que producen una demanda de energía relativamente alta.

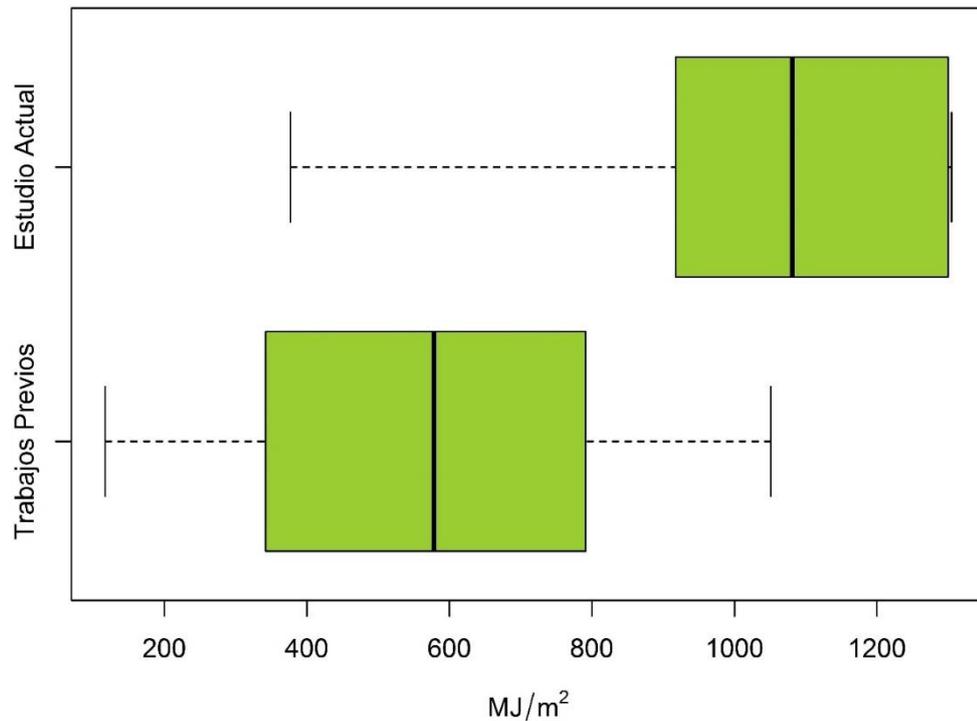


Figura 21.- Consumo de energía operacional total versus resultados reportados en la literatura especializada, ver tabla 1.

Los resultados han expuesto notables diferencias en el rendimiento energético para cada práctica de construcción propuesta. Con una demanda total (50 años) de energía primaria de  $18.9 \text{ GJ/m}^2$ , el sistema de muros de mortero armado con alma de poliestireno ICF +Sc alcanzó el mejor rendimiento, representando un contraste remarkable respecto de las demás alternativas, las cuales variaron su consumo de  $45.9 \text{ GJ/m}^2$  hasta  $65.2 \text{ GJ/m}^2$ . Las prácticas CM +Z y LBW +Z obtuvieron los rendimientos menos favorables. En consecuencia, potenciales ahorros energéticos han sido detectados (49-69%) mediante la aplicación de prácticas constructivas de mayor eficiencia. Así se constata una vez más, la proposición de que una apropiada selección de materiales en etapa de diseño de una vivienda es crucial para el desempeño a lo largo de su vida útil (G. Heravi & Qaemi, 2014; Utama & Gheewala, 2008).

Un producto adicional es presentado por la tabla 7, dónde se detalla la demanda de energía operacional separada por fuentes primarias, en base a la matriz productiva actual de Ecuador. De la tabla se observa que los combustibles fósiles componen el mayor aporte con un 57%, seguido del recurso hídrico con el 42%, mientras que las demás categorías tienen una contribución mínima. Recordando que Ecuador es un país que se encuentra experimentando cambios sustanciales en su matriz energética tradicional, se espera que estos resultados puedan ser considerados un insumo para la aplicación de futuras políticas energéticas y la planificación nacional.

