



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Análisis costo beneficio de la aplicación del Código de Edificación de Vivienda (CEV) con relación al impacto en emisiones indirectas por usos finales

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN ARQUITECTURA
En el campo de conocimiento de Tecnologías

PRESENTA:
Arq. Edlin Michelle Flores Alva

TUTOR/A PRINCIPAL
Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo
Facultad de Ingeniería

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
Dr. Carlos Chávez Baeza
UACM

Dra. Dolores Ana Flores Sandoval
Facultad de Arquitectura

Ciudad Universitaria, CD. MX., mayo 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Análisis costo beneficio de la aplicación del Código de Edificación de Vivienda (CEV) con relación al impacto en emisiones indirectas por usos finales

Tutora principal

Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo

Facultad de Ingeniería

Sinodales

Dr. Carlos Chávez Baeza

UACM

Dra. Dolores Ana Flores Sandoval

Facultad de Arquitectura

Mtro. Jorge Rangel Dávalos

Facultad de Arquitectura

Mtro. David Franco Martínez

Facultad de Estudios Superiores Aragón



Agradecimientos

A Dios. Gracias por cada día.

A mi familia. Gracias por existir.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme nuevamente un espacio en sus aulas; esta vez virtuales.

A la Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo por tus enseñanzas durante todo este proceso. Gracias por las pláticas, por el impulso, por tu paciencia y comprensión.

A la Dra. Ana Flores, al Dr. Carlos Chávez, al Mtro. Jorge Rangel y al Mtro. David Franco. Gracias por su apoyo individual y colectivo al unirse a este esfuerzo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para el desarrollo de esta investigación.

A Héctor Toledo por compartir todo dato posible sobre su casa. A la Mtra. Fabiola Rodiles y a la Dra. Ilse Villalobos por las explicaciones dentro y fuera de clase.

A todos los profesores, personal del Posgrado y compañeros que compartieron su conocimiento y soporte a lo largo de este camino.

Dedicatorias

A mi mamá y guerrera número uno, Edith. Gracias por el ejemplo de resiliencia que eres. Gracias por tu humor, por tus consejos, por tu paciencia y apoyo incondicional día y noche, en todos los aspectos de mi vida. Mi amor y eterna admiración para ti mamá.

A mi papá Ricardo, “corazón de león”. Pasa el tiempo y agradezco la vida me reafirme que siempre estás conmigo y me sostienes. Me sigues demostrando que no hay límites.

A Mónica, Ricardo y Edna; “curse the space that separates us from the people we love”. Gracias por ser ustedes hermanos, por la inspiración que significan sus vidas en la mía. Los adoro.

A Pablo, Dani y Richito, gracias chamacos por ayudarme con las líneas rojas, por esa alegría y vida que comparten incluso a la distancia. Los amo de aquí al infinito.

A Isabel y Manuel, gracias abuelitos por las comidas, por sus ánimos. A Nieves y Santos. A Wizzy y Anahí. Tías, tíos, primos, y amigos que me acompañan.

A las Wichas y a Gepe.

A Roni, que sigue siendo el mejor perro del mundo.

Contenido

Introducción.....	VII
Objetivos.....	VIII
Planteamiento del problema.....	X
Capítulo 1 Códigos de edificación en el sector residencial.....	1
1.1 Producción y consumo energético residencial en México.....	9
1.2 Costo de aplicación de lineamientos de eficiencia energética.....	12
1.3 Panoramas futuros: El ciclo de vida en la vivienda	14
Capítulo 2 Normatividad nacional y programas para la eficiencia energética.....	16
2.1 Organismos rectores.....	22
2.2 Normatividad	24
2.3 Código de Edificación de Vivienda (CEV)	25
2.3.1 <i>Capítulo 31. Sustentabilidad</i>	27
2.3.2 <i>Anexo 8. Especificaciones bioclimáticas para el consumo energético y emisiones de carbono recomendadas</i>	28
Capítulo 3 Mitigación de emisiones de GEI	30
3.1 Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INEGYCEI)..	36
3.2 Metodologías del cálculo de emisiones de CO ₂ eq. por sector.....	37
3.3 Uso final de energía eléctrica y térmica.....	45
Capítulo 4 Análisis energético y económico del Código de Edificación de Vivienda (CEV)	49
4.1. Descripción de caso base.....	50
4.1.1 Características geográficas y socioeconómicas.....	54
4.1.2 Equipamiento	55
4.2 Selección de lineamientos oficiales NOM-ENER	59
4.2.1 Criterios de selección.....	59
4.2.2 Parámetros por lineamiento.....	60
4.3 Análisis bioclimático.....	62
4.4 Análisis del consumo energético para el caso base.....	73
4.5 Escenarios CEV para vivienda multifamiliar vertical región templada	78
4.5.1 Cálculo del consumo energético por usos finales	79
4.5.2 Superficie construida y consumo energético	83
4.5.3 Cálculo de emisiones por consumo energético.....	83
4.6 Evaluación económica	87
4.6.1 Criterios	87

4.6.2 Costos de energía	88
4.6.3 Flujos de efectivo para el caso base y escenarios CEV.....	91
4.7 Resumen de resultados	96
4.7.1 Análisis bioclimático	96
4.7.2 Análisis del consumo energético para el caso base.....	97
4.7.3 Escenarios CEV para vivienda multifamiliar vertical región templada	97
4.7.4 Ahorro anual por operación.....	98
4.7.5 Emisiones por consumo energético.....	100
4.7.6 Evaluación económica	101
Capítulo 5 Tabulador CEV Vivienda Vertical.....	103
5.1 Discusión de resultados.....	103
5.1.1 Análisis bioclimático	103
5.1.2 Análisis del consumo energético para el caso base.....	105
5.1.3 Escenarios CEV para vivienda multifamiliar vertical región templada	106
5.1.4 Ahorro anual por operación.....	107
5.1.5 Emisiones por consumo energético.....	109
5.1.6 Evaluación económica	113
5.2 Conclusiones.....	115
5.2.1 Con relación a los objetivos	120
5.2.2 Con relación a la hipótesis	122
5.2.3 Futuras líneas de investigación.....	123
Referencias Bibliográficas.....	125
Bibliografía.....	134
Índice de Figuras.....	135
Índice de Gráficas	135
Índice de Tablas	136
Anexos	138
Anexo 1 Cálculo energético depto. tipo para caso base	139
Anexo 2 Cálculo energético depto. tipo para Escenario 01	141
Anexo 3 Cálculo energético depto. tipo para Escenario 02	143
Anexo 4 Equivalencias y referencias de equipos	144
Anexo 5 Evaluación económica con horizonte de proyecto de 150 meses.....	145
Anexo 6 Inversiones recurrentes (según vida útil de equipos y sistema)	146
Anexo 7 Evaluación económica con horizonte de proyecto de 240 meses y reinversiones	147

Acrónimos

AIE Agencia Internacional de Energía

BIEE Base de indicadores de eficiencia energética

CANADEVI Cámara Nacional de la industria y promoción de vivienda

CEV Código de Edificación de Vivienda

CONAVI Comisión Nacional de Vivienda

CONUEE Comisión Nacional para el uso eficiente de la energía

ENCEVI Encuesta Nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares

ENIGH Encuesta Nacional de ingreso y gasto de los hogares

GEI Gases de efecto invernadero

GIZ Sociedad alemana de cooperación internacional (por sus siglas en alemán)

ICC Consejo de Código Internacional (por sus siglas en inglés)

IECC Código Internacional de Conservación de Energía (por sus siglas en inglés)

INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

NAMA Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación

NOM-ENER Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética

ONNCCE Organismo Nacional de Certificación y Normalización de la Construcción y Edificación

PNNL Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (por sus siglas en inglés)

SEMARNAT Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SENER Secretaria de Energía

TREMA Tasa de rendimiento mínima atractiva

TRNSyS Programa de simulación de sistemas solares pasivos/diseño de sistemas activos

UNEP Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente

Introducción

En la arquitectura, como en diversas actividades económicas, desde hace medio siglo es clara la tendencia mundial hacia el desarrollo sostenible para regular repercusiones ambientales en beneficio de la calidad de vida. Esta línea de acción correctiva surge como una de diversas consecuencias de la dependencia global a los combustibles fósiles, y cobra mayor prominencia con la publicación del informe “Nuestro Futuro Común” de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED, por sus siglas en inglés), de las Naciones Unidas. Actualmente, a pesar de significativas ramificaciones hacia las energías renovables, atenuar tal dependencia persiste como un escenario futuro, pues poco más de un tercio de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en proyecciones hacia 2040 y 2070 dependen de tecnologías que no están disponibles comercialmente (International Energy Agency [IEA], 2020).

La política nacional de vivienda en México busca mejorar la calidad de las mismas, así como su entorno, tanto natural como urbano, y con ello atender el rezago habitacional del país (Ley de Vivienda, 2006), estimado en 8.5 millones de viviendas (CONAVI, 2021). Parte complementaria de esta legislación son las normas oficiales enfocadas a la eficiencia y ahorro de energía doméstica. Como componente inicial de tal enfoque, está el Código de Edificación de Vivienda (CEV), documento compilatorio de lineamientos de construcción mínimos establecidos por las “Normas Técnicas Complementarias (NTC Mexicanas) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 88 Normas Oficiales Mexicanas (NOM), 148 normas voluntarias nacionales e internacionales, así como la inclusión del primer Código de Conservación de Energía para las Edificaciones en México (Calidad y Sustentabilidad en la Edificación [CASEDI], 2016).

Formulado por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) en atención al artículo 72 de la Ley de Vivienda, el CEV es un código modelo voluntario que homologa aspectos básicos aplicables a tipologías habitacionales de todos los estratos socioeconómicos ([CONAVI, 2017a). Para su última edición publicada en 2017, la CONAVI designó al Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), como consultor para su actualización. Dentro de las nuevas disposiciones, destaca una línea base para el diseño bioclimático, consumos máximos de energía y emisiones de CO₂eq según el tipo de vivienda y condición climatológica en el territorio mexicano.

¿Y qué significa, en términos de emisiones por consumo de energía, que nuestro país cuente con un código de edificación?; ¿cuál sería el resultado operativo y económico de cuantificar su aplicación a una muestra del parque habitacional del centro del país? Analizar el impacto de la normatividad compilada en el CEV respecto al daño ambiental que mitiga, así como el costo asociado, aporta al sustento teórico de que tal inversión es provechosa tanto para usuarios como constructores. Lo anterior también permite estimar la efectividad de herramientas existentes para establecer estándares de desempeño en la vivienda, a la par que se fomenta la adaptación y adopción de un esquema normativo como lo es un código nacional.

El presente trabajo parte del análisis del CEV en lo concerniente a la eficiencia energética en la vivienda, indicándose en su capítulo 31, “Sustentabilidad”, así como en el Anexo 8 (“Especificaciones bioclimáticas para el consumo energético y emisiones de carbono recomendables”), dado que dichos apartados citan como propósito fundamental la reducción de emisiones de carbono. Para determinar la relación entre el costo y el beneficio implícito de lineamientos seleccionados, se consideran parámetros según la norma correspondiente,

consumos unitarios y totales de energía, factores de emisión según el tipo de energético, y su incidencia asociada a emisiones producidas durante cierto período operativo.

El consumo de energía operacional de la vivienda y el potencial de mitigación que representan las medidas de eficiencia energética existentes pareciera ser un tema ya estudiado en demasía. Sin embargo, su pertinencia continúa como parte de un proceso evolutivo en materia de análisis de políticas energéticas. Contribuir a la construcción de edificios que durante su vida útil permitan la conservación y el aprovechamiento de energía debe ser una constante en la práctica. Un camino claro, aunque aún complicado en su gestión y ejecución (principalmente en países en desarrollo) para favorecer tal contribución, son las legislaciones ambientales, certificaciones oficiales de producto y sistemas, así como los códigos de edificación.

Los esquemas actuales para el ahorro energético en nuestro país son voluntarios, y por lo mismo, su impacto suele ser limitado por desconocimiento, falta de financiamiento, o porque el beneficio ambiental proyectado es secundario en importancia para el promedio de usuarios. Tal panorama merma el interés hacia una aplicación a mayor escala. No obstante, esto puede argumentarse a través de un análisis que contribuya a puntualizar la viabilidad técnico-económica y la pertinencia social de la aplicación de lineamientos nacionales voluntarios existentes. Para ello, se requiere estudiar el impacto ambiental derivado del consumo de energía por usos finales en la vivienda, el gasto familiar generado, y con ello, las posibilidades de inversión en medidas de eficiencia según la normativa correspondiente.

Objetivos

Se establece entonces, que el objetivo general de este trabajo es *un análisis costo beneficio de la aplicación del Código de Edificación de Vivienda (CEV), con el fin de determinar su impacto en las emisiones indirectas por usos finales*. Esto, a su vez, se desglosa en los siguientes objetivos particulares:

- a) Analizar consumos de energía (eléctrica y gas LP) para estimar el comportamiento energético de la vivienda multifamiliar actual (interés social, multifamiliar vertical de cinco niveles, en Ciudad de México) como caso base.
- b) Identificar lineamientos oficiales referenciados en el CEV pertinentes a la eficiencia energética por usos finales en la vivienda para conformar dos escenarios de mejora apegados a la normatividad seleccionada (capítulo 31, “Eficiencia Energética”).
- c) Cuantificar el beneficio ambiental de integrar lineamientos identificados en el CEV a cada escenario de mejora, para determinar el potencial de mitigación de emisiones de CO₂eq de acuerdo con los límites recomendados por el código.
- d) Estimar el ahorro operativo y económico por consumo de energía, así como la inversión adicional ligada a la aplicación teórica de los lineamientos identificados, para definir los beneficios y costos asociados a cada escenario.

El análisis pretende contribuir a los antecedentes que sustentan la aplicación de lineamientos, especialmente cuando se trata de un instrumento de carácter nacional y oficial, lo cual en teoría implica obligatoriedad. Conocer su impacto en términos energéticos, ambientales

y económicos, acentúa su propósito al ofrecer una perspectiva medible, y supondría un efecto positivo para la regulación de emisiones de GEI en el sector residencial. Ahora bien, resulta necesario trazar su utilidad teórica a partir de la técnica, de modo que los beneficios equiparen e incluso superen una inversión adicional necesaria por parte de usuarios.

Dado que el alcance máximo en cuanto a tipología habitacional del CEV es de hasta cinco niveles, se propone un caso de estudio que responda a esta condición. Se plantea en la Ciudad de México por suponerse como la ciudad del país con la mayor probabilidad de adopción del esquema normativo en cuestión, además de predominar en la producción de vivienda vertical de interés social dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

De lo anterior parte la hipótesis siguiente: *Si se aplica el CEV en vivienda multifamiliar, es posible un costo adicional de hasta 30%¹, y al mismo tiempo, no exceder el límite de emisiones por consumo de energía térmica y eléctrica recomendado.*

Con esta investigación se abordan beneficios económicos y ambientales derivados de la eficiencia energética, vista como característica de un proceso, sistema o instalación cuando consume una cantidad menor a la media de energía requerida para una actividad (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE], 2017). Cuando el proceso se refiere al ciclo operativo de edificios, se obtiene al calcular consumos energéticos anuales bajo condiciones normales de funcionamiento y ocupación (California Energy Commission, 2021). También se conoce como consumo de energía específico (SEC, por sus siglas en inglés) o intensidad de uso de energía (EUI, por sus siglas en inglés), al dividir la energía consumida anualmente entre el metraje de superficie útil, expresado cualitativa o cuantitativamente con indicadores, índices o escalas (Energy Star, 2020).

El concepto de emisiones indirectas por usos finales al que se alude en el título del trabajo refiere solo a una fracción de las emisiones que componen la denominada “huella de carbono” en edificaciones. Además del dióxido de carbono, tal indicador considera otros GEI expresados conjuntamente en unidades de carbono equivalente (CO₂eq) (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2019). Por otro lado, se considera un planteamiento costo beneficio como una de las herramientas de evaluación económica habituales en distintas disciplinas para valorar proyectos o políticas que, bajo el enfoque metodológico de este trabajo, atienden acciones que de manera indirecta afectan el medio ambiente (Aldy et al., 2021; Belaïd et al., 2021; Mendoza, 1998; O’Mahony, 2021). Esto, para estimar si los beneficios cuantificables de la aplicación del CEV, según los términos establecidos, superan los costos o desventajas percibidas, y resulta en un propósito económicamente rentable.

Este trabajo se estructura en cinco capítulos. El capítulo uno ahonda en el estado del arte de los códigos de edificación como esquemas normativos, y el porqué de su relevancia técnica y económica. El capítulo dos aborda la intervención de la política nacional en la eficiencia energética en la vivienda, además de reflejar la desarticulación que puede existir entre lo normado y lo construido. El capítulo tres explora enfoques para estimar emisiones indirectas por consumo energético residencial. El capítulo cuatro contiene el desarrollo del análisis, los resultados y su respectiva discusión. Finalmente, el capítulo cinco ofrece la aportación comparativa del análisis, las conclusiones generales, así como puntuales en cuanto a hipótesis y objetivos planteados.

¹ Se considera 30% de costo adicional según montos paramétricos reportados del desempeño de la herramienta “Sisevive-Ecocasa”, 2016. Fuente: Vinculación de “Hipoteca Verde” del Infonavit con el Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde “Sisevive-Ecocasa”. Programa de Energía Sustentable en México, GIZ, 2017.

Planteamiento del problema

A pesar de constantes contribuciones en materia de normas para la eficiencia energética en edificios, en particular del género habitacional, el beneficio que suponen se ve restringido globalmente por ciertos factores ligados entre sí. Se suelen resumir en: una latente disparidad entre la adopción y adaptación de política pública, esfuerzos gubernamentales dispersos o viciados para regular procesos, y una tendencia a la sobreestimación de metas en la mitigación ambiental por asimetrías de datos disponibles (Belaïd et al., 2021; Evans et al., 2017; Singhal et al., 2022). Lo mismo se interpreta de la base de datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés). Desde 1999 recaba datos de políticas oficiales, códigos, y demás regulaciones técnicas enfocadas en el consumo energético de edificios y su relación con la superficie construida a nivel global, de la cual más del 80% corresponde a vivienda. Sus datos más recientes indican que para 2020, más de 110 países construyeron lo equivalente a 2.4 billones de m² sin considerar mejoras en su operación.

En México, el análisis y repercusión de lineamientos oficiales, en este caso bajo la configuración de un código de edificación, no es debidamente documentado. De ahí que el entendimiento de su utilidad proyectada, sus implicaciones en materia de costos, o la viabilidad de su integración dentro de un proceso de diseño convencional, quede a la deriva. Por lo mismo, de ser un elemento rector creado para fortalecer la política pública entorno a la operación de la vivienda, se convierte en el mejor de los casos en un aspecto de voluntad dentro de la práctica profesional.

El reporte anual “Balance Nacional de Energía” (Secretaría de Energía [SENER], 2021) indica que, en México, el sector residencial en conjunto con el comercial y público conforma el 17.56% del consumo final total de energéticos a nivel nacional. Más de la mitad del consumo final dentro de dicho sector se abastece de electricidad y el gas LP, con una participación de 31.40% y 30.8% respectivamente, lo cual refleja la habitual dependencia a combustibles fósiles (SENER, 2021). Incluso para aquellas viviendas que integran electrodomésticos ahorradores, persiste el reto de mantener un desempeño energético que parta del apego a la normativa vigente. Un esquema integral y oficial de eficiencia que cubra aspectos tanto de operación como de la envolvente arquitectónica y sus componentes resulta inusual aun en el panorama actual de la vivienda promedio; ni qué decir sobre el deterioro ambiental progresivo característico de la industria de la construcción.

Lo anterior está inmerso dentro de una problemática troncal en nuestro país ligada a las fuentes de energía provenientes de hidrocarburos. Datos históricos de organizaciones nacionales como es el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), mantienen que la electricidad es el principal energético que se consume en edificaciones, con el 89% destinado al servicio doméstico (FIDE, 2018). Y a pesar de que el petróleo como fuente de producción de energía ha disminuido drásticamente en la última década (por agotamiento de reservas, por variación de precios de extracción, y por la regulación de fuentes de energía limpia), su participación predomina dentro del balance energético nacional. A esto se suma el contraste entre la producción y el consumo final energético a nivel nacional; las cifras más actuales indican un déficit de 32% en la producción para cubrir la demanda (SENER, 2021).

El ahorro energético, finalidad primordial de programas e iniciativas que la política nacional de vivienda sustentable respalda, genera como efecto directo la mejora integral en calidad y estilo de vida de usuarios, además de moldear el costo por el uso de energéticos necesarios para actividades básicas en la vivienda como la cocción de alimentos,

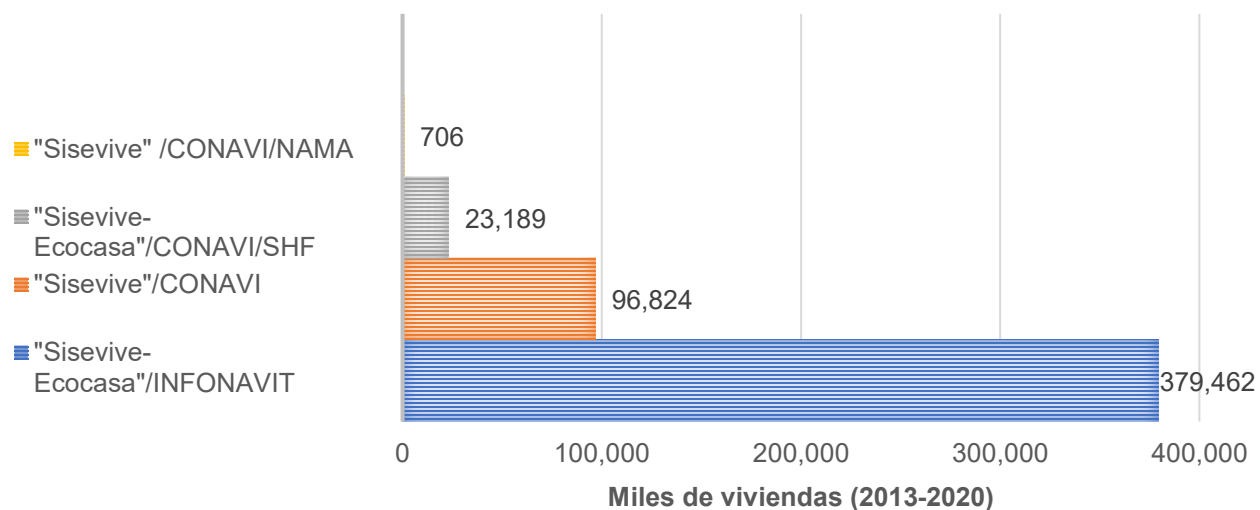
calentamiento de agua, iluminación, y electrodomésticos (Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, 2015). La reducción de emisiones de GEI producto de la energía racionada, lo cual podría argumentarse que en la escala global de impactos quizá no parezca relevante¹.

Si bien el subsector residencial de manera aislada no representa una contribución desmedida de emisiones nacionales netas, en especial si se compara con el sector de la industria o el transporte, su impacto constante en la demanda de producción de energía nacional sí resulta significativo cuando se consideran acciones de mitigación durante la etapa operativa de viviendas a corto y mediano plazo (Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo, 2016). Esto a su vez repercute en las emisiones nacionales por la producción de electricidad y calor, que en 2018 representaron el 34.83% del total de emisiones registradas, y para el año 2020, el 36.06% (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2022).

Además, prevalece la producción de vivienda en favor del interés económico reflejado en cantidad de proyectos, mas no en la calidad de estos. En México, durante el periodo entre 2013 y 2020, se tenía el registro a nivel nacional de 500,181 viviendas nuevas que cumplen con criterios de eficiencia energética, esto de acuerdo con cifras del Registro Único de Vivienda (RUV). La eficiencia energética referida en tales viviendas responde a parámetros establecidos por programas de iniciativa híbrida y gubernamentales gestionados por INFONAVIT, CONAVI y la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF), donde la verificación se realiza usualmente al concluir la construcción. De tal cifra, el sistema "Sisevive-Ecocasa", solo como complemento a esquemas de financiamiento operados por INFONAVIT, tuvo mayor presencia a nivel nacional, con un 75.86% (ver Gráfica 1).

Gráfica 1

Producción de vivienda sustentable en México



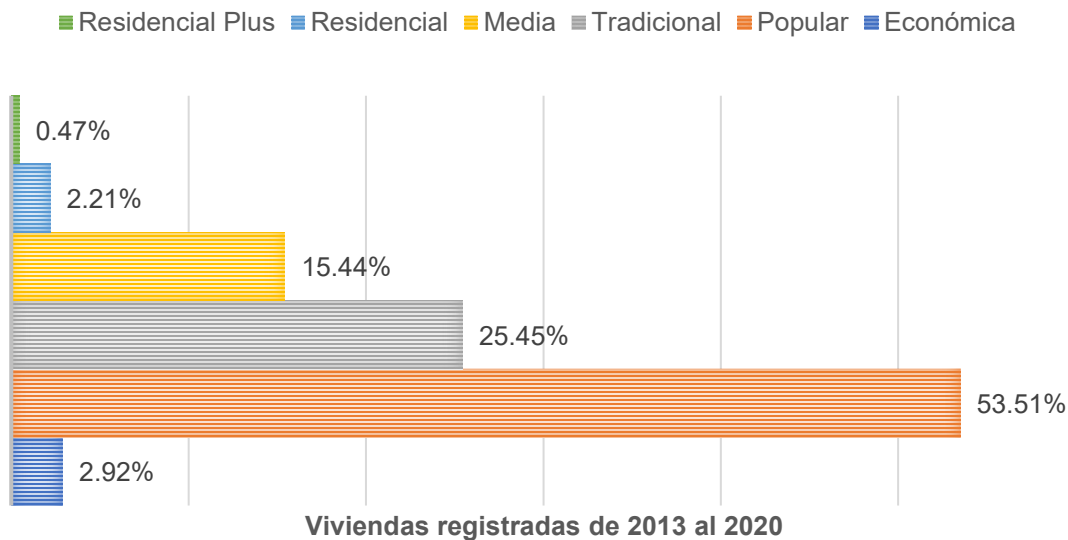
Nota. Cifras indicativas de viviendas subsidiadas. Elaboración propia con información del RUV actualizada al año 2020.

¹ Según datos del "Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero" (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, [SEMARNAT] 2018) en 2013 las emisiones de GEI del sector residencial y comercial en conjunto representaron el 3.9% del total nacional. Para el último año actualizado (2020) esta cifra aumentó a 4.97%.

De modo que, por lo que se refiere a la vivienda nueva bajo tales esquemas, estas representan apenas el 8% con respecto a la producción nacional durante el mismo periodo, estimada en 6,148,410 viviendas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020b). Si se consideran las viviendas existentes remodeladas para ser verificadas como sustentables según el RUV, tal porcentaje sube a 32%. En cuanto a tipología, la vivienda horizontal prevalece en el país, mientras que la vivienda vertical representa el 25.60%. Esta última se concentra en la Ciudad de México, donde representa el 99.51% de producción, y en siete estados de la república donde representa más del 50% del inventario de vivienda nueva. Asimismo, dentro de las clasificaciones por estrato socioeconómico, las cifras del RUV señalan que más de la mitad de vivienda construida pertenece a la categoría popular (ver Gráfica 2), donde el 44.30% que se produce actualmente comprende un tamaño de vivienda menor a 60.00 m².

Gráfica 2

Clasificación socioeconómica de la producción nacional de vivienda en México



Nota. Los porcentajes conforman un total nacional de 1,859,837 viviendas registradas como producción en el RUV durante el periodo indicado. Elaboración propia con información del RUV actualizada al año 2020.

Nuestro país es el segundo mercado de construcción más grande de América Latina, con un crecimiento estimado para la edificación residencial de 2.6 millones de unidades nuevas, traducido en \$286 mil millones de inversión solo entre 2018 y 2025 (World Resources Institute [WRI], 2020). Tal crecimiento actualmente debe considerar el desequilibrio económico que originó la situación de pandemia mundial dentro del sector de la construcción y el resto de las actividades productivas. La demanda de vivienda nueva, que para 2021 se estimó en 805,420 unidades, se recuperó después de una disminución de 28% con relación a niveles de 2018. Se sumó a esto una variación anual en los precios de insumos en la industria de hasta 17%, lo cual incrementó a su vez el costo de la vivienda económica a nivel nacional en promedio 8.6% anual para 2021 (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción [CMIC], 2022).

En paralelo, las proyecciones del INEGI más actuales para México (que consideran como base 126,014,024 millones de habitantes al 2020) pintan un horizonte que rebasa los 150 millones de habitantes para el año 2050. Naturalmente esto implica un aumento en la demanda de energía, lo cual debería influir en la producción de vivienda de acuerdo con la normativa

vigente. También debiera tener un rol en la intervención de vivienda existente para cubrir la necesidad del 71.6% a nivel nacional que pueden atender su condición de rezago² mediante mejoras que no involucran remodelaciones o reconstrucción (CONAVI, 2021), y en el proceso, mitigar el inevitable deterioro ambiental que su vida útil genera.

Una medida de mitigación que indudablemente ha presentado un aumento gradual en el nivel de eficiencia dentro del consumo energético residencial es la implementación aislada del ahorro energético por medio de productos certificados en su operación por las NOM. Los datos de la Encuesta Nacional sobre el Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) publicada en 2018, indican que los electrodomésticos con mayor incidencia de operación bajo norma oficial de eficiencia energética (NOM-ENER) son refrigeradores (72%), lavadoras (65%), aire acondicionado (56%), calentadores (53%) y estufas (43%) (INEGI, 2018).

Sin embargo, desde una perspectiva integral, los lineamientos que generan un potencial de ahorro energético en la vivienda, por ser en su mayoría voluntarios, se perciben como un costo adicional que no justifica los beneficios a futuro. En cuanto a los programas e iniciativas que existen actualmente, que no presenten una homologación influye en su alcance; aun y cuando los fondos monetarios nacionales e internacionales se facilitaran, las barreras institucionales limitan el acceso a los mismos.

En diversos países del mundo, la existencia de un código de edificación y de energía supone un sistema de certificación similar a los de verificación de organizaciones mundiales como LEED, BREEAM (creado en 1990 en Reino Unido y considerado el primer sistema de certificación de este tipo en el mundo), CASBEE, Energy Star, el Sistema Nacional de Clasificación del Medio Ambiente Construido en Australia (NABERS, por sus siglas en inglés), y EDGE, por mencionar los que presentan mayor expansión mundial (Rhem y Ade, 2020). La particularidad entre un sistema y otro recae en que los esquemas de certificación se perciben como un lujo que pudiera contribuir a la plusvalía del inmueble que se certifique. Por su parte, un código emitido por un organismo gubernamental teóricamente implica obligatoriedad por su contenido, normando lo mínimo, en este caso en términos de ahorro y eficiencia.

El CEV ha sido desarrollado por la CONAVI desde el 2007, y a lo largo de tres ediciones ha buscado englobar la normativa que concierne al proyecto arquitectónico y ejecutivo, sumando ahora el énfasis en la eficiencia energética del mismo. Como código modelo voluntario, su aplicación puede ocurrir de manera particular en una unidad de vivienda, o en desarrollos habitacionales, abarcando las tipologías de viviendas adosadas, aisladas o verticales de máximo cinco niveles sin contar planta baja. La importancia de su aplicación en zonas sobrepobladas como la región metropolitana del Valle de México es un factor de cambio para que la expansión hacia el que indudablemente se dirige el centro del país nos muestre una cara distinta en materia de producción de vivienda y el comportamiento energético de esta.

Para sustentar tal postura, un punto de interés resulta de adentrarse a la problemática ligada a la documentación actual, en su mayoría segregada, acerca del impacto con relación a las emisiones indirectas durante la etapa operativa o vida útil de inmuebles como producto de la adopción de instrumentos normativos en nuestro país. Lo anterior comprende la revisión tanto de las pautas que han dado resultado, como de aquellas que se han reformado para detectar nuevas necesidades de consumo poblacional respecto al ahorro económico y energético actual y a futuro.

² Las cifras más recientes referentes al rezago habitacional reportan 8.5 millones de viviendas en el país, de las cuales el 8.2% se concentran tan sólo en la Ciudad de México (CONAVI, 2021).

Capítulo 1 Códigos de edificación en el sector residencial

Un código de edificación estipula aspectos mínimos de seguridad, de calidad, y adicionales, como lo es la sustentabilidad, para la construcción de edificios según su tipología (Federal Emergency Management Agency [FEMA], 2021; IEA, 2019). Cada estado, país o región adopta su propio código, aunque en algunos casos ciertos organismos internacionales imponen recomendaciones generales a las cuales se debe adherir cualquier normativa local, como sucede con la Unión Europea (Schwarz et al., 2020).

Se identifican en este trabajo dos denominaciones de códigos a nivel mundial; los códigos de construcción modelo y los prescriptivos. Los prescriptivos se entienden como una lista de verificación obligada que no permite cambios en sus procesos, incluso si se comprueba que una solución o proceso no enlistado supera los niveles de cumplimiento requeridos (FEMA, 2021). Esto limita la integración de nuevos métodos por estar fuera de norma, razón por la cual algunos investigadores consideran obsoleto tal enfoque (Chen, 2021; Feng et al., 2017; Yu et al., 2019). Ejemplos de códigos prescriptivos son las Normas Básicas de la Edificación españolas, o las normas expedidas por los Comités Técnicos de Normalización (CTN) de la Asociación Española de Normalización (UNE, antes llamada AENOR).

Los códigos modelo se han impulsado desde principios del siglo XX en países con un mayor control legal local para la industria de la construcción, sobre todo al incorporar aspectos de eficiencia y ahorro de energía (Building Energy Codes Program, 2016). Tienen mejor aceptación mundial que los prescriptivos porque se adaptan a las condiciones locales al establecer criterios específicos de seguridad, asimismo analizar los impactos ambientales, económicos y sociales de edificaciones (Allard et al., 2021; Schwarz et al., 2020). Una autoridad local podría optar por utilizar códigos modelo ya que se adoptan (se aceptan sin modificaciones) o se adaptan (se modifican) para implementarse (McFarlane et al., 2021). Algunos ejemplos de códigos modelo son el Código Técnico de la Edificación de España, los Euro códigos o el Código Internacional de Conservación de Energía (IECC, por sus siglas en inglés).

El enfoque de cumplimiento de un código modelo se basa en el desempeño energético de un edificio, en algunos países anglosajones referido como “performance-based approach” (International Code Council [ICC], s.f.). Permite una flexibilidad proyectada mediante herramientas analíticas, o bien a través de programas de modelado energético, debido a la variedad de soluciones que pueden existir para lograr un indicador global de desempeño. Por otro lado, el enfoque prescriptivo, que ha sido el punto de partida para los códigos modelo, si bien hoy en día también demanda recursos analíticos y simuladores para agilizar procesos y tiempos de obra, basa su cumplimiento en cubrir una serie de pasos para alcanzar determinado nivel de desempeño en un edificio o en alguno de sus componentes (ICC Performance Code for buildings and facilities [ICCPC], 2018).

Ambos enfoques se valen de parámetros para el cumplimiento que en la literatura suelen diferenciarse entre absolutos o relativos (Foroushani et al., 2022). Si un código modelo indica porcentajes mínimos de eficiencia para un sistema o componente de un edificio, o bien, emplea el esquema de “edificio de referencia” para comparar tal porcentaje, se trata de un parámetro relativo. Si ofrece un indicador global, como son los límites de consumo por tipo de energético según la superficie construida, se refiere a un parámetro absoluto. En el ámbito gubernamental es más práctico interpretar porcentajes que indicadores absolutos, ya que estos

últimos suelen adaptarse a distintas unidades de análisis según la jurisdicción de un país. Hoy son comunes las combinaciones entre parámetros para fomentar el cumplimiento, por lo cual resulta inusual que un código actualizado sea puramente prescriptivo.

Cuando se aceptan recomendaciones basadas en lo mínimo permisible y bajo condiciones locales para una tipología arquitectónica, se habla de una adaptación técnica de código modelo (Allard et al., 2021). Esto, con relación a la eficiencia energética de la vivienda, suele incluir la envolvente térmica, electrodomésticos, sistemas y demás equipamiento pertinente a la etapa operativa. La adopción, por su parte, implica que un código se incorpore a la normativa local y adquiera carácter obligatorio; si existiera un instrumento normativo similar, lo ideal es considerar el más restrictivo (Armstrong et al., 2017). Tanto en la adopción como en la adaptación es clave la revisión constante mediante estudios de evaluación del cumplimiento, análisis económicos y ambientales, para así identificar mejoras respecto a ediciones previas de códigos.

Ahora bien, aunque están compuestos usualmente por disposiciones obligatorias, la ruta de cumplimiento de un código modelo suele ser voluntaria. De 80 países que cuentan con algún esquema de código de construcción, en 43 de ellos es obligatorio (IEA, 2021). Por lo cual, si bien existen diversas medidas de ahorro técnicamente factibles y rentables, ser parte de un código no vislumbra su implementación a la escala esperada en el sector residencial. Algunos autores explican esta situación con la llamada “brecha energética” (Gerarden et al., 2017; Giraudet, 2020; McCoy y Kotsch, 2018). Fallas del mercado por la volatilidad en los precios de energéticos, la influencia del comportamiento humano en el desempeño energético de la vivienda, y errores en mediciones o modelos de cálculo (ya sean manuales o por medio de software) son las principales conjeturas identificadas. El contraste entre lo regulado y el consumo real refleja un potencial económico no explotado con respecto a la eficiencia energética en la vivienda durante su etapa operativa.

Ligado al tema de la operación de la vivienda está el impacto en emisiones que genera. Del 30% de emisiones de GEI por consumo de energía global en edificios, el 27% corresponde a la operación de edificios, y de tal porcentaje, el 17% atañe a energía operativa residencial, compuesta por 6% de emisiones directas y 11% de emisiones indirectas (IEA, 2021). En este sentido, la industria de la construcción oferta oportunidades para la mitigación menos costosas y con un horizonte más alcanzable que otros sectores productivos (como el transporte, por ejemplo). Esto, además de favorecer el ahorro de recursos al cumplir compromisos globales contra el cambio climático (Pacific Northwest National Laboratory [PNNL], 2021). Lo anterior se entrelaza al considerar las repercusiones económicas y ambientales derivadas de la demanda global de energía, la cual se mantiene al alza con una tasa que supera su producción (IEA, 2020).

Los marcos normativos impulsados por autoridades mundiales y locales, así como por iniciativa de instituciones como la Corporación Financiera Internacional (IFC, por sus siglas en inglés) o el Consejo de Código Internacional (ICC, por sus siglas en inglés), este último fundado en 1994 y considerado una referencia mundial de códigos modelo, estándares, evaluación etc., influyen en gran medida en el avance o estancamiento de las mejoras en eficiencia energética e innovaciones tecnológicas. No es novedad, sin embargo, que continúen los esfuerzos para fomentar medidas de eficiencia en el consumo de energía como solución inicial antes que cualquier otra estrategia o tecnología en la industria de la construcción.

Reducir emisiones, ofrecer mayor seguridad energética, menor presión sobre la economía, y generar mayor confiabilidad de sistemas de energía, son solo algunos de los beneficios de la eficiencia energética dentro de las agendas urbanas (World Green Building Council, 2019). Similar a la taxonomía de códigos, la eficiencia energética con relación a la demanda de energía del usuario se podría diferenciar en recomendaciones prescriptivas y operativas (Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, 2015). Las primeras refieren a especificaciones técnicas con respecto al funcionamiento de un aparato o sistema, mientras que las operativas determinan límites o indicadores. Para estas últimas, un ejemplo es el “Umbral Máximo de consumo energético (CE)” mencionado en el CEV. Sean prescriptivas u operativas, estas debieran ir de la mano con el esquema normativo y las costumbres de uso de energía doméstica de un país.

Pese a todas sus virtudes, conviene recordar una desventaja derivada de la eficiencia energética, definida como el “efecto rebote”. Esto es la tendencia de consumir más energía debido a un beneficio económico, identificado especialmente en la reducción de consumos del sector residencial después de la implementación de programas o esquemas regulatorios (Baležentis et al., 2021; Fowlie et al., 2018). Aunque se argumenta que el tamaño del efecto es marginal (su magnitud cambia de un sector y de un país a otro, por lo que no siempre supone un efecto desfavorable), la idea de fondo es que las ganancias en eficiencia reducen el precio unitario real de servicios energéticos y, por lo tanto, el consumo aumentará y compensará parcialmente un ahorro inicial del uso de fuentes primarias (Baležentis et al., 2021).

Las experiencias internacionales sostienen que, para implementar efectivamente una política energética en conjunto con programas enfocados al ahorro de energía, se requiere de acciones constantes y a largo plazo. Algunas de las iniciativas en países como Canadá, EUA y China refieren a la compra de equipos según su consumo energético, impulsar esquemas financieros para renovables, y la revisión constante de marcos legales aplicables (Building Energy Codes Program, 2016). Justo desde el punto de vista normativo, los códigos de edificación, en este caso, aquellos que incluyen o hacen referencia al nivel de desempeño energético residencial, son la herramienta que facilita una referencia de beneficios que pueden ser medibles para entender si su utilidad e impacto es trascendente o no.

En España, por ejemplo, el Código Técnico de la Edificación (CTE) atiende aspectos obligatorios mínimos de eficiencia energética. Desde 2013 indica un límite del consumo de energía primaria no renovable, y ajusta su metodología para calcular el rendimiento energético según la normativa europea. Una de las percepciones más optimistas sobre el impacto del código español es el estudio de Fernández-Membrive y otros (2015), quienes emplearon la herramienta de cálculo oficial pública para evaluar el ahorro de energía al implementar el código. Estimaron emisiones hasta 82% menor a lo habitual en edificios multifamiliares construidos entre 1982 y 2007, lo cual elevó 11% el costo original de tales viviendas.

El CTE también estableció un rango de calificación (Certificado de Eficiencia Energética [CEE]) obligatorio para inmuebles en venta o renta. Esto, además de permitir el monitoreo del desempeño, impactó el valor de inmuebles con incrementos estimados de 10 al 12% sobre su valor original (Tinsa, 2018). Sin embargo, como ocurre en nuestro país, la obligatoriedad no supone un cambio inmediato en el paradigma de la vivienda sustentable. Así lo refleja el 79% del parque habitacional nacional registrado, donde las calificaciones más comunes del CEE son las últimas del rango. Las calificaciones más altas del rango, por su parte, equivalen a la clasificación más exigente (energía cero) que otorga la certificación alemana Passivehaus (Borralló-Jiménez et al., 2022).

En Estados Unidos se aprecia mayor aceptación sobre la utilidad de esquemas normativos voluntarios. Esto, por tener como referentes a la “Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado” (ASHRAE, por sus siglas en inglés), creada en Nueva York hace más de cien años. Han formado una base metodológica para evaluar el comportamiento energético de edificios al considerar el efecto en el ambiente interior desde la perspectiva tanto de ocupantes (metabólico) como externas. Así queda plasmado en dos de sus publicaciones dedicadas al sector residencial, "Standard 62.2 ventilation and acceptable indoor quality in low-rise residential buildings", y "Standard 55 Thermal environmental conditions for human occupancy". En cierta medida, se han cuestionado este último por sus limitaciones por enfocarse a requerimientos de sistemas de climatización activa, razón por la cual derivaciones actuales (2020) del estándar “ANSI-ASHRAE 55”, considera edificios con sistemas mecánicos que no estén en uso.

Con el aumento de posibilidades en la adopción y adaptación, la práctica de integrar códigos y estándares oficiales a softwares de modelado basados en el desempeño energético de la vivienda se vuelve más común¹. Climate Consultant, por ejemplo, desarrollado por la Universidad de California, incluye en sus simulaciones tres estándares de la ASHRAE, además del Código de Energía de California. La paquetería digital REScheck se ocupa del cumplimiento del IECC en edificios residenciales. Por su parte, la plataforma Cove.tool permite desarrollar escenarios con base en algunos códigos estatales estadounidenses; incluso ha integrado los códigos de Canadá, Australia y Japón, pero solo para edificios comerciales. Las “tarjetas de puntuación estatales”, elaboradas por el Consejo Estadounidense para una Economía Eficiente en Energía (ACEEE, por sus siglas en inglés) son otro recurso de control para estudios que abordan ahorros energéticos producto del rigor en la adopción y adaptación de códigos en EUA (Kellogg y La Cumbre-Gibbs, 2022).

El Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (PNNL, por sus siglas en inglés), es una de las entidades clave para estudiar los códigos y estándares de energía estadounidenses. Con base en la metodología² desarrollada por el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés), reporta los efectos de versiones actuales contra previas ("code to code savings") del IECC para los sectores comercial y residencial de acuerdo con las zonas climáticas identificadas en EUA. Según lo propuesto para el siguiente ciclo (2024), se prevén ahorros en energía residencial que evitarán 6% de emisiones nacionales con respecto a la edición del 2021, misma que reportó 8.66% menos emisiones que la versión de 2018. Los ahorros implican un costo adicional de \$2,732.00 USD por vivienda con respecto a cifras de 2018, y un periodo simple de recuperación de 4 años en promedio para todas las zonas climáticas. Tal inversión adicional equivale al 0.6% del precio promedio nacional de \$391,900.00 USD por vivienda en 2021.

¹ A propósito del modelado energético, es natural cierto grado de disparidad en resultados una vez que se construye un espacio simulado. Influyen factores como el nivel de capacitación en el manejo del software, o la incompatibilidad de parámetros analizados si el código en cuestión no está integrado aún. En ocasiones, esto conduce a emplear diversos métodos teóricos para cotejar resultados (lo cual implica más tiempo), o bien, a la adopción de recursos menos adaptables (lo cual suele ser más costoso) siendo característico el caso de los sistemas de simulación desarrollado para certificaciones como LEED, Energy Star, BREEAM, etc.

² Comprende la actualización del código, seguido de un periodo de adopción estatal o local. Posteriormente se analiza el potencial de ahorro en términos de intensidad energética (EUI, por sus siglas en inglés), se contrasta con los ahorros reales medidos en campo, se consideran ahorros y costos incrementales, y finalmente se tabulan ahorros a lo largo de un periodo de análisis, que suele ser quinquenal y acumulativo a 30 años.

Uno de los dos prototipos residenciales que el PNNL considera en sus análisis para estudiar el desempeño de códigos es el de departamentos multifamiliares de hasta tres niveles. A propósito, los estándares residenciales existentes relacionados con la eficiencia energética en EUA no consideran edificios de más de tres niveles. Estos se rigen de acuerdo con estándares dirigidos a edificios comerciales. Por lo mismo, existen recursos adicionales, como la guía de multifamiliares que propone el New Buildings Institute (NBI, por sus siglas en inglés), donde sí se incluyen edificios de más de tres niveles y lo relacionado con su comportamiento energético (Denniston, 2017).

De las derivaciones estatales que surgen a partir de los estándares antes mencionados, es el estándar “B3 Sustainable Building 2030” (SB 2030), un programa voluntario y progresivo diseñado para mitigar emisiones mediante la conservación de energía en edificios residenciales, comerciales, institucionales e industriales de Minnesota, EUA, mayormente subsidiados por el estado. En 2018, la adopción del programa en un proyecto de 63 departamentos en edificios multifamiliares en Mineápolis permitió ahorros energéticos de 26.6% en el consumo de electricidad y gas natural. Cabe resaltar en la versión actualizada del programa para el año 2019 se estimaron periodos máximos de recuperación de 12 años para que las medidas de ahorro implementadas, según los alcances del estándar, sean rentables (Universidad de Minnesota, Center for Sustainable Building Research, 2019).

La implementación voluntaria bien pudiera ser aprovechada como estrategia para la inserción paulatina de códigos al destacar incentivos económicos para usuarios. Justo eso se intenta en Texas, por ejemplo, donde el “Texas Emissions Reduction Plan” (TERP, por sus siglas en inglés) integra la posibilidad de cuantificar los beneficios de adoptar el IECC al analizar supuestos de cumplimiento con una “Calculadora de Cumplimiento del Código Internacional (IC3)”, una herramienta estatal para el sector residencial basada en el rendimiento energético. Al respecto, un estudio reportó entre el 15% y 17.5% de reducciones en costos por energéticos para el usuario promedio, siendo esto un aproximado de 300 USD mensuales (Baltazar et al., 2020).

También en EUA, destaca el código de energía de California como uno de los más estrictos para combatir el desperdicio de energía en edificios nuevos y existentes, con la primera edición publicada en 1975. Desde 1978, la Comisión de Energía de California actualiza cada tres años los “Estándares de Eficiencia Energética de Edificios” (Título 24, Partes 6 y 11), y en conjunto su adopción ha demostrado ahorros de entre el 10% y el 15% de energía operativa en la vivienda (California Energy Commission, 2021). Novan y otros (2022) analizaron el impacto del código como política rentable y estimaron que tan solo con los ahorros por consumo de electricidad se podría recuperar mínimo un tercio y hasta la mitad de la inversión requerida para su cumplimiento. Asimismo, Holian (2020) estimó una reducción de 2.5% en los gastos del hogar por el consumo de energía eléctrica como reflejo del impacto por la adopción del código de California, esto desde 1980 y 1990.

Resulta necesario mencionar una postura crítica sobre la adaptación y adopción del código californiano como uno de más comentados en la literatura por su antigüedad. Levinson (2016) señaló que el promedio estatal para ahorros energéticos por la adopción técnica era poco menos de la tercera parte de la meta inicial establecida en 1978. Dicha meta contemplaba ahorros de 80% en el consumo eléctrico y de gas después de diez años de adopción normativa. Sin embargo, el autor recalca que décadas y numerosas actualizaciones después, tal porcentaje de ahorro fue sobrestimado; el ahorro máximo registrado ha sido de 25%.

Además, argumenta que una vivienda nueva bien puede consumir menos energía, aunque no cumpla en la totalidad con el código vigente. Por lo mismo, enfatiza integrar a los análisis de códigos la vida útil de viviendas, con lo cual sería más fácil estimar si los ahorros se deben a una disposición normativa o a la antigüedad de construcciones.

El ahorro, tanto en dinero como en energéticos, es en sí el tema central implícito en la aplicación de códigos o lineamientos para la conservación de energía. Por lo mismo, existen distintos enfoques y metodologías para identificar y analizar beneficios, además de ofrecer estimaciones del costo adicional ligado a la aplicación a nivel local y regional. Según lo revisado en este trabajo, tales enfoques y metodologías se basan principalmente en las prácticas estadounidenses del DOE, y establecen como recomendación general aplicar el concepto de vida útil para una edificación, en este caso residencial, para así incluir la mayor cantidad de factores relacionados con la etapa operativa (PNNL, 2021). También se utiliza el periodo de recuperación simple en este tipo de evaluaciones económicas (Zhou et al., 2016), aunque expertos indican que esta no suele ser la métrica clave para la toma de decisiones a un nivel gubernamental (Energy-Efficient Codes Coalition, 2022).

Tres informes que abordan el impacto del IECC en EUA según su versión más reciente, utilizaron variaciones de la metodología del DOE antes mencionada para estimar los beneficios económicos y ambientales pertinentes a sus actualizaciones. Los informes fueron realizados por el PNNL, por los laboratorios de la Asociación Nacional de Constructores de Viviendas (HIRL, por sus siglas en inglés), y por una consultoría energética internacional (ICF, por sus siglas en inglés). Los resultados más discutidos son los del informe HIRL, donde se menciona que el IECC 2021 implica costos por cumplimiento para constructores de casi \$12,000 USD, con períodos simples de recuperación de hasta 79 años por vivienda, según la zona climática donde se ubique.

Por su parte, el British Columbia Energy Step Code de Canadá, creado en 2017, sugiere un indicador global de desempeño energético, y admite el cumplimiento bajo parámetros relativos si los lineamientos de sistema y/o producto a los que refiere superan un porcentaje mínimo estipulado. Un estudio inicial elaborado por la consultoría energética Morrison Hershfield (2017), señala que para departamentos de 720 pies cuadrados (67.82 m²) en edificios multifamiliares, la aplicación del código implicaría costos de entre 100 y 4,125 USD según el nivel de cumplimiento deseado, lo cual se traduce en menos del 2% del costo total de una vivienda que opera de manera “tradicional”, esto aun considerando distintos tipos de clima, factor decisivo para la elección de medidas de ahorro.

Existen diversos artículos que estudian la implementación de marcos regulatorios locales enfocados al ahorro energético y la sustentabilidad. Uno de ellos se llevó a cabo en el municipio de Växjö, Suecia para estudiar los requisitos relacionados con la energía más allá del Código de Construcción Sueco (BBR, por sus siglas en inglés) al vender predios para el desarrollo de edificios residenciales (Mahapatra, 2015). Se analizó el consumo energético primario, así como las emisiones operativas, o indirectas, de edificios con calefacción. Los resultados mostraron grandes variaciones entre el consumo previsto y el real, y se identificó una proporción significativa de casas que no cumplieron con los requisitos del BBR.

Otra perspectiva por considerar es el crecimiento exponencial demográfico y la urbanización. En Asia, particularmente en ciudades de China, tales factores han influenciado el análisis del esquema denominado “Etiquetado de Eficiencia Energética del Edificio” (BEEL, por

sus siglas en inglés) adoptado en dicho país desde 2008. Un estudio (Yu et al., 2019) donde se aborda la aplicación de BEEL revela la relación inversamente proporcional entre la tasa de ahorro de energía y el consumo de esta para edificios residenciales, además de establecer un panorama de las posibles barreras para implementar el esquema en las principales áreas del país.

Los organismos o concejos para la construcción sustentable, así como las herramientas de valoración existentes, permiten una orientación del mercado a los consumidores y productores, al gobierno e instituciones relacionadas con el tema. En un estudio de 2019, Ade y Rehm analizaron un grupo de publicaciones recientes del Concejo de edificio verde de Nueva Zelanda (NZGBC, por sus siglas en inglés) para cotejar la información pública al mercado con relación al programa de evaluación Homestar. Mediante un análisis comparativo de costos determinaron qué tan probable era que viviendas promedio lograran los lineamientos establecidos por el programa. Encontraron que, si bien Homestar ofrece ahorros operativos, la mayoría de las viviendas analizadas no cumplen con las afirmaciones públicas del programa del NZGBC.

A medida que se reconocen las limitaciones de códigos energéticos en la construcción, la discusión gira entonces hacia transformaciones para superar tales limitaciones. Schwarz et al. (2020) evaluaron los códigos de Dinamarca, Francia, Inglaterra, Suiza y Suecia; el resultado para todos fue un rediseño hacia la descarbonización de edificios a través de la eficiencia energética y las renovables. Para países como Francia e Italia, el camino hacia tal descarbonización debe cubrir además la renovación del parque habitacional existente, sobre todo si se busca un impacto que informe la política pública sobre la eficiencia operativa en viviendas (Belaïd et al., 2021; Salvalai et al., 2015). Se señala también el atender las “asimetrías” de los datos que conforman las políticas públicas, algo que ocurre incluso en países con herramientas y recursos necesarios como Alemania (Singhal et al., 2022).

En Australia, la aplicación y seguimiento del código nacional de construcción y energía es lo suficientemente robusto como para incluso moldear su industria (Armstrong et al., 2017). Pese a esto, se ha señalado el rezago en la implementación desde hace una década, lo cual explica la prevalencia de soluciones prescriptivas que dificultan la cuantificación de requisitos basados en el desempeño energético (Enker y Morrison, 2017). También se indica la importancia de analizar patrones de uso más apegados al comportamiento humano, así como evitar preconcepciones sobre la efectividad de esquemas normativos del sector residencial.

Similar a lo que sucede en países con un desarrollo económico destacado, otros en vías de, y con mayores retos, como India por ejemplo, empiezan a considerar dentro de sus políticas públicas lo pertinente a códigos de edificación y de energía, así como estándares para sistemas independientes (Khosla, 2016). Esto tiene sentido, pues proyecciones hacia 2040 señalan a las economías en desarrollo como las que elevarán a más de un cuarto la demanda energética mundial por su acelerado crecimiento poblacional y urbano (Turiel, 2021). Tal panorama modificaría el escenario global actual en el que países de Europa y Norteamérica son los que acumulan un aproximado del 40% de la demanda energética (IEA, 2020).

Se identifican diversos estudios internacionales que abordan la temática de emisiones por consumo final de energía residencial, así como su impacto a lo largo de cierto periodo de vida útil asignado. Un estudio realizado en EUA por Goldstein y otros (2020) donde se consideró a 93 millones de viviendas en áreas de Boston-Cambridge-Quincy y Los

Ángeles-Long Beach-Anaheim, reveló que descarbonizar la red eléctrica del sector residencial reduciría hasta 28% de emisiones proyectadas para 2025. Esto, si bien favorece al menos uno de los compromisos estadounidenses bajo el Acuerdo de París, dista de ser suficiente si se considera la meta del 80% de reducción de emisiones para el año 2050. Los principales motivos de tal insuficiencia, de acuerdo con los autores, son aplicables a prácticamente cualquier país: la expansión del parque de viviendas y el uso continuo de hidrocarburos.

Lograr reducciones cercanas a tal meta del 80%, según lo señalado por Langevin y otros (2019) en lo que concierne a la operación eficiente de edificios en EUA, depende de una combinación de medidas progresivas que incluyen energías renovables y mejoras en el suministro de energía eléctrica para favorecer la eficiencia en el consumo doméstico. Mencionan además el reto de sustituir viviendas que han cumplido su ciclo útil por viviendas con mayor grado de eficiencia operativa, una medida que prevén diversos países dentro de sus objetivos de mitigación (IEA, 2021).

A propósito, Dahmen y otros (2018) calcularon el “periodo de recuperación de emisiones” generadas por vivienda eficiente al suponer una sustitución del parque habitacional de una tipología en Vancouver, Canadá. Tomaron el concepto del periodo de recuperación simple en economía, esto para expresar la equivalencia entre la mitigación de emisiones operativas (procedentes de la ocupación y mantenimiento durante la vida útil de una vivienda) y emisiones incorporadas (referente a materiales y sus procesos de manufactura). Estimaron un promedio de 168 años para que las emisiones incorporadas de una vivienda nueva con el mayor nivel de eficiencia según los estándares vigentes a nivel local, iguallen las emisiones operativas mitigadas de una vivienda convencional. Bajo tal supuesto, construir viviendas aun cuando sean de máxima eficiencia o las llamadas “energía cero”, no sería más redituable que mejorar el nivel de eficiencia con el que operan las ya existentes, esto en el sentido de compensar el impacto ambiental total de construcciones desde un enfoque cíclico.

Lo anterior apunta a la constante de que todo recurso energético empleado durante la etapa operacional de edificios resulta en la mayor fuente emisora, por lo cual su atenuación con sustituciones de equipo y/o sistema con tecnologías de eficiencia se ha convertido en una práctica clave (Lin et al., 2017). En países como China, el costo de inversión para construir con dichas tecnologías supera el 50% de la inversión total de un proyecto residencial, esto debido a la influencia de factores como el costo de energéticos y de mantenimiento (Yu et al., 2019).

La superficie construida juega un papel importante para que las regulaciones actuales aborden la eficiencia de construcciones de manera más específica. Stephan y Crawford (2016) cuantificaron el impacto de la superficie construida de viviendas y su relación con la demanda energética total, esto para fundamentar posibles pautas en regulaciones oficiales a futuro. Sus resultados muestran que el tamaño de viviendas aumenta a un ritmo mayor que su demanda energética. También, señalan que las regulaciones locales para el ahorro requieren corregir los umbrales de intensidad energética por superficie construida, y considerar la energía incorporada en materiales de la vivienda, la cual representó entre el 26% y hasta el 50% del consumo.

Es indudable que el consumo energético residencial y sus emisiones derivadas es aún un nicho por explorar, en especial si se integran métricas actualizadas a códigos u otros esquemas normativos. Si bien existen resultados mixtos respecto a su aplicación y

alcance, los códigos de construcción y energía son una herramienta necesaria para normalizar un modelo hacia la descarbonización, en este caso del sector residencial. Para satisfacer las necesidades de mitigación que distintos códigos fomentan a futuro, se requiere de analizar lo más próximo a un ciclo de vida completo. Esto sin olvidar que el primer paso hacia dicho enfoque es dominar las prácticas vigentes de eficiencia energética durante la etapa operativa de las construcciones residenciales.

1.1 Producción y consumo energético residencial en México

La producción y el consumo de energía son ejes de desarrollo estratégicos para cualquier país. Intervienen aspectos económicos por actividades productivas, de política pública y del bienestar social. El intercambio natural que implican estos procesos se traduce en el agotamiento progresivo de reservas de hidrocarburos y de recursos no renovables (Alexander, 2015).

En México, el petróleo crudo lidera la producción nacional de energía primaria con el 55.15%, seguido del gas natural con un 22.26%, de modo que, pese a esfuerzos enfocados hacia las energías limpias, la producción continúa en favor de los hidrocarburos (SENER, 2021). Sumado a esto, debido a la reducción de la oferta interna, el 2019 se registró como el quinto año consecutivo en el que México dependió de las importaciones para satisfacer su demanda energética (IEA, 2021). Esto contrasta con el panorama histórico en la producción que durante más de un siglo caracterizó al país. Por tal motivo, la política energética de ahorro y eficiencia, hoy enfocada particularmente al sector residencial, no se consideró esencial sino hasta hace poco más de dos décadas.

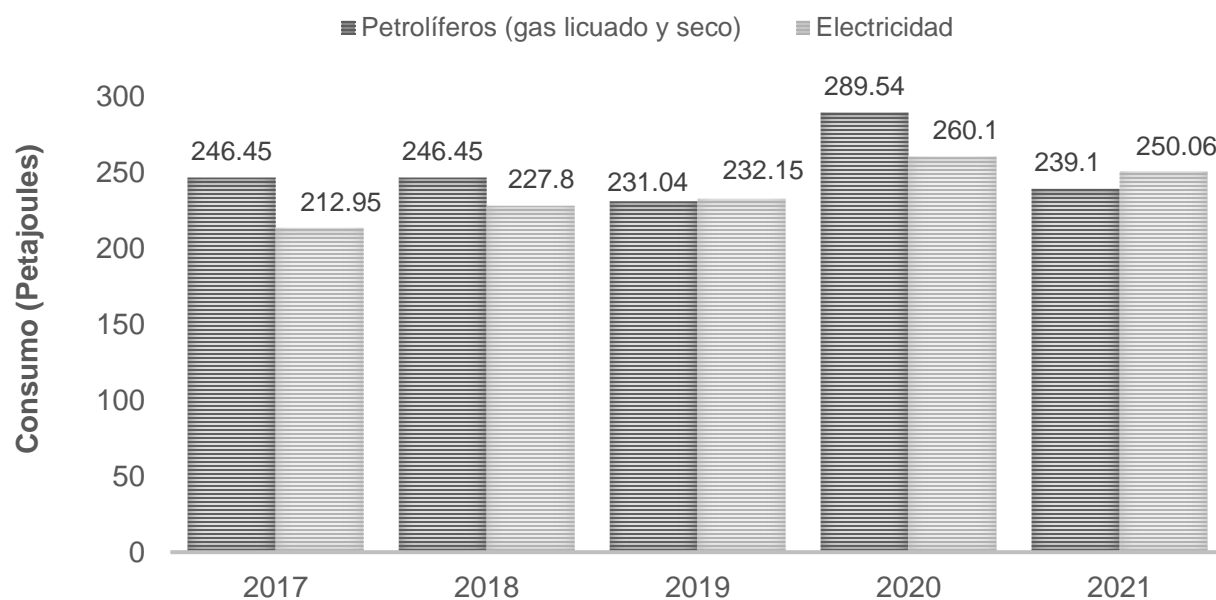
Hasta 1969, la matriz energética nacional se enfocaba a expandir la oferta con el desarrollo de infraestructura física. Un año después, con la inflación causada por diversos factores sociales, económicos y políticos, se iniciaron prácticas para regular el consumo energético de distintos sectores, entre ellos el residencial. Desde entonces, economizar a través de la eficiencia se fortaleció a tal grado que hoy se considera un pilar del desarrollo económico, además de la medida de ahorro más rentable (FIDE, 2018).

En 2019, el consumo energético del sector residencial, comercial y público fue de 952.59 PJ (petajoules), equivalente a 20% del total nacional (4,760.98 PJ) por consumo final energético (SENER, 2021). De dicho porcentaje, el sector residencial abarcó el 15.72% (748.94 PJ), con una reducción de 1.53% respecto al año previo (760.60 PJ). Derivado de la contingencia mundial que inició en 2020, el consumo del sector residencial (914.87 PJ) presentó una significativa variación anual de 22.16% al término de dicho año, lo cual se reflejó con el aumento gradual del consumo residencial con respecto al consumo energético del sector comercial y público. Para 2021, el consumo final de los tres sectores (940.95 PJ) representó el 17.56% del total nacional (5,357.36 PJ), y el consumo residencial se moderó a niveles preandémicos, con 796.59 PJ.

Actualmente, el sector residencial se mantiene como el tercero con mayor demanda por el consumo de electricidad, con un incremento sostenido durante los últimos cinco años (SENER, 2021). Tal incremento se acentuó temporalmente por el efecto de la contingencia sanitaria en los patrones del consumo final de energía (ver Gráfica 3). En el caso del consumo final térmico, en específico de gas licuado, el sector residencial es el segundo con mayor demanda; en 2019 incluso empató en proporción el consumo eléctrico, y un año después presentó un incremento de 20%. De modo que, aun con la incursión paulatina del recurso solar, es evidente que prevalecen los petrolíferos y la electricidad.

Gráfica 3

Consumo energético del sector residencial en México



Nota. Elaboración propia con información actualizada al año 2021 del Sistema de Información Energética (SIE).

Las políticas y programas nacionales de vivienda sostenible llevan ya un recorrido evolutivo de casi tres décadas. Como fomento a tal recorrido, se han creado herramientas y esquemas financieros, en muchos casos bajo subsidio federal, que integran el monitoreo del ahorro energético para determinar o modificar estrategias de eficiencia.

Gestionado por la CONAVI, el paquete de herramientas que conforman el Sistema de Evaluación de Vivienda Verde "Sisevive" fue ideado inicialmente como complemento a programas relacionados con la evaluación de vivienda operados por INFONAVIT. En 2011, un año después de su creación, formó parte del programa crediticio "EcoCasa" de la SHF dirigido a desarrollos habitacionales, y se habilitó para el público al pagar cuotas de capacitación. En el caso de "Hipoteca Verde", se convirtió en el mecanismo financiero clave para INFONAVIT, consistente en un crédito adicional obligatorio para todo crédito hipotecario otorgado (Albarrán et al., 2014). Hoy es común que "Sisevive" sea utilizado por ambas instituciones; incluso se buscó una homologación para establecer escalas de eficiencia en concordancia con la normativa vigente y bajo el concepto de "Hipoteca Verde". Pese a tales esfuerzos, iniciativas de este tipo refleja disonancias en su gestión que afectan tanto en alcance como potencial de mitigación.

El enfoque hacia la eficiencia energética impulsado por la política pública en México ha permitido reducir las importaciones de carbón y gas en un 2%, así como 12 toneladas de carbono equivalente; más del 50% de estas se debe al subsector residencial (IEA, 2020). Tales cifras son resultados de programas gubernamentales e iniciativas privadas que fomentan tecnologías ZCB (Edificios de Carbono Cero, por sus siglas en inglés) a medida que se vuelven más asequibles. En Yucatán, por ejemplo, se tiene el llamado "Compromiso Neto de Edificios de Carbono Cero" del "Consejo Mundial de Construcción Sostenible" (WorldGBC) donde la intención, un tanto

optimista, es lograr cero emisiones en menos de una década para edificios que estén registrados en el programa, y para 2050 continuar con tal compromiso a nivel estatal.

Paralelamente, las políticas ambientales y los financiamientos de carácter público y privado, liderados hoy por la CONUEE, FIDE, INFONAVIT, y la CONAVI, financian y otorgan contribuciones para fomentar e implementar esquemas de ahorro como lo es el aislamiento térmico en techos y muros, recubrimientos reflejantes, ventanas con cristal doble, reemplazos de equipos como aire acondicionado, focos ahorradores y calentadores solares (FIDE, 2018).

Lo anterior ha sido posible gracias a estudios nacionales que analizan patrones de uso de energía eléctrica en edificios a través de indicadores por consumo (kWh/m^2 -año) y por demanda de potencia eléctrica instalada (W/m^2) (Morillón et al., 2015). Cuando se habla del consumo energético por electricidad, las unidades que se manejan son Watts y Watts-hora, sin embargo, al representar conceptos distintos, es importante recordar que tales unidades no son intercambiables (Escobedo-Izquierdo, 2020). Watts, según el Sistema Internacional de Unidades (SI), refiere a la cantidad de energía transferida por unidad de tiempo, y un 1 Watt equivale a 1 joule. Watts-hora indica la potencia integrada en el tiempo, es decir, la carga de una cantidad fija de Watts por cada hora. El kilowatt-hora es la unidad de energía empleada por compañías eléctricas, como CFE en nuestro país, para establecer tarifas de cobro (FIDE, 2018).

Como complemento a los antecedentes nacionales, Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez (2015) analizaron el consumo energético enfocado en la medida posible a las directrices de "energía cero" para viviendas de 69.00 m^2 en una configuración adosada unifamiliar, para tres ciudades distintas en el país. Para la Ciudad de México, estimaron un índice de consumo de energía (ICE) de $82.26 \text{ kWh/m}^2\text{año}$, partiendo de un consumo base calculado en $1,200 \text{ kWh/año}$. Al aplicar medidas de eficiencia de acuerdo con el clima del lugar, el ICE resultante fue de $23.87 \text{ kWh/m}^2\text{año}$, lo cual representó una reducción de 72.33% del consumo de energía eléctrica y térmica.

La determinación y análisis de indicadores nacionales aporta información sobre la relación entre una actividad económica, el consumo de energía, y las emisiones contaminantes generadas (CONUEE, 2021a). Además, influyen en la creación y seguimiento de programas de financiamiento, de medición y de calidad energética, incluso cuando existen limitaciones en la información disponible por sectores. Uno de tales programas se propuso como parte de la NAMA para Vivienda Existente (NAMA VE), donde se estimó el potencial de mitigación ambiental de tres tipologías de vivienda en cuatro climas distintos al proponer una serie de mejoras en eficiencia a partir de una serie de indicadores energéticos. De acuerdo con sus proyecciones, para la vivienda multifamiliar eficiente en la CDMX se calculó de 1.2 a 4.2 toneladas de CO_2eq mitigadas por año (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU], 2014).

Sumando a los estudios sobre el nivel de desempeño energético residencial, el Centro Mario Molina desarrolló un estudio en 2012 del cual surgió el Índice de Sustentabilidad de Vivienda (ISV) del INFONAVIT. A partir de los datos recabados en 35 conjuntos habitacionales ubicados en cuatro zonas metropolitanas del país (Cancún, Monterrey, Tijuana y Valle de México), se propuso el primer "Análisis de ciclo de vida de la vivienda de interés social en México". Se consideró un periodo de vida útil de 50 años para la medición de impactos ambientales ligados directa e indirectamente a la construcción y operación de tales conjuntos habitacionales. En el caso del Valle de México, se estimó un total de 156 toneladas de CO_2eq acumuladas durante tal periodo.

Los estudios mencionados forman las bases para el mejoramiento de herramientas de monitoreo, programas gubernamentales e iniciativas para la producción residencial, principalmente de interés social. De igual modo, son de utilidad para analizar el consumo específico por uso final, al tiempo que se identifica si tal uso predomina o no según el clima (CONUEE, 2018).

A propósito, la región climática es un factor clave del que dependen no solo los usos finales de energía residencial, sino también el esquema tarifario con el que se rige el consumo energético. En el caso de la energía térmica, en nuestro país se otorgan subsidios focalizados que generan una perceptible inestabilidad de costos. Para la energía eléctrica, el subsidio es inversamente proporcional al consumo; a mayor consumo, menor subsidio. Tal esquema no permite beneficiar a quienes generan mayor consumo, el cual de alguna manera se explica con una o todas las cuestiones siguientes: condiciones climáticas extremosas, diseños de vivienda ineficientes, y equipos fuera de norma (Ochoa, 2020). Asimismo, quienes sí perciben tal subsidio podrían estar generando un efecto rebote en su consumo, pues al estar "ahorrando" una parte del importe por energía que se consume, caen en comprar más equipos, descuidar el mantenimiento, usarlos por más horas al día, etc.

Las tarifas son apenas uno de los aspectos a considerar cuando se busca cuantificar el beneficio de la eficiencia residencial en términos monetarios. Influyen además, tasas de descuento, también interpretadas como costos de oportunidad, así como la disposición de pago por parte de usuarios, esto a cambio de un beneficio que no siempre resulta directo sino que se concentra en el erario. La complejidad del tema aumenta cuando además se requiere valorar o "poner precio" a un beneficio (como la mitigación de emisiones, o el bienestar humano) que implica un costo directo o indirecto que no puede ser del todo estipulado dentro del mercado local. Esto debido a que no es habitual aún manejar un valor monetario absoluto, lo cual suele dificultar uno de los objetivos de estudios que abordan el costo beneficio ambiental (E-BCA, por sus siglas en inglés).

1.2 Costo de aplicación de lineamientos de eficiencia energética

Como regla general, la cuantificación de los costos y beneficios producto de estrategias y lineamientos oficiales para el ahorro energético se compone de los mismos principios teóricos. Estos surgen de los enfoques de la economía clásica y del bienestar; en específico, suele emplearse la relación costo beneficio como herramienta de evaluación económica, así como el indicador del Valor Presente Neto (VPN) (Belaïd et al., 2021; CONUEE, 2021c; Mendoza, 1998). Se diferencia de un enfoque financiero por considerar la perspectiva hacia la sociedad y no hacia una entidad privada. De cualquier forma, la intención al asignar valores monetarios para prever una serie de impactos positivos, negativos o nulos, es en teoría sustentar la toma de decisiones asociadas a las políticas energéticas dentro del sector residencial (Belaïd et al., 2021).

Las tasas de descuento, costos de energía, y el propio consumo son factores que en gran medida afectan la valoración económica de lineamientos oficiales para el ahorro energético residencial. O'Mahony (2021) añade como factor crucial la definición de un horizonte de tiempo pertinente para valorar el impacto de toda solución de ahorro que se aborde en un análisis de este tipo. Ejemplos de tal horizonte de tiempo son el periodo de vida útil de viviendas, de un sistema o producto certificado con cierto nivel de eficiencia, o bien la escala de tiempo, usualmente a largo plazo, empleada en análisis ambientales para evaluar procesos contaminantes.

Aldy y otros (2021) mencionan tres elementos clave para un análisis costo beneficio ambiental, basados en enfoques de EUA e Inglaterra. Primero, se determina qué son costos y qué son beneficios, según la naturaleza del estudio, y a qué o a quien corresponden. Segundo, se identifica un límite físico y social para acotar el efecto en la población de determinada política pública incluida en el análisis. Incluso, tal límite se puede definir por la jurisdicción de tal política. Por último, se establece el horizonte sobre el que los beneficios y costos tendrán (o no) tal efecto. Para esto, los autores señalan que es necesario establecer un parámetro de "descuento", o bien, el rendimiento mínimo aceptado para que un proyecto se considere positivo. Si los costos y beneficios suceden en tiempos distintos, tal factor de descuento facilita las comparaciones intertemporales al permitir la conversión de todos los costos o inversiones, y todos los beneficios o ahorros, a cifras que consideren el valor del dinero. Con esto es posible obtener un indicador a partir del valor presente de beneficios netos identificados.

Quizá donde se aprecian mayores sesgos en este tipo de análisis, es justo en entender qué tasas de descuento considerar y en qué punto del proceso descontarlas (Aldy et al., 2021). También, como se mencionó previamente, no siempre es posible traducir un beneficio ambiental, o su costo, a valores monetarios de mercado que impliquen compensaciones inmediatas. Esto se liga al concepto de las externalidades. Según la teoría económica, estas refieren a los efectos indirectos positivos o negativos, y en distintas escalas, de actividades productivas o de consumo. Los causantes incluso pueden invertir más recursos para superar o innovar en una situación con respecto a un referente considerado como ideal (externalidad posicional). Se entiende entonces que lo convencional para el análisis económico y ambiental de estrategias de eficiencia energética en la vivienda es "medir" la disposición del usuario a pagar directa o indirectamente por algo.

El informe titulado "Logros de los programas de etiquetado y estándares de electrodomésticos y equipos de eficiencia energética" (IEA, 2021) aborda el impacto en eficiencia energética por país. Para México, reportó un ahorro de 6.5% del consumo eléctrico nacional, solo considerando ahorros por energía eléctrica. Esto como resultado directo de las mejoras en la eficiencia energética de los electrodomésticos, lo cual representa el menor costo disponible actualmente para la reducción del consumo energético y emisiones resultantes con una relación significativa de beneficio/costo neto para la sociedad de 4:1.

En nuestro país, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que aplican al sector residencial han resultado en un ahorro de cerca de 120 mil GWh entre 1982 y 2018, traducido a cerca 360 mil millones de pesos ahorrados para la economía nacional; aproximadamente dos terceras partes de tal cantidad responden a la hacienda pública, y a usuarios 122.4 mil millones (CONUEE, 2018). En 2021, la CONUEE publicó una metodología formal del análisis costo beneficio para evaluar el efecto económico y garantizar los beneficios de proyectos NOM-ENER, en especial normas de producto. Describe básicamente de tres etapas. Primero, se identifican los costos y los beneficios de aplicación de normas, esto desde el punto de vista del usuario final, los fabricantes, o comerciantes de equipos regulados. Segundo, se define un intervalo de tiempo en el que tales costos y beneficios se darían. Tercero, se evalúa el flujo de beneficios y costos totales, considerando el valor del dinero en el tiempo.

Puntualmente está el estudio de costos y beneficios por la aplicación de la NOM-020-ENER-2011 para envolvente residencial realizado por la CONUEE en 2017. Aunque elaborado solo para viviendas de clima cálido, presenta estimaciones del cumplimiento para usuarios como para el erario, asimismo de los impactos por emisiones evitadas de GEI.

Los resultados refieren que las viviendas proyectadas como línea base (sin ninguna medida, con losas de concreto) tienen ganancias térmicas que triplican lo permitido por la norma. Por cumplimiento se estiman costos adicionales que van de entre 13 mil a 27 mil pesos (MXN) para viviendas con superficies de entre 39 y 100 m². Dicho costo se reduce en más de 33% si se considera como línea base para el techo el sistema de vigueta y bovedilla.

La NOM-020-ENER-2011, hoy bajo anteproyecto de actualización, aplica a la envolvente de edificaciones residenciales, es decir, la composición y propiedades térmicas de elementos como muros, ventanas, puertas y techos (NOM-020-ENER-2011). Los estudios nacionales que abordan esta norma hasta la fecha se enfocan a viviendas unifamiliares de uno o dos niveles máximo. El progreso de su implementación se ve frenado debido al costo adicional implícito, en especial cuando se trata de ampliaciones a edificios existentes. Sin embargo, se ha estimado que tales costos se recuperan en menos de seis años si se considera una vida útil de vivienda de 30 años (CONUEE, 2017a). Por otro lado, un estudio reciente analizó su integración al marco legal de reglamentos de construcción, con un prototipo de vivienda de interés social donde se consideró el uso de aire acondicionado para tres climas del país (Vargas, 2022), con costos mensuales mínimos por operación de \$3,444.60 MXN para clima templado.

Ligado a lo anterior, es relevante un estudio que monitoreó el comportamiento energético de 450 casas de interés social en el norte del país durante 16 meses (Davis et al., 2018). Aleatoriamente se asignaron medidas de ahorro (aislamiento en muros, ventanas y techos), y se encontró que los ahorros por consumo de energía no correspondían con modelos analíticos que calcularon un ahorro anual de 26% por medidas de eficiencia energética. Tales medidas implicaron una inversión adicional de entre 400 a 500 USD por vivienda, lo cual resultó en tasas de retorno negativas. Los autores mencionan la sobrestimación del uso de aire acondicionado como explicación, aun y cuando es una zona de pocas en el país donde sí se emplea. También influye que la mayoría de participantes en el estudio regula temperaturas dentro de la vivienda al abrir y cerrar ventanas, lo cual nulifica el beneficio que podría otorgarles la implementación de aislamiento térmico en techos y muros.

Referente a edificios habitacionales en el centro del país y su consumo eléctrico en específico, en un estudio realizado en 2013 por la Mtra. Itzel Velazco del Posgrado en Arquitectura del Campo de Tecnologías (“Estimación del potencial del ahorro eléctrico, económico y ambiental en la vivienda plurifamiliar vertical Tarifa 1”) se aplicaron medidas de ahorro y eficiencia para luminarias y electrodomésticos a 2,084,507 usuarios. Se obtuvo un ahorro económico de \$217.18 MXN anuales, un potencial de ahorro energético de 199.24 kWh/año, y uno ambiental de 38.13 kg de GEI por cada usuario.

1.3 Panoramas futuros: El ciclo de vida en la vivienda

Como parte de la relevancia futura en el tema, el documento “Acelerando la descarbonización de los edificios” publicado en 2019 por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés) identificó en México ocho vías para lograr edificios con emisiones cero. Es de resaltar que en todas se presenta como primera estrategia la eficiencia energética, con el fin de aprovechar las políticas pertinentes que ya están en función desde hace años. Sin este primer paso, difícilmente trasciende la integración de las demás vías identificadas, entre ellas la energía limpia dentro y fuera de sitio.

El común denominador para impulsar la sustentabilidad dentro del sector residencial recae entonces en las políticas oficiales existentes y su respectiva revisión para la actualización. Lo mismo se retoma en el estudio elaborado por Evans y otros (2018), donde se analizó la ruta de cumplimiento de códigos de construcción y energía para seis ciudades en distintos países, entre ellas la Ciudad de México. Destaca en el análisis la falta de directrices para el seguimiento e implementación del código IECC-México y del propio CEV. Los autores recomiendan enfoques basados en el desempeño probado y monitoreo como para conformar tales directrices, esto a partir del diagnóstico en torno a la política energética local dirigida al sector residencial. En específico, mencionan pautas para la infraestructura y gestión de normas oficiales y códigos a futuro, dado que actualmente solo puede ser de tipo prescriptiva y con propuestas de mejora en el desempeño por sustituciones.

Evans y otros (2018) comentan además los efectos de una evidente desarticulación en cuanto a la capacidad de implementación efectiva de lineamientos oficiales y los agentes pertinentes (gobierno en coordinación con empresas privadas, como certificadoras y consultorías). Esto se relaciona y de cierta manera explica el incipiente mercado de vivienda sustentable en comparación con el sector de edificios a nivel nacional. La IFC estima que apenas un 9% de las nuevas construcciones en nuestro país proyectadas para el año 2025 serán "sustentables". Queda en el limbo si tal adjetivo significaría en algún punto de la vida útil de viviendas nuevas un valor agregado. Tampoco se indica si tal porcentaje, aunque mínimo, responderá a una condición de avance en los procesos de normatividad aplicada, o a una exigencia más enfocada al propio mercado para satisfacer la demanda.

Con relación a los enfoques de cumplimiento de códigos de construcción y de energía, una tendencia que cobra fuerza se basa en el resultado del desempeño energético cuando este se ha medido y monitoreado ("outcome-based approach"). Foroushani y otros (2022) incluso recomiendan dejar de fomentar el enfoque del edificio de referencia como ruta convencional de cumplimiento en países donde no se implementan enfoques puramente prescriptivos, y que además tengan la infraestructura para alinearse con objetivos globales más rigurosos relacionados al desempeño energético de edificios (como limitar consumos anuales a 15 kWh/m²año, si la intención es mínimamente cercana a emisiones cero). Esto atendería la creciente brecha generada por modelos analíticos o digitales que simulan ahorros esperados, pero basados en etapas iniciales de diseño o anteproyecto y no en la etapa operativa de inmuebles, que es justo la etapa en la cual se observa el efecto de los hábitos de consumo del usuario, horas pico, intensidades de energía, etc. (O'Brien et al., 2020).

En esa misma línea, diversas herramientas hoy en día trabajan con el principio del análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) para conocer el impacto global de una edificación, con lo cual se puede emplear su equivalente para evaluar el riesgo económico (LLCA, por sus siglas en inglés). Como resultado se tiene una perspectiva integral sobre la operación en distintas etapas de la vida útil de un edificio, con lo cual es más fácil anticipar riesgos ambientales y financieros (Energy-Efficient Codes Coalition, 2022).

Se reconoce la importancia de retroalimentar la política pública nacional de vivienda sustentable con la experiencia internacional (y evitar replicar sin considerar contextos locales), para así reflejar una cultura de conciencia que lleva años en desarrollo, aunque con un consenso mixto respecto a sus impactos. De igual modo, resulta evidente analizar marcos regulatorios pertinentes, e identificar estrategias de eficiencia y mitigación adecuadas según una zona bioclimática o térmica homologada por medio de entidades neutrales, como lo son las universidades. Lo anterior contribuye a un cambio progresivo del paradigma de la eficiencia energética referenciada por códigos y su impacto en la producción de vivienda.

Capítulo 2 Normatividad nacional y programas para la eficiencia energética

Durante la presentación para ONU-Hábitat del proyecto nacional “El Infonavit liderando el cumplimiento de la Agenda 2030: la vivienda en el centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)”, llevado a cabo entre 2017 y 2018, se hicieron recomendaciones abordando la vivienda como el eje central de la llamada “Agenda 2030 para el desarrollo sostenible”. El ámbito de intervención del marco normativo nacional que se reconoce en dicho documento indica una adecuación que abarque lineamientos, reglamentos constructivos y esquemas de código, en sus distintos niveles de jurisdicción. Tal adecuación favorecería la optimización de recursos materiales para viviendas nuevas y su inevitable extensión territorial, así como la eficiencia operativa del consumo energético residencial impulsada por políticas y programas de desarrollo.

La vivienda contribuye en mayor o menor medida a cumplir los 17 ODS, principalmente el 7 (“Energía asequible y no contaminante”), 11 (“Ciudades y Comunidades sostenibles”) y 13 (“Acción por el clima”), así como diversos otros que no solo refieren al espacio construido, sino que atienden además estrategias para reducir la pobreza, mejorar servicios de salud e igualdad económica, por mencionar algunos. De modo que la vivienda se vuelve un mecanismo central para un sinnúmero de compromisos por el impacto que genera a distintas escalas (ONU-Hábitat, 2018).

A nivel nacional, el “Programa Nacional de Vivienda 2019-2024” puntualmente indica como acción específica el fortalecer la implementación del Código de Edificación de Vivienda (CEV) como marco normativo relacionado a las acciones de vivienda que reciben créditos o financiamiento federal (CONAVI, 2017a). Tal es el caso de los multifamiliares, los cuales si bien aun se construyen principalmente en la zona periférica de la ZMVM intentando resarcir la necesidad de vivienda nueva, no se compara con el auge que tuvieron entre las décadas de 1950 y 1980 en la capital del país, esto como parte de la abundante producción arquitectónica financiada por el gobierno mexicano en aquel entonces (Guadalupe y Reza, 2019).

El progreso o estancamiento de esfuerzos enfocados a la regulación, reducción, diversificación de fuentes de suministro, así como la sustitución paulatina de combustibles fósiles por renovables (en aquellos casos viables) se debe en gran medida al papel que juegue la seguridad económica. Es decir, humana y del tejido ecosistémico, pero sin afectar aspectos económicos dependiendo del país que se trate, o el eje rector de un sector tan crucial como el de energía. Debido a ello, las políticas públicas de eficiencia energética como opción ante la creciente demanda de recursos, se ha convertido en un factor definitivo e intrínseco en el desarrollo sostenible al que apuntan las políticas públicas encaminadas a satisfacer necesidades de consumo actuales sin comprometer la capacidad de provisión de las próximas generaciones (Comisión Brundtland, 1987), tanto para países en desarrollo como de potencias mundiales.

México se ha valido de experiencias internacionales (principalmente estadounidense, debido a la globalización de la economía) en el ámbito de la eficiencia energética desde la perspectiva del consumo en viviendas. Con esto se han delineado programas y financiamiento para así culminar en estrategias públicas y herramientas normativas que rijan, en lo posible, el futuro del sector residencial.

Para situar el origen de la eficiencia energética en la vivienda mexicana primero es importante identificar de dónde surge tal enfoque como política pública desde el sector de la energía. Hasta finales de la década de 1960, el horizonte energético nacional se orientaba al aumento de hidrocarburos, a la par de fomentar infraestructura física y tecnológica, esto de acuerdo con la política en materia de energía de aquel entonces. Con la inflación, causada por diversos factores sociales, económicos y políticos, a finales de 1970 iniciaron esquemas de reducción del consumo final de energía, aquel que resulta del aprovechamiento de fuentes primarias y secundarias para distintos sectores como el residencial (SENER, 2021). Desde entonces, se han consolidado ejes normativos que contribuyen al desarrollo de la eficiencia energética como la medida más rentable de conservación y ahorro (CONUEE, 2018).

En 1980, por primera vez se consideró la eficiencia energética como política pública en nuestro país, esto bajo la creación del “Programa nacional para el uso racional de energía eléctrica” (PRONUREE) por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La intención central era difundir información respecto al ahorro y a las alternativas energéticas a nivel nacional (FIDE, 2012); sin embargo, los resultados no fueron los esperados.

Tales resultados cambiaron con la creciente participación de CFE, y paralelamente PEMEX, instituciones respaldadas a nivel federal para racionalizar la energía. De manera que esto llevó a la actualización del “Programa nacional de energéticos” (1984-1988) y el “Programa nacional de la modernización energética” (1989-1994), previo a la creación de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE; actualmente CONUEE) en 1989, el “Programa de ahorro de energía del sector eléctrico” (PAESE) en el mismo año, continuando para 1990 con el FIDE y el “Fideicomiso para el aislamiento térmico de la vivienda” (Fideicomiso 728 FIPATERM) en 1992, este último siendo la cúspide en aquel entonces de logros en ahorro, principalmente en estados del norte como Baja California. Asimismo, reflejaba el resultado de análisis realizados por CFE y PRONUREE que establecían ahorros energéticos de 20% al aislar techos de viviendas en climas extremosos (CONUEE, 2017a).

FIPATERM marcó la primera ocasión en la cual las empresas eléctricas se enfocaban en acciones de ahorro de lado de la demanda de energía y no de la producción. A lo largo del proceso evolutivo de la iniciativa se considera la reactivación y suspensión en 2019 de lo que se convirtió en su sucesor a partir de 1997, el “Programa de ahorro sistemático integral” (ASI) de la CFE. Parte de sus acciones facilitaba la compra de aparatos como aire acondicionado y focos incandescentes, además de materiales aislantes (inicialmente en Mexicali y después con alcance a otros estados del norte noroeste y sureste) con cargo diferido al recibo de CFE. Actualmente, este tipo de apoyos continúan operando con el “Programa de financiamiento del ahorro de energía eléctrica” (PFAEE) (FIDE, 2018).

Como fideicomiso público de fondo revolvente, FIPATERM significó un antecedente importante para los primeros proyectos piloto enfocados en el ahorro por usos finales como la iluminación. Esto finalmente culmina en 1995 con la creación del primer programa que potenció el ahorro en luminarias, llamado ILUMEX.

Financiado por el Banco Mundial debido a la alta dependencia nacional de combustibles fósiles, tal programa, también enfocado a la demanda, continúa siendo un referente en su metodología por sus mediciones, pruebas de laboratorio y cuantificación de reducción de emisiones de GEI. Sus resultados influenciaron programas a cargo de FIDE, estudios

sobre el aprovechamiento de la luz natural y el ahorro de energía eléctrica. También derivó en la implementación del Horario de Verano (HV) en 1996, el cual, por decreto presidencial fue cancelado como medida de ahorro en octubre de 2022, con la excepción para tres estados de la república mexicana (SENER, 2022)³.

Para 1990 la política pública de eficiencia energética tenía una importancia sin precedentes, inicialmente a nivel general en el sector energético y ramificándose al subsector residencial. A partir de los aprendizajes que se han obtenido es que las acciones actuales delinean esquemas futuros, sin importar si provienen del gobierno, de instituciones tanto privadas como públicas, y demás organismos nacionales (emulando sus contrapartes internacionales) que se han creado exprofeso para el impulso del reenfoque en la política pública, ligada en los últimos años a la agenda nacional de cambio climático⁴.

El Programa Sectorial de Energía en el periodo de 2001-2006 ya hacía mención del cambio climático como el rumbo de la política nacional hacia un desarrollo sostenible. En su versión para el periodo 2007-2012, se hacía énfasis en la reducción del consumo energético residencial con el objetivo de mitigar emisiones de GEI. Se establecieron entonces diversos programas y estrategias públicas, como la llamada “Ley para el aprovechamiento sustentable de la energía” de 2008, para impulsar la optimización de recursos desde el origen hasta el consumo.

Durante el mismo periodo, CONUEE diseña y pone en marcha el “Programa para la promoción de calentadores solares de agua en México” (Procalsol), esto con el apoyo de la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GIZ, por sus siglas en alemán) y la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) (CONUEE, 2018). Tal programa planteaba la incursión en el mercado nacional de la tecnología del calentador solar, con especial atención para la implementación dentro del sector residencial.

En 2007, por otro lado, inicia como proyecto piloto desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en la parte técnica, el modelo de financiamiento de “Hipoteca Verde”. El modelo se diseñó para viviendas de interés social financiadas por INFONAVIT o bien por el Fondo de la Vivienda del ISSSTE (FOVISSSTE). El proceso consiste en integrar las llamadas ecotecnologías, que refieren a una serie de accesorios o equipos ahorradores de agua y energía, generando además un incentivo fiscal (Albarrán et al., 2014).

Tal proyecto se presentó como el financiamiento ideal para la compra de viviendas (nuevas o existentes) que de alguna manera fomentarían el consumo eficiente de agua, electricidad y/o gas. Al considerar el costo de cada una de las ecotecnologías adoptadas, y en función de los ahorros proyectados a lo largo del ciclo de una hipoteca, se entiende facilitarían al usuario la obtención de un préstamo mayor al que sería acreedor si su opción de compra fuera una vivienda sin ninguna de las opciones de consumo eficiente (CONAVI, 2020).

³ Si bien los ahorros derivados del HV contribuyeron a reducir picos de demanda máxima, hoy dichos ahorros son marginales, según el Ing. Odón de Buen Rodríguez, en comparación con otras medidas que deben fortalecerse y estar vigentes, como lo son las NOM de eficiencia energética.

⁴ Actualmente, como parte de los esfuerzos enfocados a la problemática del cambio climático en conjunto con la situación sanitaria que se vive, el gobierno federal en conjunto con CONACYT emitió la “Convocatoria 2021 para la presentación de proyectos de investigación e incidencia orientados a la adaptación y mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad del aire en ciudades mexicanas”, lo cual resuena con los propósitos de las diversas herramientas existentes dentro de la política pública nacional enfocadas a la eficiencia energética en beneficio del desarrollo sostenible del país.

El portal de INFONAVIT actualmente cuenta con un “Simulador de Hipoteca Verde” donde es posible verificar las opciones de ecotecnologías autorizadas. También se puede consultar su precio, un estimado del ahorro individual que producirán, así como conjuntos de opciones diseñados según el nivel de ahorro esperado. Conviene destacar que el CEV, al menos en su publicación inicial, fue prácticamente sincrónico respecto a la creación de la fase piloto de este proyecto. Pasados los años, se observa que el impulso de solo una de estas iniciativas es perceptible, pues desde hace ya más de una década es obligatoria la incorporación de ecotecnologías para cualquier vivienda con subsidio de INFONAVIT (CONAVI, 2020).

En 2008 comenzó a diseñarse el programa “Luz Sustentable” a cargo del FIDE, esto con financiamiento público del Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable del Energía (FOTEASE), creado en 2009. Se implementó a nivel nacional a partir del siguiente año, enfocado a usuarios del servicio eléctrico doméstico, y se basó en distribuir lámparas fluorescentes compactas autobalastadas (LFCA), de menor consumo, con el fin de fomentar la sustitución de focos incandescentes de uso residencial.

En 2012, se implementó el “Reglamento de la ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética”, documento que considera beneficios económicos netos de las renovables así como de la cogeneración. Durante el mismo año, se creó la Ley General de Cambio Climático (LGCC), misma que indica, a partir de la experiencia internacional, el origen del modelo de inventario de emisiones actual, el cual es gestionado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INEEC).

Un año después, se dio a conocer la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE). En esta ley se proponen límites progresivos de generación de energía con recursos fósiles; de 65% para el año 2024, de 60% para 2035, y de 50% para 2050. Con esto, México pasa a formar parte de aquellos países que desde hace más de una década, al menos en teoría, trazaron un camino hacia la descarbonización de su red eléctrica para minimizar la dependencia de recursos fósiles, y así, favorecer proyectos relacionados con fuentes renovables (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2018).

Lo anterior coincide con diversas iniciativas llevadas a cabo entre 2010 y 2011 que situaron a México como el primer país en desarrollo que presentó un programa público piloto de viviendas sustentables hacia 2030, principalmente en respuesta a las “Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación” (NAMA, por sus siglas en inglés). Las NAMA parten de un principio internacional en atención al cambio climático definido por la ONU, al crear instrumentos de soporte técnico y económico que incluso puedan convertirse en políticas públicas de un país.

Con esto se origina el programa con presencia nacional “NAMA Vivienda Nueva” producto directo de esfuerzos realizados por INFONAVIT, que, en conjunto con la iniciativa gubernamental alemana, a través de la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID), así como GIZ, contribuyeron al mejoramiento de viviendas principalmente bajo el enfoque del ahorro de energía (CONAVI, 2016). Del enfoque NAMA se desprende el ya mencionado “Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde” (Sisevive), que utiliza las herramientas oficiales DEEVI para el cálculo de la eficiencia energética y SAAVI para el cálculo del ahorro de agua. La suma de ambos indicadores evalúa el desempeño energético de la vivienda mediante el índice de desempeño global (IDG, desarrollado por el Centro Mario Molina), con el fin de obtener subsidio

prioritario de CONAVI para aquellas viviendas que cumplan con estándares enmarcados en el programa de NAMA (Registro Único de Vivienda [RUV], 2020).

A partir de 2013, SHF comenzó a operar “Programas de Vivienda Sustentable” (ver Figura 1) bajo la denominación de “EcoCasa”. La función principal es otorgar financiamiento (a través de intermediarios como el Banco Inmobiliario Mexicano, Metrofinanciera, ABC Capital, etc.) de hasta un 65% del costo total de proyectos para la construcción de viviendas con estándares de sustentabilidad avalados por las herramientas “Sisevive”. Las cifras más actuales reflejan un total de 77,922 viviendas evaluadas y certificadas (SHF, 2021). Tal certificación implica una reducción de emisiones de GEI de al menos un 20%. Además, requiere de una verificación operativa luego de la construcción, con lo cual clasifica viviendas en 3 niveles de eficiencia. El nivel mínimo refiere a requisitos semejantes a los originales de “Hipoteca Verde”, mientras que el nivel máximo es equivalente al sistema de calificación empleado por la certificación alemana “Casa Pasiva”.

Figura 1

Programas y acciones para la construcción de vivienda sustentable



Nota. Adaptado de “Programas de Vivienda Sustentable” disponible en <https://www.gob.mx/shf/acciones-y-programas/programa-ecocasa-shf>

Para la operación de tales programas, tanto en el sector público como privado, la falta de información se vuelve un obstáculo repetitivo, sumado a la capacitación técnica requerida. De modo que, si bien promueven el enfoque nacional de la sostenibilidad y el financiamiento en

la vivienda, estos programas resultan en un esfuerzo mal aterrizado al contexto (ej. ofrecer ecotecnologías sin considerar el clima de la zona) y generan discrepancia entre los objetivos nacionales y las limitaciones locales.

Durante 2013-2018 se buscaba la ampliación de fuentes de energía renovable para transformar la capacidad productiva de hidrocarburos, así como el aumento de la infraestructura eléctrica nacional en un intento por desintegrar el monopolio de los principales proveedores del país (Ramírez et al., 2021). En este periodo se establecieron tarifas energéticas que considerasen repercusiones ambientales a fin de promover el uso eficiente, con especial énfasis al bienestar del consumidor.

Para finales de 2015, se publicó la Ley de Transición Energética (LTE), la cual en su Artículo 18 y 36 identifica el carácter técnico-administrativo de la CONUEE. Destaca su intervención en programas del sector residencial, y en el cumplimiento de NOM. Por otro lado, fomenta la gestión de energía en grandes usuarios con esquemas pertinentes como el modelo “ESCO” y sistemas tipo ISO 50001, donde al generar ahorros, proveedores de servicios subsidian (de forma directa o como garantía) costos y posteriormente verifican con auditorías periódicas el mantenimiento en condiciones favorables de los sistemas originales (FIDE, 2018). A propósito, la dificultad central para implementar esquemas de este tipo en nuestro país (y en general en América Latina) incide en poder contratar proveedores de energía particulares, lo cual garantice los costos públicos entre empresas y la industria. Para esto se requiere la aprobación de múltiples partes; en el caso del sector residencial, sería la entidad de vivienda pública, el constructor, los habitantes y la compañía de servicios públicos (FIDE, 2018).

Siguiendo con la cronología, el “Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía” (PRONASE, 2014-2018), aplicable a las actividades de toda la cadena energética, se actualizó para el periodo actual (2019-2024), y junto con la “Estrategia Nacional de Energía 2013-2017” (ENE), aumentaron el nivel de eficiencia y sustentabilidad para la producción y consumo nacional de energéticos. Los objetivos proyectados implicarían 16% del consumo final nacional evitado para 2024, y de 35% para 2040. Esto a través de las acciones de entidades productivas públicas y privadas, el desarrollo, verificación y actualización de normas de eficiencia energética (SENER, 2020).

En contraparte a los avances, con cada periodo administrativo viene un desequilibrio de políticas internas. El recurso humano necesario, recortes presupuestales y demás aspectos económicos y legales originan retrocesos en todos los ámbitos. Lo anterior explica en cierta medida las barreras institucionales para implementar normas de eficiencia energética nacionales (Vargas, 2022). El lado positivo a esto es que se amplía el camino hacia esfuerzos combinados con la inversión privada en sectores como el de la construcción.

Las experiencias relacionadas al ahorro energético en nuestro país se han centrado en programas destinados a los principales usos finales dentro de la vivienda, sus estructuras de costos y tarifas. Programas públicos que controlan la red que conecta las subestaciones con los consumidores, sustentan la lógica económica de que las empresas eléctricas, por ejemplo, tendrán mayor rentabilidad al modificar o regular el consumo de usuarios, en lugar de solventar la demanda con nuevas plantas de generación (Velazco, 2013). Asimismo, es necesario dirigir los subsidios o esquemas de financiamiento primero hacia quienes presentan algún grado de carencia energética, mencionada en la LTE como la privación de servicios y bienes económicos como iluminación, satisfacción alimentaria, calentamiento de agua y climatización, presente en 36.7% de la población nacional (Ochoa, 2020).

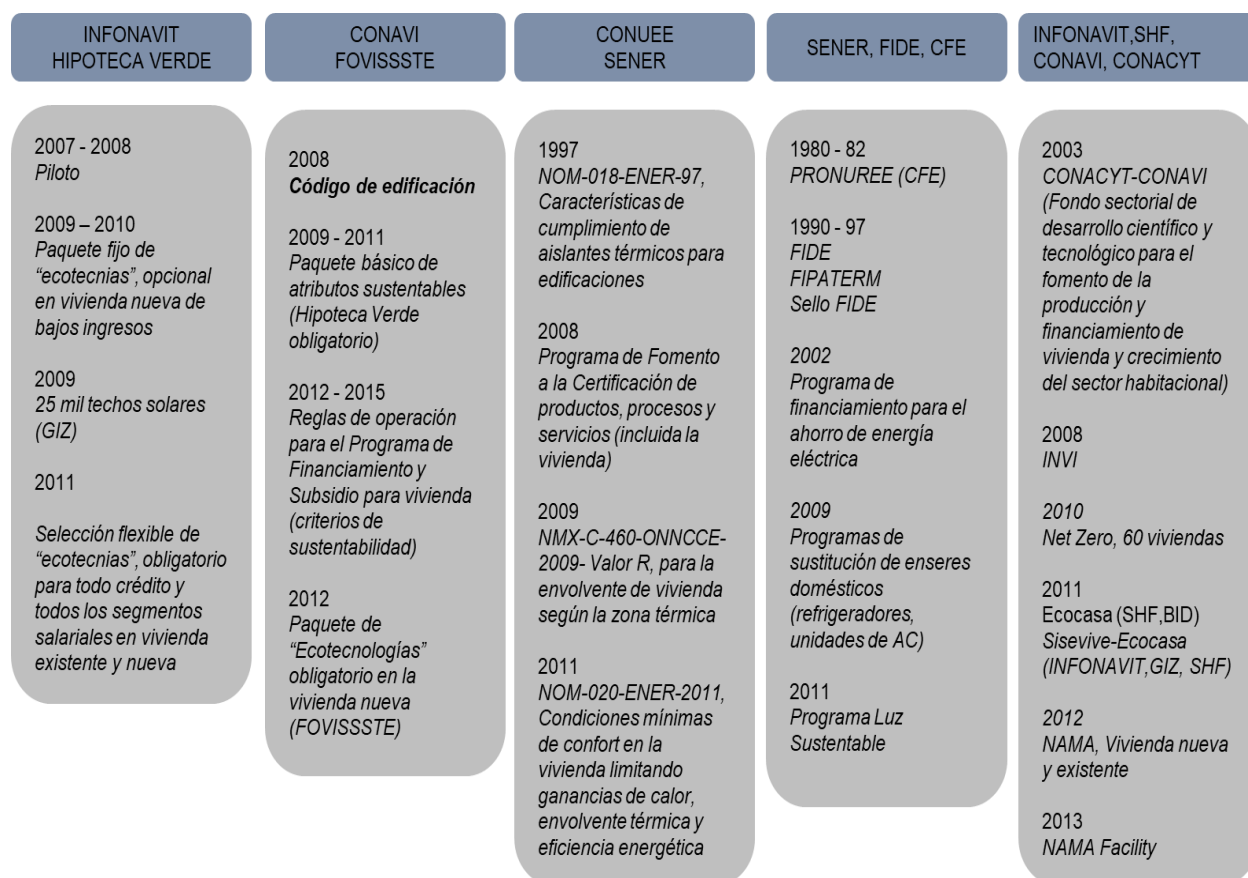
Tal enfoque alude a lo señalado previamente como estrategia hacia un desarrollo sostenible, en la que los Estándares Mínimos de Eficiencia Energética (MEES, por sus siglas en inglés) para electrodomésticos han sido esenciales. Al ser una práctica que ha generado beneficios exponenciales, se debe continuar el análisis y actualización acorde a la tecnología disponible de escenarios futuros. De manera particular, y como mencionan Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo (2016), se requiere abordar la optimización de la potencia eléctrica de equipos y sistemas, así como la eficiencia durante el periodo de uso.

2.1 Organismos rectores

Los principales organismos que intervienen en acciones del sector energético a nivel nacional son SENER, CONUEE, la Comisión Reguladora de Energía (CRE), Petróleos Mexicanos (PEMEX), el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) (antes el Instituto de Investigaciones Eléctricas [IIE]), así como institutos y unidades académicas que intervienen como consultores habituales. Se ramifican en otras dependencias para problemáticas específicas del sector residencial (ver Figura 2).

Figura 2

Esquema organizacional de la “Vivienda Sustentable en México”



Nota. Adaptado de “Programa México Alemán para NAMA” (GIZ, 2015).

En cuanto a la canalización de fondos para proyectos que buscan divulgar medidas de ahorro específico en electricidad, el FIDE es quizá la entidad con mayor trayectoria nacional, creado en 1990 con apoyo de empresas privadas ligadas a la energía eléctrica, su producción y consumo. También recibió apoyo de instituciones públicas, como CFE y el “Sindicato Único de Trabajadores Electricistas de la República Mexicana” (SUTERM). Asemajando la labor de FIDE, esta FOTEASE, donde la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP) funge como fideicomitente; BANOBRAS como fiduciario, y SENER como quien garantiza el fideicomiso. Se enfoca en acciones como son apoyos de 15% no recuperables de la inversión total (con un tope de diez millones de pesos) por sustituciones autorizadas en municipios que cumplan con requisitos preestablecidos. Al 2014 el FOTEASE contaba con siete programas autorizados por el Comité Técnico, el cual se compone por la SHCP y diversas secretarías e instituciones gubernamentales enfocadas a la investigación.

Se ha mencionado ya el papel jerárquico de CONUEE como responsable de distintas acciones de carácter técnico (lineamientos, fideicomisos, metodologías, catálogos, manuales, registros de personas, sociedades civiles e instituciones, etc.) para la eficiencia energética en el país. Su alcance abarca también el verificar y certificar las NOM orientadas ya sea a sistemas o productos aplicables a la industria y otros sectores; en el caso del residencial, por medio del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).

En 1994 el ONNCCE fue acreditado por la Secretaria de Economía como "Organismo Nacional de Normalización", y en 1997 obtuvo la acreditación de "Organismo de Certificación de Producto", esto por la Entidad Mexicana de Acreditación, A.C. (EMA), aprobada por CONUEE y por la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). A finales de 2012, amplió sus servicios al acreditarse como Unidad de Verificación ante la EMA, con el visto bueno de CONUEE. Para 2016, ONNCCE se acreditó como la primera Unidad de Verificación para la NMX-AA-164-SCFI, Edificación Sustentable.

La certificación de productos ha cobrado una importancia real en la implementación de programas de vivienda sustentable donde la eficiencia energética es un factor clave, pues ciertos organismos, por ejemplo INFONAVIT, exigen desde el año 2009 que las ecotecnologías se certifiquen para formar parte de sus esquemas crediticios (Albarrán et al., 2014).