Tabla 7.- Demanda de energía primaria según la categoría de fuente energética, adaptada a la matriz productiva ecuatoriana (Macias et al., 2017).

<b>Sistema de Envolverte</b>	<b>Demanda de Energía primaria por tipo de fuente (GJ)</b>				
	<b>Combustible Fósil</b>	<b>Renovable Biomasa</b>	<b>Renovable por Viento, Solar y Geotérmica</b>	<b>Hídrica</b>	<b>Total</b>
MC +Sa	939.17	14.62	0.31	697.80	1651.90
MC +Z	1330.07	20.70	0.44	988.23	2339.44
LBW +Sb	1233.62	19.20	0.40	916.56	2169.79
LBW +Z	1335.15	20.78	0.44	992.00	2348.37
ICF +Sc	385.82	6.01	0.13	286.66	678.62
ICF +Z	979.79	15.25	0.32	727.97	1723.33

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo entrega una estimación del consumo de energía en una vivienda de tipo social durante su etapa de ocupación. El modelo de la vivienda fue probado aplicando seis alternativas de envolvente, partiendo de la configuración de tres sistemas de pared, mampostería tradicional (CM), muros portantes de hormigón armado (LBW), y muros de mortero armado con alma de poliestireno (ICF), se aplicó dos tipos de techo en cada caso, en primer lugar una cubierta metálica muy común en la práctica de construcción social, y en segunda instancia una losa de concreto acorde a cada tipo de pared. Como resultado, mediante herramientas de simulación se valoró el desempeño energético de cada alternativa de envolvente, hallando notables diferencias tanto en los niveles de aislamiento de cada sistema, como en el rendimiento energético anual. Cabe indicar que todas las alternativas analizadas se encuentran vigentes en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC.

Otro objetivo alcanzado fue la definición de un modelo de vivienda social para el caso ecuatoriano. Dónde se estableció parámetros tales como, geometría, densidad de ocupación, cargas eléctricas e iluminación, además se estimó los coeficientes globales de transferencia de calor (valores U) para cerramientos típicos de paredes y techos, aplicados en la práctica de la construcción local. Resultado que representa un aporte a la comunidad técnica encargada del diseño de soluciones habitacionales o proyectos de construcción residencial, y otras, como aquellas encargadas en el dimensionamiento e implementación de sistemas mecánicos de climatización en proyectos de construcción.

Un análisis del consumo de electricidad anual muestra como los niveles de aislamiento en la envolvente de la vivienda inciden en la demanda de energía durante la ocupación de una vivienda, especialmente cuando se mejoran las condiciones en techos. Es importante recordar que el sistema constructivo compuesto de viga-columna confinada por mampostería no reforzada y el uso de teja metálica para cubierta, es la práctica de mayor aplicación a nivel nacional (CM +Z). Partiendo de este hecho, reducciones importantes fueron alcanzadas para un clima cálido y húmedo, como el de Guayaquil. Concretamente una casa de tipo social construida bajo un sistema envolvente tradicional para el Ecuador (CM +Z), puede consumir 3.5 veces la energía requerida para la misma vivienda construida bajo un sistema de paneles compuestos de mortero y alma de poliestireno en techos y paredes (ICF +Sc). Otro aspecto que demostró mejoras sustanciales es la aplicación de techos de concreto en lugar de teja metálica, reducciones desde 7.7% hasta 67.6% fueron alcanzadas si se utilizan cubiertas de concreto. En resumen las observaciones del presente análisis revelan potenciales ahorros energéticos en los programas habitacionales gubernamentales.

En términos de la demanda eléctrica debido al uso de sistemas mecánicos de climatización, su valor incrementa en proporción del coeficiente  $U$  característico de cada método de construcción. Es importante notar que la transmitancia térmica ( $U$ ) de los sistemas envolventes en el Ecuador son relativamente altas respecto a las prácticas recomendadas internacionalmente, para el caso del aislamiento en la cubierta es más notable. Recordando la relevante incidencia que tiene el sector de la construcción residencial sobre el consumo de electricidad nacional, se puede concluir que la práctica de la construcción en programas de índole social producen un rendimiento energético pobre, hecho que afecta directamente en la demanda nacional de electricidad, de dónde el 35.6% es generada por el sector de la construcción residencial.