Para 2001, se creó uno de los principales Organismos Nacionales de Vivienda (ONAVI), que fue la Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda (CONAFOVI). En 2006 pasó a convertirse en lo que hoy es la CONAVI. Después, como resultado de reformas organizacionales, se agrupó con la Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) para ser la parte técnica en los programas nacionales de vivienda⁵, además de la gestión de apoyos económicos (CONAVI, 2017b). Otro ONAVI relevante es la Cámara Nacional de la Industria de Desarrollo y Promoción de Vivienda (CANADEVI), formada en 2002 para atender las necesidades de beneficiarios de crédito que otorgan INFONAVIT y FOVISSSTE (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018).

⁵ La versión actualizada del Programa Nacional de Vivienda (2019-2024) incorpora elementos de la vivienda “adecuada” establecidos por ONU-Hábitat, donde se incluye la disponibilidad de servicios, los materiales empleados y las instalaciones, entre otros.

2.2 Normatividad

La Ley Federal sobre Metrología y Normalización establecía que, “corresponde a las dependencias de la Administración Pública Federal constituir Comités Consultivos Nacionales de Normalización para expedir Normas Oficiales Mexicanas sobre productos, sistemas, procesos, métodos, instalaciones y servicios, así como certificar, verificar e inspeccionar su cumplimiento” (LFMN, 1992). En el año 2020, la Ley de la Infraestructura de la Calidad sustituye el alcance de la LFMN para favorecer el Sistema Nacional de la Infraestructura de la Calidad en México (Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, 2020). SENER, a través de CONUEE, constituye en 1993 el “Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los recursos energéticos” (CCNNPURRE), siendo el responsable del proceso nacional de normalización en el uso racional de energía. Tal proceso distingue dos tipos de normas según su régimen de aplicación; obligatorio para las NOM, y voluntario las Normas Oficiales Mexicanas (NMX).

Se mencionó que las estrategias públicas enfocadas al consumo residencial eficiente detonaron a mediados de 1990. Específicamente, con la publicación de las tres primeras NOM en 1995. Una de ellas, la NOM-072-SCFI-1994, considerada la primera Norma Oficial Mexicana de Eficiencia Energética (NOM-ENER) para refrigeradores y congeladores electrodomésticos, actualizada como NOM-015-ENER-2012 y homologada con EUA y Canadá a través de las acciones del North America Energy Working Group (NAEWG, por sus siglas en inglés).

Para 2018, los impactos energéticos producto de la normalización de eficiencia energética se estimaron en un ahorro anual de energía eléctrica de 6,531.8 GigaWatts-hora (GWh), lo cual también evitó una capacidad instalada de 1,312.9 MW (CONUEE, 2018). El ahorro en energía eléctrica en nuestro país incluso supera otros líderes latinoamericanos en normalización, como Brasil. Esto en gran medida se debe al efecto de las NOM-ENER; tan solo aquellas para el consumo eléctrico generaron un ahorro que representa el 19% del consumo nacional residencial, mientras que la proporción restante de ahorros refirió a NOM-ENER térmicas (IEA, 2021).

Las NOM-ENER de producto para el sector residencial regulan el consumo de refrigeradores, equipos de aire acondicionado, lavadoras, calentadores, bombas de agua, y luminarias. En cuanto a los sistemas, cubren la envolvente arquitectónica (muros, techos, ventanas y puertas de una construcción). Para zonas de clima templado donde el aire acondicionado no suele figurar, las normas oficiales han generado un decrecimiento del consumo por usuario desde 2001 (CONUEE, 2018). A nivel nacional, la implementación paulatina ha reducido la intensidad energética del sector, pues más del 50% de las NOM-ENER cubren el 90% del consumo residencial (CONUEE, 2021b).

En el país se tienen 34 NOM-ENER vigentes, un sistema de evaluación con 90 laboratorios para pruebas, 21 organismos para la certificación y más de 200 unidades verificadoras. El reporte nacional más reciente indica 35, 100 GWh de ahorro energético por consumo final de energía para el año 2021 (CONUEE, 2021b). De tal ahorro, un estimado de 9,259.40 GWh corresponde a 19 NOM aplicables a equipos y sistemas relacionados con el consumo en viviendas. Casi el 80% de tal cifra se debe a cuatro normas, tres que regulan la electricidad y una el gas LP (ver Tabla 1).

Tabla 1

Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética (NOM-ENER) aplicables a vivienda

NOM vigentes (eléctricas y térmicas)	Ahorro (GWh)
NOM-003-ENER-2021, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial.	1,110.00
NOM-004-ENER-2014, Eficiencia energética para el conjunto motor-bomba, para bombeo de agua limpia de uso doméstico, en potencias de 0,180 kW (¼ HP) hasta 0,750 kW (1 HP).	12.40
NOM-005-ENER-2016, Eficiencia energética de lavadoras de ropa electrodomésticas.	169.00
NOM-011-ENER-2006, Eficiencia Energética En Acondicionadores De Aire Tipo Central, Paquete O Dividido.	57.80
NOM-015-ENER-2012, Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos.	854.00
NOM-017-ENER/SCFI-2012, Eficiencia energética y requisitos de seguridad de lámparas fluorescentes compactas autobalastadas.	1,110.00
NOM-018-ENER-2011, Aislantes térmicos para edificaciones.	-
NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. Envoltente de edificios para uso habitacional.	12.80
NOM-021-ENER/SCFI-2017, Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto.	155.00
NOM 023 ENER 2018, Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido, descarga libre y sin conductos de aire.	248.00
NOM-024-ENER-2012, Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones.	-
NOM-025-ENER-2013, Eficiencia térmica de aparatos domésticos para cocción de alimentos que usan gas LP o gas natural.	343.00
NOM-026-ENER-2015, Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido (Inverter) con flujo de refrigerante variable, descarga libre y sin ductos de aire.	217.00
NOM-027-ENER/SCFI-2018, Rendimiento térmico, ahorro de gas y requisitos de seguridad de los calentadores de agua solares y de los calentadores de agua solares con respaldo de un calentador de agua que utiliza como combustible gas L.P. o gas natural.	91.70
NOM-028-ENER-2017, Eficiencia energética de lámparas para uso general.	4,010.00
NOM-029-ENER-2017, Eficiencia energética de fuentes de alimentación externa.	26.70
NOM-030-ENER-2016, Eficacia luminosa de lámparas de diodos emisores de luz (LED) integradas para iluminación general.	4.40
NOM-031-ENER-2019, Eficiencia energética para luminarios con led para iluminación de vialidades y áreas exteriores públicas.	35.60
NOM-032-ENER-2013, Límites máximos de potencia eléctrica para equipos y aparatos que demandan energía en espera.	802.00

Nota. Ahorro anual estimado en 2021, NOM aplicable a vivienda. Adaptado de "Normas Oficiales de Eficiencia Energética: Balance al 2021" (CONUEE, 2021).

2.3 Código de Edificación de Vivienda (CEV)

Como todo código modelo, el CEV es desarrollado por organizaciones de estándares a través de una red de comités de desarrollo con representantes de diversas entidades, tanto gubernamentales como privadas (CEPAL, 2018). Esto facilita el acceso a recursos financieros, técnicos y metodológicos para producir códigos actualizados. Los desarrolladores del código modelo generalmente se financian con las ventas del propio código, las regalías por reimpresión, así como servicios de consultoría para las autoridades que los adoptan y a los usuarios del código (Hirata-Nagasako, 2016).

El CEV fue desarrollado por la CONAVI desde 2007 por disposición oficial según la Ley de Vivienda en su Artículo 72, el cual establece que, aquellas localidades que no cuenten con las disposiciones necesarias tomarán como referente el código modelo, donde se incluyen requisitos técnicos que garantizan la seguridad estructural, la habitabilidad, la eficiencia y sustentabilidad de la vivienda (Ley de Vivienda, 2006). Derivado de lo anterior, el CEV es de carácter voluntario, con tres actualizaciones a la fecha, donde se engloban normas oficiales y voluntarias referentes a la eficiencia energética, además de incluir el primer “Código de Conservación de Energía para las Edificaciones de México” (Hirata-Nagasako, 2016).

Establece requerimientos mínimos que conforman una línea base para el diseño y la construcción de la vivienda al integrar lineamientos técnicos vigentes de las NOM y NMX. De igual modo, el CEV es la herramienta normativa que dicta las “obligaciones y responsabilidades de las autoridades y de los involucrados en la edificación de vivienda para asegurar la correcta aplicación y vigilancia del cumplimiento de la normatividad” (CONAVI, 2017a, p. III). Otros aspectos que cubre son los requisitos para la gestión e implementación técnica y legal, así como la adecuación según seis regiones bioclimáticas enlistadas para el territorio mexicano. Puede ser aplicado de manera particular, en una unidad de vivienda, o en desarrollos habitacionales, abarcando las tipologías de viviendas adosadas, aisladas o verticales de máximo 5 niveles. La última actualización del CEV en el año 2017 resultó de las acciones de la NAMA de Vivienda, donde además se indica la necesidad de una guía de implementación para su adaptación (SEDATU, 2014).

Los esquemas normativos deben ser revisados periódicamente para mantener relevancia según el panorama socioeconómico y tecnológico de lo que regula. Generalmente esto se traduce en el aumento de lineamientos mínimos (Hirata-Nagasako, 2019), en la medida que se actualizan o modifican aspectos que intervienen en la regulación ambiental (como sucede, o debiera suceder, con la seguridad estructural).

La diversidad de contenidos normativos de alcance local, regional y nacional justo genera debilidades en el manejo y gestión de sistemas de actualización constante que atiendan una competencia técnica. A manera de subsanar tal situación, en especial ante la creciente presión social y global de atender el cambio climático desde diversos enfoques, es que han ganado terreno nacional las iniciativas privadas y certificaciones extranjeras sobre los lineamientos locales oficiales.

A propósito, no se identifican registros del impacto de aplicación del CEV, en términos de ahorro energético, o en cualquier otro aspecto. Si bien se han redactado en el Anexo 15 del código las modificaciones específicas por capítulo respecto de ediciones previas, permanece la brecha de datos empíricos, proyecciones y estudios de sensibilidad adecuados para sustentar la utilidad técnica, sobre todo si se considera que el respaldo teórico incluye algunos análisis individuales realizados para distintas normas oficiales que se enlistan en el código (CANADEVI y CONUEE, 2014; CONUEE, 2017a).

Como ejemplo de lo anterior está el estudio titulado “Análisis de costo-beneficio según el aislamiento óptimo para el cumplimiento de NOM-020-ENER-2011, en diferentes bioclimas de México y 3 tipologías de vivienda”, elaborado por la CONUEE en conjunto con CANADEVI en 2014, y, por otro lado, el estudio “Costos y beneficios de la Norma Oficial Mexicana para envolvente de edificaciones residenciales (NOM-020-ENER)”, también elaborado por CONUEE en 2017.

2.3.1 Capítulo 31. Sustentabilidad

Para la última edición del CEV, dentro del capítulo 31 se hace referencia en el apartado de “Eficiencia energética” a 23 NOM-ENER vigentes en el país. La intención es concentrar los criterios mínimos de sustentabilidad vigentes, englobando una serie de elementos de la vivienda como lo es la envolvente y todo lo pertinente a la selección y funcionamiento eficiente del equipamiento y sistemas mecánicos (iluminación, agua, residuos, etc.). También se considera la inclusión de energías renovables, así como estrategias de diseño bioclimático de la vivienda como de su entorno inmediato para en conjunto favorecer la reducción de emisiones de GEI (CONAVI, 2017a).

La envolvente de edificios habitacionales, los usos finales de iluminación, electrodomésticos y equipos que usan gas LP, son incluidos en el código respecto al consumo de energía eléctrica y térmica y sus emisiones correspondientes. El código no hace distinción del alcance o el tipo de emisiones que se busca atender. La determinación del impacto por emisiones indirectas a partir de lo establecido en el CEV surge justo porque se especifica la intención de mitigación:

(...) realizar la homologación y estandarización de criterios mínimos de sustentabilidad estableciendo lineamientos para el diseño sustentable de una vivienda, considerando aspectos como la envolvente, selección e instalación de sistemas y equipos mecánicos eficientes, sistemas para aprovechamiento de energías renovables, iluminación eficiente y natural ahorro y tratamiento de agua, manejo de residuos y áreas verdes con la finalidad de reducir las emisiones de carbono y otros gases de efecto invernadero. (CONAVI, 2017a, p. 377)

En nuestro país, el “Código de Conservación de Energía para las Edificaciones de México” (IECC-México) es referido dentro del capítulo 31 del CEV, en el apartado de “Eficiencia energética”. Al igual que el CEV, fue elaborado bajo el esquema de código modelo, con la particularidad de que los códigos de energía tienen como objetivo único el rendimiento energético de edificaciones según su tipología, cubriendo sus sistemas y componentes (PNNL, 2021). Se recomienda partir del enfoque más restrictivo, ya que para el IECC-México algunos de los parámetros considerados se traslapan con lineamientos oficiales (NOM) referidos en el CEV (Hirata-Nagasako, 2016).

La creación de la primera versión del IECC en México toma como referencia directa el IECC estadounidense y otros equivalentes internacionales, en específico basados en el diseño y la metodología del International Code Council (ICC). Similar al proceso de creación del CEV, se han publicado ciertos documentos de apoyo para su adaptación técnica y adopción normativa, donde se sugiere llevar a cabo una revisión y mantenimiento periódico, sin embargo, solo en el caso del CEV se ha avanzado más allá de la primera edición.

En concordancia con lo ya mencionado, parte clave de los códigos dentro de la política energética es facilitar el estudio de patrones de consumo en el sector residencial. Mediante actualizaciones se puede evaluar la pertinencia de lineamientos dentro de un proceso, en este caso tal proceso siendo la totalidad del proyecto arquitectónico. Como objetivo final se tiene la transformación en el comportamiento energético de los inmuebles donde se aplique un código (incluso en los casos más restrictivos apuntando a convertirse en productores de energía) a través de la demanda de energía reducida en medidas de “suficiencia energética”, utilizando equipos electrodomésticos certificados de acuerdo con el proceso de normalización energética vigente.

2.3.2 Anexo 8. Especificaciones bioclimáticas para el consumo energético y emisiones de carbono recomendadas

Se ha establecido ya que los edificios representan una oportunidad manejable para lograr reducciones significativas de emisiones de GEI en distintos niveles de impacto (IEA, 2020). Específicamente, la IEA ha estimado, con el seguimiento a lineamientos enfocados a la conservación de energía, que casi un 30% del total de emisiones previstas a nivel mundial procedentes de los procesos operativos dentro de la industria de la construcción podrían evitarse en menos de una década. Sin embargo, predicciones más recientes señalan un panorama menos prometedor en cuanto a los obstáculos que surgen para equilibrar objetivos de mitigación ambiental, y así frenar efectos nocivos. Debido a los cambios estructurales que ha generado la pandemia, por ejemplo, la seguridad en el abasto de recursos energéticos y el alto costo de vida ligado al bienestar humano, son dos de los diez riesgos más urgentes de atender para 2025 (World Economic Forum, 2023).

Como parte del Anexo 8 del CEV, la Tabla “Especificaciones bioclimáticas para el consumo energético y emisiones de carbono recomendables” incluye los distintos climas que existen dentro del territorio nacional, de acuerdo con la clasificación aceptada por CONAVI, misma que utilizan en sus análisis los programas de “Hipoteca Verde” y el sistema de evaluación “Sisevive-EcoCasa”. Tales clasificaciones pueden ser consultadas para la localidad que se requiera de manera independiente mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) del RUV. El propósito de dicha tabla es ofrecer información para el proyecto nuevo de vivienda, empezando por aspectos que inciden en el diseño bioclimático como lo es la orientación, agrupamiento (si es una vivienda aislada, adosada o un conjunto vertical), espacios exteriores con vegetación, así como los consumos máximos de energía recomendados según el tipo de vivienda. Los valores que se consideran en esta sección del código se resumen al indicador de consumo de energía máximo (CE).

Las recomendaciones mostradas en la tabla refieren a la cantidad máxima de emisiones emitidas a la atmósfera para poder mantener “niveles de sustentabilidad” ideales en el país. Sin embargo, no se aclara a partir de qué datos se están estableciendo tales niveles. Los factores de emisión reportados en la tabla corresponden al año 2016⁶, calculados por Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) y por el WRI, avalados anualmente por la SEMARNAT (CONAVI, 2017a).

Para esta sección del CEV, es preciso mencionar que la clasificación climática más aceptada a nivel mundial en códigos de construcción se basa en el concepto de “Grados Día” al identificar el clima de una región a partir del resumen de datos históricos del clima, tomados de bases de datos como son las estaciones meteorológicas (CONUEE, 2018). Se diferencian para calentamiento (HDD, por sus siglas en inglés) y para enfriamiento (CDD, por sus siglas en inglés), lo cual indica cuántos grados y días estuvo la temperatura ambiente por encima o por debajo de una temperatura fijada como base. Esto permite comparar de manera ecuánime los requerimientos energéticos de cargas por calefacción o refrigeración de edificios en zonas climáticas distintas. De modo que no siempre un mayor requerimiento de energía refleja ineficiencia en el consumo de esta; a veces, pese a la eficiencia, se refleja mayor carga para mantener una temperatura base según la zona climática.

⁶ En apartados posteriores de este trabajo donde se utilizan estos factores de emisión se considera su valor actualizado al año 2020, tomados de la CFE y de la CRE.

Con relación a los esfuerzos para la adopción normativa, Morales-Martínez y de Buen-Rodríguez (2020) estimaron la predominancia de los grados día para refrigeración durante la mayor parte del año en nuestro país. Los autores puntualizan la necesidad de actualizar y complementar con herramientas disponibles la clasificación climática utilizada para el análisis del rendimiento energético de edificios. Una de tales herramientas se desarrolló por la CONUEE en 2021 para uso de sectores privados y públicos (ver Figura 3). Las zonas térmicas que considera corresponden al IECC estadounidense. Por tanto, la clasificación que arroja para localidades nacionales responde a los grados día calculados para una temperatura base de EUA estimada en 65°F (18.33°C). Aun así, resulta en una aproximación a parámetros nacionales al extrapolar con datos de las tres estaciones meteorológicas más cercanas a determinado punto de estudio. Esto puesto que no se ha adoptado en su equivalente (el IECC-México, o incluso el Anexo 8 del CEV) una clasificación de zonas térmicas bajo tal concepto.

Figura 3

Herramienta desarrollada por CONUEE para la clasificación climática en función de grados día

Grados Día

Encontrados: 7 / 190440

Estado: Distrito Federal
 Municipio: Coyoacán
 Localidad: Coyoacán (Clave INEGI 090030001)
 Zona Térmica: 3A
 GDCA65F: 2,281
 GDRA50F: 5,084

Grados Día de Calefacción Anual base 65 Grados Fahrenheit (GDCA65F)
 Grados Día de Refrigeración Anual base 50 Grados Fahrenheit (GDRA50F)

*Los valores presentados se establecieron a partir de promedios de datos meteorológicos históricos de más de 1,600 de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional.
 *Los valores Grados Día se estimaron a partir de promedios mensuales de temperaturas máximas y mínimas para cada localidad.
 *Las Zonas Térmicas se definen de acuerdo a lo establecido en el International Energy Conservation Code.
 *El alcance nacional a todas las localidades se realizó por extrapolaciones a partir de los valores las tres estaciones más cercanas.

Regresar a Consulta | Salir

Nota. De acuerdo con la versión estadounidense del IECC, la zona térmica 3A corresponde a las localidades con hasta 6,300 CDD (grados día de enfriamiento) y con menos de 5,400 HDD (grados día de calentamiento). Captura de pantalla. Disponible en <https://a945717.fmphost.com/fmi/webd/GradosDia%2029062021>

Los esquemas obligatorios y voluntarios para la eficiencia energética dentro de la industria de la construcción son un indicador de progreso para nuestro país. Para que el progreso sea real, la tarea es analizarlos, identificar necesidades para su actualización, e integrar esfuerzos de instituciones privadas y públicas hacia una implementación gradual basada en resultados. El camino que ha recorrido México desde el punto de vista de la política energética en el ámbito del sector residencial es aún uno de amplias áreas de oportunidad. Mismas que se pueden atender desde diferentes frentes; programas, normas, herramientas e iniciativas públicas en colaboración con el sector privado.

Capítulo 3 Mitigación de emisiones de GEI

La masa de GEI⁷ emitida por una persona, producto u organización, por efecto directo o indirecto, compone lo que se conoce como huella de carbono, y suele expresarse por unidad de tonelada métrica según su equivalencia en dióxido de carbono (tCO₂eq) (IFP, 2021). Este último es la referencia global para medir otros GEI, al ser el gas que por concentración de emisiones⁸ antropogénicas afecta en mayor proporción el equilibrio ecológico y la temperatura global (INEEC, 2019). Para mediciones relacionadas a este indicador ambiental se emplean diversas metodologías de cálculo según el tipo de emisión, la actividad productiva, la industria o el sector donde se emiten, así como el horizonte de tiempo afectado. Son además la base técnica de inventarios, de análisis de impacto ambiental ligado a daño económico, y de ciclo de vida, los cuales sustentan el rumbo de políticas de mitigación o compensación (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE], 2018).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), instaurado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial y por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (WMO y UNEP respectivamente, por sus siglas en inglés), es el referente global para la elaboración de informes que aporten datos a las causas y estrategias más viables para la adaptación y mitigación. El "Quinto Informe de Evaluación (AR5)" publicado en 2014, enfatiza en el volumen "Mitigación del Cambio Climático" el definir un punto de partida al analizar emisiones existentes y futuras. El informe más reciente (AR6), publicado en abril de 2022, sostiene el argumento anterior y la intención de reducir emisiones globales en un 50%, esto para evitar un incremento en temperaturas de 2.7°C. Resalta además que, desde una perspectiva económica, donde el cambio climático se considera una externalidad negativa, los beneficios de evitar emisiones exceden cualquier variante de costos asociados.

A propósito de los costos asociados, es habitual en el diseño de políticas de mitigación integrar el componente social del daño por emisiones de GEI. En la literatura esto se identifica como el costo social del carbono (SC-GHG, por sus siglas en inglés), es decir, el valor monetario por tonelada métrica de CO₂ emitida (Interagency Working Group on the Social Cost of Greenhouse Gases, 2021). Esto no debe confundirse con el costo atribuido a una actividad de mitigación específica, como es la aplicación de lineamientos en relación con un tope de emisiones. En tal caso, se asigna un valor monetario a una acción correctiva que se informa de precios establecidos en el mercado. El costo social, por su parte, asigna un valor monetario al daño (que incluye la salud humana, ecosistemas, productividad agrícola, entre otros) generado por la concentración de GEI a un nivel de análisis agregado. Dicho sea de paso, esto genera una problemática distinta y recurrente debido a consensos mixtos sobre el precio de mercado del carbono, en específico, el proceso que respalda y resulta en la definición de un valor monetario (Stern y Stiglitz, 2021).

⁷ Definición oficial de INECC: "Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes, ocasionando el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los gases de efecto invernadero primarios en la atmósfera terrestre".

⁸ Definición oficial del INECC: "Liberación a la atmósfera de gases de efecto invernadero y/o sus precursores y aerosoles en la atmósfera, incluyendo en su caso compuestos de efecto invernadero, en una zona y un periodo de tiempo específicos".

En condiciones normales, a todo crecimiento económico corresponde una correlación directa en emisiones contaminantes mientras no se diversifique la matriz energética tradicional de países con dependencia histórica a los hidrocarburos (Turiel, 2021). La situación de crisis generalizada por el virus del SARS-CoV-2 deja claro que existen periodos excepcionales; la producción económica de diversos sectores se redujo, aunque el consumo energético de combustibles no disminuyó al mismo ritmo. En ese sentido, si bien es natural que la desestabilización de los últimos tres años frenó temporalmente diversas fuentes emisoras, esto fue más bien un efecto rebote, similar a lo que identifican algunos autores en el consumo de energía (Baležentis et al., 2021; Giraudet, 2020; McCoy y Kotsch, 2018). Tan solo en emisiones procedentes de edificios, se estimó una reducción mundial de 9 gigatoneladas (Gt) de CO₂, las cuales se recuperaron a niveles de 2019 tan pronto se reactivó la producción económica en 2021 (IEA, 2021).

Por otro lado, es cada vez más común que países con un crecimiento económico firme y con alto grado de dependencia a los combustibles fósiles presenten un desacoplamiento entre ambos; a mayor crecimiento económico, menor consumo energético (Turiel, 2021). Tal proceso, referido coloquialmente como la “descarbonización” de la economía, se ha identificado en EUA desde 2008, aun cuando mantienen una política ambiental de impuesto al carbono limitada a unos cuantos estados, y generan el 15% de emisiones globales por consumo de energía. En realidad, el beneficio aparente se debe en gran medida a la transferencia de industrias pesadas con alta intensidad energética a otros países emergentes, y no tanto a medidas de mitigación internas (Ferrari, 2020).

El desacoplamiento que puede ocurrir entre el crecimiento económico y el consumo energético en términos de emisiones asociadas refleja el nivel de eficiencia de la economía de un país. En la literatura nacional esto se refiere a la intensidad de carbono por consumo de combustibles fósiles (Ferrari, 2020). Tal indicador relaciona las emisiones producto de la combustión fósil por unidad de Producto Interno Bruto (PIB), este último siendo el parámetro que define la producción por sectores⁹ durante cierto periodo (INEGI, 2020a). Lo ideal es que el indicador incremente, pues se infiere un desacoplamiento entre el crecimiento económico y las emisiones. En México, si bien se ha mantenido una reducción de emisiones por lo menos entre 1990 y 2015, con un promedio anual estimado de 0.484 kg de CO₂ emitidos por dólar (por paridad de poder de compra, es decir, equiparando el poder adquisitivo de nuestra moneda y el dólar), no se ha registrado una tendencia definitiva que indique un desacoplamiento entre emisiones de GEI y el PBI nacional (SEMARNAT, 2022).

La relación entre el cambio climático y la estabilidad financiera de un país revela un reto constante ya que los riesgos implícitos en estrategias de mitigación no suelen ser trazables, al menos no en un sentido “lineal” (Bolton et al., 2020). Algunos autores afirman que, después de la eficiencia energética, la mejor manera de atenuar el cambio climático con la menor probabilidad de riesgos es con la tributación, por un lado, del contenido de carbono de combustibles fósiles, y por otro, de emisiones de GEI para las industrias de mayor peso (Bolton et al., 2020; Bernal et al., 2021). Para México, el impuesto refiere al contenido de carbono en procesos de combustión industrial, y está vigente desde 2014 para contados estados como Querétaro y Yucatán. Se ha sugerido involucrar más sectores y tipos de combustible (como el gas natural), así como trabajar hacia un mecanismo confiable de asignación de lo recaudado. Sin embargo, debido a nuestra situación política fiscal y socioeconómica, tal practica es aún lejana de ser perceptible en nuestro país.

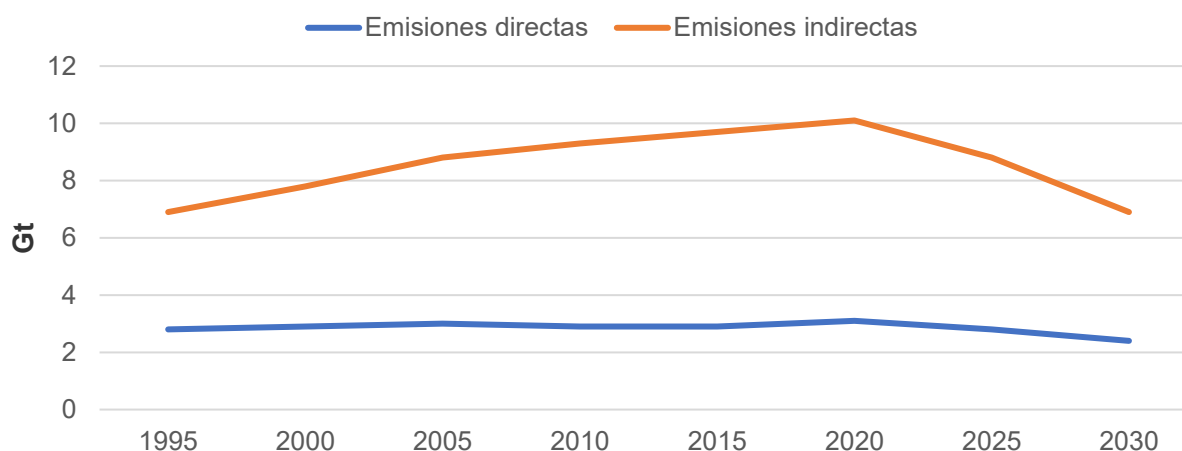
⁹ De acuerdo con el INEGI, al año 2021, el sector de la vivienda (que incluye actividades de edificación, servicios inmobiliarios y financieros, entre otras) en nuestro país aporta el 5.7% del PIB nacional.

Ahora bien, con respecto de la industria de la construcción y su participación en las políticas de mitigación de GEI, resulta complejo definir un punto de partida o referente principal, pues son diversas las iniciativas u organizaciones involucradas, aunque no siempre con el fin realista de avanzar en objetivos, sino más bien buscando cierta aprobación por parte de la opinión pública. El Green Building Council, fundado en 1993, en conjunto con el World Green Building Council, son algunas de las entidades internacionales con ramificaciones en México que incentivan la reducción de la huella de carbono de edificios (mitigación) y la preparación ante el impacto del cambio climático por condiciones meteorológicas (adaptación).

La “mitigación” por normativa en lo pertinente al sector residencial, supone una serie de lineamientos que engloban el proceso constructivo integral, así como el ciclo de vida de cualquier edificio en uso, contemplando además el suministro de materia prima, maquinaria, selección del terreno, etc. (CEPAL, 2018). Dependiendo la cantidad y el tipo de lineamientos, se han proyectado entre el 40% y el 90% de emisiones evitadas (Yang et al., 2022). En etapas posteriores de este análisis, la mitigación dependerá de la reducción del consumo final de energía residencial. Particularmente, referirá a la equivalencia de reducciones en carbono operacional, es decir, aquel emitido durante la vida útil de un inmueble (IEA, 2022). Es común que lo anterior se interprete como emisiones indirectas por consumo de energía operacional, las cuales son más significativas a largo plazo y representan un mayor reto de mitigación (ver Gráfica 4).

Gráfica 4

Emisiones de CO₂ por consumo de energía dentro de la industria de la construcción



Nota. Escenario 2000-2030. Elaboración propia con datos reportados por IEA.

México responde por el 1.5% del total de emisiones globales, con emisiones de 3.7 toneladas per cápita (por habitante) (IEA, 2020). Estas son cifras menores cuando se comparan con la media global de 5 toneladas per cápita (4.4 veces menor a la de EUA, nuestro principal socio comercial, con 16.5 ton per cápita). Sin embargo, no eximen al país de formar parte de los 20 emisores principales dentro de los 195 países considerados por las Naciones Unidas con compromisos vigentes para la reducción de GEI (World Green Building Council, 2019). Por otro lado, el Global Carbon Project (GCP, por sus siglas en inglés), organización establecida en 2001 por distintas iniciativas (World Climate Programme, Diversitas, Future Earth, por mencionar algunas) y especializada en cuantificar emisiones de GEI, situó a México en sus registros más recientes (2021) en el doceavo y décimo lugar mundial por emisiones producto del consumo de combustibles fósiles (petróleo y gas LP, respectivamente).

Con relevancia al Acuerdo de París en 2016, México ha requerido modificaciones legales para integrar disposiciones directamente relacionadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), además de crear instituciones para su implementación. Lo anterior es relevante si se toma en consideración el panorama del promedio nacional de temperatura. En los últimos 50 años, este aumentó aproximadamente 0.85 °C sobre la normal climatológica, lo cual corresponde con el incremento global reportado por el IPCC. Sumado a esto, se arrastra con un problema típico de países en desarrollo por formar parte de un esquema capitalista que privilegia la industria de la exportación; la tendencia en un futuro cercano es que los gobiernos no decidirán hacia el decrecimiento energético, por lo cual la ruta más próxima hacia la mitigación de emisiones recae en la eficiencia (Ferrari, 2020).

Una de tantas disposiciones es la “Contribución Prevista Determinada a Nivel Nacional” (NDC, por sus siglas en inglés) de México, actualizada para el periodo 2020 a 2030, lo cual va de acuerdo con los informes del IPCC. En 2020, las emisiones registradas fueron 683 millones de toneladas métricas de carbono equivalente (MtCO_{2e}), mayor que lo comprometido como límite para dicho año, de 672 MtCO_{2e} (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [SEDEMA], 2021). Esto a pesar de que las políticas implementadas con base en datos disponibles para el año base (que fue 2013) proponen reducir en menos de una década las emisiones de GEI con respecto de la línea base en un 22%. La línea base incluye el sector residencial y comercial, cuantificados con 26 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2013 y con un aumento estimado de dos toneladas para 2030 (ver Tabla 2).

Tabla 2
Línea Base BAU (Business as usual) de NAMA

Sector	2013	2020	2025	2030
MtCO _{2e}				
Transporte	174	201	225	250
Generación de energía eléctrica	149	166	174	186
Industria	124	149	173	199
Agricultura y ganadería	98	106	114	122
Petróleo y gas	73	70	93	101
Residuos	44	50	52	56
Residencial y comercial	26	26	27	28
USCUSS (emisiones)	21	36	42	49
Total emisiones brutas	709	804	902	991

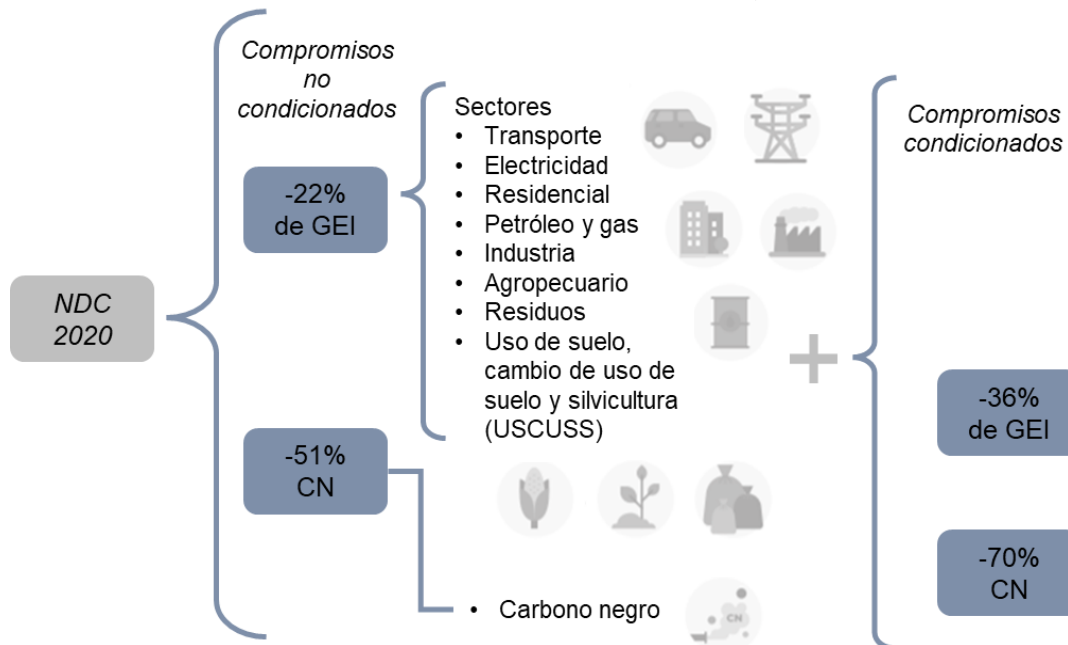
Nota. 991 MtCO_{2e} como proyección hacia 2030, sin considerar acciones de mitigación. Adaptado de “Informe de Actualización NAMA” al 2020, publicado por SEMARNAT e INECC.

Dicho aumento se aprecia como el mínimo comparado con el resto de los sectores que se proyectaron, sin embargo, se podría interpretar como el objetivo con mayor viabilidad cuando se consideran los mecanismos y esquemas normativos existentes en el país. Además de que el impacto por mitigación que pudiera lograrse incidirá de manera directa sobre sectores que presentan mayores diferencias entre lo definido como línea base y la proyección estimada al año meta de 2030, como lo es el de la generación de energía eléctrica, con un incremento de 24.83%.

La ruta de descarbonización que se propone en la NDC implica ajustar el porcentaje de mitigación de 22% en 2030 al 51% para 2050 (ver Figura 4). Tal ajuste incluye la reducción de emisiones de carbono negro (CN) producto de la combustión de origen fósil. El progreso en este aspecto está condicionado al apoyo y financiamiento internacional, considerando que para cumplir con la mayoría de los compromisos se requiere de mecanismos de transferencia tecnológica, un precio internacional del comercio del carbono, ajustes en aranceles pertinentes, asimismo el acceso a esquemas financieros que idealmente se configuren bajo un enfoque asequible (SEMARNAT, 2022).

Figura 4

Contribución Prevista Determinada a Nivel Nacional de México, al 2020



Nota. Contribución Prevista Determinada a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés) de México, al 2020. Adaptado de "Informe de Actualización NAMA" al 2020, publicado por SEMARNAT e INECC.

Por otro lado, la Ley General de Cambio Climático (LGCC), en su última actualización de 2018, también acentúa los compromisos básicos para cumplir con metas nacionales en menos de una década. La utilidad principal de la LGCC es la regulación, adaptación y mitigación climática, esto a través del Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC) dependientes del Instituto Nacional de Ecología, que hoy es el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y pertenece a SEMARNAT (LGCC, 2012). Uno de los instrumentos de política pública que conforman la LGCC es el Registro Nacional de Emisiones (RENE), el cual compila información específica para el conteo de emisiones de Compuestos y Gases de Efecto Invernadero (CyGEI), como son factores de emisión en sus versiones actuales, así como diversas particularidades técnicas y metodológicas. Además, indica según el sector productivo, qué tipo de emisiones reportar de manera obligatoria.

Y es que todo sector productivo es relevante cuando se considera una consolidación de compromisos condicionados y no condicionados dentro de un plazo que en realidad ya no es lejano. La proporción de emisiones del sector residencial es marginal y en nada equiparable con la del sector energía, por ejemplo. Sin embargo, al estar ligados entre sí se explica el interés y el nicho de oportunidad que representan los edificios, con el 27% de

emisiones relacionadas a sus necesidades energéticas. Esto sin dejar de lado el fortalecimiento de la política pública y actividades de mercado vigentes para la mitigación de emisiones por medio de la eficiencia energética, incluso proyectando lo que en diversos países ya se atiende con edificaciones cero carbono (WRI, 2019).

El documento “Gases de efecto invernadero. Líneas base de emisión y potenciales de reducción de edificios en México”, desarrollado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2009) con la participación de entidades y expertos nacionales, hace referencia a emisiones nacionales procedentes del consumo final residencial y comercial. Se estimaban 75 millones de toneladas en 2006, representando alrededor de 12% del total de emisiones en el país para dicho año (Rodríguez, 2009). Asimismo, se proyectaba un crecimiento aproximado de 500 millones de toneladas para 2050 si se mantuviera un escenario sin acciones correctivas (conocido como “business as usual”). Se consideraron las emisiones totales como constantes durante el periodo 2006-2050, bajo el supuesto de que la intensidad promedio del consumo de electricidad en hogares para el clima templado no creciera, y por otro lado, que la intensidad energética promedio para el enfriamiento de los hogares en climas cálidos también se mantuviera constante.

En el mismo documento se indica que las medidas de mitigación en el sector residencial se reflejan en las intensidades de uso final; iluminación, refrigeración/calentamiento de espacios y de agua, refrigeradores, así como electrodomésticos y “otros usos eléctricos” (Rodríguez, 2009). Los resultados reducirían emisiones de CO₂ equivalente un 63% de acuerdo con lo estimado como línea base, con datos de 2006. La mayoría de las reducciones provienen de medidas relacionadas con una mayor eficiencia en “otros usos eléctricos” (50%), seguido de refrigeración de espacios (42%), refrigeradores (3%), calentamiento de agua (3%) e iluminación (2%). En términos generales de costos unitarios por tonelada de CO₂ equivalente evitado, la medida más accesible implicó “otros aparatos eléctricos”, mientras que el calentamiento del agua adoptando calentadores solares representó el costo más alto.

Por otro lado, el esquema voluntario de Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA, por sus siglas en inglés) en México, desde 2011 incluye acciones específicas en cuanto a la reducción de emisiones basadas en el desempeño energético de la vivienda nueva y existente (CONAVI, 2016). Con base en resultados previos a “Hipoteca Verde”, la iniciativa NAMA presentó estrategias de control y validación para apoyar el financiamiento directo a constructores a través de “EcoCasa”. La intención de vincular al sector residencial por medio de acciones para la mitigación y adaptación al fenómeno del cambio climático implica un potencial de mitigar 1.7 MtCO₂e estimado anualmente por viviendas nuevas y existentes, especialmente cuando se profundiza en el proceso constructivo y su operación mediante prácticas convencionales que no consideran el desempeño energético.

Considerando lo anterior, el desafío para los participantes que intervienen en el sector residencial es adecuar estrategias para la vivienda actuales y previstas a futuro con los instrumentos y mecanismos disponibles. Incentivar la tecnología y el enfoque de la resiliencia con elementos ya establecidos que pueden y deben ser mejorados, como son las hipotecas de eficiencia energética, así como instrumentos normativos y política pública, es una alternativa que destacará el efecto de lo que ya se ha logrado establecer (y que sin embargo, se debe seguir analizando) en términos de ahorro económico, energético y por consiguiente de emisiones (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2013).

3.1 Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INEGYCEI)

El efecto invernadero relacionado a las emisiones antropogénicas ocurre cuando el gas atmosférico absorbe y emite radiación. Esto eleva la temperatura del planeta producto de una diferencia en la irradiación vertical sobre la tierra, y origina el efecto del forzamiento radiativo; a mayor forzamiento radiativo de un GEI, mayor potencial de calentamiento (INECC, 2019). El INEGYCEI estima emisiones antropogénicas y su absorción a partir de la formulación, planificación, ejecución, evaluación y actualización (INECC, 2019). A cargo del INECC, y conforme a los criterios establecidos por el IPCC como parte del compromiso internacional de nuestro país al ser parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992)¹⁰, y según lo señalado en el artículo 12 de su protocolo, así como en el artículo 74 de la LGCC, supone la base metodológica para otros inventarios locales y específicos.

Cada actualización del inventario nacional implica una serie de ajustes en la recopilación de datos empezando por la capacidad técnica para obtenerlos, examinar a mayor detalle los sectores y subsectores, así como los gases o compuestos que se registran por sector. Los Gases o Compuestos de Efecto Invernadero (GyCEI) que se identifican para su registro son el dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, carbono negro, gases fluorados, hexafluoruro de azufre, trifluoruro de nitrógeno, éteres halogenados, halocarbonos, mezclas de estos y otros identificados por el IPCC, que después son designados por autoridades nacionales o regionales (SEMARNAT, 2022).

Su utilidad es esencial para auxiliar en el diseño de políticas enfocadas a la mitigación al tener un registro confiable de las principales fuentes emisoras. Para ciertos sectores (incluido el sector de Energía), en específico aquellos que superan en sus instalaciones 25 mil tCO₂eq entre emisiones directas e indirectas, resulta obligado reportar emisiones. Una vez registradas para determinado año, la proyección de estas se realiza con datos de actividad y factores de emisión¹¹, y la línea base se desarrolla bajo un esquema de consultas con expertos en cada uno de los sectores.

El desarrollo de una línea base es entonces la proyección de la tendencia histórica de variables impulsoras de las diferentes fuentes de emisión donde la trayectoria de emisiones a nivel nacional se desarrolla de acuerdo con las proyecciones por cada sector, categoría y en algunos casos por fuente de emisión (Solís, 2021). Sus etapas incluyen la identificación de variables en términos de la generación de emisiones de GyCEI, así como la recopilación y análisis de fuentes de datos por tipo de actividad, con lo cual se obtiene lo necesario para proyectar producción, demanda y consumos energéticos, entre otros (SEMARNAT, 2022).

¹⁰ Compromiso de México ante la CMNUCC: “Elaborar, actualizar periódicamente, publicar y facilitar a la Conferencia de las Partes, de conformidad con el Artículo 12, inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, utilizando metodologías comparables que habrán de ser acordadas por la Conferencia de las Partes” (Artículo 4, texto de la Convención, 1992).

¹¹ La LGCC define los factores de emisión como la relación entre la cantidad de gases emitidos a la atmósfera y una unidad de actividad. Generalmente se expresan como tasa de emisión (masa del gas por unidad de tiempo) o como masa por unidad de energía o volumen emitido de contaminantes. Si no hay fuentes locales o específicas de cada país disponibles, se usan factores predeterminados del IPCC.

Como fuentes de información principales a nivel nacional está la plataforma de la SENER, Sistema de Información Energética (SIE), la cual es actualizada a su vez con datos de instituciones académicas, empresas privadas y organismos públicos. Las actividades económicas, sectores y subsectores que reporta se incluyen en el Balance Nacional de Energía, y los datos de utilidad se relacionan con el consumo energético, tanto en estructura porcentual como en unidades de energía por tipo de combustible.

Dependiendo de la fuente emisora o la actividad que se registra, las bases de datos deben ser más especializadas y complementarse con documentación oficial que se avale por diversas cámaras y asociaciones según la industria. Los datos pertinentes se integran por sector, categoría, y en algunos casos hasta por fuente de emisión. La especificidad de los datos de actividad, por ejemplo, consumos energéticos, define en función de qué es que se calculan emisiones y da una idea de su alcance y categoría. Las emisiones asociadas a datos proyectados por sector se estiman bajo la consideración de un enfoque metodológico que surge de las recomendaciones del IPCC para la elaboración de inventarios a distintas escalas.

Para la actualización de 2018, el sector residencial 1A4b representa el 4.24% del total de emisiones netas a nivel nacional, mientras que, en 2015, respondía por el 3.98%, equivalente a 21,279.70 gigagramos (Gg) de CO₂eq. La versión más actual (2022) indica que el sector residencial registró el 4.97% del total de las emisiones nacionales netas, lo cual equivale a 20,342.73 Gg de CO₂eq (SEMARNAT, 2022). Si bien la equivalencia en emisiones es menor al valor de 2015, la proporción del sector residencial respecto al total sí registró un aumento. Con relación a otros rubros, tal aumento en emisiones netas pudiera resultar trivial, sin embargo, la pertinencia del sector residencial como parte de planes y estrategias nacionales de mitigación se basa en que las soluciones que se pudieran plantear son más viables desde el punto de vista técnico a corto y mediano plazo. Esto debido a que no dependen en su totalidad de cambios radicales en la composición de la matriz energética del país (SENER, 2019).

3.2 Metodologías del cálculo de emisiones de CO₂eq. por sector

Se ha mencionado ya la importancia de conocer el impacto ambiental generado por las construcciones, y sobre esa línea es fundamental entender los procesos existentes para la estimación, regulación y/o disminución de emisiones. En lo referente a su medición, como conjunto suelen expresarse en unidades de carbono equivalente (CO₂eq) (INECC, 2019). A esto se refiere la huella de carbono como indicador de emisiones agregadas, tomando la misma unidad (WRI, 2014). De modo que la huella de carbono comprende la concentración de GEI, así como la capacidad de absorción de calor, o el potencial de calentamiento global (PCG) de cada uno. Tal potencial es referido normalmente por sus siglas en inglés (GWP), donde para el dióxido de carbono se indica el valor de 1 (ver Tabla 3).

El proceso base para definir emisiones de GEI se basa multiplicar dos valores. Uno de estos refiere a las unidades que consideradas datos de actividad, es decir, aquellos datos que describen la magnitud nacional anual de la mismas (por ejemplo, consumo de electricidad en Giga julios [GJ]). El segundo valor se refiere al factor de emisión (por ejemplo, emisiones de CO₂ por MJ/gas LP). La unidad de medida habitual en inventarios y algunos reportes de sectores subsectores es la tonelada métrica; para la conversión a toneladas de CO₂eq se utilizan factores GWP de 100 años publicados por el IPCC.

Tabla 3

Valores de potencial de calentamiento global (PCG) determinados por el IPCC

Nombre	Fórmula	Valores de PCG en el 2do Informe de Evaluación del IPCC (1995)	Valores de PCG en el 3er Informe de Evaluación del IPCC (2001)	Valores de PCG en el 4to Informe de Evaluación del IPCC (2007)	Valores de PCG en el 5to Informe de Evaluación del IPCC (2013)
		CO ₂ e			
Dióxido de carbono	CO ₂	1	1	1	1
Metano	CH ₄	21	23	25	28
Óxido nitroso	N ₂ O	310	296	298	265
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	23.900	22.200	22.800	23.500
Tetrafluoruro de carbono	CF ₄	6.500	5.700	7.390	6.630
Hexafluoroetano	C ₂ F ₆	9.200	11.900	12.200	11.100
HFC-23	CHF ₃	11.700	12.200	14.800	12.400
HFC-32	CH ₂ F ₂	650	550	675	677
HFC-41	CH ₃ F	150	97	92	116
HFC-125	C ₂ HF ₅	2.800	3.400	3.500	3.170
HFC-134	C ₂ H ₂ F ₄	1.000	1.100	1.100	1.120
HFC-134 ^a	CH ₂ FCF ₃	1.300	1.300	14.300	1.300
HFC-143	C ₂ H ₃ F ₃	300	330	353	328
HFC-143 ^a	C ₂ H ₃ F ₃	3.800	4.300	4.470	4.800
HFC-152 ^a	C ₂ H ₄ F ₂	140	120	124	138
HFC-227 ^{ea}	C ₃ HF ₇	2.900	3.500	3.220	3.350
HFC-236 ^{fa}	C ₃ H ₂ F ₆	6.300	9.400	9.810	8.060
HFC-245 ^{ca}	C ₃ H ₃ F ₅	560	950	1.030	716
Trifluoruro de nitrógeno	NF ₃	-	-	17.200	16.100

Nota. Publicados en cada Informe de Evaluación del IPCC. Adaptado del "Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria" de WRI (2014).

Las metodologías para el cálculo de emisiones implican un planteamiento base que se adapta tanto al contexto local como al tipo de actividades y fuentes emisoras (SEDEMA, 2021). El INECC basa sus metodologías para registrar y cuantificar emisiones directamente de lo que establece el IPCC, esto al ser el referente mundial en la elaboración de inventarios y temas relacionados (SEMARNAT, 2020). Algunos otros lineamientos empleados a nivel nacional para estimaciones aisladas por sector y también para identificar factores de emisión provienen de la CONUEE, del Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés) y en algunos casos, como sucede con el apartado pertinente a emisiones por consumos energéticos máximos permitidas según el CEV, del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés).

De acuerdo con lo que se estipula en las directrices del IPCC, de inicio es importante establecer el nivel de complejidad metodológica de estimaciones cuando se consideran factores de emisión y datos de actividad. Esto se expresa con niveles de jerarquía, donde el nivel 1 o "Tier 1" es aquel en el que se emplean datos predeterminados y ecuaciones simples con factores de emisión relacionados a información preexistente. El nivel 2 o "Tier 2" requiere de un método más específico como el balance de masa, que suele incluir mediciones directas.

El nivel 3 o "Tier 3", al ser el más complejo, implica una evaluación por tipo de fuente, usualmente con el enfoque de abajo a arriba o "bottom-up". Este nivel exige inventarios detallados de la infraestructura y factores de emisión o determinación de las emisiones por fuente de energía. Por lo mismo, suele ser el más exacto para países que cuentan con datos exhaustivos, y justo esto último, en teoría, es lo que favorece este método sobre los otros dos niveles (International Panel on Climate Change [IPCC], 2006).

La cantidad y calidad de datos, así como los métodos por nivel, implican un grado de exactitud (incertidumbre) en las estimaciones resultantes, mismo que varía según el tipo de gas o fuente emisora, y particularmente del factor de emisión empleada. Y es que cuando una metodología no incluye mediciones directas, requiere entonces de un factor de emisión para asignar valores representativos entre la cantidad de GEI liberado por efecto de alguna actividad y las unidades en que se expresa (CRE, 2020). Por ejemplo, si se trata de cuantificar emisiones asociadas a consumos energéticos, el factor de emisión suele indicarse con relaciones de masa por unidad de energía. Estimar emisiones mediante un factor de emisión es de las opciones con el menor costo porque no se requieren equipos de medición, no obstante, es importante reiterar la disponibilidad y confiabilidad de los datos que se utilizan.

Ahora bien, aunque partan del IPCC como tronco común, la versatilidad de métodos de inventario, así como las adecuaciones o modificaciones que puedan surgir, dificultan comparaciones y el cálculo en sí. Es común diluir la calidad de datos e incluso limitar la capacidad de agregar más a nivel local y nacional (WRI, 2014). Con esto se acentúa la importancia de aprender a determinar qué metodología resulta más adecuada para el registro según el propósito de un inventario o cálculo aislado, que haya coherencia con el inventario nacional del país (en caso de datos para un inventario regional) y/u otros registros de medición. En el caso de cuantificar emisiones incorporadas y operativas cuando un proyecto ya se construyó, los métodos intensivos en datos proporcionan metodologías más detalladas, pues generalmente se cuenta con datos más precisos.

La recopilación de datos es un paso fundamental en el proceso de actualización de inventarios de GEI. Puede darse de una variedad de fuentes, principalmente de organizaciones, entidades gubernamentales y agencias de estadística, de universidades e institutos, artículos científicos e informes oficiales, así como de entrevistas con expertos del sector/partes interesadas.

Con base en el IPCC, el "Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria" (GPC, por sus siglas en inglés) del WRI, publicado en 2014 y actualmente bajo revisión para su actualización, ofrece un marco metodológico de cálculo y reporte de las emisiones de GEI en una ciudad utilizando dos enfoques distintos, aunque complementarios. El primero considera emisiones producto de actividades que ocurren dentro de la ciudad límite, incluidas algunas emisiones liberadas fuera del límite de la ciudad; el segundo enfoque categoriza todas las emisiones dependiendo de dónde ocurren físicamente. Lo importante en este caso es desarrollar múltiples inventarios para una contabilización separada y con esto, en la medida posible, evitar el doble conteo.

El GPC está diseñado para cuantificar emisiones de GEI anuales, cubriendo los gases determinados por el Protocolo de Kyoto (dióxido de carbono [CO₂], gas metano [CH₄], óxido nitroso [N₂O], hidrofluorocarbonos [HFC], perfluorocarbonos [PFC], hexafluoruro de azufre [SF₆]

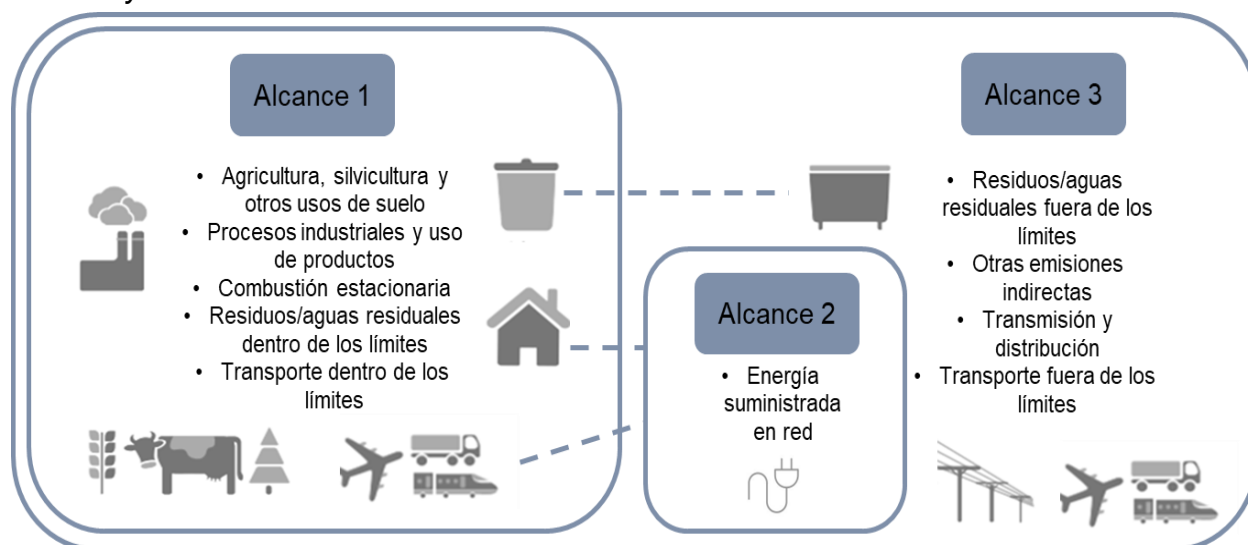
y el trifluoruro de nitrógeno [NF₃] (WRI, 2014). Para implementar el GPC, primero se define un límite de inventario, el área geográfica, así como la temporalidad del estudio, de gases y fuentes de emisión a cubrir. El límite depende del propósito del inventario; pudiera ser administrativo de gobierno local, una región o municipio urbano.

Las emisiones de GEI procedentes de actividades en la ciudad, de acuerdo con el esquema del GPC, se clasifican en seis sectores: energía estacionaria¹², transporte, residuos, procesos industriales y comercio de productos, uso de la tierra, así como cualquier otra emisión resultante de actividades productivas que ocurra fuera del límite geográfico, las cuales pueden ser reportadas por separado si no entran dentro de alguna de las categorías establecidas.

Por ubicación o límite geográfico donde ocurren, el GPC agrupa las emisiones en tres categorías: las de alcance 1 incluyen emisiones directas dentro del límite geográfico provenientes del consumo de combustibles de fuentes fijas y/o móviles; alcance 2, son las emisiones indirectas consecuencia del consumo energético suministrado desde red dentro de límites urbanos; y el alcance 3, que refiere a emisiones indirectas no controladas y que ocurren fuera de un límite establecido, ej. pérdida de energía suministrada en red ya sea por distribución o transmisión, o bien, el tratamiento y la disposición final de residuos (ver Figura 5).

Figura 5

Fuentes y límites de emisiones de GEI en la ciudad



Nota. Adaptado del “Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria” del 2014 (GPC, por sus siglas en inglés).

Para la industria de la construcción, se ha resaltado ya la importancia de analizar la etapa operativa y de mantenimiento de inmuebles, pues responde por hasta 89% del total de emisiones a lo largo del ciclo de vida útil (Lin et al., 2017). Estas emisiones suelen clasificarse

¹² El GPC clasifica las fuentes de energía estacionarias como provenientes de la combustión fósil en edificios e instalaciones residenciales, comerciales e institucionales, la construcción e industrias manufactureras, así como las centrales eléctricas para generar energía suministrada en red. También incluye las emisiones fugitivas que ocurren usualmente durante la extracción, transformación y el transporte de combustibles fósiles primarios (GPC, 2014).

dentro de los alcances 1 y 2 de acuerdo con el GPC, más no se consideran emisiones por transmisión y distribución de combustibles y electricidad cuando se contabiliza para el subsector de edificios residenciales (WRI, 2014). En conteos para registros nacionales es común que tal subsector no se contabilice como elemento independiente, sino que se cuantifiquen sus emisiones dentro del sector de energía estacionaria, donde sí se consideran las emisiones por transmisión y distribución al usuario final. También suelen integrarse al sector de transporte, como emisiones producto de la maquinaria y equipo para la construcción.

Por otro lado, la clasificación de fuentes emisoras que indicada en el “Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México”, se desglosa en: fuentes puntuales o fojas, móviles, naturales (vegetación y suelos) y fuentes áreas naturales o de procesos industriales (SEDEMA, 2021). En esta última es donde se incluyen todas las fuentes domésticas, así como combustibles y servicios no regulados. Componen un total de 17,069,895 tCO₂eq emitidas en 2018 en la ZMVM, donde el 4.6% de estas corresponde a la combustión residencial (SEDEMA, 2021). Para el sector residencial se consideran emisiones por quema de combustibles para la cocción de alimentos y el calentamiento de agua, así como emisiones de COV en forma de hidrocarburos no quemados (HCNQ) durante procesos de combustión.

Es común que los datos disponibles para cierto tipo de actividad no coincidan con el límite geográfico que establece determinada metodología, que no coincidan con el periodo a reportar (es decir, que sean reportes de años calendario o años fiscales) o que no sean datos completos. En tales casos, algunas metodologías como la del GPC por ejemplo, permite realizar ajustes con un “factor de escalamiento”, que refiere a la relación entre los datos disponibles y los datos que componen un inventario. Un ejemplo podría ser el ajuste en población de un año previo al actual para registrar emisiones por residuos domésticos si no se tuviesen datos actualizados. El GPC establece tres niveles de calidad de datos: alta “A”, donde se tienen datos detallados de actividad y factores de emisión específicos; media “M”, con datos modelados y factores de emisión generales, y baja “B”, con datos inciertos y factores de emisión predeterminados (GPC, 2014).

Para la mayoría de las fuentes emisoras, se calculan emisiones al multiplicar datos de actividad por el factor de emisión asociado ($\text{Emisiones GEI} = \text{Datos de actividad} \times \text{Factor de emisión}$), con lo cual se convierten tales datos de actividad a masa de GEI. Como se mencionó previamente, en muchos casos los datos disponibles por actividad no son precisos, dado el factor de emisión particular que le corresponde. Para tales casos, se deben derivar los datos de actividad con “factores de conversión” a otros datos, con lo cual se obtienen “datos de actividad estimados” (INECC, 2019). Según el detalle o precisión de los datos de actividad, corresponde el nivel de calidad de estos.

Concretamente para emisiones por fuentes de energía estacionaria, abordadas en el capítulo 6 del GPC, se calculan al multiplicar el consumo energético (que en este caso serían los datos de actividad) por el factor de emisión para determinado combustible. Es un escenario ideal, se tienen mediciones por cada tipo de combustible (y desglosado por subsector, si fuera necesario) como base del consumo real. Por otro lado, se requiere determinar el límite del estudio (que en este contexto sería superficie en metros cuadrados) para el factor de escalamiento, así como datos de consumo modelados.

Mientras que el GPC recomienda reportes de cada uno de los seis sectores de inventario (Energía, Procesos industriales, Solventes y otros usos, Agricultura, Uso de suelo, Silvicultura y Residuos, así como sus fuentes individuales por sector) definidos por el IPCC,

es posible subdividir aún más. Esto permite identificar puntos altos de emisiones con mayor precisión y acciones de mitigación más específicas. Por ejemplo, las emisiones por combustión residencial o doméstica dentro de un límite geográfico de edificios multifamiliares pueden subdividirse por altura o tipología. Adicionalmente, y como se pretende en el presente trabajo, se podría dividir por uso final predominante; cocción, calefacción o agua caliente.

Considerando lo anterior, el GPC pudiera parecer de naturaleza exploratoria debido a la flexibilidad metodológica que ofrece, además de que no exige que aquellas ciudades que lo adopten verifiquen resultados de inventario. Cuando se opta por tal verificación, admite realizar una autoverificación o una verificación por terceros, lo cual podría restar confianza y certeza a las emisiones reportadas. Es importante gestionar la calidad del inventario a través del tiempo, planeando su actualización y revisión metodológica siempre que se generen investigaciones relevantes al campo de análisis o a los datos utilizados.

El capítulo segundo del documento “Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero”, publicado en 2006, aborda el cálculo de emisiones de CO₂ procedentes de fuentes fijas de combustión del sector Energía (dicho sector es referido como “Energía Estacionaria” por el GPC). Como subsector 1A4b se identifican las emisiones por combustión fósil del sector residencial.

Para estimar emisiones procedentes de la quema de combustible de tal subsector, el IPCC plantea un método de referencia en el cual primero se estiman los combustibles fósiles que entran al país, siendo esto el consumo aparente. Segundo, se hace la equivalencia a unidades de masa de GEI, en este caso carbono equivalente ; tercero, se resta la cantidad de carbono contenido en materiales fabricados a partir de fuentes fósiles. Luego, se multiplica por un factor de oxidación con el fin de descontar carbono correspondiente (no oxidable), y finalmente se realiza la equivalencia a CO₂eq por cada combustible. Este método distingue entre fuente primarias y secundarias, lo cual resulta en estimaciones agregadas por tipo de combustible.

Otro método que plantea el IPCC es el sectorial, donde a diferencia del de referencia, las emisiones se clasifican por tipo de fuente emisora. Las estimaciones resultantes de ambos métodos no debieran presentar variaciones significativas, aun y cuando miden emisiones en distintos puntos de generación. La ecuación para el cálculo realizado con el nivel 1, de acuerdo con el método para la cuantificación de emisiones de CO₂ resultantes de fuentes fijas por combustión del sector Energía del IPCC es la siguiente:

$$\text{Emissions}_{\text{GHG,fuel}} = \text{Fuel Consumption}_{\text{fuel}} * \text{Emission Factor}_{\text{GHG,fuel}}$$

Donde:

$\text{Emissions}_{\text{GHG,fuel}}$ = emisiones de GEI por tipo de combustible (kg de GEI)

$\text{Fuel Consumption}_{\text{fuel}}$ = cantidad de combustible quemado/consumido (TJ)

$\text{Emission Factor}_{\text{GHG,fuel}}$ = factor de emisión de GEI (kg de GEI /TJ)

Es común encontrar en la literatura nacional distintas adaptaciones de las directrices internacionales principalmente por la necesidad de segmentar estimaciones en reportes oficiales, inventarios o estudios específicos. Al cuantificar emisiones por generación de energía eléctrica residencial suelen considerarse los gases de GEI que enlista el IPCC (cuando son significativos) y luego sumarlos. Con base en la metodología propuesta por SENER y CONUEE en 2009, que a su vez se basa en el método del nivel 1 del IPCC previamente descrito, se considera el factor de emisión derivado del proceso de generación de electricidad actualizado por la CRE¹³ para estimar los GEI por generación y consumo energético, adecuándose la ecuación a lo siguiente:

$$E_g^c = C_{\text{electricidad}} * FE_{\text{electricidad,g}}$$

Donde:

E_g^c = Emisiones totales de GEI “g” (en kg de GEI)

$C_{\text{electricidad}}$ = Consumo de electricidad (TJ)

$FE_{\text{electricidad,g}}$ = Factor de emisión de GEI en el uso de electricidad (kg de GEI/TJ)

En un estudio de Rosas-Flores et al. (2011), se utilizó el siguiente arreglo basado en la ecuación anterior para estimar emisiones de CO₂ por uso de electrodomésticos en zonas urbanas y rurales de México entre 1996 y 2021:

$$CO_{2E} = \sum CEF_e e$$

Donde:

CEF_e = Factor de emisión de GEI de generación eléctrica

e = Consumo de electricidad

Otra variante se identificó en el estudio titulado “El impacto de estándares de eficiencia energética en el consumo residencial de electricidad en México” (Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo, 2016). Con datos históricos del IPCC para definir el factor de emisión por generación de electricidad y proyecciones oficiales de CFE para calcular consumos unitarios constantes, se proyectó el impacto en emisiones nacionales evitadas por la sustitución de electrodomésticos al aplicar NOM-ENER entre 2014 y 2030:

$$CO_{2t} = E_t * EEF_t$$

¹³ El factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), se expresa en toneladas de bióxido de carbono equivalente (CO₂eq) por Megawatt-hora (MWh). La Comisión Reguladora de Energía (CRE) es la entidad encargada de actualizar tal factor para el cálculo de las emisiones indirectas de GEI por consumo de electricidad. El factor considera la generación de las centrales eléctricas que entregan energía a la red eléctrica nacional (fracción XLIV del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica), y se emplea para fines del reporte al Registro Nacional de Emisiones (CRE,2020). Para el año 2020 dicho factor es de 0.494 tCO₂e / MWh.

Donde:

CO_{2t} = Emisiones anuales

E_t = Consumo de electricidad anual

EEF_t = Factor de emisión de GEI en el uso de electricidad del año correspondiente

Dicho estudio indica que la reducción de emisiones de CO_{2eq} por el uso de electrodomésticos de 1990 a 2013 y las estimaciones de 2014 a 2030, considerando consumos unitarios constantes de acuerdo con la década de 1990 y contrastando con la aplicación de NOM-ENER para cinco usos finales lo que significó una reducción del 6.5% de las emisiones por producción eléctrica del mismo año. Parte de los resultados son proyecciones hacia 2030, donde se señala que una actualización de NOM-ENER implicaría una reducción de 14% sobre el total de emisiones asociadas a la producción de energía eléctrica.

De acuerdo con Solís (2021), la ecuación del IPCC es también la base para el cálculo de emisiones por consumo de combustible del sector residencial, explicado en la sección de ejemplos propuestos en la Norma Ambiental para el Distrito Federal (NADF-008-AMBT-2017). Si bien la norma es específica a técnicas de aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de agua, parte de su metodología incluye estimar emisiones producto de la quema de combustible para el calentamiento de agua (SEDEMA, 2018). La norma establece el cálculo de emisiones para edificaciones habitacionales mayores a 4 niveles con el siguiente planteamiento:

$$\text{Emisión GEI}_{GN} = FE_{GN}ET_{GN}$$

Donde:

FE_{GN} = Factor de emisión de gas natural (Ton CO_{2eq}/m^3)

ET_{GN} = Suma del consumo energético anual de todos los sistemas convencionales de calentamiento de agua individuales por vivienda a base de gas natural (m^3 /año).

El cálculo, según lo indicado en el “Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero” (SEMARNAT, 2015), se adapta a un nivel sectorial o local según la fuente emisora, la actividad y el tipo de combustible. En este trabajo se analiza el gas LP por su predominancia, además de que junto con la electricidad, es abordado en el Anexo 8 del CEV para el análisis de emisiones según la clasificación de viviendas y su ubicación geográfica dentro del país. La actividad es el consumo unitario de equipos, y la fuente emisora se delimita a la combustión habitacional.

Datos provenientes de fuentes oficiales y actualizadas deben incluir el poder calorífico (contenido energético por unidad de masa o volumen) de combustible y su equivalente según la unidad de cálculo correspondiente. También, identificar el factor de emisión (en este caso para CO_2), dependiendo del uso o actividad, y emplear factores de conversión específicos al tipo de combustibles utilizados en México. La metodología descrita se

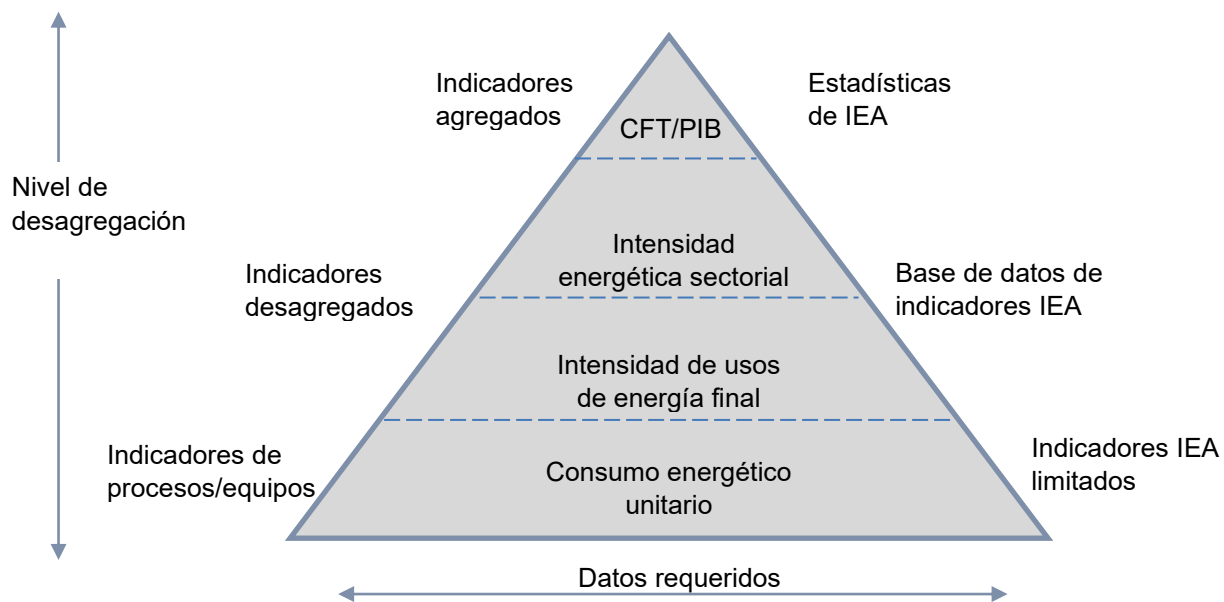
valida al comparar con valores reportados en la literatura, como son los anexos de la NADF-008-AMBT-2017, y resultados de trabajos previos.

3.3 Uso final de energía eléctrica y térmica

El consumo final energético refiere al combustible primario y secundario empleado para satisfacer las actividades de distintos sectores, entre ellos el residencial (IEA, 2016). La clasificación del consumo por usos finales generalmente sigue pautas internacionales como la del “Manual para los indicadores de eficiencia energética” publicado por la IEA en 2016. Entre más nivel de detalle o desagregación (ver Figura 6), más específicas serán las fuentes de información, que, en caso de no estar disponibles, requiere de mayores recursos (humanos y económicos) para su recopilación.

Figura 6

Indicadores energéticos por nivel de detalle



Nota. Adaptado del “Manual para los indicadores de eficiencia energética” (IEA, 2016). En el nivel agregado (valor agregado bruto), los indicadores pueden variar según la actividad productiva, sin embargo, los más usuales son el costo fijo total (CFT) y el Producto Interno Bruto (PIB).

Ahora bien, para el sector residencial, la CONUEE clasifica el consumo energético en tres categorías: el transporte, todo lo relacionado con la producción y fabricación de la envolvente arquitectónica, y, por último, el consumo de electricidad y gas por usuario (CONUEE, 2018). Esta última categoría se considera la de mayor peso, pues intervienen además de la envolvente arquitectónica, los hábitos de consumo de ocupantes. Tan solo por energía eléctrica, proyecciones de consumo estiman un aproximado total de 44,633,230 usuarios para 2025 (SENER, 2019).

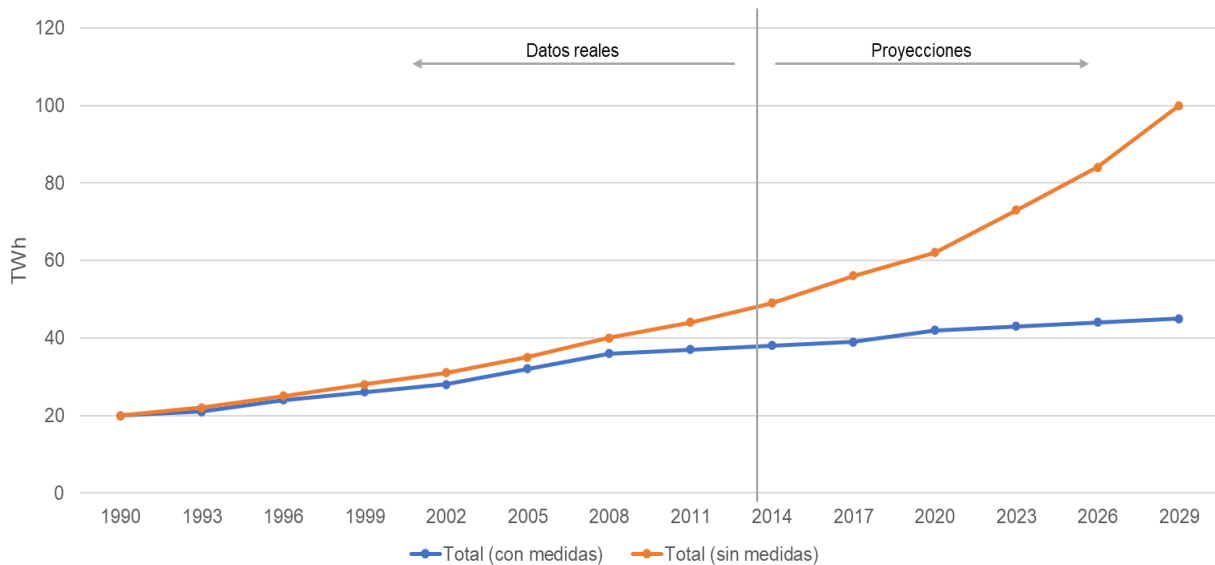
Los últimos tres años registrados por el SIE reflejan que el consumo eléctrico residencial aumentó 9% hasta el año 2019. Caso contrario para el gas licuado, pues durante el

mismo periodo su consumo se redujo un 6.25%, lo cual podría relacionarse con el incremento de estufas sin piloto de encendido (INEGI, 2018). A propósito del consumo de gas LP en viviendas, de acuerdo con datos del inventario de emisiones de 2016, su consumo en la Ciudad de México registró 15% de las emisiones totales de COV y 7% de CO₂eq. Resulta importante considerar estas cifras pues el consumo tradicional de combustibles por uso final residencial en nuestro país es de gas, ya sea LP o natural, junto con el diésel. Estos combustibles emiten contaminantes conocidos como “contaminantes criterio” que impactan las emisiones de COV y otras partículas suspendidas nocivas para la salud humana y en general para la calidad del aire.

Según los datos de ENCEVI¹⁴, en nuestro país la distribución de energía eléctrica se concentra en los siguientes usos finales: iluminación, electrodomésticos y, para ciertas zonas, climatización. Sumado a lo anterior, la encuesta reporta porcentajes nacionales de electrodomésticos con etiqueta NOM-ENER: 72% en refrigeradores, 65% en lavadoras, 56% para aire acondicionado, 53% en calentadores y 43% en estufas. Para energía térmica, gran parte se concentra en la cocción y calentamiento de alimentos y agua, con una proporción del 80% de gas LP, seguido del gas natural con 7.3% en la región templada del país (INEGI, 2018). En este sentido, un estudio elaborado por Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo (2016) ofrece una proyección acerca del impacto en el consumo eléctrico residencial por la adopción de las NOM-ENER de producto para los usos finales de iluminación y electrodomésticos. Al considerar un consumo de energía constante, los ahorros esperados para 2030 serían de 69,55 TWh (ver Figura 7).

Figura 7

Consumo eléctrico residencial en México con y sin medidas de ahorro



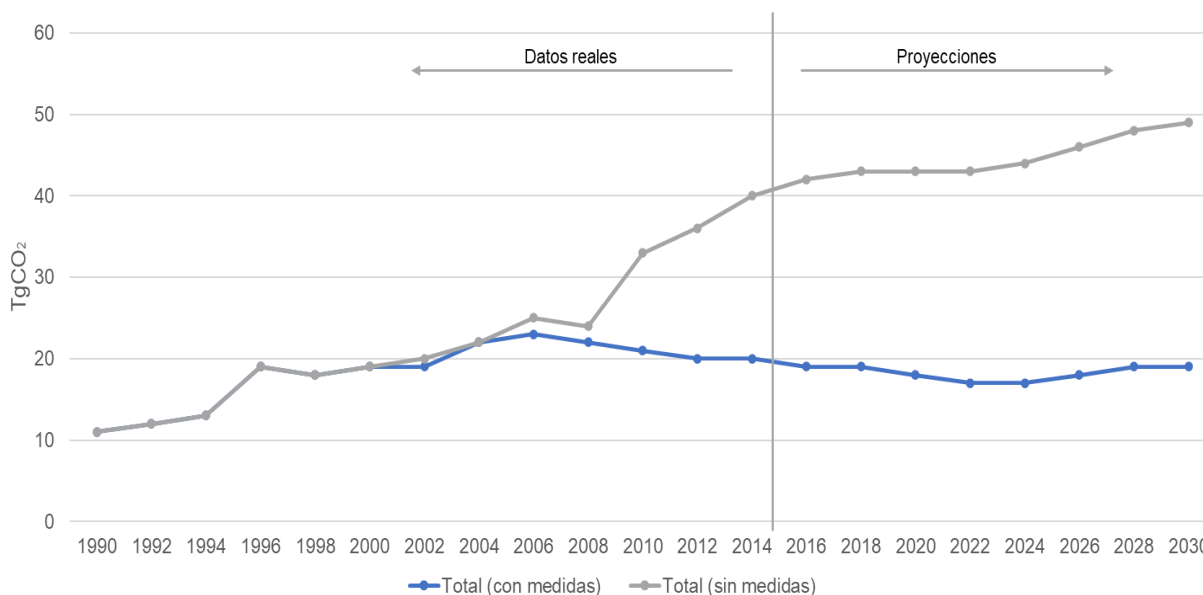
Nota. Adaptado de Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo (2016). Consumo eléctrico residencial en México por uso final (iluminación, electricidad por refrigeradores, lavadoras, TV, y aire acondicionado) con y sin implementación de NOM-ENER.

¹⁴ La ENCEVI 2018 se aplicó a una muestra de 32, 047 viviendas distribuidas en tres regiones climáticas que abarcan la totalidad del país; Región cálida extrema, Región templada y Región tropical.

El mismo estudio revela que la reducción de emisiones producto del consumo residencial de energía eléctrica y térmica podría ser de hasta el 14% del total de emisiones producto de la generación anual de electricidad a nivel nacional, lo cual equivaldría a 30.9 teragramos (Tg) de emisiones de CO₂ evitadas hacia 2030 (ver Figura 8).

Figura 8

Consumo eléctrico residencial en México con y sin medidas de ahorro



Nota. Adaptado de Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo (2016). Emisiones evitadas producto del consumo de energía total por usos finales con y sin implementación de NOM-ENER.

En particular para la Ciudad de México, un estudio elaborado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LNLB), al que hace referencia el “Programa de Acción Climática 2021-2030” evaluó consumos de electricidad y gas en viviendas y otros edificios para conocer su impacto entre 2020 y 2050. Tal estudio señala que los refrigeradores continuarán siendo el aparato que más energía consume en los hogares. Indica además un crecimiento gradual en la adquisición de estos equipos por una mayor fragmentación de familias en el futuro. Sus resultados reflejan un incremento en el consumo eléctrico residencial en la ciudad, de 3,000 TWh a 3,800 TWh (Comisión Interinstitucional de cambio climático de la Ciudad de México, 2021).

De los aspectos que más influyen en el aumento del consumo de electricidad es el aumento en la propiedad de electrodomésticos, particularmente de refrigeradores, como se infirió en el estudio de LNLB. Desagregar el consumo por usos finales resulta de gran utilidad ya que esto facilita estudiar la estructura, los impactos ambientales y el potencial de ahorro por consumo eléctrico o térmico en el sector (Escobedo-Izquierdo y Morillón-Gálvez, 2013). Lo anterior se liga al efecto en el tiempo de indicadores de eficiencia energética¹⁵ especialmente en un nivel agregado, pues motivan tanto la política pública como cambios en materia de energía y avances tecnológicos. El consenso internacional

¹⁵De acuerdo con la CONUEE, los indicadores miden la cantidad de energía requerida para realizar una actividad o para que un servicio opere a determinado nivel; tal nivel suele expresarse en unidades físicas o monetarias, según el tipo de análisis que se esté realizando.

señala que los indicadores de eficiencia energética se calculan a nivel de uso final o subsector, y también por consumo de unidad de energía (IEA, 2016).

En el sector residencial, uno de los indicadores energéticos más útiles es el consumo de energía por electrodomésticos. Al ser un indicador en un nivel desagregado de información, se requiere de intensidades de consumo, expresadas en unidades de energía y su relación con datos de actividad por unidad física (ej. número de refrigeradores por hogar). En lo referente a las intensidades energéticas, se indica cuánta energía es necesaria para producir un peso de PIB de consumo final, y en los sectores como el residencial son índices obtenidos al dividir el consumo energético entre el valor agregado a precio constante (CONUEE, 2018). De acuerdo con las cifras del informe “Análisis de la evolución de los indicadores de eficiencia energética en México por sector” de CONUEE, entre 1995 y 2015 las intensidades energéticas del sector residencial reflejaron una reducción progresiva de 45.9%. Esto se debe en gran medida a la implementación de política energética, particularmente las NOM-ENER y los programas nacionales comentados en el capítulo dos.

Para un análisis integral del consumo de energía residencial que aborde el impacto por emisiones evitadas o mitigadas, resulta útil conocer cuánta energía consume cada aparato electrodoméstico (consumo unitario). Esto depende en principio de la potencia del aparato y del tiempo de uso, y en función de esto es que las NOM-ENER, bajo determinados procedimientos de prueba, regulan la potencia máxima y el nivel de energía recomendado. Adicional a esto, es ideal conocer el comportamiento de usuarios en cuanto a la sustitución de equipos, así como la vida útil promedio de aparatos y electrodomésticos, datos que usualmente suelen sobreestimarse debido a la falta de muestras adecuadas o bases de datos oficiales actualizadas (Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo, 2016; Rodríguez et al., 2015).

Con lo anterior, se identifican las bases metodológicas para el análisis y cuantificación de emisiones indirectas generadas y evitadas asociadas al consumo final residencial cuando se elige adoptar, a nivel teórico, determinados lineamientos en función de los principales energéticos empleados en la vivienda en México.

La industria de la construcción sugiere un potencial alcanzable en cuanto a la mitigación de emisiones por consumo de energía doméstica. Supone el menor costo neto para cumplir compromisos globales que se tornan menos factibles conforme pasan los años. Sin embargo, resulta prudente primero analizar el uso final de energía en edificaciones para sugerir medidas de ahorro que reflejen nuevas necesidades de consumo actual y a futuro. También es necesario atender la problemática entorno a la poca y segregada documentación actual en torno a las metodologías para cuantificar emisiones indirectas que complementen el análisis de instrumentos normativos en nuestro país.

Capítulo 4 Análisis energético y económico del Código de Edificación de Vivienda (CEV)

En este capítulo se desarrolla la propuesta de prefactibilidad técnica y económica de la aplicación selectiva del CEV y su impacto en emisiones indirectas producto del consumo energético de la vivienda multifamiliar vertical. Para esto, mediante un método cuantitativo, se propone una adecuación de las etapas necesarias para estructurar un análisis costo beneficio enfocado a esquemas de códigos modelo que rigen la eficiencia energética dentro del sector residencial (PNNL, 2021).

Se inicia con un caso base del parque habitacional en la Ciudad de México como muestra representativa no aleatoria, que responde a la tipología arquitectónica y al estrato social justificado en el planteamiento del problema de este trabajo. Se recopilan datos de la edificación a partir de fuentes oficiales y públicas para conocer el proyecto arquitectónico y ejecutivo, lo cual permite estimar un periodo de vida útil. También se obtienen facturas eléctricas y de gas para el análisis del consumo energético. Sin embargo, dichas facturas, por corresponder a un consumo anual atípico (debido a la situación sanitaria de los últimos años), no se emplean en el análisis y se recurre a construir una aproximación del comportamiento energético desagregado por uso final con datos recabados de la revisión de trabajos previos.

Posteriormente, se seleccionan lineamientos enfocados a la eficiencia energética que facilitan identificar parámetros mínimos permisibles por el CEV, esto para tener una referencia oficial del consumo final eléctrico y térmico residencial. Tal selección se delimita según la aplicabilidad al caso base, los usos finales con mayor incidencia, y a las especificaciones de producto y sistema disponibles en el mercado.

Una vez que se tiene el subgrupo de lineamientos, se integra como parte del método el análisis bioclimático para obtener un balance térmico que refleje la situación actual en cuanto a ganancias o pérdidas térmicas del caso base. Con esto es posible considerar la envolvente arquitectónica en las etapas posteriores que así lo requieran. Asimismo, con base en los parámetros o condiciones de frontera que limitan el consumo energético, se analiza su impacto en el consumo total por vivienda, por edificio, y su proyección a futuro. Esto según el promedio del consumo energético calculado según el tipo de vivienda, considerando energía eléctrica y gas LP para el cálculo manual del consumo unitario por equipos, validado por la literatura y bases de datos correspondientes al año 2019. A partir de este punto, el análisis se desarrolla mediante la técnica de escenarios. Con base en los lineamientos seleccionados, se proponen sustituciones de equipamiento del caso base, con lo cual se obtiene un escenario de cumplimiento y uno de mejora adicional.

Seguido a esto, se procede al análisis comparativo de consumos finales para estimar ahorros por escenario partiendo del consumo original del caso base. Asimismo, se cuantifican las emisiones correspondientes según el tipo de energético y partiendo de la energía total empleada, y se estima el potencial de mitigación de emisiones para cada escenario.

Finalmente, se evalúan dichos escenarios con base en el sustento teórico del análisis costo beneficio ligado a la normativa pertinente. Para esto, se define por un lado el alcance de los beneficios económicos y ambientales resultantes, y por otro, el de las inversiones

monetarias requeridas para cada situación por cumplimiento o mejora adicional. Se estima entonces el periodo simple de recuperación de inversiones adicionales por la integración de los lineamientos oficiales. Sumado a tal criterio, se emplean otras herramientas económicas referidas en la literatura que respalden el ahorro operativo y monetario que supone cada escenario.

4.1. Descripción de caso base

El Censo de Población y Vivienda 2020 determina que, de las viviendas particulares habitadas a nivel nacional, se contabilizan 1.5 millones clasificadas como departamentos en edificio, mismas que por definición en algunos referentes oficiales como lo es el CEV, se catalogan como plurifamiliares, multifamiliares o unidades habitacionales¹⁶. El consenso es mixto respecto al alza en su producción al menos hacia los próximos diez años en las zonas metropolitanas del país, siendo la de más rápida expansión la ZMVM (INEGI, 2020b; Tinsa, 2021).

El concepto inicial de la configuración habitacional en cuestión buscaba ofrecer opciones de vivienda asequibles a un sector de la población mayoritario, además de obtener mayor retorno de inversión por cada metro cuadrado construido para desarrolladores. Surgieron como obras públicas ordenadas por mandato constitucional, utilizando recursos de contribuyentes para beneficio de ciertos sectores sociales, y como respuesta a la demanda de vivienda nueva debido a la migración campo-ciudad en busca de suelo urbanizable (Alonso-Arenas y Juárez-Pérez).

Su relevancia se debe a la demanda de ocupación presente principalmente en la capital de nuestro país; según cifras del RUV al 2022, el 99.51% de la vivienda registrada corresponde a la vivienda en un conjunto vertical. Dentro de tal denominación se incluyen 7,234 Unidades Habitacionales (UH), esto conforme a la cifra registrada en el Padrón de Unidades Habitacionales de la Procuraduría Social de la Ciudad de México, misma que no ha tenido actualizaciones desde el año 2011. Estas representan un total de 582,190 viviendas en la CDMX, cubriendo el 83% de las clasificadas como departamento en tipología vertical o multifamiliares. Las UH con más de treinta departamentos suman 2,592, con un total de 462 mil viviendas, lo cual representa el 79.36% de las UH registradas, albergando una población de 1'768,000 habitantes.

En relación con el periodo de construcción, el 21% de UH registradas se construyó de 1940 a 1979, el 29% entre 1980 y 1989, y el 50% restante entre 1990 y 2008. Cabe resaltar que la entidad federativa con menor porcentaje de viviendas nuevas a nivel nacional es justo la Ciudad de México, con apenas 3.4% (INEGI, 2020b). Esto en parte explica que 21% de tales inmuebles continúen en función aun después del periodo de vida útil habitual si se toma la referencia fiscal para edificios de vivienda que lo establece en 50 años (Consejo Nacional de Armonización Contable [CONAC], 2012), señalado también como referente general dentro del capítulo 11 del CEV, en la sección 1101 ("Condiciones Generales").

¹⁶ Unidad habitacional, condominio o conjunto habitacional se emplean para definir el mismo tipo de configuración habitacional, pero usualmente difiriendo en la clasificación por precio y el tamaño de lote. En este trabajo se utiliza como sinónimo de "multifamiliar", que refiere al inmueble de interés social perteneciente proindiviso a un conjunto de personas, y que reúne las condiciones establecidas por el Código Civil Federal según lo aplicable a determinada entidad federativa.

Tal periodo, sin embargo, es el límite inferior en distintas clasificaciones internacionales (Canadian Standards Association, 2001; Australian Building Codes Board, 2006, citado por Moreno, 2017) que a su vez toman como referencia el método establecido por ISO 15686-1:2011 para estimar la vida útil de edificaciones, y que sugiere un periodo de 50 a 99 años para edificios habitacionales incluidos en la categoría de “vida larga”, siempre que se consideren factores como la calidad de los materiales, mano de obra, y el nivel de diseño del proyecto (International Organization for Standardization [ISO], 2017).

El CEV, en la sección 301 del capítulo tres (“Parte 1”) establece que la vivienda se puede clasificar por el precio promedio¹⁷, según el número de viviendas por lote, lo cual define que sea unifamiliar o multifamiliar, y/o por forma de propiedad (condominios). Por precio y superficie construida promedio, el CEV enlista las categorías de vivienda de interés social (que incluyen las subcategorías de económica, popular y tradicional) que van de 40.00 a 72.00 m², la vivienda media de hasta 102.00 m², media residencial de hasta 156.00 m² y residencial plus de 188.00 m² y más. Los rangos de precio para la categoría de interés social van de 118 y hasta 350 UMAS (Unidad de Medida y Actualización)¹⁸, lo cual equivale a un rango de \$482,878.00 MXN y hasta \$898,975.00 MXN si se considera el valor actualizado para 2019. Considerando una fuente adicional, el precio de venta promedio para la categoría de interés social tradicional se registra en hasta \$1’383,000.00 MXN para la CDMX (SHF, 2021).

El caso base se delimita entonces, a un edificio multifamiliar de interés social de cinco niveles, integrado por 80 viviendas, con una vida útil de 50 y hasta 99 años, con un precio promedio por construcción de vivienda de \$898,975.00 MXN y precio de venta promedio de \$1’383,000.000 MXN. Se propone la unidad habitacional Tlalpan ISSSTE, también conocida como Conjunto Urbano Tlalpan o Multifamiliar Tlalpan, que cuenta con más de 60 años de antigüedad¹⁹. Se ubica sobre la Calzada de Tlalpan, entre Cerro San Antonio y Álvaro Gálvez y Fuentes, Colonia Educación, C.P. 04410, delegación Coyoacán. Sus coordenadas geográficas son 19°20’02” latitud norte y 99°07’56” longitud oeste, con una altitud de 2,250 m.s.n.m. Abarca una superficie estimada de tres hectáreas, con una densidad de 12 a 71 habitantes por hectárea (Secretaría de Inclusión y Bienestar Social, 2021).

Originalmente, el conjunto se conformaba por once edificios; uno de uso comercial y diez habitacionales. Posterior a su remodelación producto del sismo del 19 de septiembre de 2017 restan diez edificios; el de uso comercial y nueve habitacionales con un total de 500 departamentos. Para el análisis se recopilan datos del edificio denominado 3-C, cuya configuración se repite tres veces dentro del conjunto, representando 68.67% de la extensión territorial total del mismo. Tal configuración distribuye la mayor cantidad de departamentos por edificio. Las colindancias hacia el norte y oeste son los edificios 3-B y 4-A respectivamente, ambos también parte del conjunto; al sur colinda con las vialidades secundarias Álvaro Gálvez y Fuentes al sur y Avenida 8 al este (ver Figura 9).

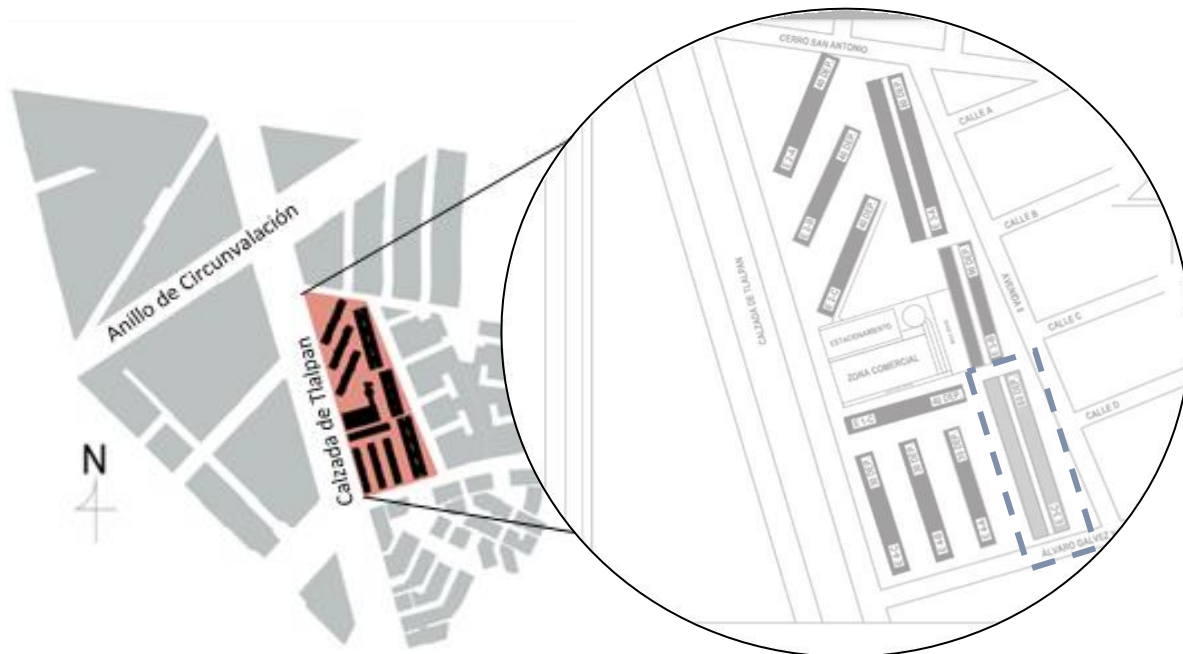
¹⁷ Toma como fundamento el pago por las licencias y permisos, el costo de producción (mano de obra, materiales y suministros), la forma de edificación de la vivienda y la fuente de financiamiento.

¹⁸ Valor mensual en 2019 equivale a \$ 2,568.50 pesos mexicanos MXN (INEGI,2021).

¹⁹ Construido durante el sexenio de Adolfo Ruiz Cortines, inaugurado en 1957. Su construcción fue a cargo del ISSSTE bajo la supervisión de los arquitectos Fernando Hernández y Jorge Cuevas.

Figura 9

Ubicación caso base



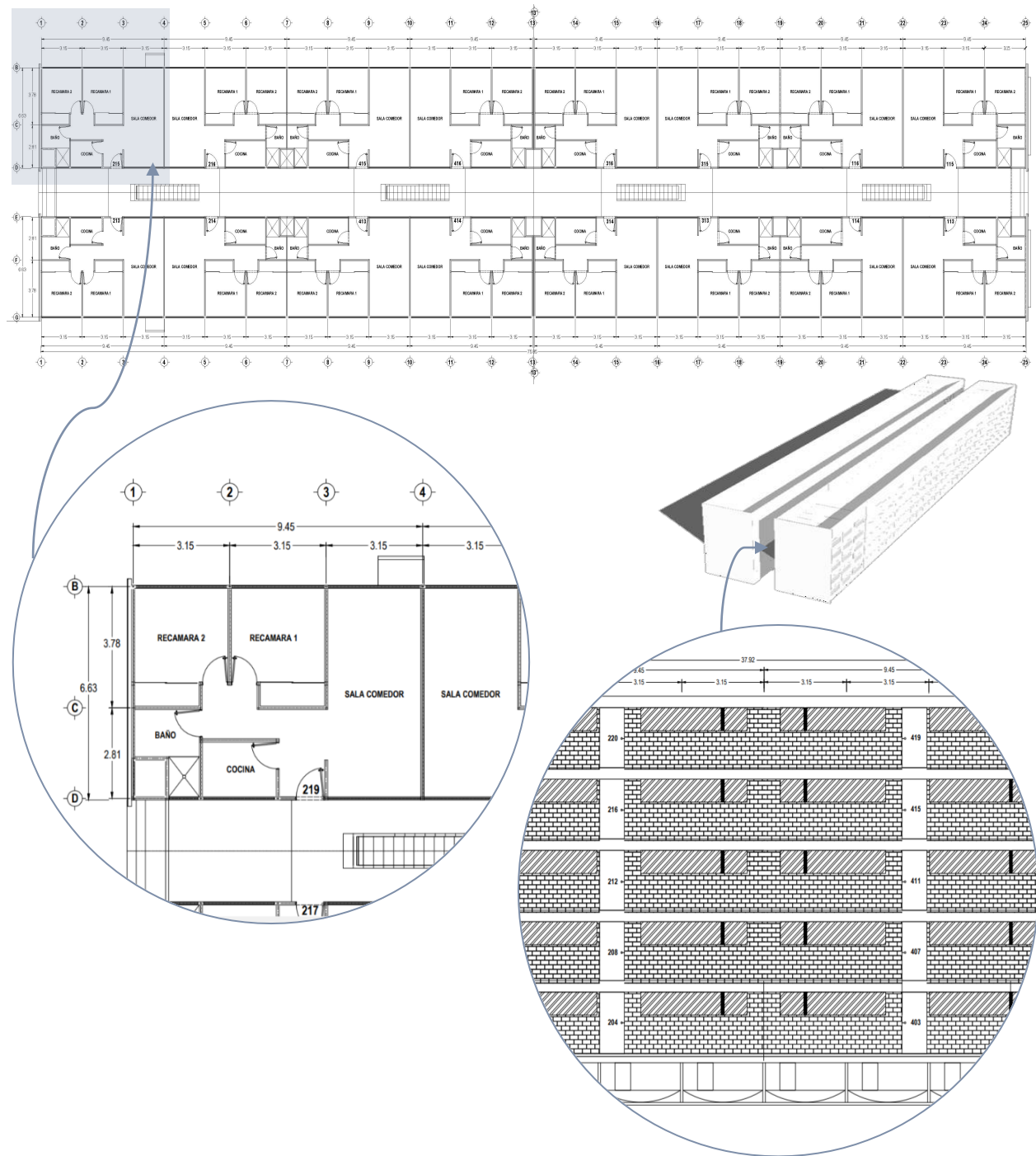
Nota. Adaptado de mapas del Dr. Juan José Kochen en "Suelo para la vivienda de la población de menores ingresos en la Zona Metropolitana del Valle de México" (CONAVI, 2017b).

El edificio se compone por dos cuerpos separados por una crujía central de distribución orientados en sus accesos principales hacia el este y oeste (ver Figura 10). En lo referente a la proporción de superficies opacas y translucidas, las fachadas de cada cuerpo orientadas hacia el este y oeste, paralelas a las vialidades de Calzada de Tlalpan y Avenida 8, cuentan con el 29.45% de superficie translucida, mientras que, para la fachada de cada cuerpo orientada hacia el pasillo de distribución, se tiene el 20.10%. El área total construida es de 6,867.3 m², con ochenta departamentos distribuidos en cinco niveles; 16 departamentos por nivel, lo cual equivale a 5,102.00 m² de área privativa habitable (considerada para el análisis energético). Cada departamento cuenta con una superficie útil de 62.65 m² con la siguiente configuración: dos recamaras, sala-comedor con un balcón, cocina y baño. El acceso principal a cada departamento se concentra en el pasillo central, con escaleras para los niveles superiores del edificio, incluyendo la azotea, donde se ubica un área destinada a tinacos.

Se obtiene información del proyecto arquitectónico y ejecutivo (plantas arquitectónicas, cortes estructurales y fachadas tipo) de la base de datos de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México. Las especificaciones de la envolvente, los materiales y sus propiedades térmicas se corroboraron vía entrevista remota con el ex presidente de la asociación vecinal, Héctor Toledo, quien cuenta con la totalidad de planos ejecutivos empleados para la remodelación. Los datos para el consumo de energía eléctrica y térmica, como se mencionó previamente, al no ser una muestra suficiente, se calculan y validan con la literatura revisada y bases de datos nacionales (ENCEVI y BIEE), esto para estimar el comportamiento energético, dependiendo del uso final predominante en la zona.

Figura 10

Edificio 3-C. Planta de entresuelo, fachada y departamento tipo



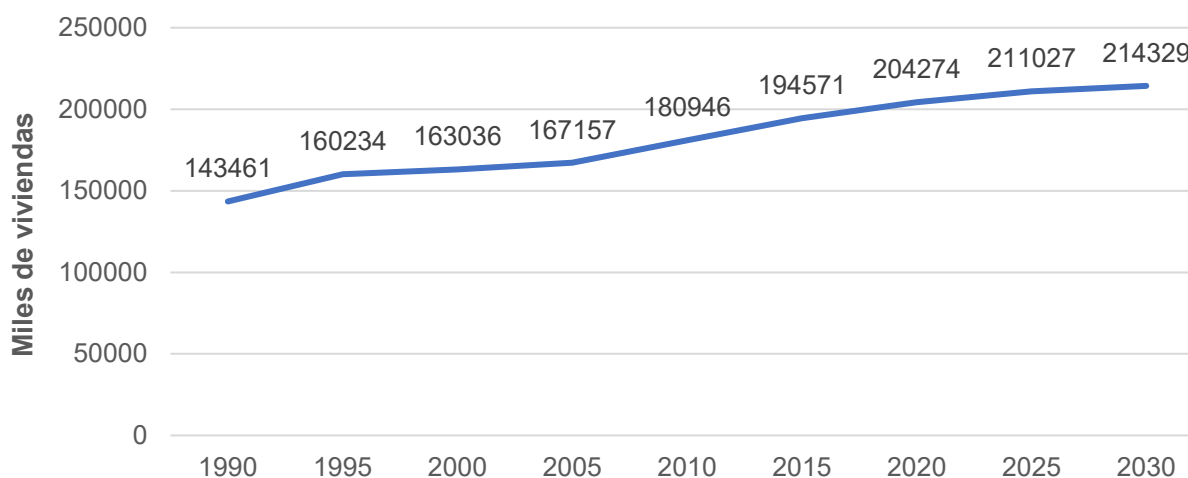
Nota. Arriba, planta tipo del edificio 3-C. Abajo, izq., departamento tipo. Abajo, derecha, fachada y ventanas tipo. Adaptado de planos ejecutivos de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México (2018).

4.1.1 Características geográficas y socioeconómicas

Coyoacán es la tercera delegación con mayor concentración de vivienda multifamiliar, después de Iztapalapa y Azcapotzalco (CONAVI, 2017). Las variaciones porcentuales que reflejan el incremento en la demanda de vivienda en la delegación se prevé permanezca entre el 2% y el 12% al menos hasta 2030 (ver Gráfica 5). Esto, debido principalmente a la disminución en el tamaño de hogares capitalinos y el agotamiento de superficie libre para construcción nueva.

Gráfica 5

Proyección de demanda de vivienda nueva a nivel delegación



Nota. Elaboración propia con datos de “Suelo para la vivienda de la población de menores ingresos en la Zona Metropolitana del Valle de México” (CONAVI, 2017b).

Para este trabajo se considera un tamaño de hogar promedio de 4 personas (Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares [ENIGH], 2020) como referencia para definir el número de ocupantes por departamento para el caso base. Bajo tal supuesto, se tendría como población total del edificio 320 personas. Adicionalmente, y según el reporte del ex presidente de la asamblea vecinal del conjunto, se tuvo una población de hasta 2,500 personas antes del sismo de 2017, de modo que se considera este dato como población máxima del conjunto.

A nivel colonia, se registra un nivel de marginación “bajo” (INEGI, 2020a). En cuanto al promedio del ingreso total mensual por hogar, la ENIGH reporta \$17,932.67 MXN²⁰ para CDMX, y un promedio de gasto corriente mensual total de \$15,798.67 MXN. Lo anterior sitúa a la población del caso base dentro del perfil socioeconómico D+ medio bajo, rango en el cual para el 62% de hogares en este nivel la cabeza del hogar cuenta con estudios posteriores a primaria, el gasto relativo a la canasta básica se incrementa a 42%, mientras que el gasto en educación es del 7% (Asociación Mexicana de Agencias de Inteligencia de Mercado y Opinión AC [AMAI], 2021).

²⁰ Compuesto por el ingreso corriente total (ingreso corriente monetario e ingreso corriente no monetario) y percepciones financieras y de capital (retiro de inversiones, ahorro, préstamos, etc.).

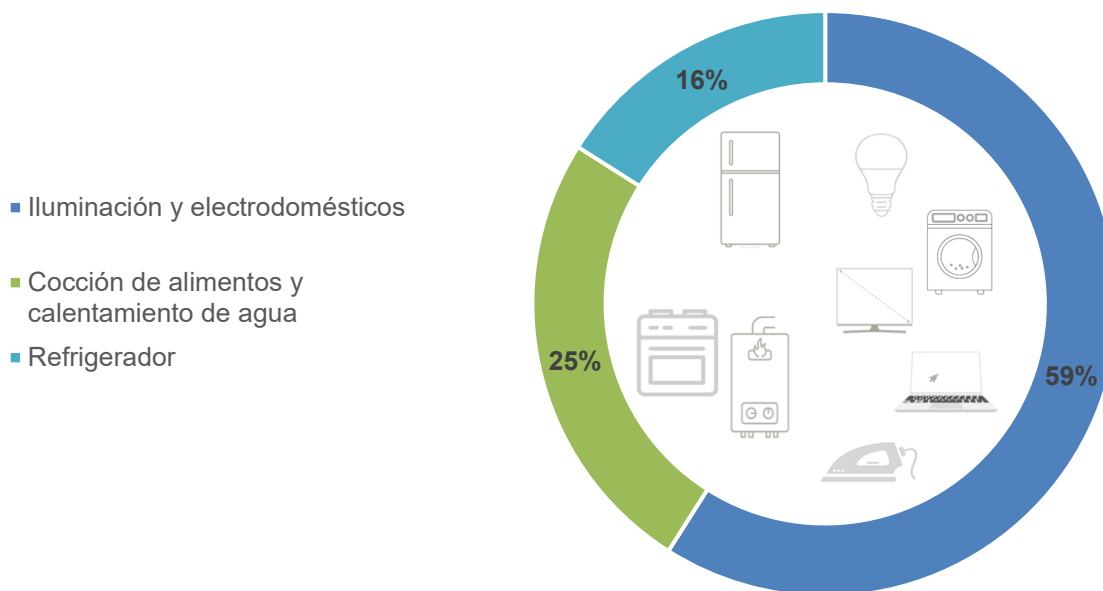
4.1.2 Equipamiento

El caso base se encuentra dentro de la tarifa doméstica 1 de CFE²¹, que corresponde a consumos de electricidad con un promedio de 250 kWh mensuales, con un límite de consumo de 500 kWh bimestrales para regiones del país en las que la temperatura promedio en verano sea menor a 25 C° (CFE, 2020). Cada departamento cuenta con servicio de red mediante medidores digitales independientes, los cuales se concentran en tableros derivados para cada edificio dentro del conjunto.