Es importante recordar que a pesar de que los resultados han sido validados a través de comparación, el modelo aún requiere un contraste mediante datos reales del consumo energético en viviendas de tipo social, tanto para las etapas de construcción y uso. Esto es necesario para obtener mayor precisión en el modelo. Otro aspecto no considerado en el presente estudio, fue el consumo de gas y agua durante las etapas de ocupación de la vivienda. En términos de energía embebida, no fue posible cuantificar el consumo energético para el mantenimiento y demolición de la vivienda.

Para recapitular, Ecuador es un país que actualmente experimenta cambios medulares en su matriz energética tradicional, motivo por el cual se espera que los resultados del presente trabajo representen un aporte pertinente a instituciones gubernamentales, investigadores locales, profesionales de la construcción y usuarios, de manera que los datos puedan ser base en la aplicación de futuras políticas de eficiencia energética o programas de planificación energética nacional.

## Bibliografía

Adalberth, K. (1997). Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: Examples.

*Building and Environment*, 32(4), 321–329.

Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2015). *Reporte Estadístico ARCONEL*

2015 (*National Control Agency of Electricity, statistic reports*). Ecuador: ARCONEL.

Recuperado a partir de <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/reportes-estadisticos/>

Beltran, D., Miño-Rodríguez, I., Lobato, A., Gallardo, A., & Naranjo-Mendoza, C. (2015).

Thermal comfort performance within heritage buildings subject to a change of use.

Presentado en Proceedings of the Mediterranean Green Building and Renewable Energy Forum 2015, Florence, Italy.

Beltran, R. D., Castillo, J., Miño-Rodríguez, I., Naranjo-Mendoza, C., & Ávila, C. (2015).

Assessment of Different Natural Ventilation Strategies for an Educational Building on the Warm-Humid Climate of Guayaquil, Ecuador. En *ASME 2015 9th*

*International Conference on Energy Sustainability* (p. V002T17A006–V002T17A006).

American Society of Mechanical Engineers.

CIBSE, G. A. (2006). Environmental design.

Climate Data Center | [ashrae.org](http://www.ashrae.org). (s/f). Recuperado el 15 de julio de 2017, a partir de

<https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/climate-data-center>

Crespo, K. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida de una vivienda tipo media en la ciudad de Guayaquil*

(*Life Cycle Analysis of a house in Guayaquil City: Case study of a medium income family*).

Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.

- Dodoo, A., & Gustavsson, L. (2016). Energy use and overheating risk of Swedish multi-storey residential buildings under different climate scenarios. *Energy, 97*, 534–548.
- DOE, U. S. (2016). EnergyPlus Input output reference. *US Department of Energy*.
- El Telégrafo. (2017, abril 19). Energía: oferta y demanda en Ecuador. *El Telégrafo*.  
Recuperado a partir de <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/punto-de-vista/1/energia-oferta-y-demanda-en-ecuador>
- Gallardo, A., Beltran, D., Palme, M., & Villacreses, G. (2016). Analysis and Optimization of the Thermal Performance of Social Housing Construction Materials in Ecuador. En *International Conference on Passive and Low Energy Architecture* (pp. 360–366). Los Angeles.
- Hensen, J. L., & Lamberts, R. (2012). *Building performance simulation for design and operation*. Routledge.
- Heravi, G., Nafisi, T., & Mousavi, R. (2016). Evaluation of energy consumption during production and construction of concrete and steel frames of residential buildings. *Energy and Buildings, 130*, 244–252.
- Heravi, G., & Qaemi, M. (2014). Energy performance of buildings: The evaluation of design and construction measures concerning building energy efficiency in Iran. *Energy and Buildings, 75*, 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.035>
- Hittle, D. C. (1981). *Calculating building heating and cooling loads using the frequency response of multilayered slabs*. CONSTRUCTION ENGINEERING RESEARCH LAB (ARMY) CHAMPAIGN IL.
- Huovila, P. (2007). *Buildings and climate change: status, challenges, and opportunities*. UNEP/Earthprint.

- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2015). *Encuesta Anual de Edificaciones 2015 (Permisos de Construcción)* [Annual construction census 2015]. Ecuador.
- Interagua LTDA. (2015). Ajuste y Revisión del Plan Maestro de Agua Potable; Alcantarillado Sanitario y Alcantarillado Pluvial Tomos I y II. Recuperado a partir de <http://www.emapag-ep.gob.ec/emapag/wp-content/uploads/2015/06/C-IX-XIIPlanMaestro.pdf>
- ISO, B. E. (2007). 10456: 2007. *Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.*
- Jia Wen, T., Chin Siong, H., & Noor, Z. Z. (2015). Assessment of embodied energy and global warming potential of building construction using life cycle analysis approach: Case studies of residential buildings in Iskandar Malaysia. *Energy and Buildings*, 93, 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.002>
- Koesling, M., Ruge, G., Fystro, G., Torp, T., & Hansen, S. (2015). Embodied and operational energy in buildings on 20 Norwegian dairy farms - Introducing the building construction approach to agriculture. *Energy and Buildings*, 108, 330–345. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.012>
- Lee, S., Kim, S., & Na, Y. (2015). Comparative analysis of energy related performance and construction cost of the external walls in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings*, 99, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.058>
- Macias, J., Iturburu, L., Rodriguez, C., Agdas, D., Boero, A., & Soriano, G. (2017). Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador. *Energy and Buildings*, 151, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016>

- Macías, J., Soriano, G., Sánchez, H., & Canchingre, Y. (2015). Assessment of solar reflectance of roofing assemblies of dwellings in Guayaquil, Ecuador (Vol. 195, pp. 307–315). Presentado en WIT Transactions on Ecology and the Environment.
- MEER Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, & BID Banco Interamericano de Desarrollo. (2016). Plan Nacional de Eficiencia Energética del Ecuador 2016-2035 (PLANEE). Recuperado a partir de <http://www.energia.gob.ec/biblioteca/>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción. Vivienda de Hasta 2 Pisos con luces de hasta 5 m. (Ecuadorian Building Standard. Houses of up to two stories and 108 up to 5 meters spans)*. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI. Recuperado a partir de <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- Ministerio de Fomento. (2013). *Código técnico de Edificación, Documento Básico, Ahorro de energía (Building Technician Code, Elemental Document, Energy savings)*. Recuperado a partir de <http://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Gobierno de Chile. (2006). *Manual de Aplicación de la Reglamentación Térmica (Application Manual for Thermal Regulation)*. Recuperado a partir de [http://www.minvu.cl/opensite\\_20070417155724.aspx](http://www.minvu.cl/opensite_20070417155724.aspx)
- Miño-Rodríguez, I., Naranjo-Mendoza, C., & Korolija, I. (2016). Thermal Assessment of Low-Cost Rural Housing—A Case Study in the Ecuadorian Andes. *Buildings*, 6(3), 36.

- Monahan, J., & Powell, J. (2011). An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings*, *43*(1), 179–188.
- Paulsen, J. S., & Sposto, R. M. (2013). A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. *Energy and buildings*, *57*, 95–102.
- Peuportier, B. (2001). Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. *Energy and buildings*, *33*(5), 443–450.
- Praseeda, K. I., Reddy, B. V., & Mani, M. (2016). Embodied and operational energy of urban residential buildings in India. *Energy and Buildings*, *110*, 211–219.
- Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, *42*(10), 1592–1600.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>
- Remund, J., Kunz, S., METEOTEST, & of Energy, M. S. F. O. (2016). *METEONORM - Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education*.
- RENDICIÓN DE CUENTAS-MIDUVI. (2014). Recuperado el 12 de agosto de 2017, a partir de <http://transparencia.miduvi.gob.ec/>
- Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions, *39*(11), 1167–1174.
- Thormark, C. (2002). A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and environment*, *37*(4), 429–435.