Para los usos finales y la saturación de equipos y electrodomésticos, se toman como referencia principal los resultados de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares 2018 de INEGI, en específico, los datos de la región templada del país, así como algunos trabajos previos (Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo, 2016; Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez, 2018; Rosas-Flores y Rosas-Flores, 2020). La clasificación de electrodomésticos que se considera para el análisis posterior va en función de su uso más común, siguiendo la pauta de estudios similares.

Gráfica 6

Consumo de energía por usos finales en viviendas de clima templado



Nota. Elaboración propia con datos de Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez (2018).

En la Gráfica 6 se distribuye por usos finales para energía eléctrica y térmica registrada en los hogares que no cuentan con aire acondicionado (Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez,

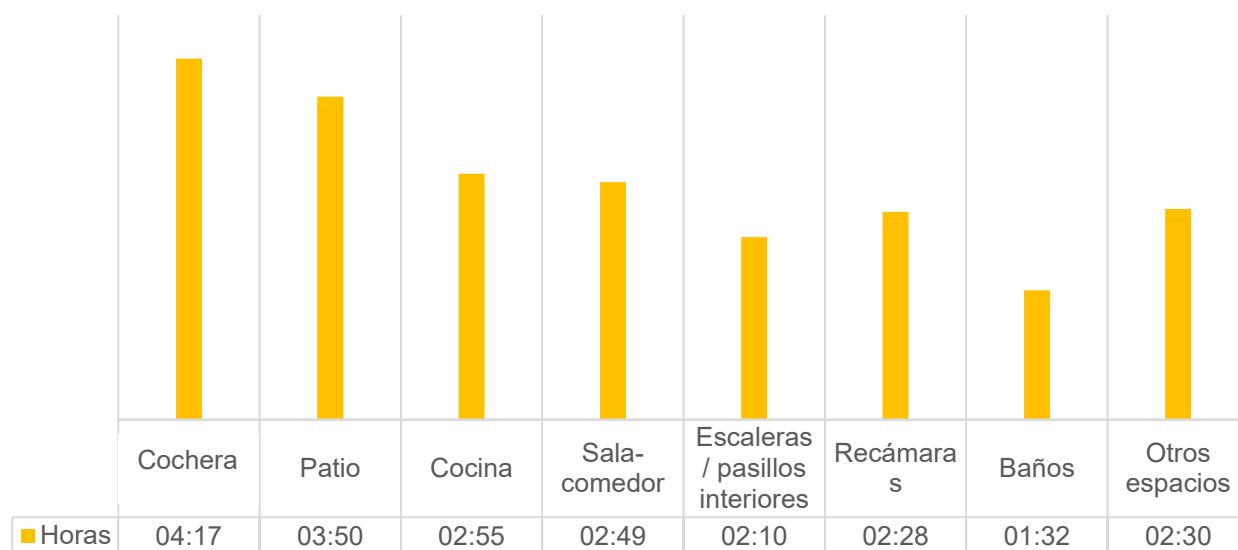
²¹ Las cifras más actuales del SIE indican que al 2017 se contabilizaron 19,633,299 usuarios en la tarifa doméstica 1.

2018). Tales usos finales se desglosan a continuación, en función del equipo o tecnología empleada.

Para iluminación, el caso base se considera parte del 70% en la región templada del país que cuenta con focos ahorradores fluorescentes, donde el promedio de uso en horas por día es mayor en espacios como la cocina, sala/comedor, y otros espacios de la vivienda como terrazas, cuarto de lavado o balcones (ver Gráfica 7). En cuanto al uso de focos incandescentes, como se mencionó en el capítulo dos, tanto la normativa vigente como los distintos programas de sustitución con presencia nacional han generado una reducción progresiva en la vivienda promedio. Sin embargo, aún representan el 16% dentro de ciertos espacios, principalmente recámaras, de modo que se considera un foco incandescente por cada recámara para el departamento tipo.

Gráfica 7

Uso promedio diario de focos en viviendas particulares habitadas



Nota. Elaboración propia con datos de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) (INEGI, 2018).

Para la cantidad total de luminarias del caso base (ver Tabla 4) se considera el promedio regional de siete por hogar (INEGI, 2018), con las siguientes características tecnológicas tomadas del catálogo digital de productos Osram²²:

-Lámpara fluorescente compacta 20W autobalastada, base E27, eficacia luminosa 60 lm/W, CRI 82, TCC 6500 K, 1200 lm, vida útil de 10000 hrs., y medida de alto 244 mm.

-Lámpara incandescente 40W, base E26, eficacia luminosa 12.25 lm/W, TCC 3000 K, 490 lm, vida útil 1000 hrs., y medida de alto 900mm.

²² Los catálogos, fichas técnicas de producto o sistema, planos, memorias técnicas, y demás archivos y documentación recabada para construir el comportamiento energético del caso base en esta sección del trabajo se pueden consultar en la liga del apartado de Anexos, dentro de la carpeta virtual "Fichas técnicas".

Tabla 4

Lámparas consideradas para el caso base

Lámparas			
Espacio	Potencia unitaria (W)	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Habitación 1	40.00	1.00	2.28
Habitación 2	40.00	1.00	2.28
Cocina	20.00	1.00	2.55
Sala/comedor/pasillo	20.00	3.00	2.50
Baño	20.00	1.00	1.32
Total	140.00	7.00	10.93

Nota. Elaboración propia con información de etiquetas y fichas técnicas de producto de Asociación Nacional de Fabricantes de Aparatos Domésticos. Las horas de uso promedio son datos de ENCEVI 2018.

En cuanto a electrodomésticos, se consideraron los equipos predominantes a nivel nacional, y en algunos casos donde fue posible recabar el dato, a nivel regional para la Ciudad de México o su zona metropolitana (INEGI, 2018). Se describen a continuación:

El refrigerador, como se ha mencionado en capítulos anteriores, es uno de los equipos que más ha mejorado su eficiencia. El 88% de la población usa refrigerador con congelador, de deshielo manual, automático y semiautomático, con un tamaño promedio de 11 a 15 pies (refrigerador mediano). El 48.9% de la población tiene equipos de 1 a 5 años de antigüedad, mientras que el 29.8% reporta equipos de entre 6 a 10 años de antigüedad. Para el análisis, se considera que el refrigerador del caso base no ha sido renovado en los últimos diez años, dada la incidencia de programas de sustitución que hubo en décadas anteriores, y la focalización hacia el norte del país de aquellos programas que sí han ocurrido en años recientes.

El 61% de viviendas a nivel nacional cuenta con lavadora tipo automática con tapa arriba. El horario de uso se relaciona con el horario de saturación y mayor costo de la energía; en la región templada el horario predominante es de 6:00 a 12:00pm para el 72.2% de la población. Similarmente, en el 62% de las viviendas del país (aprox. 20.2 millones), se utiliza plancha, y en 6 de cada 10 se usa plancha de vapor con un horario de uso predominante, según ENCEVI, igual al de las lavadoras. Para el análisis se considera que la lavadora y la plancha son electrodomésticos que tampoco se renuevan constantemente.

En el 91.5% de las viviendas a nivel nacional se registra al menos una televisión²³; 22% son televisores aun analógicos mientras que el resto son LCD, plasma o incluso LED. Se consideró para este trabajo el promedio nacional de 1.31 televisores por vivienda particular habitada, con el tamaño predominante de 30 a 39 pulgadas para una tercera parte de los equipos reportados a nivel regional. Respecto a uso diario, 45.9% de los hogares reportan un tiempo de uso del televisor de 2 a 5 horas diarias. El 72.6% de los equipos reportados tienen una antigüedad de entre uno y cinco años (esto, similar al caso de los refrigeradores, debido a las políticas de sustitución de equipos por la tecnología más reciente y la reducción de costos, que principalmente se identifica en televisiones) mientras que el 17.3% corresponde a equipos con antigüedad de seis a diez años.

²³ La televisión es el único electrodoméstico que se cuenta por más de uno en los hogares mexicanos.

El 43% de la población reportó el uso de computadoras, aun y cuando la proporción de hogares que disponen de computadora registró un descenso mínimo de 44.9% en 2015 y 2018 a 44.3% en 2019 (INEGI, 2020b). Para este equipo no se encontraron cifras específicas en cuanto al periodo de renovación, por lo que se propone una antigüedad de equipo igual a la del televisor, esto porque para ambos equipos sí se reporta una renovación de tecnología constante en los últimos diez años (INEGI, 2018).

En la siguiente tabla se enlista la cantidad de electrodomésticos²⁴ a considerar para el caso base. También se registra una estimación de potencias unitarias y de horas de uso diario promedio, retomadas de estudios de la CONUEE y otros autores (Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo, 2016; Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez, 2018).

Tabla 5

Electrodomésticos considerados para el caso base

Electrodomésticos			
Equipos	Potencia (W)	Cantidad	Horas de uso diario (promedio)
Computadora (laptop)*	30.00	1.00	4.00
Televisión color (30-39 pul)	230.00	2.00	3.50
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	44.00	1.00	24.00
Lavadora (16 kg)	600.00	1.00	4hr /semana
Plancha eléctrica	1000.00	1.00	4hr /semana

*Considerando la potencia de trabajo necesaria para todos los componentes del equipo.

Nota. Elaboración propia con información tomada de etiquetas, fichas técnicas de producto de Asociación Nacional de Fabricantes de Aparatos Domésticos, estudios previos, así como datos de la ENCEVI (INEGI, 2018).

Respecto al uso de energía térmica, el 85.2% de la población en la región templada del país utiliza gas LP como combustible principal para los usos finales de cocción y calentamiento de alimentos y agua. Similar al refrigerador, el 49% reportó equipos de 1 a 5 años de antigüedad y el 26% de 6 a 10 años. Dado que la información sobre consumos reales para el caso base fue limitada y atípica, se recurre a considerar el energético con mayor presencia a nivel nacional, siendo este el gas LP.

El 61% usan estufa de gas con encendido manual sin piloto, utilizando máximo dos quemadores de manera simultánea. Para el consumo unitario, se considera la frecuencia de uso de siete días a la semana, reportada por el 81.4% de los usuarios encuestados por ENCEVI, y el promedio de uso al día indicado como 2 horas con 25 minutos (ver Tabla 6). Es preciso recordar que como con cualquier aparato, tales datos pueden variar por las características de la estufa y el fabricante que se considere.

En cuanto al calentador de agua a gas, se indica que las capacidades de 30 a 40 litros predominan en 44% de las viviendas en la región templada. De los 11 millones de calentadores de agua a gas en viviendas particulares a nivel nacional, poco más del 70% se encuentran en la región templada. De estos, en el 26% se reporta una antigüedad de 6 a 10 años.

²⁴ Para datos específicos de cada equipo, como modelo, marca, especificaciones técnicas, etc., se compila en la sección de anexos un listado de referencias donde se pueden consultar las distintas bases de datos y estudios de calidad de PROFECO considerados para la selección.

Se toma entonces el supuesto de que el calentador y la estufa del caso base son equipos que tampoco han sido renovados en los últimos diez años.

Tabla 6

Equipos de gas LP considerados para el caso base

Aparatos para cocción de alimentos y calentamiento de agua			
Equipos	Consumo kg/h	Cantidad	Horas de uso diario (promedio)
Estufa de piso	0.07	1.00	2.25
Calentador de agua	0.50	1.00	2.50

Nota. Elaboración propia con información de consumos promedio de equipos tomada de estudios de calidad de estufas y calentadores (PROFECO, 2011), así como datos de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (INEGI, 2018) y consumos unitarios por equipo reportados en un estudio nacional sobre potenciales de ahorro por sustituciones de calentadores (Rodríguez et al., 2015).

Por otro lado, en lo que concierne a la envolvente térmica de la vivienda, solo el 1.5% de las viviendas en la región templada del país (sin desagregar por tipo de vivienda; aislada, adosada o vertical) reportan el uso de aislamiento térmico, esto debido a que el uso de equipos de climatización artificial se presenta en apenas el 1.3% de las viviendas en dicha región.

4.2 Selección de lineamientos oficiales NOM-ENER

Las Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética para equipos representan hasta 90% del consumo de energía eléctrica y térmica de un hogar promedio en el territorio nacional (CONUEE, 2021b). Gran parte de estos lineamientos han sido analizados en reportes nacionales y trabajos que fueron mencionados en el marco teórico de la presente investigación, ya que conforman los porcentajes más significativos de saturación de equipos normados en la vivienda promedio.

Las normas de equipos o producto (electrodomésticos, calentadores, bombas de calor, etc.) predominan dentro del capítulo 31 titulado “Eficiencia energética” del CEV. Estas certifican el nivel de eficiencia con el que opera determinado aparato para que utilice una mínima cantidad de energía durante su vida útil. En última edición del CEV (2017), en su Anexo 1 “Referencia a Normas Nacionales e Internacionales”, se enlistan 23 de las 34 NOM-ENER vigentes. Se consideran para el alcance del presente análisis aquellas que, por datos disponibles en la literatura y fichas técnicas, sea justificable su inclusión.

4.2.1 Criterios de selección

A partir de la premisa de que la electricidad y el gas LP son los recursos energéticos que rigen el análisis del consumo por usos finales, se establece en este apartado un subgrupo de normas oficiales a cubrir. Dentro de dicho subgrupo, se considera por un lado la norma NOM-020-ENER-2011, siendo la única norma de sistema que se está analizando, y se recurre a la herramienta de cálculo elaborada por la CONUEE²⁵ para

²⁵ Herramienta de cálculo de la NOM-020-ENER-2011; diseñada y desarrollada por la Agencia Danesa de Energía para la CONUEE, disponible en <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-calculo-nom-020-ener-2001>.

ofrecer una estimación de su cumplimiento para el tipo de vivienda analizada. Por otro lado, se consideran normas de producto que cubren los consumos unitarios de equipos previamente descritos para construir el comportamiento energético del caso base.

En la Tabla 7 se indica con color verde aquellas NOM-ENER que según el equipo que regulan y el contenido de la norma, permiten una determinación de niveles mínimos sobre los cuales proponer mejoras del consumo final eléctrico y térmico, respaldado por la literatura revisada. En color amarillo, se indican aquellas que de igual modo influyen en el consumo, sin embargo, no se tienen los datos o especificaciones de producto necesarias para integrarlas al análisis. Finalmente, en rojo se señalan las que no se consideran para el análisis por ser normas en las que se describen principalmente procesos o métodos de prueba para su cumplimiento, o bien, por no ser parte de los usos finales predominantes en la vivienda y la región climática en cuestión.

Tabla 7

Selección de Lineamientos oficiales del capítulo 31 del CEV

Energía eléctrica y térmica
NOM-003-ENER-2021, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial.
NOM-004-ENER-2014, Eficiencia energética para el conjunto motor-bomba, para bombeo de agua limpia de uso doméstico, en potencias de 0,180 kW (¼ HP) hasta 0,750 kW (1 HP).
NOM-005-ENER-2016, Eficiencia energética de lavadoras de ropa electrodomésticas.
NOM-011-ENER-2006, Eficiencia Energética En Acondicionadores De Aire Tipo Central, Paquete O Dividido.
NOM-015-ENER-2012, Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos.
NOM-017-ENER/SCFI-2012, Eficiencia energética y requisitos de seguridad de lámparas fluorescentes compactas autobalastadas.
NOM-018-ENER-2011, Aislantes térmicos para edificaciones.
NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios para uso habitacional.
NOM-021-ENER/SCFI-2017, Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto.
NOM-024-ENER-2012, Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones.
NOM-025-ENER-2013, Eficiencia térmica de aparatos domésticos para cocción de alimentos que usan gas LP o gas natural.
NOM-026-ENER-2015, Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido (Inverter) con flujo de refrigerante variable, descarga libre y sin ductos de aire.
NOM-028-ENER-2017, Eficiencia energética de lámparas para uso general.
NOM-030-ENER-2016, Eficacia luminosa de lámparas de diodos emisores de luz (LED) integradas para iluminación general.
NOM-032-ENER-2013, Límites máximos de potencia eléctrica para equipos y aparatos que demandan energía en espera.

4.2.2 Parámetros por lineamiento

Se mencionó previamente que las normas de producto son responsables de certificar el que un aparato opere con una mínima cantidad de energía durante su vida útil. Asimismo, son las que predominan en el apartado en cuestión del CEV. La mayoría de los equipos que consumen energía eléctrica y gas han sido creados bajo una norma de producto vigente desde hace más de diez años, por lo cual resulta improbable que existan equipos sin certificar en

una vivienda que fue edificada dentro de los últimos cinco años desde la última edición del CEV. Sin embargo, para la aplicación teórica del código, se establece que el caso base fue construido hace más de cincuenta años. Se considera entonces una renovación de equipamiento según los años de antigüedad reportados por ENCEVI, tomando como parámetro general que ningún equipo ha sido sustituido en los últimos diez años.

Ahora bien, en cuanto al subconjunto de normas por consumo energético específico, se toman los criterios mínimos de eficiencia correspondientes a cada aparato normado (ver Tabla 8). Esto para conformar medidas de ahorro energético en las siguientes etapas del análisis. Según el parámetro que cada lineamiento establece, por ejemplo, el índice de eficiencia expresado en porcentaje, o el consumo máximo energético en kWh por año, se determina la sustitución de equipos. Primero como medida de ahorro mínima y posteriormente como mejora adicional. Con esto se delimitan también los aparatos necesarios para el cálculo de consumos unitarios del caso base. Las claves propuestas para cada lineamiento se utilizan como referencia en la sección 4.5.2 de este trabajo.

Tabla 8

Criterios de mínimos de eficiencia para escenarios CEV

Equipo/ Sistema	Luminarias	Refrigerador	Lavadora	Televisor	Estufa	Calentador	Envolvente
Clave	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Lineamiento/ Última actualización	NOM-017- ENER/SCFI- 2012 NOM-030- ENER-2016 NOM-028- ENER-2017	NOM-015- ENER-2018	NOM-005- ENER- 2016	NOM- 032- ENER- 2013	NOM-025- ENER- 2013	NOM-003- ENER- 2021	NOM-020- ENER-2011
Parámetro de cumplimiento	Sustitución de incandescentes por LFC y/o LED. Eficacia luminosa (relación entre el flujo luminoso total y la potencia emitida, expresada en lumen por Watt lm/W)	317.00 (kWh/año) *	160 (kWh/año)	Potencia en modo de espera 1W	Eficiencia térmica de quemadores mínima 45% para capacidades térmicas de hasta 11,500 kJ/h	Eficiencia térmica mínima 75% (referido a calentadores de almacenamiento con capacidades de 40 y menor o igual que 62 litros)	Materiales certificados; conductividad térmica que regule las ganancias de calor por conducción y radiación

Nota. Elaboración propia con datos de la última edición del CEV, capítulo 31, "Eficiencia Energética" (CONAVI, 2017). * No considera el ajuste por capacidad en lts. para refrigerador-congelador con deshielo automático, con congelador montado en la parte inferior, sin máquina de hielo automática.

4.3 Análisis bioclimático

En esta sección se abordan una serie de consideraciones para estimar el desempeño de la envolvente arquitectónica respecto al contexto climático en el que se encuentra. En términos generales tal contexto es clima templado, donde se reside el 55% de los usuarios de energía eléctrica en el país (Rodríguez y Morales Martínez, 2020). Conviene especificar que, aunque esta etapa del análisis no es el enfoque principal de la presente investigación, se incluye aludiendo a lo que menciona el CEV al inicio del capítulo 31 “Eficiencia Energética”, siendo un componente primordial de la operación de edificaciones no solo habitacionales, sino de cualquier tipología arquitectónica.

También es preciso recordar que, si bien no se establece el aire acondicionado como uno de los usos finales a considerar con para la implementación de normas pertinentes en este trabajo, sí se considera el único lineamiento oficial existente para envolventes residenciales referido en el CEV. Por tal motivo resulta relevante valorar el caso base con la metodología simplificada del libro “Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética” (Ramírez-Morales, 2019)²⁶, basada en las ecuaciones del programa TRNSYS, el cual comúnmente se utiliza para la simulación energética de edificios, con la flexibilidad de integrar sistemas de climatización pasivos y activos (O'Brien et al., 2020).

Con lo anterior, se estima el comportamiento térmico de la envolvente por departamento tipo, basado en cálculo extraído del modelado energético. Asimismo, permite conocer el rango de confort térmico al definir la temperatura neutra, es decir, aquella temperatura ideal donde no hay estrés por estar perdiendo o ganando calor. De modo el balance térmico²⁷ refleja la situación actual en cuanto a temperatura y ganancias o pérdidas térmicas del caso base.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García, la Ciudad de México pertenece al grupo de clima templado subhúmedo semifrío con poca oscilación térmica anual de temperaturas medias (entre 5 y 7°C), lluvias en verano, identificado con la nomenclatura Cbw2(i'). El registro de Normales Climatológicas de la estación más próxima al caso base (Estación Meteorológica 00009071 Colonia Educación)²⁸ indica una temperatura media anual de 14.6° C. El mes con la temperatura más alta es abril, con una máxima promedio de 28.7° C, y el mes más frío es enero, con una mínima promedio de 4.9° C, lo cual refleja una oscilación térmica máxima de 23.8° C. El mes registrado de agosto se registra como el más lluvioso, con 290.5 mm anuales, y los meses con mayor nubosidad son mayo y junio.

En cuanto a los vientos, la dirección predominante presenta variaciones estacionales pero es más frecuente hacia el sureste, de acuerdo con los registros reportados por la Estación de Monitoreo Santa Úrsula (la estación Colonia Educación no presenta registros sobre este dato). La velocidad anual de vientos dominantes es de 1.1 a 2.1 m/s, (se toma como promedio 1.5 m/s para fines de cálculo), con temporadas de mayor intensidad entre los

²⁶ El desarrollo del cálculo se ubica en la carpeta nombrada “Cálculo térmico_MTIalpan - Ecuaciones TRNSYS” de la liga de Anexos.

²⁷ El calor es energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura. La transferencia de calor es la energía liberada de un sistema a otro con menor temperatura, debido a la diferencia de temperaturas. Los principales mecanismos de transferencia de energía usualmente se acepta clasificarlos en conducción, convección y radiación.

²⁸ Latitud de 19°20' norte, longitud 99°07' oeste y una altitud de 2,250 metros sobre el nivel del mar (MSNM).

meses de enero a abril (SEDEMA, 2021). Tal situación suele favorecer el inicio del verano porque interrumpe el aumento de temperaturas, pero resulta excesivo en el invierno, como se muestra para los meses de noviembre a marzo (ver Tabla 9). El mes de enero, al ser el más frío, tendría las peores condiciones durante invierno. En verano, abril sería el más crítico al considerar la correlación inversa entre temperatura y humedad relativa, la cual tendría una mínima de 32%.

La temperatura neutra mensual para el mes más cálido, calculada a partir de temperaturas promedio, es de 23.68°C. Esto indica que incluso en la temporada más calurosa del año, la temperatura ambiente es menor a la zona de confort (ver Tabla 10, 11 y 12), la cual se determina a partir de la temperatura neutra (Tn) como sigue (Ramírez J. D., 2019):

$$T_n = 17.6 + (0.31 * T_{em}) \quad Z_n = T_n \pm 2.5^\circ\text{C}$$

Donde

T_{em} = temperatura media mensual

La radiación solar incidente para el día 21 de enero como el más crítico de la época de invierno, se mantiene con valores por debajo de los 710 W/m², máxima de 709 W/m² a las 11 am (ver Tabla 13). Para el mes de abril, al ser el mes más caluroso de verano, la radiación solar máxima ocurre al medio día, con una máxima de 1,097.4 W/m².

Tabla 9

Temperatura neutra y zona de confort mensual

Zona de Confort mensual														
Parámetro	Unidad	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
ZCsuperior	°C	24.44	25.04	25.66	26.18	26.28	26.18	25.90	25.90	25.84	25.49	25.04	24.63	24.44
Tn	°C	21.94	22.54	23.16	23.68	23.78	23.68	23.40	23.40	23.34	22.99	22.54	22.13	21.94
ZCinferior	°C	19.44	20.04	20.66	21.18	21.28	21.18	20.90	20.90	20.84	20.49	20.04	19.63	19.44
Confort de Humedad (ISO 7730)														
Superior	%	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Inferior	%	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Nota. Temperaturas a partir de medias mensuales. Humedad de acuerdo con la ISO 7730, datos tomados de <https://multimat.es/wp-content/uploads/2017/05/Principios-basicos-instalaciones-domesticas-multimat.pdf>.

Tabla 10

Temperaturas medias mensuales y su relación con la temperatura neutra y el rango de confort

Parámetro	Unidad	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
Máxima	°C	23.1	25.4	27.6	28.7	28.4	27.1	25.8	25.9	25.3	24.9	24.7	23.7	20.7
Media	°C	14	15.9	17.9	19.6	19.9	19.6	18.7	18.7	18.5	17.4	16	14.6	12.5
Mínima	°C	4.9	6.5	8.3	10.5	11.5	12.1	11.6	11.5	11.7	9.9	7.2	5.5	4.2

Tabla 11

Humedades relativas mensuales y su relación con la temperatura neutra y el rango de confort

H.R.	Unidad	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
Máxima	%	79	75	74	76	79	83	83	83	84	81	77	78	86
Media	%	55	52	51	54	56	60	62	61	63	59	54	54	61
Mínima	%	31	29	28	31	34	38	40	39	41	37	32	31	31

Arriba de confort

Dentro de confort

Debajo de confort

Tabla 12

Humedad relativa estimada para la Ciudad de México

Localidad	Cdmx	Latitud	19.20	Long.	99.07	Altitud (m) 2250						
						ene	feb	mar	abr	mayo	jun	jul
Mes	ene	feb	mar	abr	mayo	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Temperatura máxima	23.1	25.4	27.6	28.7	28.4	27.1	25.8	25.9	25.3	24.9	24.7	23.7
Temperatura media	14	15.9	17.9	19.6	19.9	19.6	18.7	18.7	18.5	17.4	16	14.6
Temperatura mínima	4.9	6.5	8.3	10.5	11.5	12.1	11.6	11.5	11.7	9.9	7.2	5.5
Hr media observada	75	73	71	69	72	78	77	76	79	78	76	75
Hr media calculada	55	52	51	54	56	60	62	61	63	59	54	54
Hr máx. calculada	79	75	74	76	79	83	83	83	84	81	77	78
Hr mín. calculada	31	29	28	31	34	38	40	39	41	37	32	31

Nota. Humedades relativas (Hr) medias mensuales (a partir de medias extremas). Elaboración propia con datos de hoja de cálculo proporcionada por el Dr. José D. Morales. Las coordenadas geográficas corresponden a la estación meteorológica más cercana al caso base.

Tabla 13

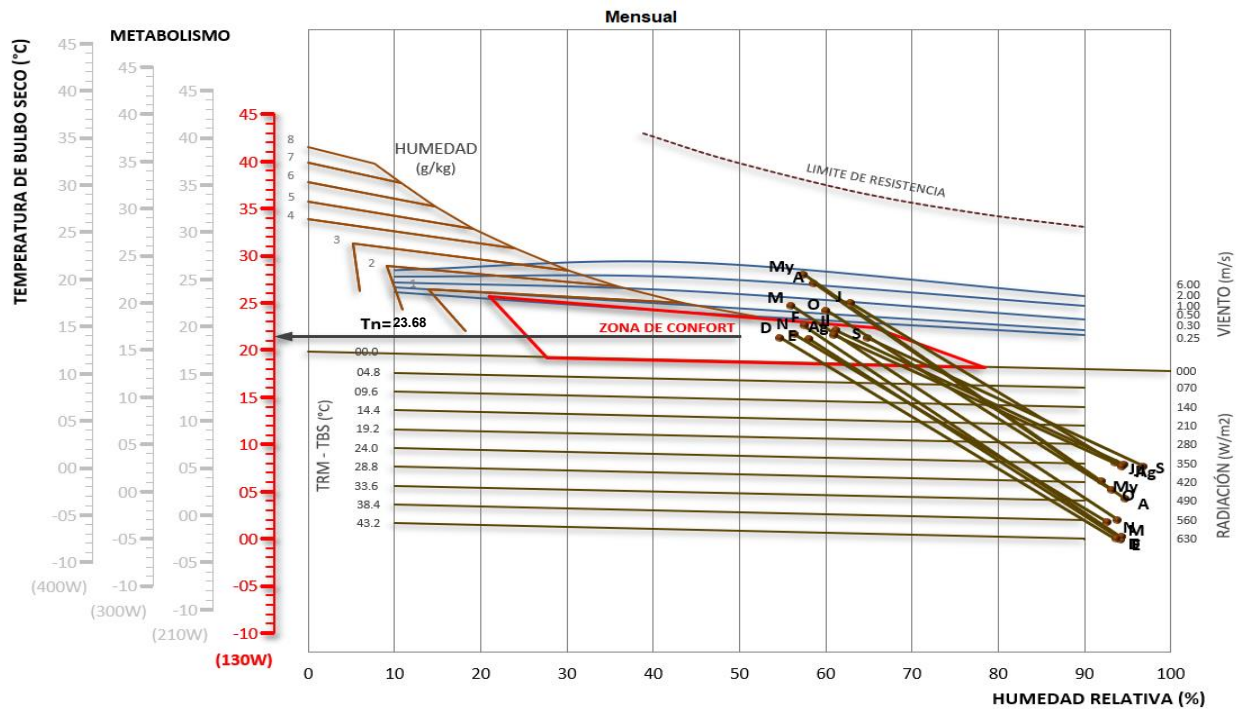
Radiación solar incidente para la Ciudad de México

Radiación Solar Incidente (verano)				Radiación Solar Incidente (invierno)			
Hora Solar	Total	Altura	Azimut	Hora Solar	Total	Altura	Azimut
5.51	0.0				0.0		
5.00	0.0			6.49	0.0		
6.00	9.8	-0.66	68.13	6.00	12.3		
7.00	122.9	12.42	72.63	7.00	124.6	6.62	65.96
8.00	335.0	26.03	76.27	8.00	309.6	19.2	59.46
9.00	598.0	39.85	79.29	9.00	506.6	30.82	50.65
10.00	850.4	53.82	81.76	10.00	654.8	40.78	38.32
11.00	1031.60	67.86	83.45	11.00	709.70	47.87	21.24
12.00	1097.40	81.92	81.54	12.00	654.80	50.51	0.00
13.00	1031.60	83.83	-79.69	13.00	506.6	47.87	-21.24
14.00	850.4	69.78	-83.56	14.00	309.6	40.78	-38.32
15.00	598.0	55.74	-82.05	15.00	124.6	30.82	-50.65
16.00	335.0	41.76	-79.66	16.00	12.3	19.2	-59.46
17.00	122.9	27.91	-76.72	17.00	0.0	6.62	-65.96
18.00	9.8	14.26	-73.17	18.00	0.0		
19.00	0.0			19.00	0.0		
18.49	0.00			17.51	0.0		

Nota. Elaboración propia con datos de hoja de cálculo desarrollada por el Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet. Para los datos de altura solar y azimut, se toman los datos generados en <http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>.

Figura 11

Carta bioclimática modificada para la Ciudad de México, Coyoacán



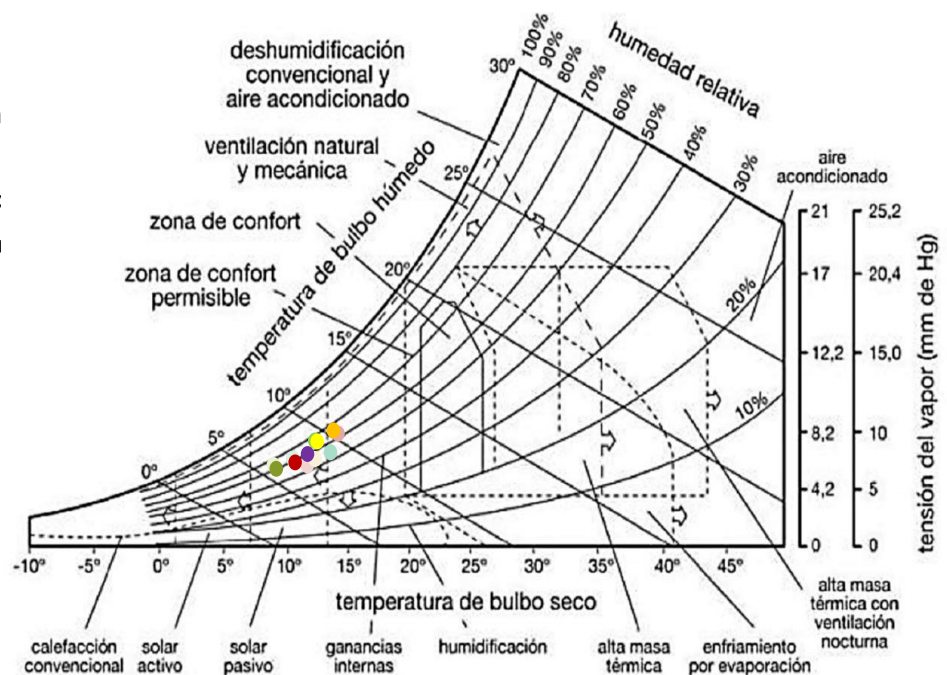
Nota. Captura de pantalla de hoja de cálculo desarrollada por Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet (2013).

Figura 12

Diagrama bioclimático de Olgay, modificado para la Ciudad de México, Coyoacán

- Enero
- Julio
- Febrero
- Agosto
- Marzo
- Septiembre
- Abril
- Octubre
- Mayo
- Noviembre
- Junio
- Diciembre

Nota. Diagrama bioclimático de Olgay (1963), a partir de temperaturas y humedades medias, modificado para CDMX, Coyoacán. Adaptado de material proporcionado por titulares del curso "Eficiencia Energética" de Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura.



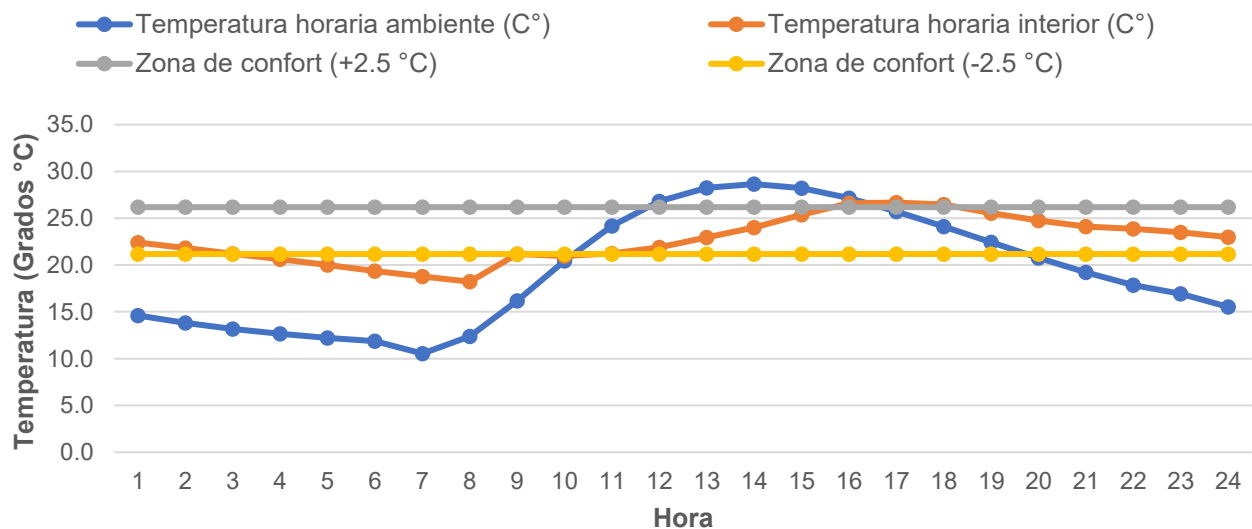
Recabados los datos climatológicos se recurre a diagramas bioclimáticos como diagnóstico inicial de la envolvente arquitectónica del caso base (Figura 11 y 12). Estos muestran que la temperatura ambiente, por su relación inversa con la humedad durante la mayor parte del año, limitan ganancias de calor que podrían favorecer al confort térmico de usuarios, por lo que se tendrían que considerar requerimientos de ganancias solares pasivas. Es preciso mencionar en este punto que definir y aplicar estrategias de climatización no es el fin de este análisis; únicamente se identifica la interacción de la envolvente con el clima como resultado de esta primera etapa, lo cual es de utilidad para ubicar el caso base dentro de la clasificación bioclimática que propone el CEV.

Posteriormente, se calcula del balance térmico a partir de las propiedades térmicas de los materiales de la envolvente, electrodomésticos de mayor uso e iluminación, así como las temperaturas y humedades mensuales para determinar las horarias. La interacción de la temperatura ambiente con la envolvente arquitectónica ofrece un estimado del comportamiento de los flujos de calor al interior del departamento del caso base, es decir, si se generan ganancias o pérdidas y en qué momento del día. Se consideran para el caso base flujos por conducción, radiación directa, ventilación e infiltración, considerando también los equipos en uso al interior del departamento.

En la Gráfica 8 se tiene el flujo de temperaturas horarias ambiente, temperaturas interiores y su relación con la zona de confort determinada a partir de la temperatura neutra, la cual se calculó de 23.68 °C para verano. La mayor parte del día la temperatura ambiente (línea azul) está fuera del rango confort, particularmente durante horas de la madrugada y hasta las 10 de la mañana. Sin embargo, las temperaturas interiores del departamento (línea naranja) presentan temperaturas confortables durante 16 horas del día (considerando tres horas que se grafican en los límites inferiores de la zona de confort), y temperaturas por debajo del rango durante la madrugada.

Gráfica 8

Temperaturas horarias interiores y su relación con la zona de confort

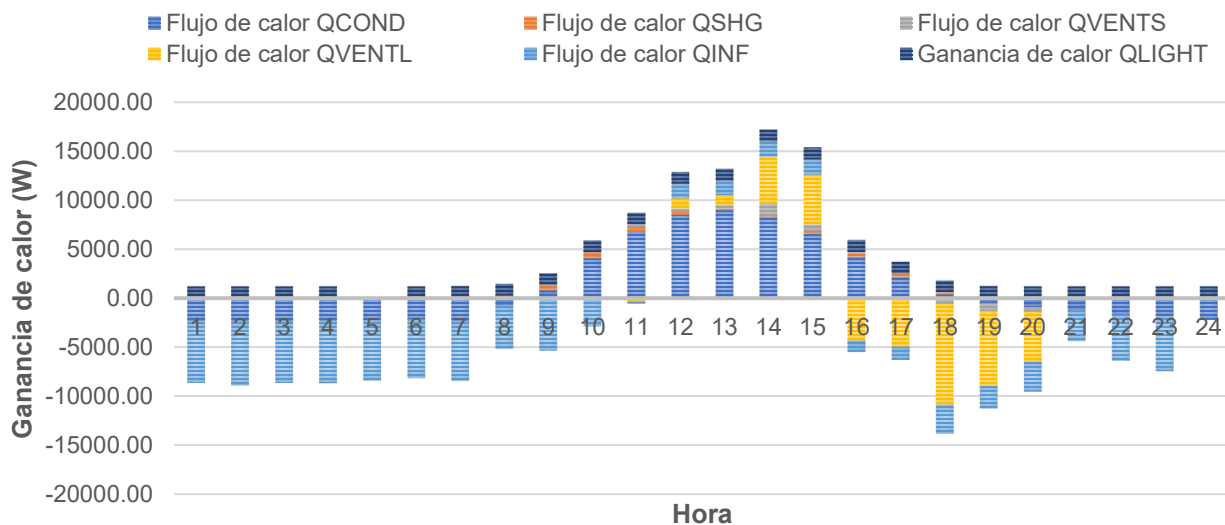


Nota. Temperaturas horarias al interior del depto. tipo y su relación con la zona de confort calculada. Elaboración propia con base en la metodología expuesta en el libro "Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética" (Ramírez J. D., 2019).

Por otro lado, el intercambio entre flujos de calor durante el día genera temperaturas al interior del departamento que se compensan con la temperatura ambiente del exterior (ver Gráfica 9). Se tienen pérdidas de calor por infiltraciones durante las primeras horas de la mañana, mientras que, por la tarde, aprox. hasta las 5 de la tarde, se recupera dicho calor con ganancias por conductividad térmica de los materiales de la envolvente. Nuevamente se empieza a perder calor de las 4 de la tarde y hasta las 8 de la noche por ventilación, esto considerando que se mantienen ventanas abiertas durante la tarde.

Gráfica 9

Comportamiento térmico de la envolvente del caso base



Nota. Flujo de calor/comportamiento térmico de la envolvente (por depto.). Elaboración propia con base en la metodología expuesta en el libro "Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética" (Ramírez J. D., 2019).

Para el desglose del cálculo desarrollado y su metodología, se enlista en los anexos de este trabajo una liga electrónica a un archivo de Excel donde se puede modificar todo dato necesario para mejorar las ganancias de calor. Para una perspectiva general del comportamiento térmico del caso base durante periodos críticos del año, se desarrolló el análisis para el día más frío reportado por la estación meteorológica 00009071. Los resultados del día cálido son los que se toman como referencia ya que, si bien el cálculo de la temporada fría arroja requerimientos de calefacción para el caso base, el uso final de aire acondicionado no predomina en el equipamiento residencial analizado, esto por la condición climatológica y por el estrato social al que pertenece el caso base, de modo que no forma parte del análisis posterior de consumos de energía y emisiones.

Una vez identificado el comportamiento térmico de la envolvente por departamento tipo, se analiza conforme a la metodología de la NOM-020-ENER-2011, esto para estimar el nivel de cumplimiento hipotético del caso base. La norma describe el cálculo manual del presupuesto energético para el edificio proyectado o inmueble a analizar al comparar su desempeño con un "edificio de referencia", idéntico en forma y función, pero que responde a una limitación de ganancias térmicas.

El presupuesto energético parte de cuantificar las porciones de la envolvente térmica según sean translúcidas u opacas, homogéneas o heterogéneas (ej.; un muro macizo de

tabique rojo se considera una porción homogénea; uno a base de panel de yeso con capas aislantes se considera heterogéneo), y calcular valores para cada material identificado en la envolvente, como es el coeficiente de sombreado para cristales y la transmitancia térmica²⁹ (si es que no se cuenta con certificados de cumplimiento o fichas técnicas). Algunos otros datos necesarios son los factores de corrección por sombreado exterior, y el factor de ganancia solar por radiación, los cuales pueden ser consultados directamente en la propia norma. Se utiliza la herramienta de cálculo existente desarrollada por la CONUEE para estimar la ganancia de calor de la envolvente (solo por radiación y conducción). Por norma, se calcula como sigue:

$$\Phi_p = \Phi_{pc} + \Phi_{ps}$$

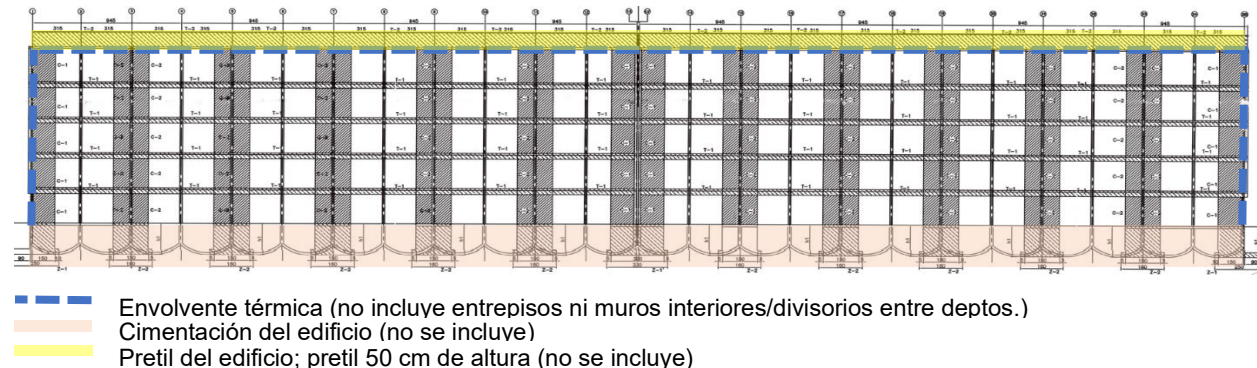
Donde:

- Φ_{pc} = Ganancia térmica por conducción
- Φ_{ps} = Ganancia por radiación
- Φ_p = Ganancia total de calor por envolvente

Como criterio de cumplimiento, la norma señala que un edificio es eficiente cuando el resultado de la ganancia por envolvente proyectada, representado por Φ_p (que sería el edificio “real”) presenta una ganancia de calor por envolvente menor o igual a la ganancia del denominado “edificio de referencia”. Se considera la totalidad del edificio 3-C porque la norma señala como envolvente arquitectónica a toda superficie en contacto directo con la temperatura ambiente, y, que, por ende, genera un flujo de calor entre superficies interiores y exteriores. No se consideran entrepisos a menos de que tengan una superficie y perímetro diferente al nivel de planta baja o de azotea, y tampoco se consideran pretilos (ver Figura 13).

Figura 13

Envolvente de edificio 3-C



Nota. De acuerdo con los parámetros de la NOM-020-ENER-2011. Adaptado de corte longitudinal del proyecto de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México.

En la siguiente tabla se recopilan las propiedades térmicas y ópticas de cada material que compone la envolvente del edificio 3-C. Entre más desglosada sea esta sección, más

²⁹ La norma refiere que la transmitancia térmica es lo mismo que el coeficiente global de transferencia de calor, valor “K” o valor “U”, el cual expresa qué tanto pasa el calor a través de un material considerando su interacción con la temperatura de un determinado ambiente interno y/o externo. Por otro lado, el coeficiente de sombreado (CS) es la relación entre la ganancia de calor por radiación de un determinado vidrio contra uno claro de 3mm de espesor.

específicos serán los flujos por conducción y radiación. Los datos que no se obtuvieron de memorias y fichas técnicas, o bien, directamente de los planos del proyecto ejecutivo de remodelación publicados en el sitio web de la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la CDMX, fueron tomados del apéndice “D” de la propia NOM-020-ENER-2011. También se consideraron valores para materiales del documento titulado “Catálogo de Tecnologías. Tecnologías energéticamente eficientes para la envolvente térmica de las edificaciones” (CONUEE, 2017b), donde se establecen materiales predominantes para la vivienda en el territorio nacional. Este fue el caso de la conductividad térmica (λ), en algunos casos también referida como valor “R”, para el cristal en ventanas, y para la madera en puertas.

Tabla 14

Propiedades térmicas de la envolvente del caso base

Elemento	Espesor (m)	Conductividad térmica “R” λ (W / m ²)	Aislamiento térmico “M” (m ² K / W)
Muros¹			
Tabique hueco (esmaltado exterior)	0.12	0.7415	0.01618
Concreto armado	0.15	1.74	0.0862
Aplanado cemento-arena	0.015	0.63	0.0238
Pintura blanca	0.001	0.29	0.0034
Ventana ²	0.003	0.93	0.0032
Madera blanda (puertas)	0.036	0.13	0.2769
Techo³			
Pintura blanca	0.001	0.29	0.0034
Aplanado cemento-arena	0.015	0.63	0.0238
Concreto armado	0.12	1.74	0.0690
Entortado concreto pobre F'C' 100 kg/cm ²	0.05	0.63	0.0793
Impermeabilizante	0.001	0.30	0.003

¹Muro de tabique rojo hueco Santa Julia 24 x 12 x 6 cm. Aplanado 1.5 cm en interior con mortero cemento-arena proporción 1:5. Pintura ecológica blanco mca Comex. Dado que la envolvente presenta dos tipos de muro (28% muro de concreto y 72% tabique), ambos a una altura de 2.25m, el valor R es distinto para muro de concreto armado de 15 cm de espesor, aplanado mortero cemento-arena proporción 1:5 de 1.5 cm de espesor (ambas caras) y pintura blanca.

² Vidrio claro 3 mm espesor; cancelería de aluminio negro. Coeficiente de sombreado (CS) 1.00. Al este, ventanas de 2.40 x 1.00 m y cancel de 2.25 x 1.80m. Al oeste, ventanas de 2.40 x 1.00 m y de 0.80 x 0.80 m.

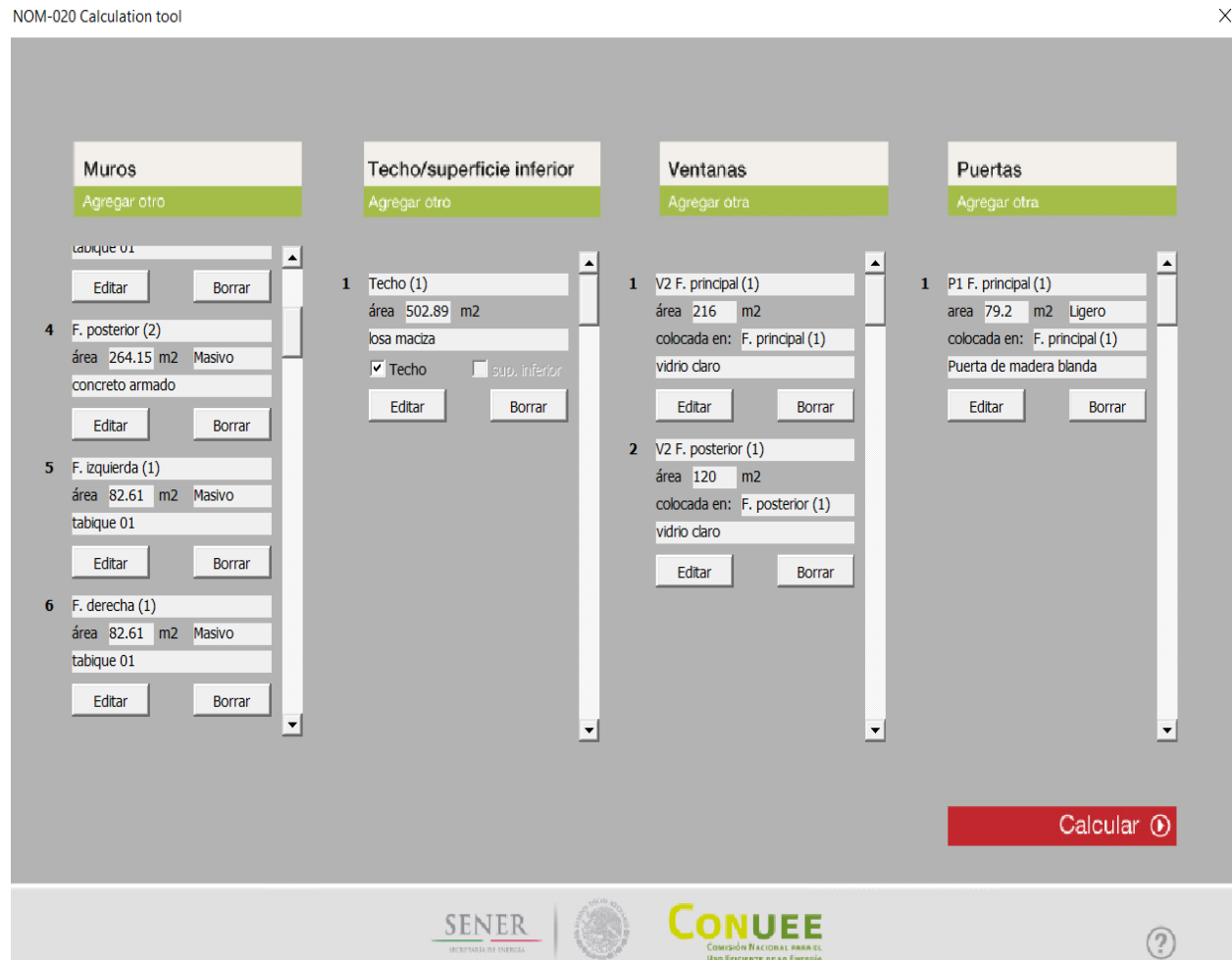
³ Losa maciza concreto armado peralte 15 cms, F'C' 200 kg/cm² con cemento gris Cemex Tolteca. Impermeabilizante rojo Comex Top Total.

Se realizó el cálculo de la norma con la herramienta CONUEE para cada cuerpo que compone el edificio 3-C, pues, aunque tienen una distribución y superficie habitable idéntica, su

orientación principal es opuesta (este y oeste). Para ingresar las porciones de la envolvente (techos, muros, ventanas y puertas) se tomaron las recomendaciones de la norma. En muros, por ejemplo, se agruparon las áreas de muros con la misma orientación y material, sin restar el área de vanos de ventanas y puertas. También se agrupó la superficie de ventanas ubicadas en una misma cara u orientación, ya que todas tienen el mismo material (ver Figura 14).

Figura 14

Componentes del caso base según la herramienta de cálculo de CONUEE

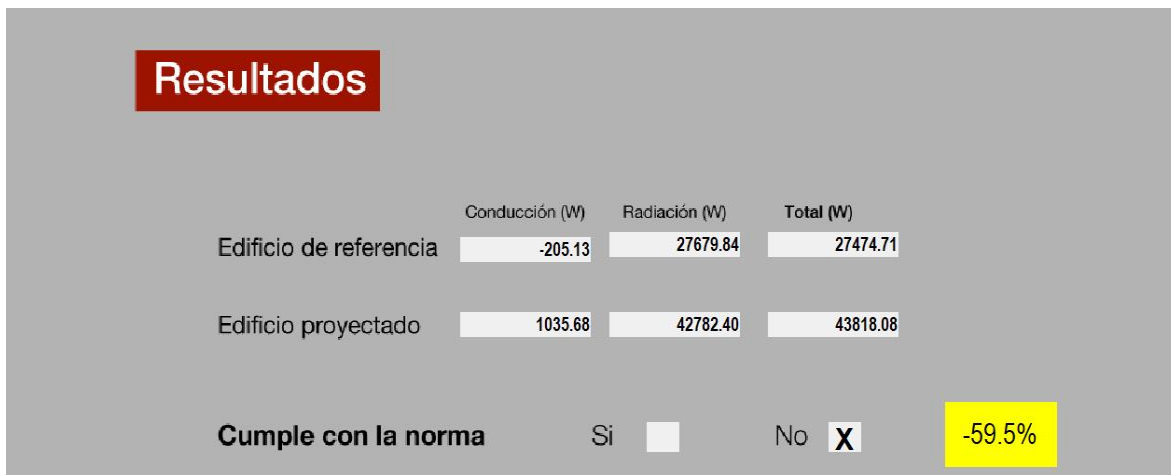


Notas. Componentes de envolvente del edificio 3-C. Captura de pantalla de Macros de Excel. Adaptado de la Herramienta de cálculo de la NOM-020-ENER-2011 desarrollada por la Agencia Danesa de Energía para la CONUEE, disponible en <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-calculo-nom-020-ener-2001>.

Detallada la composición de la envolvente con las propiedades térmicas y ópticas de cada material, se comprueba el criterio del presupuesto energético establecido por la norma. La herramienta señala que el edificio 3-C, aún después de una remodelación que finalizó en enero de 2020, no cumple con los límites de ganancias térmicas correspondientes al edificio de referencia que se genera como parte del cálculo. Esto al considerar únicamente las cargas térmicas expresadas en Watts por conducción y radiación (ver Figura 15).

Figura 15

Incumplimiento de envoltente del caso base

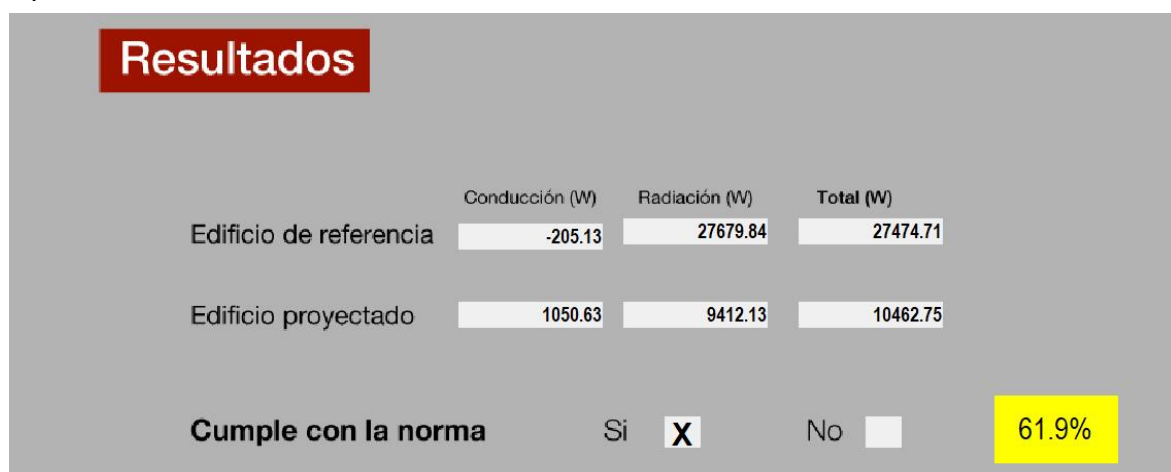


Nota. Incumplimiento de envoltente edificio 3-C. Captura de pantalla de Macros de Excel. Adaptado de la Herramienta de cálculo de la NOM-020-ENER-2011 desarrollada por la Agencia Danesa de Energía para la CONUEE, disponible en <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-calculo-nom-020-ener-2001>.

Según la porción de envoltente (ventanas, puertas, muros o techos), y de acuerdo con las opciones de materiales precargados que ofrece la herramienta CONUEE, se realizan combinaciones aleatorias de sustitución de materiales. Al considerar las ventanas originales, pero con la modificación de agregar una película de control solar con factor de sombreado (CS) de .22 y no de 1.00, como suele considerarse para vidrios claros de 3 mm de espesor sin ningún tipo de protección, la ganancia por radiación disminuye de 27,679.84 W a 9,462.13 W, e implican un incremento marginal de ganancias por conducción (ver Figura 16).

Figura 16

Cumplimiento de envoltente del caso base



Nota. Cumplimiento de envoltente edificio 3-C. Captura de pantalla de Macros de Excel. Adaptado de la Herramienta de cálculo de la NOM-020-ENER-2011 desarrollada por la Agencia Danesa de Energía para la CONUEE, disponible en <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-calculo-nom-020-ener-2001>.

Tal modificación favorece las ganancias por radiación principalmente, lo cual permite que la envolvente proyectada sea 61.9% más eficiente según el criterio del edificio de referencia. En el archivo nombrado “Herramienta CONUEE” de la liga de Anexos, se puede consultar a detalle la corrida de incumplimiento y cumplimiento, así como el listado de materiales para sustitución, los cuales coinciden con el “Catálogo de Tecnologías energéticamente eficientes para la envolvente térmica de las edificaciones” (CONUEE, 2017b).

Por otro lado, se realizó la comprobación con una segunda herramienta generada a principios del año 2022³⁰, donde el incumplimiento del caso base se repite (ver Figura 17). Las ganancias del edificio proyectado y de referencia se obtienen bajo el mismo procedimiento del presupuesto energético de la norma, considerando únicamente ganancias por conducción y radiación. La diferencia principal identificada es al ingresar los datos de la envolvente, pues no se tiene un apartado específico para enlistar los materiales de puertas, como ocurre con la herramienta de la CONUEE, por lo cual en este caso se ingresan como muros de madera. De igual modo, el cálculo realizado con esta herramienta refleja que el caso base presenta un déficit en el desempeño energético debido a variaciones en las cargas por radiación entre el edificio de referencia y el proyectado.

Figura 17

Resumen de cargas del cálculo por radiación y conducción de la envolvente del caso base

	Ganancia de calor por conducción (W)	Ganancia de calor por radiación (W)	Ganancia de calor total (W)
Referencia	1623.96595	4632	6,256
Proyectado	-1478.79277	43908	42,429

5.2 - Cumplimiento

RESULTADO No cumple con la NOM-020-ENER-2011

Notas. Envolvente del edificio 3-C. Captura de pantalla de Macros de Excel. Adaptado de “Herramienta digital para el cálculo de la NOM-020-ENER-2011”, elaborada por Christian Fernando Flores Vega (2020).

³⁰ Se utilizó la “Herramienta digital para el cálculo de la NOM-020-ENER-2011”; macros de Excel elaborada por Christian Fernando Flores Vega para el Programa de Sistemas Energéticos de la Facultad de Ingeniería UNAM, bajo la supervisión de la Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo.

4.4 Análisis del consumo energético para el caso base

En esta sección se estima el consumo energético del caso base desagregado por uso final. Se mencionó en el capítulo anterior que el impacto de las NOM-ENER en el consumo energético residencial depende del equipamiento de la vivienda, lo cual implica conocer la tasa de renovación, o bien la vida útil media de aparatos. Ambos aspectos definen el comportamiento de usuarios en cuanto al uso de energía eléctrica y térmica de los hogares, asociados al estrato socioeconómico y al estilo de vida, lo cual a su vez se condiciona por la ubicación y el clima (Rosas-Flores et al., 2011).

Se emplea la metodología de usos finales (conocido como el enfoque bottom up), con una desagregación del consumo energético unitario por equipo o aparato para mayor precisión (IEA, 2016). El principio de dicha metodología se basa en analizar la demanda de energía a partir de necesidades de uso y no de mercado (Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, 2015). Establecidos la electricidad y el gas LP como los dos energéticos principales para este análisis, se propone tomar como valor constante anual el consumo unitario calculado para cada uno, y se valida con lo establecido por trabajos previos.

Ahora bien, lo primero es partir del promedio de energía térmica y eléctrica para viviendas sin aire acondicionado, que se estima en 4.67 kWh por día (Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez, 2018) (ver Tabla 15). Lo anterior es similar a datos reportados para 2016 en la Base de Indicadores de Eficiencia Energética (BIEE), referente al consumo de energía eléctrica y por combustible empleado para la cocción de alimentos y calentamiento de agua. Específicamente para la Ciudad de México, se reportó 4.30 kWh/día, esto al considerar un consumo anual de electricidad por hogar en 1,054.90 kWh, equivalente a 0.090 tep³¹, un consumo anual de combustible para cocción y calentamiento de agua por hogar de 0.27 tep, y un total de consumo de ambos energéticos por hogar de 0.36 tep por año.

Tabla 15

Uso medio de energía por actividad/uso final

Uso final	Consumo anual (MWh)	Consumo diario (kWh)
Iluminación, equipos eléctricos	1.00	2.75
Refrigeradores	0.27	0.74
Cocción de alimentos y calentamiento de agua	0.43	1.18
Total	1.70	4.67

Nota. Elaboración propia con datos de Oropeza-Perez y Petzold-Rodríguez, (2018).

a) Energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica se calcula para dos usos finales principales, iluminación y electrodomésticos. En algunos análisis se considera un promedio de consumo por electrodomésticos a partir de un índice de saturación, el cual se refiere al número de aparatos en uso dividido entre el número viviendas (Rosas-Flores et al., 2011). Tal

³¹ 1 tep (tonelada equivalente de petróleo) = 11,630 kWh, de acuerdo con el Convertidor de Unidades de la página del Sistema de Información Energética (SIE) de la SENER.

índice se multiplica por una unidad o un valor constante de consumo unitario de los aparatos que se consideren, para así obtener una cifra total por vivienda. Si bien esta cifra puede ser calculada por grupos de población, resulta común que el consumo se asuma como constante tanto por grupos poblacionales como en periodos de tiempo debido a la falta de información del consumo energético unitario. Y es que, aunque México cuenta con diversas fuentes oficiales sobre la saturación de electrodomésticos a nivel nacional y regional, se debe tener en cuenta su actualización con mediciones de la demanda de los aparatos o estimaciones de cambios en la eficiencia (Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, 2015; Rosas-Flores et al., 2011).

El consumo unitario de energía para cualquier equipo eléctrico se puede estimar multiplicando su potencia promedio por su tiempo de uso. Se requiere entonces, el rango o potencia en Watts de los diferentes equipos, y el tiempo promedio de uso, ambos datos previamente mencionados en este capítulo, para así calcular el total anual (solo para electricidad) del caso base en 2019. Los usos finales a los que corresponden los aparatos considerados son la iluminación y electrodomésticos.

Se toman referencias de la Asociación Nacional de Fabricantes de Aparatos Domésticos, A. C., así como del buscador de productos estadounidense Energy Star. Se considera para la validación estudios previos (Rosas-Flores et al., 2011; Oropeza y Petzold, 2018), datos de consumo y horas de uso de ENCEVI, asimismo, datos de estudios de calidad de lavadoras, refrigeradores y televisores, elaborados por el laboratorio de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) en sus versiones más actuales. Cabe señalar que para cada aparato existirán variaciones respecto a lo reportado en la literatura (incluso en el caso de las computadoras, no se encontró una referencia directa para realizar la validación), esto debido principalmente a factores como el fabricante, el modelo, las especificaciones técnicas y niveles de eficiencia del equipo que se analiza.

- Iluminación

Para el cálculo del consumo unitario de energía eléctrica por iluminación (ver Tabla 16) se consideran los datos de lámparas incandescentes y lámparas fluorescentes compactas (LFCA) por departamento, de acuerdo con las especificaciones mencionadas en el apartado 4.1.2 de este trabajo. Se utiliza la siguiente ecuación, retomada de Velazco (2013):

$$E_I = \sum S_{Bd} CU_B + \sum S_{Fd} CU_F$$

Donde:

E_I = Consumo eléctrico por iluminación

S_{Bd} = Número de lámparas incandescentes por departamento

CU_B = Consumo unitario por lámpara incandescente (kWh/luminaria*año)

S_{Fd} = Número de LFCA o LED por departamento

CU_F = Consumo unitario por lámpara LFCA o LED (kWh/luminaria*año)

Tabla 16

Consumo eléctrico por iluminación del caso base

Iluminación	S _{Bd}	CU _B (kWh/luminaria)	S _{Fd}	CU _F (kWh/luminaria)	E _i diario (kWh)	E _i (kWh/año)
Incandescente 40 W, 12.25 lm/W	2.00	0.26	-	-	0.48	175.44
LFCA 20 W, 60 lm/W	-	-	5.00	0.22		

Lo anterior equivale a 14.62 kWh al mes por departamento tipo.

- Electrodomésticos

De igual manera, para el consumo por electrodomésticos se considera para el cálculo del consumo unitario por equipo el equipamiento previamente descrito del caso base, el cual se enlistan en la Tabla 17. Se obtiene el consumo por uso final de electrodomésticos con la siguiente ecuación, retomada de Velazco (2013):

$$E_E = \sum_i S_{EC_d} CU_{EC}$$

Donde:

E_E = Consumo eléctrico por electrodomésticos

S_{EC_d} = Número de electrodomésticos por departamento

CU_{EC} = Consumo unitario por electrodoméstico (kWh/equipo*año)

Tabla 17

Consumo eléctrico por electrodomésticos del caso base

Electrodomésticos	S _{EC_d}	CU _{EC} (kWh/equipo*año)	E _E (kWh/año)
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	1	1.055	385.00
Lavadora	1	0.343	125.07
Televisión plasma (32 pul)	2	1.610	587.33
Computadora	1	0.120	43.78
Plancha	1	0.571	208.45
Total			1,349.62

Nota. Las especificaciones para cada equipo se desglosan en el Anexo 1.

Lo anterior equivale a 112.47 kWh al mes por departamento tipo.

Sumando ambos, se obtiene una aproximación del comportamiento energético del caso base por consumo de energía eléctrica durante un periodo anual, mediante la siguiente ecuación:

$$E_T = E_I + E_E$$

Donde:

E_T = Consumo eléctrico total por departamento

E_I = Consumo eléctrico total por iluminación

E_E = Consumo eléctrico total por electrodomésticos

El consumo total de energía eléctrica para el caso base al considerar los usos finales antes descritos equivale a 127.09 kWh al mes, que al año resultarían en 1,525.06 kWh. En la Tabla 18 se muestra que los electrodomésticos (lavadora, televisión, plancha, computadora) representan el 64.97% del total estimado, seguido del refrigerador con 24.34% y finalmente la iluminación con 10.69%.

Tabla 18

Consumo eléctrico anual del caso base

Uso final	Consumo anual (kWh) ^a	Consumo anual (kWh) ^b
Iluminación, equipos electrodomésticos	1,140.06	1,000.0
Refrigerador	385.00	270.00
Total	1,525.06	1,270.00
^a Consumo anual (kWh) resultante del cálculo por consumo unitario de aparatos y equipos		
^b Consumo anual (kWh) resultante de referencias		

Nota. Consumo por depto. a partir de consumos unitarios. El consumo anual resultante de referencias corresponde a Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez (2018), quienes a su vez se basaron en estimaciones de Rosas-Flores et al. (2011).

b) Energía Térmica

Por lo que se refiere al gas LP, el consumo unitario se estima en este caso para el calentador de almacenamiento y la estufa de piso, con estos dos aparatos se propone el consumo total de energía térmica del caso base.

Se consideran especificaciones técnicas y consumos unitarios tomados de estudios de calidad del laboratorio de PROFECO de hace una década. También se toma en cuenta un ajuste a tales consumos por la variación porcentual de 2.37% en el consumo de gas LP del sector residencial durante 2019 respecto al año anterior (SIE,2021). Los equipos que se consideran para el caso base se enlistan en la Tabla 19.

Tabla 19

Consumo de gas LP por aparato del caso base

Aparato/equipo	Consumo diario (kg/día)	Consumo (kg/mes)	Consumo (kg/año)
Calentador ^a	1.24	37.80	453.26
Estufa ^b	0.15	4.62	55.40

^aCalentador de almacenamiento marca Guardián modelo GA-DEP-060LP. Gas LP. Carga Térmica 3.2 kW. Número de servicios 1.5, capacidad 58 litros, medidas: 92.5 cm alto, 33 cm diámetro, peso 20.3 kg. Aislante térmico de espuma de poliuretano. Encendido piezoeléctrico. Tiempo de recuperación 27 min. Eficiencia térmica 75%

^bEstufa de piso, 6 quemadores, 1 horno, encendido manual. Marca mabe modelo EM 7647 BSIS0A. Capacidad de horno 12,387 kJ/h. Eficiencia térmica 56%.

Nota. Consumo por depto. partir de consumos unitarios (PROFECO, 2011; Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez, 2018).

Similar a lo que ocurre con el consumo específico de electrodomésticos, se presentan variaciones en las capacidades térmicas de quemadores y calentadores reportadas para cada aparato (ver Tabla 20), así como el año en el que se obtienen dichos datos³².

Tabla 20

Consumo térmico anual del caso base

Uso final	Consumo anual (kg/gas LP) ^a	Consumo anual (kg/gas LP) ^b
Calentamiento de agua	453.26	278.40
Cocción	55.40	184.00
Total	508.67	462.40

^aConsumo anual (kg/gas LP) resultante del cálculo por consumo unitario de equipos

^bConsumo anual (Kg/gas LP) resultante de referencias

Nota. Consumo por depto. a partir de consumos unitarios. El consumo anual estimado resultante de referencias corresponde a estadísticas y trabajos similares (CONUEE, 2021; Rodríguez et al., 2015).

Ahora bien, los consumos por energía eléctrica y térmica del caso base se convierten a unidades de energía equivalente, en este caso a mega julios (MJ), para expresar el consumo total por departamento tipo n, que se toma como valor constante para reflejar el comportamiento energético por uso final del caso base bimestral y anualmente (ver Tabla 21).

³² Consumo de gas LP para estufas de piso según cifras reportadas en estudio de calidad de estufas de gas y parrillas; modelos analizados: 13. Consumo de gas LP para calentador de almacenamiento según estudio de calidad de calentadores de agua de uso doméstico; modelos analizados: 33. Ambos elaborados por el Laboratorio Nacional de Protección de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) y publicados en la Revista del consumidor, 2011.

Tabla 21

Consumos totales por energético del caso base

Electricidad			
Distribución porcentual	Uso final	Consumo anual	
		(kWh)	(MJ)
11.50%	Iluminación	175.44	631.58
63.25%	Equipos electrodomésticos	964.62	3,472.63
25.24%	Refrigerador	385.00	1,386.00
Consumo total anual depto.		1,525.06	5,490.21
Gas LP			
Distribución porcentual	Uso final	Consumo anual	
		(kg)	(MJ)
10.89%	Cocción	55.40	2,742.65
89.11%	Calentamiento de agua	453.26	22,438.44
Consumo total anual depto.		508.67	25,181.10

Nota. Calculado a partir de consumos unitarios por equipo o electrodoméstico.

Con base en lo anterior, se tienen consumos bimestrales por departamento de 254.18 kWh por electricidad, lo que equivale a 915.04 MJ. Por gas LP, se estima que al bimestre se consumen 84.78 kg, lo equivalente a 4,197 MJ. En total, bimestralmente cada departamento del caso base consume 5,111.89 MJ por iluminación, electrodomésticos, cocción y calentamiento de agua. La distribución porcentual refiere al consumo por energético; para electricidad los electrodomésticos consumen el 63.25% del consumo de energía eléctrica anual. Por otro lado, el calentamiento de agua requiere el 89.11% de energía térmica anual. En unidades de energía equivalente, la distribución porcentual registra un total de 30,671.31 MJ anuales por departamento. En este sentido, la proporción de los electrodomésticos es de 11.32% del total anual, y del calentamiento de agua es de 73.16%.

4.5 Escenarios CEV para vivienda multifamiliar vertical región templada

De acuerdo con los parámetros de cumplimiento identificados para cada uno de los lineamientos oficiales referidos en el CEV, se proponen dos conjuntos de medidas de ahorro energético denominados Escenario 01 y 02. El primer escenario implica el cumplimiento de lineamientos en un nivel mínimo, mientras que el segundo refleja una mejora adicional al ahorro de energía por el cumplimiento mínimo.

Para cada escenario se proponen las medidas de sustitución correspondientes, esto a partir del comportamiento energético por usos finales estimado para el caso base y el nivel de eficiencia requerido. Cabe mencionar que, para ambos escenarios, la medida de sustitución propuesta para el lineamiento de sistema (descrita en la sección 4.3 de este capítulo) se toma como constante. Por lo mismo, no se incluye en el cálculo del consumo energético por usos finales pues el aire acondicionado no figura dentro de los usos finales analizados.

4.5.1 Cálculo del consumo energético por usos finales

- Escenario 01

El Escenario 01 o de cumplimiento comprende la sustitución de tecnologías para iluminación y equipos electrodomésticos. A continuación, se señala el criterio de sustitución para cada medida de ahorro según el tipo de energético.

a) Energía eléctrica

Para iluminación, las dos lámparas incandescentes consideradas dentro del caso base se sustituyen por tecnología LFCA, la cual ya estaba contemplada originalmente en 5 de las 7 lámparas del caso base. Se plantea como criterio de sustitución la mejora en la eficacia luminosa, además de que por decreto de la NOM-028-ENER-2017, las lámparas incandescentes de 40W ya no se comercializan en el país desde 2015.

En la siguiente tabla se desglosa el consumo y ahorro anual a partir del consumo unitario diario que se consideró para esta sustitución.

Tabla 22

Consumo eléctrico por iluminación del Escenario 01

Iluminación	S_{Fd}	CU_F (kWh/luminaria)	E_I diario (kWh)	E_I (kWh/año)	Ahorro (kWh/año)
LFCA 20 W*	7.00	0.31	0.31	111.64	63.80

Donde:

E_I = Consumo eléctrico por iluminación

S_{Fd} = Número de LFCA por departamento

CU_F = Consumo unitario por lámpara LFCA (kWh/luminaria*año)

*Lámpara fluorescente compacta 20W autobalastada, base E27, eficacia luminosa 60 lm/W, CRI 82, TCC 6500 K, 1200 lm, vida útil de 10000 hrs., y medida de alto 244 mm.

Los electrodomésticos sustituidos son el refrigerador, lavadora, televisión y computadora (ver Tabla 23). Para el equipamiento del caso base se considera una antigüedad mínima diez años, de acuerdo con lo reportado por ENCEVI. El criterio de sustitución parte del cumplimiento de eficiencia energética que establece la última actualización del lineamiento oficial correspondiente a cada aparato.

Por ejemplo, la NOM-015-ENER-18 establece que para un “refrigerador-congelador con deshielo automático, con el congelador montado en la parte inferior sin máquina de hielo automática”, (descripción que cubre los modelos de refrigerador utilizados para este análisis) el consumo de energía máximo es de 317.7 kWh/año.

Tabla 23

Escenario 01. Consumo y ahorro por sustitución de electrodomésticos

Equipo/aparato	S_{EC_d}	CU_{EC} (kWh/equipo)	E_E (kWh/año)	Parámetro/ consumo máximo NOM-ENER	Ahorro (kWh/año)
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	1	0.858	313.00	317.7 (kWh/año)	72.00
Lavadora	1	0.337	123.00	160 (kWh/año)	2.06
Televisión plasma color (30-39 pul)	2	0.195	70.99	1W ^a	516.34
Computadora (laptop)	1	0.092	33.56	1W ^a	10.21
Plancha	1	0.571	208.45	-	0.00
Total			749.00		600.62

Donde:

E_E = Consumo eléctrico por electrodomésticos

S_{EC_d} = Número de electrodomésticos por departamento

CU_{EC} = Consumo unitario por electrodoméstico (kWh/equipo*año)

b) Energía térmica

Por otro lado, para cocción se sustituye la estufa de piso descrita en el caso base por una que supere su porcentaje de eficiencia térmica, entendida como la relación entre el calor absorbido por el agua y el que es liberado por el combustible (CONUEE, 2021a). Para el caso base se propuso un equipo con eficiencia térmica de 56% y una capacidad térmica de 12,387 kJ/h. De acuerdo con la NOM-025-ENER-2013, el porcentaje de eficiencia térmica se refiere al desempeño de los quemadores de estufas, y establece como mínimo 30% para capacidades térmicas (referidas en las especificaciones de equipos como capacidad de horno) de más de 11,500 kJ/h.

La revisión de trabajos similares y estudios de calidad señala que es poco probable que existan estufas con quemadores con menos del 30% de eficiencia. Esto quiere decir que, para la estufa, el cumplimiento por norma ya se considera desde el caso base, por lo que se toma como criterio de sustitución principal la antigüedad del equipo. De esta manera es posible reducir el consumo unitario energético y aumentar el porcentaje de eficiencia, fijado en 60% (según especificaciones técnicas del equipo) para el Escenario 01.

Similarmente, para el calentamiento de agua se considera la sustitución del calentador de almacenamiento que suministra de 1 a 1.5 servicios en función de su antigüedad, además de mejorar el indicador de eficiencia térmica del caso base, que se consideró de 75%. Esto porque de acuerdo con la NOM-003-ENER-2021, el porcentaje de eficiencia térmica mínima es de 75% cuando se tienen capacidades de almacenamiento de entre 40 y 62 litros.

Para el Escenario 01 se considera un calentador de almacenamiento con una eficiencia de 77%. En la Tabla 24 se enlistan los consumos unitarios, mensuales y anuales que se obtendrían por cada aparato.

Tabla 24

Escenario 01. Consumo y ahorro por sustitución de equipos de gas LP

Aparato	Consumo unitario (kg/día)	Consumo (kg/mes)	Consumo (kg/año)	Ahorro (kg/año)
Calentador, eficiencia térmica 77%	1.09	33.11	397.33	55.93
Estufa, eficiencia térmica 60%	0.10	3.08	36.94	18.47

Notas. Equipos: estufa de piso (6 quemadores, capacidad de horno 11,106 kJ/h), calentador de almacenamiento (58 litros).

- Escenario 02

El Escenario 02 de mejora adicional implica medidas de sustitución considerando equipos con eficiencias superiores al Escenario 01 de cumplimiento mínimo. Se describen a continuación:

a) Energía eléctrica

En cuanto a iluminación, las siete lámparas LFCA de 20 W consideradas para el Escenario 01 se sustituyen por tecnología LED de 7W (equivalente a un foco incandescente de 60 W). Esto por ofrecer mayor eficacia luminosa, que es el parámetro de sustitución mencionado en la sección 4.2.2 de este capítulo donde se identificaron los parámetros mínimos para el cumplimiento por norma. En la Tabla 25 se muestra un consumo anual por iluminación 78% menor que el original de 175.44 kWh/año.

Tabla 25

Consumo eléctrico por iluminación del Escenario 02

Iluminación	S_{Fd}	CU_F (kWh/luminaria)	E_1 diario (kWh)	E_1 (kWh/año)	Ahorro (kWh/año)
LED 7W*	7.00	0.11	0.11	39.08	136.36

Donde:

E_1 = Consumo eléctrico por iluminación

S_{Fd} = Número de LED por departamento

CU_F = Consumo unitario por lámpara LED (kWh/luminaria*año)

* LED 7W, base E26, eficacia luminosa 71.4 lm/W, CRI 93, TCC 2700 K, 1200 lm, vida útil de 25000 hrs., y medida de alto 112 mm.

La propuesta de equipamiento a sustituir para este escenario únicamente considera el refrigerador y la lavadora por ser los equipos con mayor consumo unitario. Además, son los que tienen mayor disponibilidad de especificaciones técnicas que permiten corroborar sus consumos unitarios con los límites por norma. Para el resto de los equipos se conservan las opciones del Escenario 01 (ver Tabla 26).

Tabla 26

Escenario 02. Consumo y ahorro por sustitución de electrodomésticos

Equipo/aparato	S_{ECd}	CU_{EC} (kWh/equipo)	E_E (kWh/año)	Parámetro/ consumo máx. NOM-ENER	Ahorro (kWh/año)
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	1	0.853	311.00	317.7 (kWh/año)	74.00
Lavadora	1	0.321	116.98	160 (kWh/año)	8.09
Televisión plasma color (30-39 pul)	2	0.195	70.99	1W ^a	516.34
Computadora (laptop)	1	0.092	33.56	1W ^a	10.21
Plancha	1	0.571	208.45	-	0.00
Total			740.98		608.64

Donde:
 E_E = Consumo eléctrico por electrodomésticos
 S_{ECd} = Número de electrodomésticos por departamento
 CU_{EC} = Consumo unitario por electrodoméstico (kWh/equipo*año)

b) Energía térmica

Por otro lado, en cuanto al consumo de gas LP se proponen sustituciones de la estufa de piso de 6 quemadores y del calentador de almacenamiento de 62 litros. La propuesta de estufa es apenas 2% más eficiente térmicamente que la del Escenario 01, y aunque se mantiene el número de quemadores para poder realizar la comparativa, en estos equipos la eficiencia va en función de la capacidad de horno o capacidad térmica, la cual aumenta también (de 11,106 KJ/h a 12, 814 kJ/h). En el caso del calentador de almacenamiento, se considera la capacidad máxima del rango de suministro de 1 a 1.5 servicios, esto para optar por un modelo con una mayor eficiencia térmica que la del Escenario 01. De igual modo, el aumento en eficiencia al menos para este tipo de calentadores modifica la capacidad de almacenamiento (de 58 a 62 litros). En la Tabla 27 se integran los consumos de combustible unitarios, mensuales y anuales obtenidos por cada aparato con respecto a lo calculado para el caso base.

Tabla 27

Escenario 02. Consumo y ahorro por sustitución de equipos de gas LP

Aparato	Consumo unitario (kg/día)	Consumo (kg/mes)	Consumo (kg/año)	Ahorro (kg/año)
Calentador, eficiencia térmica 79%	0.54	16.48	197.73	255.53
Estufa, eficiencia térmica 62%	0.06	1.96	23.50	31.90

Notas. Equipos: estufa de piso (6 quemadores, capacidad de horno 12,814 kJ/h, calentador de almacenamiento (62 litros).

4.5.2 Superficie construida y consumo energético

Para este punto, la relación entre la superficie construida y el consumo energético anual calculado para el caso base y cada escenario se compara contra los valores máximos permitidos, en este caso el “Umbral Máximo de consumo energético (CE)”, según la Tabla B.1 “Especificaciones bioclimáticas para el consumo energético y emisiones de carbono recomendables” (pág. 562) del CEV³³. Como indicador de eficiencia, sugiere una aproximación del rendimiento energético del caso base bajo condiciones de funcionamiento típicas y según la ubicación, el clima, la configuración y tipología arquitectónica. Cuanto menos sea el valor obtenido, expresado en kWh/m²año (o en kbtu/pie²año en la literatura internacional) mejor es la eficiencia operativa de un edificio. Es común encontrarse con distintos nombres para tal valor, como es el índice de consumo de energía (ICE) (Morillón et al., 2015), consumo de energía específico (SEC, por sus siglas en inglés) o intensidad de uso de energía (gross EUI, por sus siglas en inglés) (Energy Star, 2020; IEA, 2021).

El CEV recomienda un CE de 137.8 kWh/m² año para la vivienda vertical en un clima templado subhúmedo. Tal clasificación bioclimática sugerida es equivalente a la clasificación identificada para el caso base en la sección 4.3 de este trabajo. El código señala, además, valores independientes para el consumo de electricidad (102 kWh/m² año) y de gas LP (28.2 kWh/m² año) recomendados como línea base. Aunque no se especifica un cálculo como tal, se infiere que los consumos energéticos analizados deben convertirse a unidades equivalentes antes de dividir el consumo entre la superficie construida (revisar la pestaña «CE estimado vs CE del “CEV”» del archivo nombrado «ACB del “CEV” memoria de cálculo» en la liga de Anexos). En el caso de consumos de gas LP, dado que el CE se expresa en kWh, primero se convierte el consumo en unidades de energía equivalente, en este caso de kilogramos a mega julios, y finalmente a kilowatts por hora. Considerando la superficie habitable total del edificio 3-C (5,012.00 m²), se estiman los siguientes valores:

Tabla 28

CE estimado para el caso base, Escenario 01 y 02

CE/unidad	Caso Base	Escenario 01	Escenario 02
CE kWh/m ² año (solo gas LP)	111.65	95.32	48.56
CE kWh/m ² año (solo electricidad)	24.34	13.74	24.34
CE kWh/m ² año (gas LP y electricidad)	135.99	109.06	61.01

4.5.3 Cálculo de emisiones por consumo energético

Referente al impacto ambiental del comportamiento energético del caso base, se obtiene el potencial de reducción de emisiones de CO₂eq para cada escenario, según el indicador de emisiones por tipo de energético recomendada en el Anexo 8 del CEV. Esto a través de las ecuaciones del documento "Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero" (2006) para la cuantificación de emisiones de CO₂ procedentes de fuentes fijas de combustión del sector Energía, subsector 1A4b (sector residencial).

³³ Un extracto de la Tabla B.1 se ubica en el archivo PDF nombrado “publicado-CEV_2017__FINAL_606” disponible en la liga de Anexos.

Para asignar emisiones con base en la localización, es decir, de la generación de energía al punto final de uso designado, se requiere conocer los datos de actividad (en este caso, el consumo energético) y multiplicar por el factor de emisión correspondiente al energético empleado (electricidad y gas LP). Se considera el Alcance 2 de emisiones producto del consumo energético suministrado desde red dentro de límites urbanos, que incluye todas las emisiones provenientes del uso de energía en edificios residenciales (WRI,2014).

Los factores de emisión reportados en el Anexo 8 de CEV, tanto para consumos de electricidad como para combustible gas LP, corresponden a los calculados por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) y el Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés) y datan del año 2016. Para este cálculo se consultó el valor más actualizado por energético. Para electricidad, se obtiene el factor de emisión actual (Comisión Reguladora de Energía [CRE], 2020) derivado del proceso de generación de electricidad para estimar los GEI por consumo de dicho energético, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_g^c = C_{\text{electricidad}} * FE_{\text{electricidad,g}}$$

Donde:

E_g^c = Emisiones totales de GEI “g” (tCO₂eq)

$C_{\text{electricidad}}$ = Consumo de electricidad (MWh)

$FE_{\text{electricidad,g}}$ = Factor de emisión de GEI para electricidad (tCO₂eq/MWh)

En la Tabla 29 se muestran emisiones por consumo de electricidad para un departamento tipo. Estas se toman como valor constante para estimar emisiones por edificio, (80 departamentos). Las unidades de consumo energético deben coincidir con las del factor de emisión correspondiente, de otra forma lo ideal es convertir el consumo a unidades de energía equivalente. En el caso del consumo eléctrico se convierte a mega watts por hora.

Tabla 29

Emisiones por consumo de electricidad para el caso base

Año 2019	Consumo (kWh)	Consumo (MWh)	$FE_{\text{electricidad,g}}$ (tCO ₂ eq/MWh)**	Emisiones GEI (tCO ₂ eq)
Bimestral	254.18	0.2542	0.494	0.1255632
Total anual depto. tipo	1,525.06	1.5251	0.494	0.7533794
Total anual edificio 3-C				60.27

** Factor de emisión tomado del Registro Nacional de Emisiones para el Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2020, consultado en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630693/Aviso_FEE_2020.pdf

Para el cálculo de emisiones por consumo de gas LP, se consulta el factor de emisión actualizado correspondiente al poder calorífico del combustible; se considera un poder de 48.00 MJ/kg (SEMARNAT, 2015). El factor de emisión, como se mencionó para el caso de energía eléctrica, define las unidades del dato de actividad para el cálculo. Sustituyendo en la fórmula anterior la unidad de consumo por energético y el factor de emisión, se tiene lo siguiente:

$$E_g^c = C_{\text{combustible}} * FE_{\text{combustible,g}}$$

Donde:

E_g^c = Emisiones totales de GEI "g" (tCO₂eq)

$C_{\text{combustible}}$ = Consumo de gas LP (MJ)

$FE_{\text{combustible,g}}$ = Factor de emisión de GEI para gas LP (tCO₂eq/MJ)

En la Tabla 30 se observa que para el gas LP se debe convertir el consumo en kilogramos a mega julios (MJ), pues el factor de emisión para este tipo de combustible considera toneladas de CO₂ equivalente por cada MJ.

Tabla 30

Emisiones por consumo de gas LP para el caso base

Año 2019	Consumo kg	Consumo MJ	$FE_{\text{combustible,g}}$ (tCO ₂ eq/MJ)*	Emisiones GEI (tCO ₂ eq)
Bimestral	84.78	4,196.85	0.0000631	0.2648212
Total anual depto. tipo	508.67	25,181.10	0.0000631	1.5889272
Total anual edificio 3-C				127.11

* Factor de emisión tomado del "Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero", pág. 20, art. 87, Ley General de Cambio Climático (SEMARNAT, 2015); consultado en <https://www.gob.mx/inecc/documentos/acuerdo-que-establece-las-particularidades-tecnicas-y-las-formulas-para-la-aplicacion-de-metodologias-para-el-calculo-de-emisiones>

Para el Escenario 01, las emisiones totales por consumo de gas LP (ver Tabla 31) y electricidad (ver Tabla 32), después de convertir a las unidades y magnitudes correspondientes, es de 142.53 tCO₂eq anuales por edificio.

Tabla 31

Emisiones por consumo de gas LP para el Escenario 01

Año 2019	Consumo kg	Consumo MJ	$FE_{\text{combustible,g}}$ (tCO ₂ eq/MJ)	Emisiones GEI (tCO ₂ eq)
Bimestral	72.38	3,583.00	0.0000631	0.2260870
Total anual depto. tipo	434.27	21,497.98	0.0000631	1.3565222
Total anual edificio 3-C				108.52

Tabla 32

Emisiones por consumo de electricidad para el Escenario 01

Año 2019	Consumo kWh	Consumo MWh	$FE_{\text{electricidad,g}}$ (tCO ₂ eq/MWh)	Emisiones GEI (tCO ₂ eq)
Bimestral	143.44	0.1434	0.494	0.0708597
Total anual depto. tipo	860.64	0.8606	0.494	0.4251584
Total anual edificio 3-C				34.01

El Escenario 02, según la Tabla 33 y 34, emite en conjunto 86.11 tCO₂eq anuales por edificio.

Tabla 33

Emisiones por consumo de gas LP para el Escenario 02

Año 2019	Consumo kg	Consumo MJ	FE _{combustible,g} (tCO ₂ eq/MJ)	Emisiones GEI (tCO ₂ eq)
Bimestral	38.87	1,825.00	0.0000631	0.1151801
Total anual depto. tipo	221.24	10,952.15	0.0000631	0.6910805
Total anual edificio 3-C				55.29

Tabla 34

Emisiones por consumo de electricidad para el Escenario 02

Año 2019	Consumo kWh	Consumo MWh	FE _{electricidad,g} (tCO ₂ eq/MWh)	Emisiones GEI (tCO ₂ eq)
Bimestral	130.01	0.1300	0.494	0.0642246
Total anual depto. tipo	780.06	0.7801	0.494	0.3853477
Total anual edificio 3-C				30.38

Lo anterior comprende emisiones indirectas por operación del caso base y de ambos escenarios en un periodo anual (2019). Para estimar emisiones evitadas a futuro, se efectuó el cálculo considerando la vida útil del edificio 3-C. En la sección 4.1 del presente capítulo, se describe el criterio para calcular la vida útil de un inmueble habitacional. De acuerdo con el método de factores de ISO 15686, se estima una vida útil para la vivienda multifamiliar designada como caso base de 82 años, de los cuales han transcurrido 62. El desglose de los parámetros que se consideraron para determinar la vida útil se encuentra en la pestaña «Vida útil (edificio)» del archivo nombrado «ACB del “CEV” memoria de cálculo» en la liga de Anexos. Bajo el supuesto de que durante los próximos veinte años que restan de operación al caso base, tanto el consumo energético como los factores de emisión se mantienen constantes, se obtienen las emisiones evitadas por las mejoras en eficiencia de cada escenario (ver Tabla 35).

Tabla 35

Emisiones anuales por consumo energético considerando un periodo de operación de 20 años

Vivienda multifamiliar vertical	Caso base	Escenario 01	Escenario 02
Emisiones anuales gas LP	31.78	27.13	13.82
Emisiones anuales electricidad	15.07	7.71	7.71
Total emisiones anuales	46.85	34.84	21.53
Emisiones anuales evitadas (tCO ₂ eq)		12.01	25.32

4.6 Evaluación económica

Hasta este punto, el análisis ha comprendido las estimaciones del consumo energético base por uso final, ahorros por operación derivados del Escenario 01 y 02, así como el cálculo de emisiones evitadas bajo el alcance correspondiente. Ahora bien, se requiere valorar la prefactibilidad económica de cada escenario, en función del costo adicional que implican los ahorros energéticos. Esto a partir de una propuesta de costos relativos a la operación bajo condiciones típicas de funcionamiento del caso base, y, por otro lado, de costos adicionales que resultan de las medidas de ahorro desarrolladas para cada escenario. Con esto se asigna un valor monetario indicativo para evaluar cuál representa mayores ahorros.

4.6.1 Criterios

En esta etapa se recopila el costo unitario de equipos y electrodomésticos, para lo cual se utilizaron referencias de los buscadores de producto de PROFECO y de Energy Star. También, se considera el costo del servicio por energético reportado por fuentes oficiales, esto para estimar el importe bimestral y anual del caso base y para cada escenario de estudio.

Por otro lado, se asigna un valor paramétrico al costo de la vivienda correspondiente al caso base. Se toman precios de venta de SHF para la tipología analizada, mencionados en la sección 4.1.1 de este capítulo. Los costos se manejaron como precios corrientes al año 2019 sin convertir a constantes, esto por la variación considerable y atípica de los últimos años. Como costo de oportunidad, entendido como el porcentaje de referencia que determina si un proyecto genera o no ganancias, o bien la tasa de rendimiento mínima atractiva (TREMA) (Mendoza, 1998), se considera un 12% mensual. Este valor indica el rendimiento mínimo aceptado según una serie de estudios realizados por el equipo técnico a cargo de las evaluaciones económicas del sistema de evaluación “Sisevive-Ecocasa” (Infante-Barbosa, 2021).

Se utilizan las siguientes herramientas de evaluación económica: valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), costo anual uniforme equivalente (CAUE), relación beneficio costo (B/C) y el periodo de recuperación simple de la Inversión. La perspectiva de evaluación de cada una depende de los datos que se tienen y en qué periodos, lo cual suele representarse mediante un flujo de efectivo. Esto sitúa las variaciones del valor del dinero en el tiempo con relación a la duración de un proyecto. Asimismo, se identifican salidas de dinero, si son salidas incrementales o fijas, o bien, si hay una pauta durante el proyecto entre valores positivos (ingresos) y negativos (egresos, inversiones, mantenimiento, etc.) (Belaïd et al., 2021; Escobedo, 2020; Mendoza, 1998; Zhou et al., 2016). Las ecuaciones para cada herramienta son retomadas de la literatura y se desarrollan con las funciones de Excel. En teoría, si todas son correctamente aplicadas concurren en la misma decisión.

Si bien se hace uso de todos los criterios listados porque se relacionan entre sí directamente (ej., la TIR es la tasa de descuento que convierte el VPN de un proyecto a cero), el que puedan ser interpretados para el mismo fin depende de las condiciones de flujo de efectivo planteadas. Esto es especialmente cierto si se consideran distintos periodos de vida de proyecto, en este caso empezando por la vida útil de cada aparato o sistema sustituido, y la vida útil estimada del inmueble del caso base/escenarios.

De acuerdo con esto último, la herramienta más favorable para evaluar cada escenario en términos monetarios sería el CAUE en conjunto con el VPN. Según el CAUE, la

viabilidad económica refiere a la opción con el valor más bajo porque implica menores costos, y la diferencia entre ahorros y la anualidad equivalente (convertir ingresos y egresos a un valor uniforme durante determinado periodo) debería ser positiva. También aplica cuando solo se están considerando egresos, pues los ingresos no influyen en la decisión final al no ser incrementales. Debido a que se establece como planteamiento principal el mismo horizonte de proyecto a partir del promedio de vida útil de los aparatos considerados para ambos escenarios, estimado en 12.50 años (150 meses), se elige el criterio del VPN más alto y el periodo de recuperación simple de la inversión para respaldar la relación costo beneficio.

Ahora bien, en cuanto a los flujos de efectivo, se considera como flujo negativo a la inversión inicial del caso base por el equipamiento de un departamento tipo con los aparatos descritos en la sección 4.5.1 de este capítulo. Para cada escenario, los flujos negativos son la inversión diferencial con respecto de la inversión original del caso base. Por otro lado, se consideran flujos positivos recurrentes y constantes a los ahorros monetarios derivados del ahorro energético cuando se integran a cada escenario las sustituciones de equipo correspondientes. Los ahorros monetarios se asignan de acuerdo con los costos de energía para el año de análisis, descritos a continuación.

4.6.2 Costos de energía

Para calcular el importe por energía eléctrica del caso base, se consideró el consumo por energético previamente estimado como constante para los periodos bimestrales del año 2019. Se consultó en el historial de tarifas del portal de CFE el costo por kilowatt-hora para el consumo básico aplicable a los primeros 75 kWh, el costo por consumo intermedio aplicable a los siguientes 65 kWh, y por consumo excedente aplicable a los kWh restantes. La suma de los tres se toma como el importe bimestral para el periodo correspondiente. De acuerdo con esto, el promedio bimestral calculado para el caso base es de \$ 451.98 MXN (ver Tabla 36).

Tabla 36

Importe por consumo de energía eléctrica del caso base

Año 2019	Consumo kWh	Importe bimestral*
Enero	254.18	\$443.28
Marzo	254.18	\$446.76
Mayo	254.18	\$450.24
Julio	254.18	\$453.72
Septiembre	254.18	\$457.21
Noviembre	254.18	\$460.69
Total	1,525.06	\$2,711.90
Promedio de importe bimestral por depto.		\$451.98

* Se considera el costo de energía eléctrica (suministro, distribución, transmisión, CENACE, energía, capacidad y costos relacionados a los servicios del Mercado Eléctrico Mayorista) para el año 2019, de acuerdo con el consumo en kilowatts-hora correspondiente según la Tarifa 1 (sin IVA).

Nota. Con datos consultados en <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1.aspx>

En cuanto al costo por consumo de gas LP, se convirtieron los consumos constantes a litros considerando la densidad promedio del combustible nacional (0.540 kg). Se consultó en el portal de la CRE el historial de precios promedio reportado por distribuidores, correspondiente

con el año de estudio. Los costos más significativos se presentaron durante los meses de invierno, y el promedio bimestral para el caso base es de \$ 1,553.21 MXN (ver Tabla 37).

Tabla 37

Importe por consumo de gas LP del caso base

Año 2019	Consumo (kg)	Conversión a litros gas LP ^a	Importe bimestral**
Enero	84.78	157.00	\$1,610.78
Marzo	84.78	157.00	\$1,489.89
Mayo	84.78	157.00	\$1,551.12
Julio	84.78	157.00	\$1,489.89
Septiembre	84.78	157.00	\$1,527.57
Noviembre	84.78	157.00	\$1,650.03
Total	508.67	941.98	\$9,319.27
Promedio de importe bimestral por depto.			\$1,553.21

** Se consideran precios por litro para el año 2019 en Ciudad de México

^a 1 litro de gas LP equivale a 0.540 kg (densidad promedio del gas LP nacional). NOM-003-ENER-2021, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial. Apartado "Símbolos y abreviaturas".

Nota. Con datos de precios por litro tomados del "Historial de precios promedio al público de gas LP reportados por los distribuidores". Disponible en <https://www.gob.mx/cre/documentos/historial-de-precios-promedio-al-publico-de-gas-lp-reportados-por-los-distribuidores>

Con base en lo anterior, el importe por consumo energético total anual de un departamento es de \$ 12, 031.17 MXN. El importe promedio bimestral por ambos energéticos es de \$ 2, 005.20 MXN. Por edificio, donde se considera el consumo de 80 departamentos tipo (sin el consumo que pudiera generarse en áreas comunes, como pasillos), el importe promedio es \$ 160,415.65 MXN, mientras que el costo de energía total anual se calcula en \$ 962,493.91 MXN.

Para el Escenario 01, los costos por el consumo de energía eléctrica y gas LP por departamento equivalen a un ahorro bimestral promedio de \$ 317.60 MXN y \$ 227.20 MXN respectivamente. Los ahorros más altos se tienen durante los meses de invierno, lo cual coincide con los mayores importes por consumo (ver Tabla 38 y 39). Por edificio, anualmente se tendrían ahorros de \$ 109,046.93 MXN por importe de gas LP, y \$ 152,443.36 MXN por importe de electricidad.

Tabla 38

Importe por consumo de energía eléctrica para Escenario 01

Año 2019	Consumo (kWh)	Importe bimestral	Ahorro respecto al caso base
Enero	143.44	\$131.78	\$311.50
Marzo	143.44	\$132.82	\$313.94
Mayo	143.44	\$133.87	\$316.37
Julio	143.44	\$134.92	\$318.81
Septiembre	143.44	\$135.96	\$321.24
Noviembre	143.44	\$137.01	\$323.68
Total	860.64	\$806.36	\$1,905.54
Promedio de importe bimestral por depto.		\$134.39	

Tabla 39

Importe por consumo de gas LP para Escenario 01

Año 2019	Consumo (kg)	Conversión a litros gas LP	Importe bimestral	Ahorro bimestral
Enero	72.38	134.03	\$1,375.18	\$235.60
Marzo	72.38	134.03	\$1,271.97	\$217.92
Mayo	72.38	134.03	\$1,324.24	\$226.87
Julio	72.38	134.03	\$1,271.97	\$217.92
Septiembre	72.38	134.03	\$1,304.14	\$223.43
Noviembre	72.38	134.03	\$1,408.68	\$241.34
Total	434.27	804.20	\$7,956.19	\$1,363.09
Promedio de importe bimestral por depto.			\$1,326.03	

Por otro lado, en cuanto al Escenario 02, una vez calculados los importes bimestrales derivados del consumo de energía eléctrica y gas LP, se estiman los ahorros correspondientes por departamento (ver Tabla 40 y 41). A partir de estos, la mejora en operación por edificio refleja entonces un ahorro de \$ 161,879.66 MXN anual por consumo de electricidad, mientras que por gas LP, se tendrían ahorros anuales de \$ 421, 279.21 MXN.

Tabla 40

Importe por consumo de energía eléctrica para Escenario 02

Año 2019	Consumo (kWh)	Importe bimestral	Ahorro bimestral
Enero	130.01	\$112.51	\$330.77
Marzo	130.01	\$113.40	\$333.36
Mayo	130.01	\$114.29	\$335.95
Julio	130.01	\$115.18	\$338.55
Septiembre	130.01	\$116.07	\$341.14
Noviembre	130.01	\$116.96	\$343.73
Total	780.06	\$688.40	\$2,023.50
Promedio de importe bimestral por depto.		\$114.73	

Tabla 41

Importe por consumo de gas LP para Escenario 02

Año 2019	Consumo (kg)	Conversión a litros gas LP	Importe bimestral	Ahorro
Enero	36.87	68.28	\$700.58	\$910.19
Marzo	36.87	68.28	\$648.01	\$841.88
Mayo	36.87	68.28	\$674.64	\$876.48
Julio	36.87	68.28	\$648.01	\$841.88
Septiembre	36.87	68.28	\$664.39	\$863.18
Noviembre	36.87	68.28	\$717.65	\$932.37
Total	221.24	409.70	\$4,053.28	\$5,265.99
Promedio de importe bimestral por depto.			\$675.55	

4.6.3 Flujos de efectivo para el caso base y escenarios CEV

Una vez establecidos los importes y ahorros, se desarrolla el flujo de efectivo para el caso base, esto para representar la propuesta de inversión inicial y un horizonte de proyecto de 150 meses, mismo que se maneja como fijo para el análisis de los escenarios. Tal horizonte se define por ser el promedio de vidas útiles reportadas para cada aparato que compone el equipamiento de la vivienda multifamiliar vertical planteada como caso base.

En la Figura 18 se muestra el flujo de efectivo para el caso base, donde el egreso inicial en el periodo cero equivale a la suma de los costos individuales de equipos (calentador de almacenamiento, estufa de piso, refrigerador, lavadora, televisor, computadora, plancha y luminarias). Los costos por equipo se desglosan en la Tabla 42, y corresponden a la media del rango de precios corrientes que considera el buscador de productos en la categoría de “Hogar y línea blanca” de PROFECO para la Ciudad de México y el área metropolitana.

Figura 18

Flujo de efectivo del caso base

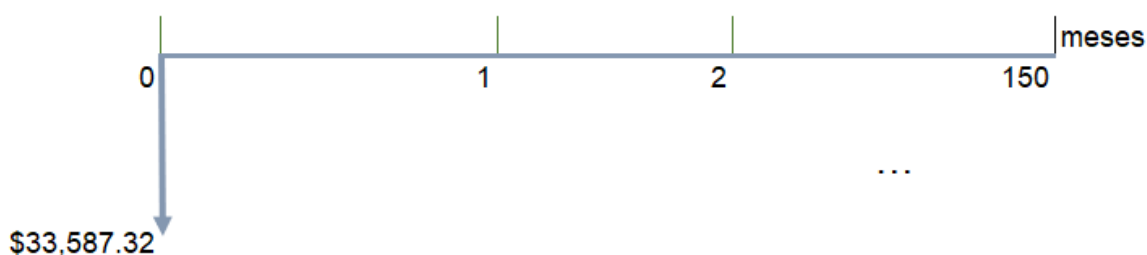


Tabla 42

Inversión original del caso base

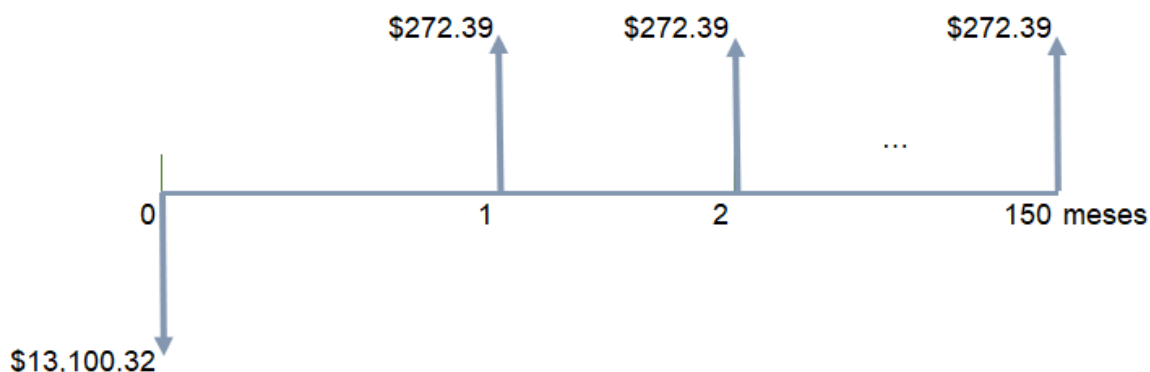
Caso Base	
Costos de equipos:	
Calentador de almacenamiento	- \$2,850.00
Estufa de piso (6 quemadores)	- \$8,999.00
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	- \$9,140.00
Iluminación (5 incandescentes)	- \$65.00
Iluminación (2 LFC)	- \$130.00
Lavadora	- \$8,009.32
Computadora	- \$3,999.00
Plancha	- \$395.00
Valor presente de la inversión	- \$33,587.32

Nota. Costo promedio de equipos para CDMX consultado en <https://www.profeco.gob.mx/precios/canasta/home.aspx?th=1> y en catálogos de producto en el caso de la iluminación. Precios sin IVA.

En cuanto al Escenario 01, la inversión por sustitución de equipos también se ubica en el periodo cero como flujo negativo, y refiere al diferencial con respecto a la inversión original propuesta para el caso base. Los flujos positivos corresponden a la suma de los ahorros mensuales por consumo de electricidad y gas LP (ver Figura 19).