- U.S. Department of Energy. (2016). *EnergyPlus Engineering Reference*. Recuperado a partir de [https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs\\_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf)
- U.S. Energy Information Administration. (2016, mayo). International Energy Outlook 2016. Recuperado a partir de [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
- Utama, A., & Gheewala, S. H. (2008). Life cycle energy of single landed houses in Indonesia. *Energy and Buildings*, *40*(10), 1911–1916.
- Van Geem, M. G., & Marceau, M. L. (2006). Comparison of the life cycle assessments of an insulating concrete form house and a wood frame house. *Journal of ASTM International*, *3*(9), 1–11.

## **A n e x o s**

## Anexo 1

Comparativo de Consumos de Energía Anual						
Energía Anual Secundaria (MJ/m <sup>2</sup> )	Area	Componentes		Comentarios	Autores, año	Ubicación
388,80	130	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Adalbert, 1997	Suecia
417,60	129	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Adalbert, 1997	Suecia
345,60	138	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Adalbert, 1997	Suecia
145,00	48	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input checked="" type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Tipo Social	Paulsen & Sposto 2013	Brasil
324,00	139	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Crespo 2016	Ecuador
293,64	55	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Tipo Social	Utama, 2008	Indonesia
312,27	55	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Tipo Social	Utama, 2008	Indonesia

## Anexo 2

Comparativo de Consumos de Energía Anual						
Energía Anual Primaria (MJ/m <sup>2</sup> )	Area	Componentes		Comentarios	Autores, año	Ubicación
936,00	130	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Adalbert, 1997	Suecia
982,80	129	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Adalbert, 1997	Suecia
874,80	138	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Adalbert, 1997	Suecia
232,00	48	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input checked="" type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Tipo Social	Paulsen & Sposto 2013	Brasil
583,20	139	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Crespo 2016	Ecuador
302,40	55	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Tipo Social	Utama, 2008	Indonesia
342,00	55	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Tipo Social	Utama, 2008	Indonesia

288,00	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Suecia
117,36	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Dinamarca
160,92	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Noruega
650,88	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Suecia
685,44	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Suecia
584,64	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Suecia
475,56	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Suecia
573,84	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Suecia
709,92	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Suecia
572,40	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Suecia

631,44	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Dinamarca
590,76	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Dinamarca
248,40	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Dinamarca
612,72	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Dinamarca
475,92	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Noruega
462,96	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Noruega
868,32	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Noruega
783,36	120	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Thormark, 2002	Noruega
936,00	130,00	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Suecia
982,80	129,00	<input checked="" type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input checked="" type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Suecia

874,80	138,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Suecia
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
543,60	110,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Noruega
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
428,40	110,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Noruega
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
478,80	110,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Noruega
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
608,40	110,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Noruega
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
234,00	110,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Noruega
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
676,80	266,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Suiza
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
543,60	266,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Suiza
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
309,60	266,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Suiza
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			
838,80	123,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos	<input type="checkbox"/> HVAC	Residencial	Ramesh, 2010	Australia
		<input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> Agua Caliente			

961,20	128,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Australia
1051,20	128,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Australia
432,00	120,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Suecia
302,40	50,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Indonesia
342,00	50,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Indonesia
1000,80	156,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Varios
799,20	156,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Varios
604,80	156,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Varios
334,80	156,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Varios
385,20	156,00	<input type="checkbox"/> Electrodomésticos <input type="checkbox"/> Cocción	<input type="checkbox"/> HVAC <input type="checkbox"/> Agua Caliente	Residencial	Ramesh, 2010	Varios

---

<b>255,60</b>	156,00	<input type="checkbox"/> <b>Electrodomésticos</b>	<input type="checkbox"/> <b>HVAC</b>	Residencial	Ramesh, 2010	Varios
		<input type="checkbox"/> <b>Cocción</b>	<input type="checkbox"/> <b>Agua Caliente</b>			

---