Figura 19

Flujo de efectivo del Escenario 01



El periodo simple de recuperación según la inversión diferencial es de cuatro años, mientras que el valor presente de ahorros supera tal inversión (ver Tabla 43). Esto explica que se obtenga un valor presente neto positivo al considerar los ahorros contra la inversión, una relación costo beneficio superior a 1.0, y que la TIR supere por casi el doble la TREMA propuesta, por lo cual, el Escenario 01 se considera económicamente viable.

Tabla 43

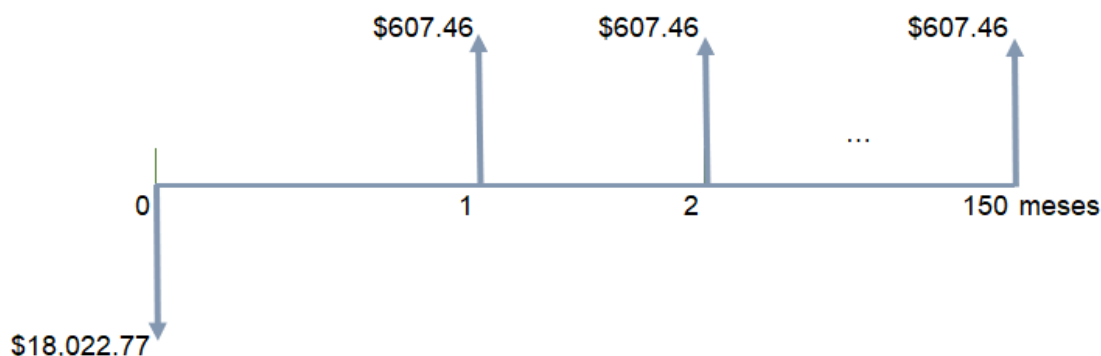
Inversión propuesta para el Escenario 01

Escenario 01	
Ahorros anuales	\$3,268.63
Ahorros mensuales	\$272.39
Inversión por sustitución de equipos	
Calentador	\$5,976.00
Estufa	\$9,370.50
Refrigerador	\$10,325.13
Iluminación (7 LFC)	\$455.00
Lavadora	\$9,183.88
TV	\$4,597.20
Computadora	\$6,384.93
Plancha	\$395.00
Total inversión por sustitución de equipos	\$13,100.32
Tiempo simple de recuperación (meses)	48
Tiempo simple de recuperación (años)	4
Valor presente de ahorros	\$21,115.38
Valor presente neto	\$8,015.06
Anualidad de inversión	\$168.99
Anualidad "neta" de inversión (beneficios)	\$103.39
B/C	1.61
TIR	23.61%

Para el Escenario 02, se modifican los valores de la inversión diferencial por sustitución de equipos y los ahorros mensuales (ver Figura 20).

Figura 20

Flujo de efectivo del Escenario 02



En este caso, el periodo simple de recuperación se reduce a la mitad de tiempo. El valor presente de los ahorros, que duplican los del Escenario 01, supera las inversiones consideradas (ver Tabla 44), mientras que el VPN del proyecto triplica el del Escenario 01. La relación costo beneficio aumenta a 2.61, y la TIR supera la TREMA propuesta.

Tabla 44

Inversión propuesta para el Escenario 02

Escenario 02	
Ahorros anuales	\$7,289.49
Ahorros mensuales	\$607.46
Inversión por sustitución de equipos	
Calentador	\$6,569.65
Estufa	\$11,132.33
Refrigerador	\$11,571.16
Iluminación (7 LED)	\$599.00
Lavadora	\$10,360.82
TV	\$4,597.20
Computadora	\$6,384.93
Plancha	\$395.00
Total inversión por sustitución de equipos	\$18,022.77
Tiempo simple de recuperación (meses)	30
Tiempo simple de recuperación (años)	2
Valor presente de ahorros	\$47,090.17
Valor presente neto	\$29,067.40
Anualidad de inversión	\$232.50
Anualidad "neta" de inversión (beneficios)	\$374.97
B/C	2.61
TIR	40.16%

El VPN de cada escenario se convierte a una serie de “anualidades” netas (en este caso no son periodos anuales, sino mensuales) para obtener los beneficios periódicos. Este valor responde al criterio del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), y coincide con la diferencia entre los ahorros mensuales y la anualidad equivalente que corresponde a inversiones. En ambos escenarios resulta en un valor positivo. Cuando se comparan los costos uniformes del Escenario 01 y 02, se tiene que el Escenario 01 representa la mejor opción por tener un CAUE menor que el del Escenario 02. Sin embargo, la perspectiva del análisis es que se están valorando beneficios, que en este caso representan los ahorros; en realidad lo que se está calculando es el beneficio anual uniforme equivalente (BAUE). El criterio de selección es el inverso; el valor más alto indica la opción más factible.

Por otro lado, si bien el aire acondicionado no se consideró en el análisis por la zona climática, de modo que no habría costos de operación relacionados a la envolvente térmica en ese aspecto, al inicio del capítulo sí se valoró el cumplimiento del estándar NOM-020-ENER como parte de la aplicación del CEV. Se tomó para ambos escenarios un costo paramétrico mínimo de \$389.70 MXN/m² por agregar a las ventanas existentes una película de control solar con un coeficiente de sombreado (CS) de 0.20, y una vida útil de 20 años. El costo se obtuvo al considerar el crecimiento anualizado acumulado³⁴ sobre el valor de \$325.00 MXN/m² reportado por CONUEE (2017b) (ver Tabla 45). Se consideró 14.89 m² como la superficie de ventanas a sustituir en las caras oriente y poniente de un departamento tipo y 336.00 m² como el total de superficie de ventanas a sustituir si se considera la envolvente total del inmueble (revisar datos en el archivo de Excel nombrado «Cálculo térmico» de la liga de Anexos).

Tabla 45

Inversión adicional por sustitución de equipos y sistema para el Escenario 01 y 02

Concepto (por depto.)	Escenario 01		Escenario 02	
	Inversión adicional* por sustituciones			
	(NOM-ENER producto)	(NOM-ENER sistema)	(NOM-ENER producto)	(NOM-ENER sistema)
VP/ diferencial respecto al caso base	\$13,100.32	\$5,802.26	\$18,022.77	\$5,802.26
Importe total	\$18,902.58		\$23,825.03	

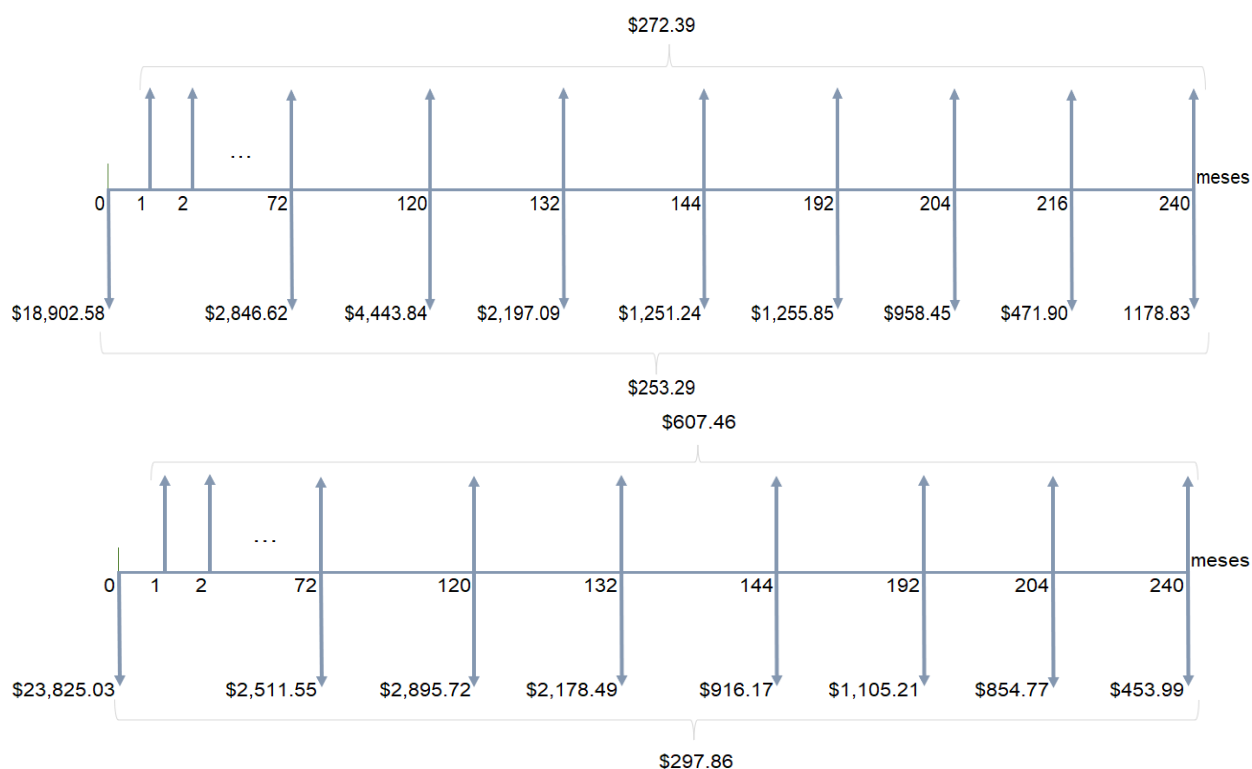
*Adicional al costo promedio de \$ 1,383,000.00 MXN por vivienda para la CDMX (SHF, 2021). Calculado con precios corrientes, sin IVA.

Un horizonte de proyecto alternativo surge de considerar un periodo de 82 años de vida útil de acuerdo con el método establecido por ISO 15686-1:2011 (ver pestaña nombrada “Vida útil (edificio)” del archivo «ACB del “CEV” memoria de cálculo» en la liga de Anexos). Esto ya que el caso base supera el periodo de vida útil que establece el CEV (50 años). Dado el año de construcción del multifamiliar, en teoría restan 20 años (240 meses) de operación. El planteamiento de flujos de efectivo implica al menos una reinversión de todos los equipos a excepción de la iluminación LED en el Escenario 02. Al ser valores futuros en distintos periodos de operación, las reinversiones se convierten a valores actuales y posteriormente a anualidades equivalentes. En la Figura 21 se muestra el flujo de efectivo con reinversiones para el Escenario 01 (arriba) y 02 (abajo).

³⁴ 11.4% de 2017 a 2018 y 8.5% de 2018 a 2019 en la categoría de “otros materiales para la construcción” según datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC).

Figura 21

Flujo de efectivo con reinversiones por sustitución de equipos



En la Tabla 46 se muestra que en ambos escenarios el valor presente de los ahorros mensuales sigue superando el valor presente de las inversiones iniciales, aun cuando se suman las reinversiones a valor presente. Aunque el periodo de recuperación del Escenario 02 es de un año más que en el Escenario 01, el valor presente de los ahorros se duplica.

Tabla 46

Inversiones (equipos y sistema) para el Escenario 01 y 02

Concepto	Escenario 01	Escenario 02
Inversión equipos	\$13,100.32	\$18,022.77
Inversión equipos+sistema	\$18,902.58	\$23,825.03
Reinversión equipos+sistema	\$4,101.39	\$3,226.21
Tiempo simple de recuperación (meses)	84	91
Tiempo simple de recuperación (años)	7	8
Valor presente de ahorros	\$24,737.91	\$55,168.92
Valor presente de inversiones	\$23,003.98	\$27,051.25
Valor presente neto	\$1,733.94	\$28,117.68
Anualidad de inversión	\$253.29	\$297.86
Anualidad "neta" de inversión (beneficios)	\$19.09	\$309.60
Diferencia entre anualidad de inversión y ahorros (valor presente)	\$19.09	\$309.60
B/C	1.08	2.04
TIR	13.17%	29.35%

4.7 Resumen de resultados

En este capítulo se desarrolló la propuesta de prefactibilidad técnica y económica de la aplicación selectiva del CEV. Esto con el fin de estimar el impacto en las emisiones indirectas por usos finales derivadas del consumo energético del caso base planteado en la Ciudad de México, delimitado a un edificio multifamiliar de interés social de cinco niveles con 80 departamentos y una superficie de 62.65 m² cada uno.

A partir de 15 lineamientos oficiales NOM-ENER referidos en el CEV con relación al desempeño energético de la vivienda, se identificaron seis de producto y uno de sistema para integrar una base común de medidas de ahorro en dos niveles de eficiencia, expresados como escenarios de cumplimiento mínimo (01) y de mejora adicional (02). En la Tabla 47 se concentran los resultados más relevantes de cada escenario y en cuanto a los objetivos de esta investigación.

Tabla 47

Resumen de análisis energético, ambiental y económico por depto. tipo

Concepto	Unidad	Caso Base	Escenario 01	Escenario 02
Consumo bimestral (electricidad y gas LP)	MJ	5,111.89	4,099.38	2,293.39
Ahorro bimestral (electricidad y gas LP)	MJ	-	1,012.50	2,818.50
Ahorro bimestral de electricidad	kWh	-	110.74	124.17
Ahorro bimestral de gas LP	kg	-	12.40	47.90
Emisiones anuales evitadas (electricidad y gas LP)	tCO ₂ eq	-	0.56	1.27
Promedio importe bimestral por consumo energético total (electricidad y gas LP)	MXN	2,005.20	1,460.42	790.28
Promedio ahorro bimestral por consumo energético total (electricidad y gas LP)	MXN	-	544.78	1,214.92
Inversión adicional por sustituciones (equipos)	MXN	-	13,100.32	18,022.77
Inversión adicional por sustituciones (sistema)	MXN	-	5,802.26	

A continuación, se presentan los resultados para cada etapa del análisis. La memoria de cálculo a la cual se referirá esta sección de resumen se concentró en un archivo de Excel disponible en la liga de Anexos, asimismo referencias para cálculos específicos.

4.7.1 Análisis bioclimático

De acuerdo con los datos recabados de la estación meteorológica más cercana al caso base y las especificaciones térmicas de los materiales de la envolvente, se estimó un rango de confort de entre 21.18°C y 26.18°C al interior de un departamento tipo. El balance térmico resultó en temperaturas interiores dentro del rango de confort por hasta 16 horas del día más crítico en verano. También se identificaron pérdidas de calor por infiltración durante las primeras horas de la mañana, las cuales se equilibraban por las tardes con ganancias de calor por conductividad térmica. Estas últimas disminuían a partir de las 4 de la tarde por efecto de ventilación natural. Para la época de invierno, las pérdidas de calor por infiltración se mantuvieron y se sumaron pérdidas por conducción durante el día.

Por otro lado, se encontró que la envolvente del edificio no cumple con el criterio del presupuesto energético que establece la NOM-020-ENER-2011. El caso base presentó un déficit de casi 60% con respecto a los valores “ideales” del edificio de referencia, principalmente debido al desempeño de la envolvente en cuanto a las ganancias por radiación. Sin embargo, al estar en una región de clima templado, integrar requerimientos mínimos permite la viabilidad técnica del lineamiento de sistema. Según la revisión en dos herramientas de cálculo existentes, agregar a las ventanas originales una película de control solar redujo las ganancias por radiación a casi una tercera parte del valor estimado para el edificio de referencia. Los resultados de ambas herramientas se desglosaron en los archivos nombrados «NOM020_HerramientaDigital-Tlalpan» de la liga de Anexos.

4.7.2 Análisis del consumo energético para el caso base

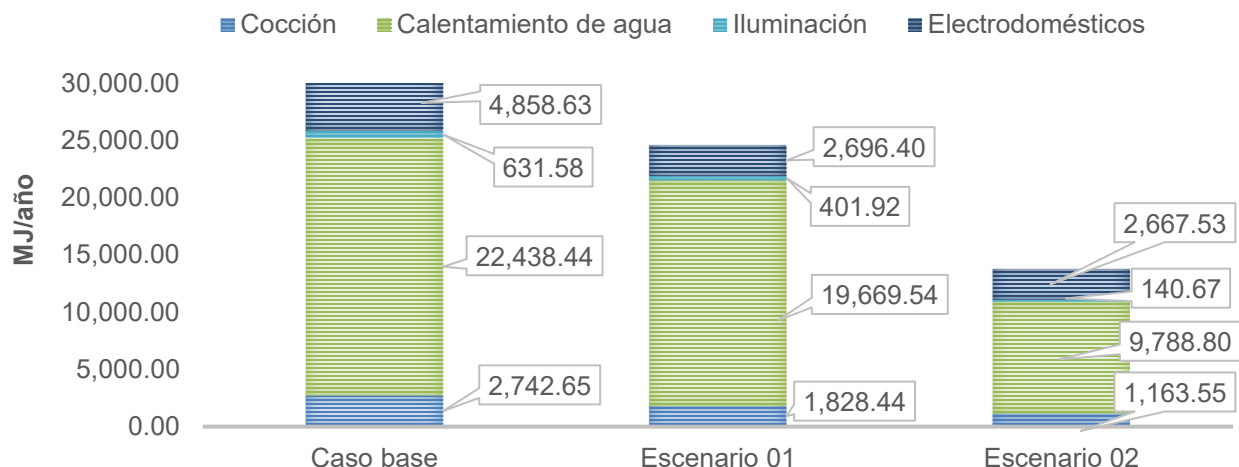
En condiciones de operación habituales, el consumo de energía eléctrica por departamento del caso base se estimó en 254.20 kWh al bimestre y 1,525.06 kWh/año. Tal consumo, como se mencionó en la sección 4.4 del capítulo, incluyó el consumo unitario de los siguientes equipos: refrigerador, lavadora, televisión, computadora y plancha. Por gas LP, se obtuvo un consumo al bimestre de 84.78 kg y 508.67 kg/año por depto., lo cual incluyó el consumo unitario de dos equipos; calentador de almacenamiento y estufa. El consumo energético final total por depto. resultó en 5,111.90 MJ por bimestre y 30,671.31 MJ anuales. Para el cálculo manual completo desagregado por uso final a partir del consumo específico de cada equipo revisar el Anexo 1 (o bien, el archivo nombrado «ACB del “CEV” memoria de cálculo» en la liga de Anexos).

4.7.3 Escenarios CEV para vivienda multifamiliar vertical región templada

Cada escenario se integró con la sustitución parcial de equipamiento y bajo el supuesto de una antigüedad de equipos de diez años. A partir de esto se calculó energía eléctrica y térmica consumida para cada escenario con respecto al caso base. Para el cálculo manual desagregado por uso final, revisar el Anexo 2 y 3 (o bien, el archivo nombrado «ACB del “CEV” memoria de cálculo» en la liga de Anexos). En la Gráfica 10 se observa que aun con las sustituciones para cada escenario, el calentamiento de agua es el uso que predomina con más del 70% del consumo energético final total por departamento.

Gráfica 10

Consumo energético anual por departamento



Para el Escenario 01, se consideró la sustitución de lámparas, calentador de agua, estufa, refrigerador, lavadora, televisor y computadora. En condiciones de operación habituales, el consumo de energía eléctrica por departamento se estimó en 143.44 kWh al bimestre y 860.64 kWh/año. El consumo bimestral de gas LP por departamento fue de 72.38 kg y 434.27 kg/año. El consumo energético final total por departamento resultó en 4,099.40 MJ por bimestre y 24,596.29 MJ anuales.

En el Escenario 02 se sustituyeron lámparas, refrigerador, lavadora, estufa y calentador de agua. El consumo de energía eléctrica por departamento se estimó en 130 kWh al bimestre y 780 kWh/año. En cuanto a gas LP, se obtuvo un consumo bimestral de 36.87 kg y 221.24 kg/año por departamento. El consumo final total por departamento fue de 2,293.39 MJ por bimestre y 13,760.35 MJ anuales.

4.7.4 Ahorro anual por operación

El consumo final de electricidad desagregado para iluminación (de incandescente a LFCA) resultó en 111.64 kWh/año. Para electrodomésticos, se calculó un consumo anual de 749 kWh. La sustitución que más ahorro generó fue el televisor, que pasó de 587.33 kWh/año a 71 kWh/año. En lo concerniente al consumo de gas LP, por cocción se calcularon 36.94 kg/año, mientras que por calentamiento de agua se estimó 397.33 kg/año. En conjunto, el ahorro energético anual por las medidas de sustitución propuestas en el Escenario 01 fue de 6,075.02 MJ. En la Tabla 48 se desglosa el ahorro de energía anual por operación correspondiente al Escenario 01 con respecto al consumo calculado para el caso base.

Tabla 48

Ahorros por energético Escenario 01

Lineamiento*	Equipo/ Uso final	Electricidad	
		Ahorro anual	
		(kWh)	(MJ)
L1	Iluminación	63.80	229.67
L2, L3, L4	Equipos electrodomésticos (refrigerador, lavadora, TV, computadora)	600.62	2,162.23
Ahorro total depto. n		664.42	2,391.91
Lineamiento*	Equipo/ Uso final	Gas LP	
		Ahorro anual	
		(kg)	(MJ)
L5	Cocción	18.47	914.22
L6	Calentamiento de agua	55.93	2,768.90
Ahorro total depto. n		74.40	3,683.10

Nota. Calculado a partir de consumos unitarios por equipo. *Ver Tabla 8 "Criterios de mínimos de eficiencia para escenarios CEV" en la pág. 61 para descripción.

Para el Escenario 02, el consumo por iluminación tras la sustitución (LFCA a LED) fue de 39.08 kWh/año. Referente al consumo final por electrodomésticos, se calculó un consumo anual de 740.98 kWh. En cuanto al consumo de gas LP por cocción, se estimó 23.50 kg/año, mientras que por calentamiento de agua el consumo fue de 197.73 kg/año. En conjunto, el ahorro energético anual por las medidas de sustitución propuestas en el Escenario 02 fue de 16,910.96 MJ. La Tabla 49 muestra el ahorro de energía anual por operación con respecto al caso base.

Tabla 49

Ahorros por energético Escenario 02

Lineamiento*	Electricidad		
	Equipo/ Uso final	Ahorro anual	
		(kWh)	(MJ)
L1	Iluminación	136.36	490.91
L2, L3, L4	Equipos electrodomésticos (refrigerador, lavadora, TV, computadora)	608.64	2,191.10
Ahorro total depto. n		745.00	2,682.00
Lineamiento*	Gas LP		
	Equipo/ Uso final	Ahorro anual	
		(kg)	(MJ)
L5	Cocción	31.90	1,579
L6	Calentamiento de agua	255.53	12,650.00
Ahorro total depto. n		287.43	16,910.96

Nota. Calculado a partir de consumos unitarios por equipo. *Ver Tabla 8 "Criterios de mínimos de eficiencia para escenarios CEV" en la pág. 61 para descripción.

Por edificio, el ahorro energético anual mínimo (Escenario 01) por la aplicación de CEV se calculó en 486,001.60 MJ, mientras que por mejora adicional (Escenario 02) el ahorro anual resultó en 1,352,876.80 MJ. Recordando que dentro de la unidad habitacional planteada tal edificio se replica tres veces (cada uno con 80 departamentos), se calcularon ahorros anuales por operación de 1,458,004.80 MJ y de hasta 4,058,630.40 MJ respectivamente para el Escenario 01 y 02.

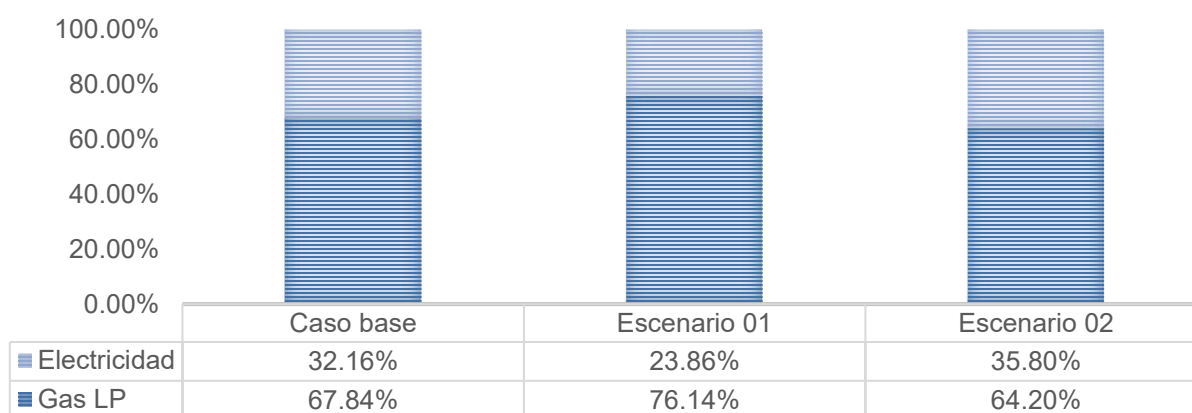
Con lo anterior se estimó la eficiencia operativa para el caso base y ambos escenarios. El Escenario 02 presentó el valor más bajo con un CE de 61.01 kWh/m² año, mientras que para el Escenario 01 fue de 109.06 kWh/m² año. El caso base se calculó en 135.99 kWh/m² año, próximo al límite establecido por el CEV según la tipología de vivienda analizada (137.8 kWh/m² año). Se mencionó que el código recomienda además valores independientes por el consumo de electricidad (102 kWh/m² año) y de gas LP (28.2 kWh/m² año). Para el Escenario 01, tales valores resultaron en 13.74 kWh/m² año por consumo de electricidad y de 93.32 kWh/m² año por consumo de gas LP. Por otra parte, para el Escenario 02 se estimó 12.45 kWh/m² año por consumo de electricidad y de 48.56 kWh/m² año por consumo de gas LP (revisar la pestaña «CE estimado vs CE del "CEV"» del archivo nombrado «ACB del "CEV" memoria de cálculo» en la liga de Anexos).

4.7.5 Emisiones por consumo energético

A partir de la energía total empleada, se cuantificaron las emisiones de CO₂eq según el tipo de energético, así como el potencial de mitigación. El cálculo se desglosa en el archivo nombrado «ACB del “CEV” memoria de cálculo» en la liga de Anexos. En la Gráfica 11 se muestra la proporción de emisiones por energético para el caso base y para cada escenario. Los usos finales por cocción y calentamiento de agua, si bien implican el consumo unitario de solo dos equipos por departamento, generarían más de la mitad del total de emisiones por año.

Gráfica 11

Proporción de emisiones anuales por energético



En cuanto al potencial de mitigación, el ahorro energético total que resultó de la sustitución de equipos para el Escenario 01 evitó 0.56 tCO₂eq al año por depto. En el Escenario 02 en cambio, se evitó 1.27 tCO₂eq al año, esto debido principalmente a la eficiencia en el consumo de gas LP. Por edificio, el impacto mínimo (Escenario 01) estimado por la aplicación de CEV fue de 44.85 tCO₂eq evitadas por año, mientras que por mejoras adicionales a la eficiencia mínima (Escenario 02) resultó en 101.60 tCO₂eq evitadas anualmente. De modo que el potencial mitigable para la unidad habitacional planteada se estimó en 134.55 tCO₂eq/año y hasta 304.80 tCO₂eq/año para el Escenario 01 y 02 respectivamente.

Las emisiones por consumo de electricidad se mantuvieron por debajo de los valores recomendados por el código para el tipo de vivienda analizada, incluso en el caso base (ver Tabla 50). Por otro lado, se encontró que las emisiones por consumo de gas LP tanto en el caso base como en ambos escenarios superaron los valores de emisiones recomendadas. Para mayor desglose, ver la pestaña “Emisiones” del archivo ya mencionado (celda 88).

Tabla 50

Emisiones por consumo energético y límites recomendados por el CEV

Vivienda multifamiliar vertical (clima templado subhúmedo)	CEV	Caso base	Escenario 01	Escenario 02
Emisiones por consumo de gas LP (tCO ₂ eq/año)	0.00641	0.02538	0.02167	0.01104
Emisiones por consumo de electricidad (tCO ₂ eq/año)	0.047	0.011	0.006	0.006

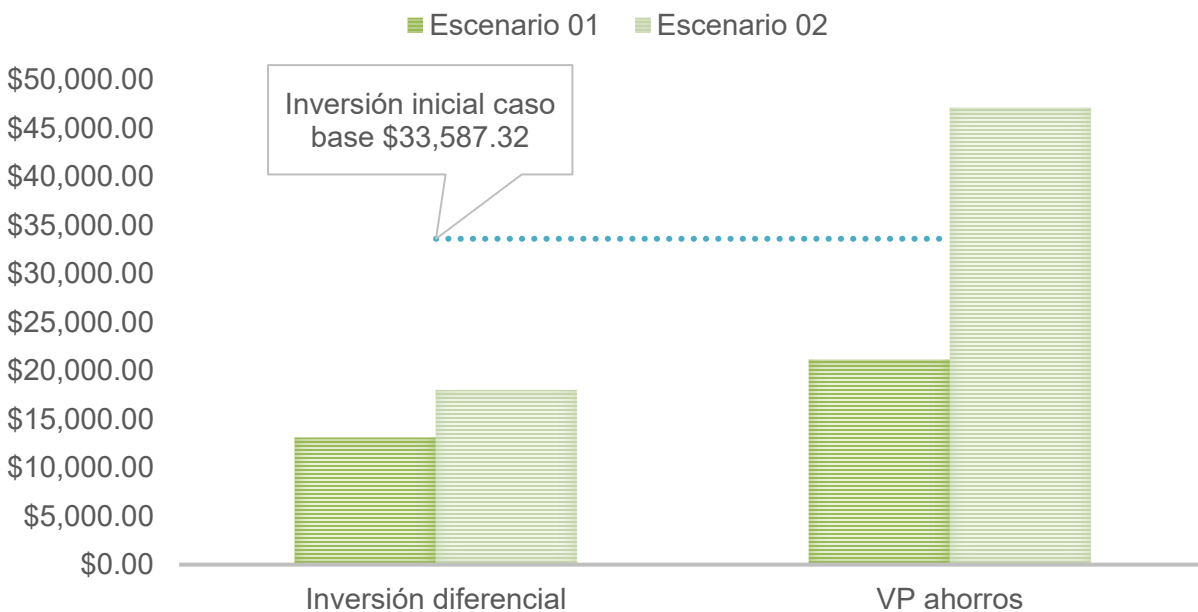
4.7.6 Evaluación económica

Para el Escenario 01, las sustituciones de equipo por departamento resultaron en un ahorro bimestral promedio de \$ 317.60 MXN en el consumo de energía eléctrica y de \$ 227.20 MXN para gas LP en el Escenario 01. En cuanto a las sustituciones del Escenario 02, estas reflejaron un ahorro bimestral promedio de \$ 337.25 MXN en el consumo de energía eléctrica y de \$ 877.67 MXN para gas LP. Anualmente para el Escenario 01 se tuvo una eficiencia en el consumo de energía por ambos energéticos que generó ahorros monetarios de \$ 3,268.80 MXN, mientras que para el Escenario 02 el ahorro anual se calculó en \$ 7,289.52 MXN.

Para un periodo de operación de 150 meses, la relación costo beneficio resultó positiva en ambos escenarios. La TIR superó la TREMA propuesta, y el valor presente de ahorros superó la inversión diferencial por sustitución de equipos. El periodo simple de recuperación fue de cuatro años para el Escenario 01 y de dos años para el Escenario 02. Por tal motivo, este último resultó ser la opción más factible económicamente; si bien la inversión diferencial es 27% mayor, el valor presente de ahorros duplicó los del Escenario 01, y el VPN del proyecto se triplicó. En la Gráfica 12 se indica el valor presente de los ahorros, asimismo la inversión diferencial por las sustituciones sugeridas para cada escenario.

Gráfica 12

Inversión diferencial y valor presente de ahorros por sustitución de equipos



En lo referente a reinversiones por sustitución de equipos en distintas etapas de un horizonte de proyecto propuesto de 20 años, el periodo de recuperación simple aumentó a 7 (Escenario 01) y 8 años (Escenario 02). El Escenario 02 se mantuvo como la mejor opción puesto que también incrementó el valor en el tiempo de los ahorros y el VPN del proyecto, lo cual a su vez mejoró la relación costo beneficio y la tasa interna de retorno. Se incluyó dentro del valor presente de las inversiones de este planteamiento la inversión adicional única por cumplimiento de sistema sumada a las sustituciones de equipos para cada escenario. La vida útil de la medida de ahorro para el cumplimiento del lineamiento de sistema también se reportó en 20 años, de modo que no sería necesario reinvertir. Para el

cálculo manual simplificado de cada planteamiento, revisar los Anexos 5, 6 y 7, o bien, las pestañas nombradas “Ev. Económica” del archivo «ACB del “CEV” memoria de cálculo» en la liga de Anexos.

Aplicar el CEV con relación a los usos finales de cocción, calentamiento de agua, iluminación y electrodomésticos, resultó en costos adicionales para el usuario que van del 1.5 al 3% de la inversión total para una vivienda multifamiliar vertical de interés social en la Ciudad de México. Para el Escenario 01, las sustituciones de equipo correspondientes generaron ahorros en el consumo total anual de energía eléctrica de 43.57%, y de 14.63% en el consumo anual de gas LP, con respecto al consumo total anual del caso base. Para el Escenario 02, el ahorro de energía eléctrica fue de 48.85%, mientras que el consumo anual de gas LP presentó un ahorro de 56.51% con respecto al caso base. Las emisiones indirectas evitadas anualmente por atender los lineamientos pertinentes a los usos finales antes mencionados fueron 23.93% (Escenario 01) y hasta 54.04% (Escenario 02) del total de emisiones indirectas por usos finales generadas en la vivienda promedio tomada como caso base.

Capítulo 5 Tabulador CEV Vivienda Vertical

En este capítulo se comentan los resultados de la propuesta del análisis costo beneficio por la aplicación selectiva del CEV para contextualizar su impacto. Por un lado tal impacto está ligado al grado de eficiencia respaldado por los lineamientos correspondientes referidos en el código, y por otro, al costo de equipamiento en la vivienda considerada como caso base, asimismo el importe por unidad de consumo energético. Por último, se concluye con los principales hallazgos y limitaciones con relación tanto a los objetivos como a la hipótesis planteada, y se sugieren futuras líneas de investigación.

5.1 Discusión de resultados

De inicio, es preciso mencionar que la selección de lineamientos oficiales incluidos en el CEV se hizo en función de los usos finales con mayor incidencia (iluminación, electrodomésticos, cocción y calentamiento de agua) en la región de estudio, así como los parámetros o límites del consumo unitario por equipo.

El CEV, al ser un código modelo voluntario, supone una mayor aceptación (que un código prescriptivo) según sus análogos internacionales ya que en teoría estos permiten flexibilidad en la adopción y adaptación a las condiciones locales (Allard et al., 2021; Schwarz et al., 2020; McFarlane et al., 2021). Si bien no se obtuvieron registros oficiales acerca de la regulación bajo tal esquema en el país, esto mismo indica similitud con respecto a la situación de rezago en la implementación y seguimiento que caracteriza a casi 40 países con códigos de construcción que atienden aspectos de eficiencia energética, según los registros de la Agencia Internacional de Energía. Tal situación explica la sobreestimación de ahorros esperados, así como la prevalencia de soluciones prescriptivas, lo cual en muchos casos obstaculiza cuantificar y medir el desempeño energético (Armstrong et al., 2017; Belaïd et al., 2021; Enker y Morrison, 2017; Evans et al., 2017; Singhal et al., 2022).

Aunque gran parte del contenido refiere a normas oficiales que sí implican un enfoque prescriptivo, en lo pertinente a la eficiencia energética de viviendas el CEV dista de ser una serie de pasos inamovibles, pues se compone de una combinación de parámetros relativos y absolutos, o bien, recomendaciones operativas y prescriptivas (Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, 2015). Por un lado, el cumplimiento se basa en el desempeño térmico de determinada tipología de vivienda con relación al clima (parámetro relativo), en este caso la vivienda multifamiliar vertical de máximo cinco niveles ubicada en un clima templado subhúmedo. Por otro lado, refiere a límites de consumo por tipo de energético, e indica porcentajes de eficiencia mínimos para un equipo o sistema (parámetro absoluto).

Los resultados del análisis bioclimático, así como del cálculo de emisiones por energético, responden a parámetros relativos. Los resultados del cálculo del consumo energético unitario con relación a cada lineamiento seleccionado responden a parámetros absolutos.

5.1.1 Análisis bioclimático

Con base en la metodología simplificada para el cálculo manual extraído del programa TRNSYS de modelado energético (Ramírez-Morales, 2019), se obtuvo el balance térmico de la envolvente por departamento. Los resultados de esta primera etapa indican que durante más de la mitad del día más crítico en verano se tienen temperaturas dentro de un rango de confort

específico para la zona de estudio. Esto reafirma las ventajas, que en realidad podrían interpretarse como potencial desaprovechado, del clima templado para lograr un nivel de eficiencia que incluso equipare los requerimientos de una vivienda con demanda cero de energía a partir de enfoques pasivos, por ejemplo, con el manejo correcto de flujos de ventilación natural (Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, 2015; Morales-Martínez y de Buen-Rodríguez, 2020). Por lo mismo, la incidencia del consumo energético derivado del aire acondicionado no interviene en este análisis, sumado a que para viviendas promedio no es un uso típico reportado por las estadísticas nacionales más recientes.

Se mencionó que el confort térmico del caso base se logra, aún cuando el desempeño de la envolvente con relación a las ganancias térmicas por radiación superó el criterio del presupuesto energético establecido por la NOM-020-ENER-2011. Nuevamente, por ubicarse en una región templada, bastó con integrar una película de control solar a las ventanas del caso base para justificar la viabilidad técnica del lineamiento (ver pág. 71).

Según sus especificaciones, el estándar debiera de ser constatado con una etiqueta, como ocurre con los lineamientos de producto. En la práctica no sucede esto, de modo que no se obtuvieron registros empíricos (además del estimado nacional de CONUEE, mencionado en el capítulo dos, Tabla 1) de inmuebles en particular que la acaten o monitoreen su cumplimiento año con año, caso contrario a lo que sucede con el esquema de certificaciones internacionales en nuestro país, por ejemplo. Cabe mencionar que todos los referentes en la literatura nacional que abordan esta norma (Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, 2015; Infante-Barbosa, 2021, Morales-Martínez y de Buen-Rodríguez, 2020; Martín-Domínguez et al., 2017; Vargas, 2022), al menos hasta la fecha de revisión del presente trabajo, se enfocan a viviendas unifamiliares para resaltar las ventajas de ahorro en climas extremosos.

Con lo anterior, se infiere que el caso base es parte del 95% de edificios que, según Rosas-Flores y Rosas-Flores (2020) en su estudio nacional sobre envolventes y su potencial de reducción de emisiones, no tienen sistemas para regular flujos de calor al interior. Aunado a esto, se encontró similitud con lo mencionado por Morales-Martínez y de Buen-Rodríguez (2020) al indicar que la norma no cumple con sus objetivos en zonas de clima templado, frío o sus combinaciones. Su cálculo va en función de reducir ganancias de calor y cantidad de energía para refrigeración, no así para calefacción. Los autores indicaron además que el coeficiente de transferencia de calor sugerido por norma en clima templado es mayor que en climas cálidos. Esto explica que viviendas en clima templado puedan tener mayores ganancias por envolvente que en climas extremosos, lo cual coincide con lo obtenido en esta sección del presente análisis. Se afirma entonces la postura de Martín-Domínguez y otros (2017) en torno a la revisión a detalle de la metodología del presupuesto energético para zonas climáticas templadas.

A propósito de la zona climática, se mencionó en el capítulo dos que la clasificación más común en códigos de construcción en el mundo se basa en el concepto de los grados día. Tal clasificación conviniere de ser integrada al CEV con el fin de esclarecer los climas a los que refiere, e incluso ser de utilidad para esclarecer en qué zonas se deja de seguir la tendencia nacional hacia necesidades de refrigeración indicada por Morales-Martínez y de Buen-Rodríguez (2020). Esto favorecería en el cálculo por ganancias térmicas al que refiere el único lineamiento de sistema que aplica para el sector residencial mexicano. Además de que tal concepto esclarecería sustancialmente el Anexo 8 del código, de donde se obtuvieron los indicadores del CE (agrupados por clima) y las emisiones máximas por energético para este estudio.

5.1.2 Análisis del consumo energético para el caso base

De acuerdo con los principios metodológicos para el cálculo del consumo energético desagregado por usos finales de estudios similares (Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, 2015; Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo, 2016; Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez, 2018; Rosas-Flores et al., 2011; Velazco, 2013), se construyó el comportamiento energético del caso base bajo condiciones de operación típicas, esto según bases de datos y estadísticas nacionales. La distribución porcentual del consumo energético por usos finales del caso base reflejó que el calentamiento de agua y los electrodomésticos componen más de la mitad del consumo de energía térmica y eléctrica respectivamente, lo cual coincide con la literatura nacional sobre la saturación de equipos y los usos representativos para la vivienda promedio sin aire acondicionado.

El consumo promedio de energía eléctrica referente a los usos de iluminación y electrodomésticos para el caso base se estimó en 1,525.06 kWh/año por depto. Si se compara esta cifra con aquellas reportadas en trabajos previos para viviendas en clima templado, el consumo eléctrico anual del caso base es entre 21 a 30% más alto. El consumo promedio de energía eléctrica anual del caso base resultó 470.16 kWh más que los resultados de Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez (2018), lo cuales a su vez se basaron en cifras de Rosas-Flores (2011). Similarmente, el consumo eléctrico anual calculado para el caso base superó con 459.48 kWh lo reportado por Velazco (2013) específicamente para la vivienda multifamiliar vertical de interés social en la Ciudad de México. La diferencia mínima se encontró con respecto a los resultados de Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez (2015), donde se consideró 1,200 kWh/año como línea base de consumo eléctrico por vivienda, también ubicada en la capital del país.

Los contrastes en potencias de trabajo reportadas para cada aparato o equipo, los patrones de uso diario y la antigüedad de tales datos explican en parte la significativa variación porcentual del consumo de energía eléctrica calculado para el caso base con respecto a lo reportado en otros trabajos.

Por otro lado, en cuanto al consumo de gas LP referente a los usos de cocción y calentamiento de agua, se obtuvo un consumo de 508.67 kg/año por depto. A diferencia del consumo de energía eléctrica, se encontraron contadas referencias nacionales sobre el consumo de energía térmica residencial en clima templado. Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez, (2015) consideraron un consumo de gas LP de 388.88 kg/año, cifra basada en estadísticas nacionales de 2008. Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez (2018), por otro lado, estimaron un consumo por vivienda de 462.40 kg/año, aunque no especifican horas de operación. Tales variaciones, de 24 y 9% respectivamente entre lo reportado en la literatura y el consumo unitario estimado en el presente trabajo, se explica en parte con la cantidad de horas de uso consideradas para el cálculo (tomadas de estadísticas nacionales de 2018 [ENCEVI]) y el gasto por hora/equipo, cotejado en estudios de calidad, fichas técnicas, asimismo cifras de Rodríguez y otros (2015) en su estudio sobre el potencial de ahorro de sustitución de calentadores.

El porcentaje del consumo energético anual total (electricidad y gas LP) por usos finales del caso base, calculado en 30,617.31 MJ, se concentró básicamente en dos usos; 79% correspondió al calentamiento de agua y 11% a electrodomésticos (lavadora, plancha, refrigerador, televisión, computadora). Por tipo de energético, el 89.11% del consumo de gas LP se destinó al calentamiento de agua, y para electricidad, el 89.31% se concentró en el consumo de electrodomésticos por departamento.

Tal proporción coincide con lo señalado en la mayoría de los estudios revisados, a excepción de Velazco (2013). Esto porque, en primer lugar, el autor no tenía como objetivo analizar el consumo de energía térmica (gas LP o cualquier otro combustible) al tiempo que se consideraba el consumo de energía eléctrica. Por lo tanto, no es posible comparar entre un energético y otro la eficiencia del consumo final total. Segundo, el estudio se realizó hace poco más de diez años (con datos recabados de encuestas a usuarios), señalando que tan solo entre el refrigerador y la iluminación se concentró el 85.16% del consumo eléctrico por vivienda. Lo anterior contrasta con los hallazgos de la encuesta nacional ENCEVI publicados en 2018, donde fue evidente el avance en el consumo eficiente gracias a los lineamientos oficiales de producto, en específico para refrigeradores y lámparas con tecnología eficiente.

5.1.3 Escenarios CEV para vivienda multifamiliar vertical región templada

Mediante la técnica de escenarios, con base en las normas oficiales seleccionadas y los parámetros del consumo unitario de equipos para el caso base, se propusieron medidas de ahorro para el cumplimiento mínimo (Escenario 01) y para mejora adicional (Escenario 02).

Los equipos sustituidos en el Escenario 01 fueron lámparas incandescentes a LFCA, calentador de agua, estufa, refrigerador, lavadora, televisor y computadora. Debido a que no se realizó un diagnóstico físico del equipamiento del caso base, se tomaron patrones de uso reportados por la encuesta ENCEVI, así como especificaciones de fichas técnicas que se cotejaron con el parámetro correspondiente por norma, ya sea de consumo unitario máximo (en kWh/año o consumo en espera) o bien, el porcentaje de eficiencia mínima. Con las sustituciones correspondientes, el consumo de energía eléctrica por depto. fue de 860.64 kWh/año, mientras que el consumo de gas LP fue de 434.27 kg/año. El consumo energético final total por departamento resultó en 24,596.29 MJ anuales, lo cual indica una reducción de 19.81% al respecto del consumo final total calculado para el caso base.

Por otro lado, para el Escenario 02 se sustituyeron lámparas LFCA a LED, refrigerador, lavadora, estufa y calentador de agua. Esto por ser los que mayor consumo representaron; el resto se conservaron con el nivel de eficiencia propuesto para el cumplimiento del Escenario 01. El consumo de energía eléctrica por departamento se estimó en 780 kWh/año. Para el gas LP se obtuvo un consumo de 221.24 kg/año por departamento. El consumo final total por departamento fue de 13,760.35 MJ anuales. Esto equivale a una reducción de 55% del consumo final total calculado para el caso base, y es 44% más eficiente que el consumo del Escenario 01.

El consumo anual eléctrico del Escenario 01 resultó ser similar al calculado por Velazco (2013) para la vivienda multifamiliar vertical en la Ciudad de México tras optimizar el consumo eléctrico (866.34 kWh/año), mientras que el Escenario 02 fue 10% menor a tal valor. En lo referente al consumo de gas LP obtenido en ambos escenarios, al compararlos con lo mencionado por Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez (2015) sobre el consumo promedio de gas LP en viviendas de interés social (388.88 kg/año), sólo el Escenario 02 presentaría una reducción del 43.11%; el Escenario 01 tendría que aumentar su eficiencia mínimo 11.67% para al menos equilibrar con el consumo base referenciado por los autores. Si se compara en cambio con lo reportados por Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez (2018), ambos escenarios presentan consumos de gas LP eficientes; entre 6 y 52% menores con relación al consumo por vivienda reportado por los autores (462.40 kg/año).

5.1.4 Ahorro anual por operación

Los ahorros operativos por adoptar el CEV bajo los alcances antes descritos con respecto al consumo original resultaron de 19.81% derivado del cumplimiento mínimo (Escenario 01), y de 44% adicional al cumplimiento (Escenario 02). Tales valores, aunque relativos a un clima que permite omitir la climatización como uso final predominante, destacan si se comparan con el margen del 5 al 28% de ahorros en la operación de edificios luego de implementar lineamientos oficiales (particularmente códigos de energía) según diversos estudios que atienden la optimización del consumo final de energía residencial (California Energy Commission, 2021; Evans et al., 2017; Kotchen, 2017; O'Brien et al., 2020).

El ahorro anual por departamento considerando ambos energéticos resultó ser de 6,075.02 MJ para el Escenario 01, lo que equivale a una quinta parte del consumo por ambos energéticos del caso base. Esto permitiría cubrir en un 96% el consumo anual de energía eléctrica y térmica de una vivienda de interés social eficiente, según lo propuesto por Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez (2015). El ahorro anual por cada departamento que opere al nivel de eficiencia del Escenario 02 sería de 16,910.96 MJ, lo cual supliría poco más de la mitad del consumo original del caso base.

Referente al consumo final de energía eléctrica, para el Escenario 01 el ahorro anual por electrodomésticos fue de 44.50% con relación al consumo del caso base (1,349.62 kWh/año) al sustituir equipos de acuerdo con el nivel de eficiencia mínimo por norma. Por sustituir luminarias, el ahorro anual fue menor; 36.36 % con relación al consumo original (175.44 kWh/año). Lo inverso ocurrió para el Escenario 02; el ahorro por iluminación fue de 78% con relación al consumo anual original, mientras que por sustituir electrodomésticos fue de 45.10%.

Si bien la eficiencia y cantidad de electrodomésticos certificados en viviendas aumentó en los últimos años, también aumentó la proporción en el consumo de energía eléctrica que les corresponde. Para el presente estudio tal proporción resultó entre 85 y 95% del consumo total eléctrico por depto. para ambos escenarios. La proporción restante, correspondiente a iluminación, se reduce al sustituir por tecnología más eficiente, lo cual como se mencionó en la encuesta ENCEVI, sucede más por necesidad que por generar ahorros. Resulta improbable que para generar mayores ahorros en el consumo por electrodomésticos, estos se sustituyan a un ritmo más alto que luminarias LED, por ejemplo. Estas, aunque tienen una vida útil mayor en comparación con cualquier electrodoméstico, son más comunes de sustituir por falla. Caso contrario a un refrigerador o lavadora, pues serán reparados al menos una vez antes de ser sustituidos, idealmente por equipos certificados con mayor eficiencia, lo cual implica también un costo de adquisición más alto.

En lo que atañe al consumo final de gas LP, el ahorro por cocción para el Escenario 01 fue de 33.33% con relación al consumo anual original, mientras que el ahorro por calentamiento de agua fue de 14.62%. Para el Escenario 02, los ahorros reflejaron un equilibrio; 57.60% por cocción y 56.37% por calentamiento de agua. Se tiene entonces que, los ahorros anuales por consumo de gas LP equivalen a entre dos (Escenario 01) y nueve veces (Escenario 02) el consumo anual por cocción y calentamiento de agua reportado por Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez (2018). Al comparar con cifras de Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez (2015) para una vivienda de alta eficiencia, encontramos que ambos escenarios superaron en hasta un 85% el consumo óptimo estimado por los autores (66.72 kg/año). Sin embargo, la comparación es parcial, pues tal optimización en el

derivó de sustituir no solo equipo, sino también el tipo de energético al emplear un calentador solar que supliera parte de la demanda de energía térmica de una vivienda en clima templado.

Los escenarios CEV propuestos consideraron seis lineamientos oficiales de los 19 que regulan el consumo residencial de energía eléctrica y térmica, mencionados en el capítulo dos de este trabajo. Supongamos factible la implementación de ambos escenarios en 1.5 millones de viviendas clasificadas como plurifamiliares, multifamiliares o unidades habitacionales en el país. En la Tabla 51 se muestra el ahorro anual por lineamiento según el escenario CEV y su relación con el ahorro anual nacional para cada lineamiento considerado. Se aprecia que en ambos escenarios los ahorros procedentes de las normas para energía térmica (L5 y L6) superan el ahorro nacional reportado por CONUEE correspondiente a cada lineamiento. Asimismo, se observa que el ahorro anual total por los seis lineamientos del Escenario 01 representa el 57.68% del ahorro oficial correspondiente al 2021, mientras que el Escenario 02 supera tal ahorro en un 62.27%.

Tabla 51

Ahorro anual de energía eléctrica y térmica para la vivienda multifamiliar vertical

NOM-ENER (eléctricas y térmicas) *						
Ahorro anual (GWh)	Luminarias	Refrigerador	Lavadora	TV	Estufa	Calentador
	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Balance nacional NOM-ENER 2021 = 4,388 GWh	1,110.00	854.00	169.00	802.00	343.00	1,110.00
CEV Escenario 01 en 2019 ^a = 2,531.20 GWh	95.70	108	3.1	789.83	380.92	1,153.71
% con respecto al Balance NOM-ENER	8.62%	12.65%	1.83%	98.48%	111.06%	103.94%
CEV Escenario 02 en 2019 ^a = 7,046.24 GWh	204.55	111	12.13	789.83	657.95	5,270.77
% con respecto al Balance NOM-ENER	18.43%	13%	7.18%	98.48%	191.82%	474.84%

Nota. ^aAhorro estimado por lineamiento correspondiente a escenarios CEV. L4 considera los mismos ahorros (televisión y laptop) para ambos escenarios. * Ver Tabla 8 "Criterios de mínimos de eficiencia para escenarios CEV" en la pág. 61 para descripción de cada lineamiento.

Por otro lado, al extrapolar los ahorros estimados a la cantidad de usuarios que CFE reporta en la tarifa doméstica 1 (19,633,299 usuarios hasta 2017 según el SIE) a la cual pertenece el caso base, el ahorro energético anual mínimo (Escenario 01) por la aplicación de CEV, en unidades de energía equivalente sería de 119 PJ. Por mejora adicional (Escenario 02), el ahorro anual resultaría en 332 PJ. Esto equivale al 15 y 43% respectivamente del consumo final de energía del sector residencial a nivel nacional reportado en 2021. Si se compara en cambio con los ahorros nacionales totales reportados para el mismo año procedentes de las NOM aplicables a equipos y sistemas relacionados con la vivienda (9,259.4 GWh), la equivalencia correspondiente de los ahorros totales del Escenario 01 (33,130.50 GWh) triplicaría tal cifra, mientras que los ahorros del Escenario 02 (92,227.25 GWh) sería casi diez veces el ahorro nacional.

Con relación al parámetro de eficiencia operativa que el CEV recomienda para la tipología de vivienda analizada y el clima correspondiente (137.8 kWh/m² año), el Escenario 02 de mayor eficiencia resultó en un CE de 61.01 kWh/m² año. Esto significó una reducción de 55% del consumo de energía eléctrica y térmica con relación al CE del caso base (135.99 kWh/m² año), mientras que en el Escenario 01, la reducción fue de 20% (109.06 kWh/m² año). Cabe mencionar que, si bien tal parámetro incluye ambos energéticos y cumple con lo recomendado, cuando se consideran los valores independientes por tipo de energético (102 kWh/m² año para electricidad y 28.2 kWh/m² año para gas LP) indicados por el código, solo el consumo por electricidad de ambos escenarios, incluso del caso base, satisface tal límite. Para que el consumo de gas LP se mantenga dentro de lo permitido, este tendría que ser del orden de 126 kg/año, es decir, entre 43 y 71% más eficiente que el Escenario 01 y 02 respectivamente.

Por el tamaño de vivienda analizada (62.65 m²), y dado que no consideró otro clima, tal parámetro fluctúa igual en ambos escenarios. En ninguno de los casos el CE calculado se aproximó a los resultados de Ceballos-Ochoa y Morillón-Gálvez (2015). Como parte de su análisis, se enfocaron en el consumo de energía eléctrica y térmica de viviendas de 69.00 m² en la Ciudad de México, aunque en una configuración adosada unifamiliar. Tras mejorar la eficiencia con diversas medidas de ahorro para una aproximación al nivel de energía cero, el índice de consumo de energía (ICE) que estimaron se redujo un 72.33% (de 82.26 kWh/m²año a 23.87 kWh/m²año). La diferencia con los parámetros estimados para este trabajo, aunque para el mismo clima y superficie útil similar, se debe a que los autores incluyeron como medida de ahorro la sustitución de energético (de gas LP a solar). Esto además de la variación entre los consumos originales que cada estudio planteó según la tipología de vivienda y las fuentes consultadas.

A propósito de la "energía cero", el CE para ambos escenarios CEV propuestos tendría que optimizarse de 75 a 86% para tener relevancia contra los 15 kWh/m²año que algunos autores señalan como indicador ideal (Foroushani et al., 2022; O'Brien et al., 2020). Indudablemente, tal nivel de eficiencia operativa en edificios requerirá de sustituir no solo equipos sino también energéticos para figurar entre las soluciones globales relacionadas con la mitigación ambiental, al menos en lo referente a la industria de la construcción.

5.1.5 Emisiones por consumo energético

El cálculo manual para esta sección se simplificó de acuerdo con las adecuaciones retomadas de trabajos previos y directrices nacionales (Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo, 2016; Rosas-Flores et al., 2011; SEMARNAT, 2015; WRI, 2014) referentes a la metodología del IPCC. Los resultados expresan las emisiones del consumo final de energía por contenido de carbono equivalente.

Bajo los alcances establecidos, el caso base emitió 2.34 tCO₂eq/año por departamento dentro de la unidad habitacional analizada. Recordemos el estudio desarrollado hace poco más de una década por el Centro Mario Molina, y utilizado por el INFONAVIT para evaluar el desempeño energético de viviendas de interés social. Indicó 156 tCO₂eq como huella de carbono para viviendas en un conjunto habitacional de interés social del Valle de México con un periodo de vida útil estimado en 50 años. El presente trabajo se delimitó a emisiones indirectas por el uso final de energía en la vivienda multifamiliar vertical de interés social. Si se toman dichas emisiones como constantes durante el mismo periodo, resultando en 117 tCO₂eq, representarían el 75% de tal huella de carbono. Las emisiones por depto. al implementar los escenarios CEV fueron de 1.78 tCO₂eq/año para el Escenario 01 y

1.08 tCO₂eq/año para el Escenario 02. Las emisiones acumuladas equivaldrían entonces a 57% (Escenario 01) y 34.62% (Escenario 02) de la huella de carbono mencionada.

Lo anterior reafirma el consenso internacional sobre la proporción de emisiones por energía operativa, que corresponde en promedio al 50 y hasta 74% de las emisiones totales durante el ciclo de vida de viviendas. El resto atañe a emisiones provenientes de energía incorporada a la envolvente, que en su mayoría fueron liberadas durante el proceso constructivo del inmueble, así como de fabricación y transportación de materiales (IEA, 2021; Stephan y Crawford, 2016). De ahí la importancia de la eficiencia energética como principio constante, por más repetitivo que se juzgue para el sector residencial. Si una vivienda persiste por un periodo de vida útil de 50, 60, o incluso cien años según el método de ISO 15686-1:2011, la eficiencia energética continua implica un impacto exponencial con cada año de vida útil transcurrido.

El potencial de mitigación por departamento fue de 0.56 tCO₂eq/año para el Escenario 01 y de 1.27 tCO₂eq/año para el Escenario 02. Esto equivale a evitar entre el 24 y el 54% de las emisiones anuales calculadas para el caso base. Según lo descrito en el capítulo tres sobre la NAMA para Vivienda Existente (NAMA VE), solo el Escenario 02 es comparable con el potencial de mitigación ambiental calculado de 1.2 a 4.2 tCO₂eq/año para la vivienda multifamiliar “eficiente” de la CDMX. Aun así, en el panorama nacional, ambos escenarios superaron el requisito mínimo de 20% de reducciones de GEI por operación de la vivienda de interés social según la certificación del programa de SHF “Ecocasa”. En el contexto internacional en cambio, ambos escenarios se encuentran por debajo del 82% de emisiones mitigadas que certifica la adopción técnica del código español al optimizar el consumo anual de energía en edificios multifamiliares existentes (Fernández-Membrive et al., 2015).

Ambos escenarios se suponen factibles en al menos la mitad de las viviendas clasificadas bajo la configuración del caso base en la ciudad de México. Esto debido a su periodo de construcción y ocupación (según lo descrito en la sección 4.1 del presente capítulo). Para 231,000 viviendas en multifamiliares (cifra que por cierto, cubre la proyección al 2030 de vivienda nueva a nivel delegación), las emisiones anuales que se evitarían por aplicar lineamientos del CEV equivaldrían a un 4.03% (Escenario 01) y 8.5% (Escenario 02) del total de emisiones anuales reportadas en 2018 por fuentes de área, donde se incluyó la combustión habitacional (SEDEMA, 2021) (ver Tabla 52).

Tabla 52

Emisiones evitadas anualmente para la CDMX

Vivienda multifamiliar vertical	Caso base	Escenario 01	Escenario 02
Emisiones anuales gas LP (tCO ₂ eq)	367,042.19	313,356.64	159,639.59
Emisiones anuales electricidad (tCO ₂ eq)	174,030.64	89,015.32	89,015.32
Total emisiones anuales (tCO ₂ eq)	541,072.84	402,371.96	248,654.92
Emisiones anuales evitadas (tCO ₂ eq)	-	138,700.87	292,417.92
% de emisiones anuales evitadas respecto a las registradas para la ZMVM**	-	4.03%	8.50%

** Emisiones anuales de CO₂eq por fuentes de área (combustión habitacional) al 2018: 3,439,049.09 tCO₂eq (SEDEMA, 2021)

Nota. Calculado para el parque habitacional de vivienda multifamiliar vertical de interés social para la Ciudad de México. Con datos de SEDEMA (2021).

Con relación a las viviendas requeridas para aliviar el rezago habitacional reportado al 2021 en la Ciudad de México (estimado en 722,500 viviendas, equivalente a 8.5% del total nacional), construir viviendas que consideren los escenarios CEV evitaría entre 404,600 tCO₂eq/año y hasta 917,575 tCO₂eq/año. Esto se traduce al 11 y hasta 26% de emisiones evitadas con respecto a las reportadas como fuentes de área por combustión habitacional. Si la muestra fuera en cambio el aproximado al total nacional existente antes mencionado de 1.5 millones viviendas bajo la configuración del caso base, la proporción de emisiones mitigadas sería entonces del orden de 24.45 al 55.21%.

Las emisiones del sector residencial y comercial a nivel nacional se estiman en 28 millones de tCO₂eq (28 Tg) para 2030. Esto según la versión actual de la NDC de México, mencionada en el capítulo tres de este trabajo. Al considerar los usuarios de la tarifa doméstica 1, el potencial mínimo (Escenario 01) de emisiones evitadas anualmente por la aplicación del CEV sería de 10,994,647 tCO₂eq (11 Tg). Por mejora adicional (Escenario 02), resultarían en 24,934,289 tCO₂eq (24 Tg) por año. En un año de operación eficiente a tal escala, se estaría evitando entre el 39 y 85% de las emisiones del sector residencial y comercial proyectadas por la NDC para 2030. Asimismo, equivaldrían a entre el 36 y 77% de las emisiones evitadas para el mismo año por aplicar NOM relacionadas al consumo de energía eléctrica y térmica del sector residencial, esto acuerdo con Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo (2016).

Por otro lado, de acuerdo con variaciones porcentuales reportadas en el historial del Sistema de Información Energética (SIE), una extrapolación simple hacia 2050 a partir de los valores calculados para el caso base y ambos escenarios refleja que las emisiones indirectas totales por consumo energético residencial tenderán a disminuir un 27%. El caso base pasaría de emitir 2.34 tCO₂eq a 1.70 tCO₂eq por año al final del periodo (ver Tabla 53). Dichas emisiones disminuyen un 24% adicional de aplicarse el Escenario 01, y 32% si se considera el Escenario 02 (ver Tabla 53). Lo anterior ocurre a pesar de que el consumo de electricidad por electrodomésticos se prevé aumente entre 29 y 54% durante el mismo periodo. El consumo por iluminación incrementaría de 5 a 10%. En el caso del consumo de gas LP para cocción, tal incremento sería de hasta 8%, mientras que para calentamiento de agua se reduciría 13% (por la incursión de calentadores solares). Bajo tal supuesto, las emisiones evitadas a una escala local desde el año base hasta el año 2050 serían más significativas si se considera el nivel de eficiencia del Escenario 01 (ver Tabla 54).

Tabla 53

Consumos y emisiones del caso base hacia 2050

Por depto.	Unidad	2019	2030	2040	2050
Consumo de gas LP (cocción)	MJ	2,742.65	2,959.63	3,087.14	3,123.66
Consumo de gas LP (calentamiento de agua)	tep	0.54	0.53	0.51	0.45
Consumo de electricidad (iluminación)	kWh	175.44	166.73	153.84	138.27
Consumo de electricidad (electrodomésticos)	kWh	1,349.62	2,086.21	2,725.21	3,523.01
Emisiones por consumo térmico	tCO ₂ eq	1.59	1.44	1.30	1.15
Emisiones por consumo eléctrico	tCO ₂ eq	0.75	0.68	0.62	0.55
Emisiones totales	tCO ₂ eq	2.34	2.12	1.92	1.70
Emisiones totales*	tCO ₂ eq/ vivienda	541,072.84	529,013.08	501,764.66	453,877.89

Nota. Contiene errores de redondeo. * Considera el parque habitacional existente de vivienda multifamiliar vertical de interés social para la Ciudad de México (231,000 viviendas).

Tabla 54

Consumos y emisiones de Escenarios 01 y 02 hacia 2050

Por depto.	Unidad	Escenario	2019	2030	2040	2050
Consumo de gas LP (cocción)	MJ	01	1,828.44	1,973.09	2,058.09	2,082.44
		02	1,163.55	1,255.60	1,309.69	1,325.19
Consumo de gas LP (calentamiento de agua)	tep	01	0.47	0.47	0.45	0.39
		02	0.23	0.23	0.22	0.19
Consumo de electricidad (iluminación)	kWh	01	111.64	106.10	97.90	87.99
		02	39.08	37.14	34.27	30.80
Consumo de electricidad (electrodomésticos)	kWh	01	749.00	1,157.79	1,512.41	1,955.17
		02	740.98	1,145.39	1,496.22	1,934.24
Emisiones por consumo de energía térmica	tCO ₂ eq	01	1.36	1.23	1.11	0.98
		02	0.69	0.63	0.57	0.50
Emisiones por consumo de energía eléctrica	tCO ₂ eq	01	0.43	0.39	0.35	0.31
		02	0.39	0.35	0.32	0.28
Emisiones totales por consumo de energía	tCO ₂ eq	01	1.78	1.62	1.46	1.29
		02	1.10	1.00	0.90	0.78
Emisiones totales*	tCO ₂ eq/vivienda	01	411,568.24	402,394.96	381,668.38	345,243.21
		02	248,654.92	243,112.75	230,590.49	208,583.69
Emisiones totales evitadas*	tCO ₂ eq/vivienda	01	-	9,173.28	29,899.85	66,325.03
		02	-	5,542.17	18,064.43	40,071.23

Nota. Contiene errores de redondeo. * Considera el parque habitacional existente de vivienda multifamiliar vertical de interés social para la Ciudad de México (231,000 viviendas).

Ahora bien, con relación a las emisiones por consumo energético según lo recomendado por el código para el tipo de vivienda analizada y su contexto climático, las emisiones por consumo de gas LP, incluso del Escenario 02, superaron tal recomendación en hasta un 72%. Contrario a las emisiones por consumo de electricidad, pues incluso para el caso base fueron entre 75 y 86% menores al valor recomendado. Tal resultado refleja la incidencia de las NOM de producto en el consumo final de electricidad. La eficiencia en el consumo de cinco electrodomésticos de una vivienda multifamiliar de interés social generó menor impacto en emisiones indirectas que la eficiencia de dos equipos que consumen gas LP. Esto podría adjudicarse a una sobreestimación, ya sea en la cantidad horas consideradas para el cálculo del consumo desagregado por cocción y calentamiento de agua, o bien, en las cifras del consumo unitario por equipo según sus especificaciones técnicas.

Se encontró semejanza con lo mencionado por algunos autores sobre el consumo final de energía térmica o combustible (Oropeza-Pérez y Petzold-Rodríguez, 2018; Rodríguez et al., 2015; Rosas Flores et al., 2011), en este caso el gas LP. El consenso general es que los niveles de eficiencia térmica para los equipos de la vivienda promedio son aún potenciales por revisar para su sustitución, principalmente por la naturaleza misma del energético, interpretaciones mixtas en cuanto a los factores de emisión utilizados, la capacidad, tipo de equipo (de almacenamiento, de paso) y el costo que se maneja en el mercado.

5.1.6 Evaluación económica

El cálculo manual para estimar los ahorros monetarios de usuarios se basó en el sustento teórico de las herramientas económicas convencionales en la literatura relacionada con la cuantificación de los costos y beneficios producto de estrategias y lineamientos oficiales para el ahorro energético (Belaïd et al., 2021; Escobedo, 2020; Mendoza, 1998; O'Mahony, 2021; PNNL, 2021; Zhou et al., 2016). La propuesta de evaluación económica consideró la inversión correspondiente a las medidas de ahorro desarrolladas en el capítulo previo, las cuales son apenas una combinación de diversas que pueden adoptarse como parte de un esquema de consumo eficiente al mínimo costo posible. Como elementos principales se observó el costo de energía, la inversión diferencial por sustituciones de equipo entre un escenario y otro, así como el rendimiento mínimo, y la vida útil u horizonte de operación asignado.

Se estimó el costo promedio de energía para el caso base según las tarifas correspondientes; \$ 1,553.21 MXN al bimestre por consumo de gas LP, y \$ 451.98 MXN por energía eléctrica. Esto resultó en un gasto total por departamento de \$2,005.20 MXN al bimestre, lo que equivale a 6.35% del gasto corriente bimestral reportado por ENIGH en 2020 para el sector socioeconómico del caso base.

Para el Escenario 01, los importes por consumo de energía por departamento reflejaron un ahorro bimestral promedio de \$ 317.60 MXN por eléctrica y de \$ 227.20 MXN y gas LP. Para el Escenario 02, el consumo de energía eléctrica y gas LP resultó en un ahorro bimestral promedio de \$ 337.25 MXN y \$ 877.67 MXN respectivamente. Destaca que el ahorro monetario por energía eléctrica equivale al 70 y 75% del importe bimestral original. En comparación, el ahorro generado por consumo de gas LP fue de 15 y hasta 56% del importe bimestral del caso base.

El importe total anual por ambos energéticos para el caso base resultó de \$ 12,031.17 MXN. Para el Escenario 01 el ahorro monetario estimado por consumo eficiente de ambos energéticos fue de \$ 3,268.63 MXN anual, es decir, 27% del gasto anual destinado al consumo total del caso base. Para el Escenario 02 el ahorro anual se calculó en \$ 7, 289.50 MXN, lo que equivale a ahorrar el 61% del importe original por consumo de ambos energéticos. Si se extrapolan los ahorros monetarios obtenidos a las viviendas bajo la configuración del caso base a nivel nacional (suponiendo consumos constantes y excluyendo la inflación), durante un año de operación eficiente por alguno de los escenarios CEV se generaría un ahorro de entre 4.5 mil y 10.2 mil millones de pesos. Esto equivale a entre el 4 y 8% del ahorro a la economía nacional comentado en el capítulo uno, correspondiente al consumo final de usuarios durante el periodo de 1982 a 2018 por la implementación de NOM-ENER en el sector residencial.

La inversión diferencial que implicó el Escenario 01 por departamento se estimó en \$13,100.32, mientras que para el Escenario 02 fue de \$18,022.77. Tales inversiones incrementarían \$5,802.26 MXN por considerar el cumplimiento de la NOM-020-ENER-2011. Dicha cantidad es entre 21 y 45% menor a lo reportado por CONUEE en 2017 (entre 13 mil a 27 mil pesos por vivienda) por el cumplimiento del estándar para climas extremosos.

Referente a las inversiones mencionadas y su relación con el costo paramétrico (según el índice de SHF) para la tipología de vivienda propuesta como caso base, tal costo se elevaría máximo 3% al considerar el cumplimiento de alguno de los escenarios CEV. Dicho porcentaje resulta mínimo en comparación con el 30% que se referenció como costo adicional según

estudios nacionales pertinentes al desempeño energético de viviendas que cumplen con niveles de eficiencia del esquema Ecocasa para 2017.

Cabe mencionar que tal variación se explica en primer lugar, con el índice de costos por vivienda y en general de mercado según la ubicación en el país (la mayor parte de viviendas analizadas en tal esquema se sitúan en el norte de México). Segundo, con las sustituciones adoptadas, que en lo que se basaron las mejoras en eficiencia operativa en este trabajo, no así en los materiales de la envolvente, como fue el caso de las viviendas analizadas para la certificación bajo el esquema de "Ecocasa". De hecho, todos los estudios nacionales revisados en el capítulo uno que abordan el desempeño térmico de la vivienda de interés social mencionan medidas de aislamiento térmico enfocadas en sustituciones parciales de la envolvente. Tale medidas no resultan realistas si no es desde el enfoque de nuevas construcciones, o bien, como reportaron Rosas-Flores y Rosas-Flores en 2020, si se proponen aditamentos específicos a los muros y techos de envolventes que, si bien resultan efectivos, requieren mano de obra especializada.

Ahora bien, para un periodo de operación de 150 meses, la relación costo beneficio resultó positiva en ambos escenarios. La TIR, estimada en 26 y hasta 44% superó la TREMA propuesta, y los ahorros a valor presente superaron la inversión diferencial por sustitución de equipos. El periodo simple de recuperación fue de cuatro años para el Escenario 01 y de dos años para el Escenario 02. Por tal motivo, este último resultó ser la opción más factible económicamente; si bien la inversión diferencial es 27% mayor, el valor presente de ahorros duplica los del Escenario 01, y el VPN del proyecto se triplica. A propósito del periodo de operación propuesto, este resultó menor al que utilizaron Martínez-Montejo y Sheinbaum-Pardo (2016), quienes estimaron un promedio de 16 años para todos los equipos que analizaron en su estudio. Sin embargo, tal cifra contrasta con los promedios de vida útil reportados por ENCEVI (2018), mismos que fueron utilizados en este trabajo para tal determinación.

Se consideró un planteamiento alternativo, donde además de la inversión inicial se sumó el valor presente de las reinversiones por sustitución de equipos en distintas etapas a lo largo de un horizonte de proyecto de 20 años. El periodo de recuperación simple aumentó a 7 (Escenario 01) y 8 años (Escenario 02). El Escenario 02 se mantuvo como la mejor opción puesto que de igual modo aumentó el valor presente de los ahorros y el VPN del proyecto, lo cual a su vez mejoró la relación costo beneficio y la tasa interna de retorno.

En el contexto local, el consumo eficiente de cada escenario representa entre el 2.5 y el 5% del gasto corriente bimestral reportado para el sector socioeconómico del caso base. Tal rango se asemeja (si bien la proporción por el tipo de moneda resulta mayor) a lo reportado en el panorama internacional por Holian (2020), pues estimó reducciones de 2.5% en los gastos del hogar por el consumo de energía eléctrica derivadas del impacto del código de energía de California.

En cuanto al periodo simple de recuperación estimado para ambos escenarios (sin considerar reinversiones), estos resultaron menor e igual a los 4 años en promedio reportados para el IECC en un estudio de 2021 elaborado por el PNNL donde se analizó la adaptación del código a distintas zonas climáticas en EUA. De igual modo, resultaron ser menores a los 12 años estimados a nivel estatal en Minnesota para un proyecto de departamentos en edificios multifamiliares que respondieran al estándar voluntario de eficiencia "B3 Sustainable Building 2030" (SB 2030). Tales comparaciones no son imparciales, pues cada análisis implica una serie de medidas de ahorro pertinentes a diversos

factores como son los patrones de consumo locales por su relación con el clima, las condiciones generales de mercado, el subsidio local que cada país asigna a la energía consumida en el sector residencial, entre otros.

Dicho esto, para esta etapa del análisis se identificó un consenso mixto en cuanto a la perspectiva de evaluación económica de actividades de mitigación o acciones correctivas específicas al consumo de energía en el sector residencial. Al igual que hicieron Zhou y otros (2016), se utilizó el periodo de recuperación simple, al tiempo que otros referentes (Aldy et. al, 2021; Energy-Efficient Codes Coalition, 2022; PNNL, 2021) indicaron que este no debe manejarse como indicador único. Considerar el valor del dinero en el tiempo, lo cual implica establecer un parámetro relativo al costo de oportunidad para representar el rendimiento mínimo aceptado, es un enfoque más concreto para evaluar beneficios y costos monetarios asociados a inversiones en este caso de eficiencia energética en la vivienda.

5.2 Conclusiones

Se mencionó al inicio de este trabajo la problemática global que atañe a la adopción y adaptación de herramientas normativas existentes bajo el esquema de códigos modelo y su relevancia como estándares de desempeño energético en el sector residencial. Esto se atribuye, de acuerdo con la postura internacional, a una combinación de factores a nivel público y privado que dispersan los resultados de la política de eficiencia energética enfocada al consumo final del sector, aunado a la tendencia de sobreestimar tanto los costos adicionales como los ahorros o beneficios posibles que resulten de su implementación.

El objetivo general planteado fue el desarrollo del análisis costo beneficio de la aplicación selectiva del CEV con relación a emisiones indirectas por usos finales. En específico, para la vivienda multifamiliar vertical de interés social planteada como caso base en la Ciudad de México. El resultado fue la reducción de hasta 54% de las emisiones anuales calculadas por consumo final de energía térmica y eléctrica cuando se adopta un nivel de eficiencia adicional al cumplimiento mínimo del código. Esto se traduce en un consumo final de electricidad y gas LP 55% más eficiente al promedio calculado para un clima templado subhúmedo. Tal eficiencia en el consumo implicaría una inversión adicional de 18 a 23 mil pesos, equivalente a un rango de 1.5 al 3% del costo paramétrico para la tipología de vivienda en cuestión, y recuperable en un plazo máximo de cuatro años.

La propuesta del análisis resultó de una simplificación metodológica basada en la revisión del estado del arte, visto desde la pertinencia de esquemas normativos como son los códigos de construcción en la operación eficiente de edificios, los ahorros que tal operación supone para usuarios, y, por consiguiente, su papel en la mitigación de emisiones derivadas del consumo final de energía residencial.

En cuanto a los indicadores de consumo de energía total, se encontró que la última edición del código no tiene un carácter restrictivo con relación al parámetro que presenta como umbral máximo de consumo energético para la vivienda vertical en el clima templado subhúmedo. Esto, aun cuando el indicador estimado del consumo final térmico (gas LP), al igual que las emisiones derivadas de tal consumo, superaron el límite sugerido. Tal efecto se compensó con el nivel de eficiencia reflejado en el indicador de consumo final de energía eléctrica. Tal eficiencia permitió además un nivel emisiones por consumo de energía eléctrica hasta 86% menor al valor recomendado.

De lo anterior se obtuvo la aportación principal de esta investigación; una aproximación sobre lo que implica en términos de emisiones por consumo final de energía residencial, que nuestro país cuente con un código de edificación. Esto a su vez contribuye a los antecedentes nacionales que sustentan la interpretación de lineamientos regulatorios oficiales en cuanto a recomendaciones sobre parámetros de consumos y emisiones, clasificación climática, tipo de vivienda, entre otros aspectos.

Con base en la estimación inicial del comportamiento energético del caso base se determinó que en la distribución porcentual del consumo final de energía eléctrica y gas LP predominan los electrodomésticos y el calentamiento de agua. Estos representaron más de la mitad del consumo de energía eléctrica y térmica respectivamente, lo cual coincide con la literatura revisada sobre los usos representativos para la vivienda promedio.

Los lineamientos analizados parten de lo referido por el código según el tipo de energético (electricidad y gas LP) y los usos finales predominantes (iluminación, electrodomésticos, cocción, calentamiento de agua) para clima templado. Ligado a esto, se consideraron especificaciones de equipos y sistemas para interpretar los parámetros de cada lineamiento y así proponer sustituciones de los principales equipos consumidores de energía eléctrica y térmica. Con seis NOM-ENER indicadas en el CEV se desarrollaron dos niveles de eficiencia representados como escenarios; el de cumplimiento mínimo por norma, y 44% eficiencia adicional al cumplimiento.

En cuanto al lineamiento de sistema, el balance térmico por departamento reflejó un desempeño favorable de la envolvente del caso base debido al manejo de flujos de ventilación. Esto contrastó con los resultados de presupuesto energético de la NOM-020-ENER, donde las ganancias térmicas por radiación superaron en un 61% los valores de referencia permitidos. Esto puede ser consecuencia de que el estándar omita el efecto de otros flujos por ventilación e infiltración en torno a las ganancias térmicas por envolvente. En todo caso, lo anterior coincide con las consideraciones de otros trabajos sobre la implementación en climas templados por cuestiones del cálculo del presupuesto energético, y cómo se enfoca en reducir las necesidades de refrigeración. Podría inferirse además que el resultado del balance térmico manual permite una estimación más acertada sobre el desempeño térmico de la envolvente con relación a la zona climática donde se ubica.

Por lineamiento de producto, se observó que los ahorros más significativos ocurren por el consumo eficiente de equipos que emplean gas LP. Extrapolando los ahorros por departamento de ambos escenarios CEV al estimado nacional de vivienda multifamiliar vertical en el país, estos superaron el ahorro nacional específico de tales lineamientos reportado por CONUEE para el año 2021.

Lo anterior guarda relación con la saturación de equipos certificados de acuerdo con las normas de producto vigentes, ya que la estufa y el calentador son los dos equipos con el menor porcentaje registrado (53 y 43% respectivamente). Destaca entonces la importancia de focalizar estudios específicos al consumo eficiente de gas LP en la región templada del país. Además de la concentración de tipología de vivienda analizada, la influencia del clima acentúa que el potencial de ahorro sea más significativo que en el norte, por ejemplo, donde se tienen los menores consumos a nivel nacional. Esto coincide con la postura de Rodríguez y otros (2015) en su estudio nacional sobre potenciales de ahorro por sustitución de calentadores, donde mencionan también la necesidad de datos confiables respecto al consumo unitario por equipo.

Aplicar el CEV a la vivienda multifamiliar vertical de acuerdo con el alcance propuesto generó ahorros en el consumo energético total de 19.81% hasta 55% con relación al consumo original. Para el Escenario 01, el ahorro anual por depto. fue de 664.42 kWh por consumo de energía eléctrica y de 74.40 kg/año por consumo de gas LP. Para el Escenario 02, el ahorro anual por depto. fue de 745 kWh por consumo de energía eléctrica y de 287.43 kg/año por consumo de gas LP. El nivel de eficiencia operativa mínima del Escenario 01 considerando ambos energéticos equivale a una quinta parte del consumo calculado para el caso base. En el caso del Escenario 02, tal eficiencia en operación supliría poco más de la mitad del consumo de un departamento tipo sin sustituciones.

De modo que la reducción de consumos energéticos, tanto de electricidad como gas LP, fue siempre más significativa en el Escenario 02. Tan solo por iluminación, se registró una reducción de 78% con relación al consumo inicial del caso base. Para el resto de los consumos finales tal reducción fue de 44 a 57% con respecto al consumo estimado para el caso base. Por equipo, el que menor ahorro implicó por sustitución fue el refrigerador, con 19% de reducción en el consumo de energía eléctrica, esto debido a que desde el caso base el nivel de eficiencia ya era superior al cumplimiento mínimo según la norma oficial correspondiente. El que mayor ahorro implicó fue la televisión, con un consumo unitario 88% menor al del caso base, lo cual se explica con el avance en eficiencia que mantienen dentro del equipamiento promedio para la vivienda a nivel nacional.

Referente a las emisiones indirectas evitadas por el consumo eficiente de electricidad y gas LP, el Escenario 02 superó con más del doble lo calculado para el Escenario 02. Esto equivale a mitigar hasta 54% de las emisiones anuales procedentes del consumo final total por departamento, según lo estimado para el caso base. Particular a las emisiones procedentes del consumo final térmico, estas se redujeron 56.51%, mientras que las emisiones por consumo final eléctrico se redujeron 48.85%.

El ahorro económico anual por las sustituciones del Escenario 01 fue de \$3,268.63 pesos, mientras que para el Escenario 02 fue de \$7,289.50 pesos. La relación costo beneficio resultó positiva para ambos escenarios. Así pues, los beneficios económicos durante un lapso de doce años y medio duplicaron las inversiones estimadas para cada escenario, las cuales a su vez se recuperarían en cuatro años máximo. Con lo anterior, resulta evidente que la inversión para satisfacer los lineamientos seleccionados de acuerdo con las sustituciones correspondientes es viable. Sin embargo, esto es apenas un fragmento de lo que implica el contenido del capítulo 31 "Eficiencia Energética" del CEV, donde 4 de cada 5 lineamientos competen a la eficiencia energética de equipamiento promedio en la vivienda.

Algunas consideraciones con relación al umbral de consumo energético máximo (CE) que, conforme con lo interpretado a partir del código, refleja el desempeño de los dos energéticos analizados según el tipo de vivienda y zona climática correspondiente. El CE obtenido para ambos escenarios, e incluso para el caso base, se ubicó dentro del límite permisible indicado por el CEV. Esto aun cuando el consumo final de energía eléctrica y gas LP calculado para el caso base resultó hasta 30% más alto que cifras reportadas en trabajos previos para viviendas en clima templado. Individualmente, solo el consumo eléctrico, con relación a la superficie habitable del caso base (62.65 m²), se mantuvo dentro de lo recomendado. Lo anterior acentúa el nivel de eficiencia particularmente en el consumo final de electricidad, pues tal eficiencia permitió que el CE fuera aceptable a pesar de que el consumo de gas LP resultó mayor a lo ideal según el código.

Para que el consumo de gas LP no supere lo recomendado según la tipología analizada, se tendría que lograr un consumo anual 43% menor a lo calculado para el Escenario 02, o 71% menor a lo calculado para el Escenario 01. De los trabajos revisados en la literatura que consideran cifras promedio tomadas de datos nacionales (aunque no recientes), solo uno que aborda consumos energéticos de una vivienda “energía cero” reflejaría un consumo de energía térmica por debajo de lo establecido por el código.

Por otro lado, en cuanto a las emisiones por consumo energético según el código, estas solo se mantuvieron dentro del rango permitido en el caso de las emisiones por consumo de electricidad, nuevamente reflejando la eficiencia operativa de electrodomésticos e iluminación. En el caso de las emisiones por consumo de gas LP, no fue suficiente el significativo ahorro energético obtenido en ninguno de los escenarios para el calentamiento de agua y cocción. Resulta necesario resaltar que las recomendaciones del CEV sobre emisiones por consumo energético no son un referente que se haya encontrado en otros trabajos, pues como se mencionó, no se obtuvieron registros de la implementación del código, y mucho menos de su relevancia en cuanto a las emisiones por energético que propone.

Aun así, lo anterior no descarta el impacto estimado por la aplicación del código y sus repercusiones en el ámbito local y nacional. Ambos escenarios superaron el requisito mínimo de 20% de reducciones de GEI por operación de la vivienda de interés social según lo señalado por uno de los programas de vivienda sustentable más prolíferos en el país. También se encontró que al trasladar el potencial de mitigación por departamento eficiente al estimado nacional de viviendas pertenecientes a la tipología del caso base, así como a los usuarios de la tarifa 1, tanto los ahorros energéticos como la reducción de emisiones indirectas, particularmente del Escenario 02, serían relevantes para las metas establecidas por la NDC pendientes a cumplirse en menos de una década.

Sería de interés reconsiderar el alcance del CEV para incluir además de remodelaciones y vivienda nueva, la eficiencia en viviendas existentes, como sucede en otros países. Se mencionó al inicio de este trabajo que la intervención de 70% de la vivienda en calidad de rezago en el país puede atenderse sin involucrar remodelaciones o reconstrucción. Si bien la tendencia es que los edificios nuevos (en teoría, al menos) buscarán adherirse a lineamientos oficiales que fomenten la conservación de energía, queda excluido de las regulaciones el parque habitacional que ya ha generado una carga ambiental y energética acumulada. Para esto, sería útil atender la brecha que existe particular al desconocimiento general del CEV. Sea este en un futuro un proceso de adopción o adaptación, la revisión constante es clave mediante estudios de evaluación del cumplimiento, análisis económicos y ambientales, para así evitar sobrestimaciones o suposiciones precipitadas, e identificar áreas de oportunidad respecto a ediciones previas.

Se comentó en el capítulo uno acerca de los retos para la implementación de códigos, sea un enfoque prescriptivo, modelo o adaptativo. Dejando de lado la complejidad de cuestiones gubernamentales e institucionales que competen, destaca la capacidad técnica de revisión y actualización constante. Dado que en nuestro país el esquema es voluntario (y aunque fuera obligatorio, la ley no es retroactiva), el que se aplique o no el CEV no significa un impedimento para la industria de la construcción residencial. Los beneficios que se cuantificaron, si bien relevantes, ocurren de manera independiente e incluso paralela a la adopción del código, pues las NOM-ENER que lo componen sí llevan un recorrido respaldado por la revisión constante, que de hecho ha tenido como consecuencia indirecta el que exista un código de edificación y otro de conservación de energía en México.

La distinción recae entonces en los parámetros específicos al desempeño de edificaciones (en este caso habitacionales) como el CE, donde se refleja la necesidad de revisión y homologación pendiente que podría desde un enfoque técnico esclarecer parte de este esquema normativo en nuestro país. Y es que justo desde la perspectiva normativa, los códigos de edificación son una herramienta que facilita la referencia de beneficios medibles en la vivienda para entender su utilidad e impacto enfocado a la eficiencia operativa, y, por consiguiente, su efecto en las emisiones correspondientes. Esto sin dejar de lado que tal efecto sobre las externalidades negativas que invariablemente ocurren por la operación residencial es una cuestión relativa a qué es lo que se determina medir como beneficio y costo.

A propósito de los beneficios y costos, el beneficio que representan las emisiones indirectas evitadas en principio responde a externalidades ambientales y sociales (como generar información en torno al desarrollo y actualización de programas de vivienda sustentable) positivas derivadas de la aplicación del CEV, mas no se perciben con la misma importancia que un incentivo económico para el colectivo general (incremento en el valor de las propiedades, ahorros que superen los costos por operación eficiente). Destaca entonces que en un análisis económico de políticas específicas como lo es un código para el sector residencial, es fundamental ofrecer aproximaciones que sean de utilidad para el usuario, porque al final es quien tendrá la disposición de pagar por un servicio, una medida de sustitución de equipos o de envolvente a cambio de un beneficio perceptible.

Si bien el tema de vivienda y la operación eficiente se ha convertido en una constante en el contexto mundial, es importante recordar que poco de lo que funciona para un país es imperante para otro; para prueba el concepto medular de este trabajo. En México se ha buscado replicar el esquema de códigos modelo tomando nota de los vecinos del norte. La situación actual sugiere que en el mejor de los casos esto podría llevar a éxitos aislados que con el paso del tiempo se conviertan en un indicio de la falta de directrices para la implementación y seguimiento. Mayor énfasis en las experiencias del interior del país como es el avance sistémico de normas de eficiencia energética y la inclusión de la envolvente residencial, por mencionar algunas comentadas en el capítulo dos de este trabajo, obligará a que las problemáticas locales sean las que rijan la gestión y dirección de herramientas normativas específicas como el CEV en atención al propósito para el cual fue creado.

El potencial mitigable de un sector como el residencial, e invertir en mecanismos para fortalecer y revisar esquemas normativos pertinentes, trasciende cuando se atienden problemáticas desde la mayor cantidad de enfoques posibles. Esto implica gobiernos e instituciones, empresas constructoras, y no menos importante, usuarios. Se comentaba en el capítulo tres la evidencia sobre el potencial mitigable de emisiones operativas sobre las incorporadas. Mayor eficiencia durante la vida útil de una vivienda, o bien, durante el periodo en el cual se observa el efecto de usuarios en cuanto al consumo energético, significa una mayor proporción de emisiones operativas evitadas. Sin embargo, habría que analizar a fondo, en el contexto de la huella de carbono de la vivienda, sea esta eficiente o no, si en la práctica tal proporción permite subsanar aquellas emisiones “con candado”; incorporadas a la envolvente y sus procesos constructivos.

Tras conocer el estado actual de los códigos de edificación en el mundo, es relevante el hecho de que las medidas de ahorro basadas en la eficiencia energética se mantienen vigentes al ser un recurso que lleva años de maduración, y por lo mismo se considera indispensable para cualquier esquema de ahorro actual. Si bien el enfoque hacia energías

limpias se prevé ocurra en un futuro, las opiniones expertas no vislumbran que este sea cercano o factible para el usuario promedio en países como el nuestro. Incluso en el contexto internacional se ha señalado que medidas ambiciosas como descarbonizar la red o sustituir de manera focalizada el parque habitacional con viviendas eficientes, resultarían insuficientes para la mayoría de los compromisos contra el cambio climático actualizados durante los últimos años.

El presente trabajo cubrió tan solo una propuesta del alcance del CEV, particular a un clima y una tipología de vivienda. Dentro de tal alcance, fue posible dimensionar a un nivel de prefactibilidad, su viabilidad técnica y económica, y principalmente ofrecer una perspectiva sobre su papel en cuanto a su potencial de mitigación ambiental. Podemos acotar la importancia del análisis como una contribución a los antecedentes nacionales que refieren a lineamientos de eficiencia energética del sector residencial, particularmente, a las implicaciones económicas y ambientales derivadas de medidas de ahorro energético en viviendas multifamiliares de interés social en un clima templado. Lo anterior destaca el área de oportunidad que la falta de directrices o de una metodología específica para la revisión constante significa en el caso particular del CEV. Este aún debe ser abordado desde una perspectiva integral que no sean estudios aislados referentes a las NOM de producto y sistema que lo componen.

Para concluir, se comentan los alcances y limitaciones que se presentaron con relación a los objetivos e hipótesis, así como una propuesta sobre futuras líneas de investigación.

5.2.1 Con relación a los objetivos

Como objetivo general se planteó el análisis costo beneficio del CEV con el fin de determinar su impacto en las emisiones indirectas por usos finales. El cumplimiento de este objetivo implicó el desarrollo de los objetivos particulares a lo largo del capítulo cuatro, los cuales fueron:

- a) Analizar el consumo de energía (eléctrica y gas LP) para estimar el comportamiento energético de la vivienda multifamiliar actual (interés social, multifamiliar vertical de cinco niveles, en la Ciudad de México) como caso base.

En cuanto al comportamiento energético del caso base calculado, se mencionó en el capítulo tres la importancia de contar con la mayor cantidad de información desagregada para una mayor precisión de resultados. Este objetivo se cumplió con datos secundarios recientes en la medida posible, puesto que no fue factible obtener una cantidad suficiente de datos primarios o un levantamiento/diagnóstico energético en sitio. Se identificó una sobreestimación de consumos unitarios y promedios con relación a la literatura mencionada en este trabajo, esto se explica por el tipo y la vigencia de equipos analizados, llegando a presentarse una mayor variación en consumos por energía eléctrica. Mayor cantidad de datos, idealmente de mediciones reales en un periodo controlado, serían de utilidad en el desarrollo de análisis complementarios con métodos estadísticos como regresiones, por ejemplo.

Se optó por una simulación basada en el cálculo manual del comportamiento energético ya que no se tomó en consideración el tiempo que hubiera requerido una simulación con algún software especializado en el desempeño energético. Esto, además de la flexibilidad de poder adecuar cada etapa del análisis, puesto que no se tenía una guía específica sobre su desarrollo.

- b) Identificar lineamientos oficiales referenciados en el CEV pertinentes a la eficiencia energética por usos finales en la vivienda para conformar dos escenarios de mejora apegados a la normatividad seleccionada (capítulo 31, “Eficiencia Energética”).

La selección de lineamientos parte en primera instancia de lo que indica la literatura nacional referente a los energéticos y los usos finales predominantes en el consumo residencial. Ligado a esto último, se consideró la disponibilidad de datos para interpretar los parámetros de cada lineamiento, nuevamente por el hecho de no contar con un levantamiento de equipos certificados. De los 28 lineamientos que enlista el CEV, se identificaron nueve lineamientos aplicables, y con siete de ellos se propuso el conjunto de parámetros de cumplimiento para generar escenarios de mejora. Al respecto de la selección presentada, su complejidad implica realizar derivaciones en función del tipo de consumo energético analizado, el tipo de vivienda y sus materiales, el contexto climático, el tipo de emisiones a considerar, los métodos para cuantificar el impacto, etc.; por mencionar algunos. En el ámbito internacional esto se resuelve con una gestión específica (como ocurre con los estudios que desarrolla el PNNL con base en la metodología del DOE en EUA, por ejemplo) en cuanto al alcance del análisis y los lineamientos a incluir.

Los escenarios representaron niveles de eficiencia operativa mínima y de mejora adicional. De los siete lineamientos mencionados, se omitió el consumo y ahorro energético que generaría el lineamiento de sistema referente al desempeño térmico de la envolvente residencial, pues no implica un uso final específico (como sucede con otros estudios que ya abordaron la problemática de viviendas en climas extremosos del país) que afecte el consumo total de energía del caso base. Lo que se ha presentado constituye una aproximación de escenarios que no pretenden ser definitivos, al contrario, la intención es expandir este trabajo de acuerdo con el enfoque metodológico y el tipo de muestra que se maneje.

Por otro lado, en cuanto a la relación entre el consumo energético y la superficie construida, lo que el código refiere como CE, los valores presentados son una interpretación ya que el código no se describe el proceso para obtener tal relación, ni se especifica si los valores que enlista como indicadores energéticos del consumo máximo recomendado corresponden a una sola vivienda o a un conjunto de estas.

- c) Cuantificar el beneficio ambiental de integrar lineamientos identificados en el CEV a cada escenario de mejora, para determinar el potencial de mitigación de emisiones de CO₂eq de acuerdo con los límites recomendados por el código.

Para ser comparadas con los valores recomendados por el código, las emisiones se cuantificaron según el tipo de consumo energético correspondiente. Si bien el alcance de estimaciones se delimitó a emisiones operativas, sería ideal adoptar en estudios posteriores softwares especializados o bien, o extensiones de aplicaciones sobre modelado energético bajo licencia con un enfoque de ciclo de vida (ej. Tally, una extensión de Revit que permite cuantificar el impacto ambiental de construcciones durante determinado ciclo de vida asignado) que faciliten un análisis de emisiones tanto operativas como incorporadas a la envolvente, además de analizar el comportamiento humano respecto al uso de energía.

Por otro lado, se mencionó en el capítulo tres que el análisis costo beneficio presentado no guarda relación con el costo social del carbono, pues en este trabajo no se buscó asignar un valor monetario por tonelada métrica de CO₂ emitida. En nuestro país esto es aún un concepto

que requiere de una maduración significativa para que sea asequible a otros sectores fuera de ciertas industrias como la forestal, por ejemplo. Incluso en el panorama internacional resulta subjetivo adjudicar un precio de mercado al bienestar humano que resulta de evitar emisiones, sin embargo, en un futuro podría incentivar en mayor medida la operación eficiente de viviendas desde un enfoque empresarial, gubernamental e institucional.

- d) Estimar el ahorro operativo y económico por consumo de energía, así como la inversión adicional ligada a la aplicación teórica de los lineamientos identificados, para definir los beneficios y costos asociados a cada escenario.

Referente a la propuesta de inversiones requeridas según la eficiencia operativa de cada escenario CEV desarrollado, se consideraron costos de equipo y sistema menores al gasto promedio establecido por INEGI para el perfil socioeconómico correspondiente al caso base. Si bien se utilizaron precios establecidos en el mercado y costos directos, no se atendieron aspectos de variabilidad como la inflación, esto debido a que no se propuso un análisis financiero de factibilidad.

En cuanto a la metodología empleada para la etapa de análisis económico, la elaboración del presente trabajo coincidió con la publicación de la metodología del análisis costo beneficio para evaluar el efecto económico de proyectos NOM-ENER de CONUEE. Tal antecedente resultó esencial para identificar los elementos clave en esta propuesta de análisis enfocada en beneficios económicos, aunque únicamente desde la perspectiva del usuario final.

Por otro lado, es importante retomar que, de acuerdo con lo establecido en la literatura, particularmente en lo relativo a la metodología del DOE de EUA para evaluar la rentabilidad de los cambios en sus códigos (Metodología DOE), el criterio del periodo simple de recuperación no debiera ser fundamental o único. Para los fines y alcances presentados se utilizaron otras herramientas económicas además del periodo simple de recuperación, a manera de respaldar la valoración final. Entre más factores intervengan en el análisis (como inversiones recurrentes por sustituciones futuras en diferentes periodos, por ejemplo), será distinto el enfoque de evaluación.

5.2.2 Con relación a la hipótesis

La hipótesis planteada, “si se aplica el CEV en vivienda multifamiliar, es posible un costo adicional de hasta 30%, y al mismo tiempo, no exceder el límite de emisiones por consumo de energía térmica y eléctrica recomendado”, bajo los alcances expuestos en este trabajo, es respaldada por los resultados obtenidos.

Por un lado, apenas entre el 1.5% y 3% se calculó como costo adicional a la inversión total de la vivienda (con precio promedio de venta según SHF). Tal disparidad se debe a que el porcentaje de costo adicional referido en la hipótesis engloba una sustitución de materiales para la mayor cantidad de elementos en la envolvente arquitectónica (sistemas de aislamiento en muros y techo, sustituir ventanas, adicionar aleros), además de sustituciones o añadidura de equipos (aire acondicionado, agregar calentador solar, etc.) que no correspondió abordar en el presente análisis. Esto tiene sentido ya que los estudios nacionales de desempeño energético y térmico de la vivienda de interés social se enfocan especialmente en climas extremos, donde es común que la envolvente requiera de medidas de ahorro más significativas.

En este trabajo, en cambio, se incluyó la sustitución de electrodomésticos y una medida de ahorro pertinente al lineamiento de sistema (película de control solar sobre ventanas ya existentes). Si bien dicho lineamiento no influyó en el consumo promedio de energía eléctrica o térmica por la zona climática estudiada, sí fue considerado como parte de las propuestas de inversión diferencial para ambos escenarios CEV. El porcentaje adicional calculado para el caso base refleja un rango mínimo correspondiente a la vivienda multifamiliar vertical de interés social en clima templado subhúmedo. Quedó fuera del alcance de esta investigación establecer un rango medio y máximo de costo adicional. Asimismo, sería relevante integrar estimaciones para los climas y tipologías predominantes en el sector residencial mexicano. Tal práctica es cotidiana en el ámbito internacional, particularmente en los análisis preliminares y oficiales de actualizaciones de códigos como el IECC en EUA o el CTE de España.

Por otro lado, referente al límite de emisiones por consumo de energía eléctrica y térmica recomendado por el CEV, si bien no se obtuvo el nivel de eficiencia esperado en el consumo final de gas LP para mantener las emisiones correspondientes dentro del límite permisible, no se puede descartar que dicho nivel es posible a un costo adicional que no supere el 30% mencionado. Se estaría considerando la sustitución de un equipo con mayor eficiencia, en este caso el calentador de agua. Tal planteamiento no se integró al análisis por limitantes de tiempo, sumado a que no se encontraron (al momento de realización de este trabajo) referencias o fichas técnicas que indicaran equipos con un consumo unitario menor al propuesto para el Escenario 02. Suponer la combinación de un calentador de almacenamiento a gas y un calentador solar para mejorar el consumo (como se propuso en uno de los antecedentes revisados), implicaría un nuevo análisis que integre además un lineamiento del CEV pertinente al consumo eficiente de calentadores solares.

5.2.3 Futuras líneas de investigación

Se puntualizan algunos cuestionamientos que surgieron durante este estudio, pertinentes a su desarrollo dentro de un sector que implica procesos específicos de revisión constante por la cantidad de factores que intervienen. Tales cuestionamientos se proponen como posibles líneas de investigación:

Desarrollar propuestas de eficiencia operativa en la vivienda multifamiliar vertical superiores al nivel de eficiencia del Escenario 02, esto según la normativa vigente, el tipo de energético y el potencial de reducción de emisiones correspondiente.

Integrar, a partir de las limitaciones del presente estudio, una propuesta metodológica de revisión o monitoreo sobre los costos y beneficios del consumo de energía eficiente que considere otras tipologías de vivienda y climas referidos por el código.

Continuar con una revisión a fondo sobre el cálculo de los indicadores energéticos recomendados en el Anexo 8 del código según la tipología de vivienda y su clasificación climática. En específico, su relación con las emisiones por tipo de energético y su relevancia en el contexto de los planes nacionales de mitigación ambiental.

Cuantificar emisiones de GEI incorporadas a la envolvente residencial y su impacto con relación a las emisiones operativas desde el enfoque del ciclo de vida (LCA), esto como

una propuesta metodológica para la determinación de la huella de carbono por tipología de vivienda y ubicación en el territorio mexicano.

Analizar mediante un diagnóstico energético el consumo final de energía térmica residencial para precisar con mediciones en sitio los resultados sobre consumos unitarios de equipos en viviendas según su tipología y tipo de energético (gas LP, gas natural) en la región templada del país.

Estudiar a detalle la determinación de periodos de operación, así como parámetros de rendimiento mínimo esperado para la evaluación económica de códigos que atienden lineamientos de eficiencia energética residencial y su impacto en la industria de la construcción.

Revisión literaria sobre modelos de cálculo de las emisiones de GEI procedentes del consumo final de energía residencial, y su relevancia con relación al consenso internacional sobre el costo social del carbono.

Por último, realizar un estudio que aborde la clasificación climática indicada por el CEV para establecer las bases de una propuesta de homologación al concepto de grados día.

Referencias Bibliográficas

- Ade, R., y Rehm, M. (2019). Buying limes but getting lemons: Cost-benefit analysis of residential green buildings. A New Zealand case study. *Energy and Buildings*, 186, 284-296. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.040>
- Albarrán, A., Beele, A., Gruner, A., y Montaña, R. (2014). Manual Operativo del Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde. Programa de Energía Sustentable en México. <https://documents.es/document/sistema-de-evaluacion-de-la-vivienda-verde-manual-manual-operativo-del.html>
- Aldy, J., Kotchen, M., & Atkinson, G. (2021). Environmental Benefit-Cost Analysis: A Comparative Analysis Between the United States and the United Kingdom. *Annual Review of Resource Economics*, 13, 267-288. doi:<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-resource-040821-045913>
- Alexander, S. (2015). *Sufficiency Economy: Enough, for everyone, forever*. Simplicity Institute.
- Allard, I., Nair, G., y Olofsson, T. (2021). Energy performance criteria for residential buildings: A comparison of Finnish, Norwegian, Swedish, and Russian building codes. *Energy and Buildings*, 250(111276). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111276>
- Alonso-Arenas, J., & Juárez-Pérez, A. (s.f.). Los grandes desarrollos habitacionales en la ciudad de México: ¿proyectos habitacionales o proyectos políticos y económicos? *bitácora arquitectura*(32), 74-86. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/bitacora/article/download/56195/49809/160278>
- Armstrong, A., Wright, C., Ashe, B., y Nielsen, H. (2017). Enabling Innovation in Building Sustainability: Australia's National Construction Code. *Procedia Engineering*, 180, 320-330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.191>
- Asociación Mexicana de Agencias de Inteligencia de Mercado y Opinión AC [AMAI]. (2021). Perfil de Los hogares según Nivel Socioeconómico 2020: <https://amai.org/NSE/index.php?queVeo=niveles>
- B3 Sustainable Building 2030 Energy Standard. (2010). <https://www.b3mn.org/2030energystandard/>
- Baležentis, T., Butkus, M., y Štreimik, D. (2021). Exploring the limits for increasing energy efficiency in the residential sector of the European Union: Insights from the rebound effect. *Energy Policy*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112063>
- Baltazar, J. C., Haberl, J., Yazdani, B., Parker, P., Ellis, S., Zilbershtein, G., y Claridge, D. (2020). Energy Efficiency/Renewable Energy Impact in the Texas Emissions Reduction Plan (TERP), Volume I. <https://esl.tamu.edu/terp/documents/terp-reports/2019-2020/>
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2013). Mitigación y adaptación al cambio climático a través de la vivienda pública. Nota técnica. <https://publications.iadb.org>
- Belaïd, F., Ranjbar, Z., y Massié, C. (2021). Exploring the cost-effectiveness of energy efficiency implementation measures in the residential sector. *Energy Policy*, 150(112122). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112122>
- Bernal Ponce, L., Guízar Mateos, I., y Navarro, R. P. (2021). Capítulo 3 Causalidad entre el consumo energético sectorial y el crecimiento económico. Los desafíos de la economía mexicana. *Energía, política energética y crecimiento económico*. https://www.researchgate.net/publication/356442380_Efectos_del_indice_de_letalidad_por_Covid-19_y_el_tipo_de_cambio_en_lamezcla_mexicana_de_petroleo_de_exportacion

- Bolton, P., Despres, M., Pereira, L. A., Samama, F., & Svartzman, R. (2020). The green swan. Bank for International Settlements . <https://www.bis.org/publ/othp31.pdf>
- Borrallo-Jiménez, M., LopezDeAsiain, M., Esquivias, P., y Delgado-Trujillo, D. (2022). Comparative study between the Passive House Standard in warm climates and Nearly Zero Energy Buildings under Spanish Technical Building Code in a dwelling design in Seville, Spain. *Energy and Buildings*, 254(111570). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111570>
- Building Energy Codes Program. (2016). Office of Energy and Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/energy-codes-101-what-are-they-and-what-does-role>
- Calidad y Sustentabilidad en la Edificación [CASEDI]. (2016). Código de Conservación de Energía para las Edificaciones de México [IECC – México]. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). <https://onncce.org.mx/es/codigos-y-publicaciones/366-mbeecdc>
- California Energy Commission. (2021). California Energy Commission. Building Energy Efficiency Standards. <https://www.energy.ca.gov/about/accomplishments>
- Cámara Nacional de la Industria de Desarrollo y Promoción de Vivienda [CANADEVI]. (2014). Análisis de Costo beneficio según el aislamiento óptimo para el cumplimiento de NOM020-ENER-2011, en diferentes bioclimas de México y 3 tipologías de vivienda. México: Lean House Consulting.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción [CMIC]. (2022). Principales variaciones en el precio de los materiales y su impacto en el costo de las obras. https://www.cmic.org.mx/comisiones/Tematicas/costosyp/Informes_IPP/2022/CEICO_Informe_Mayo_2022.pdf
- Ceballos-Ochoa, F., & Morillón-Gálvez, D. (2015). Metodología para la sustentabilidad energética en los edificios. *Vivienda net zero energy* (1 ed.). Instituto de Ingeniería. <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/PDFPublicacion.aspx?pdf=SID%20690.pdf>
- Centro Mario Molina. (2012). Índice de Sustentabilidad de la Vivienda y su Entorno (ISV). Centro Mario Molina. <https://centromariomolina.org/ciudades-sustentables/evaluacion-de-la-sustentabilidad-de-la-vivienda-en-mexico/>
- Chen, K. (2021). A cooperative federalism model for building energy codes. *Columbia Law Review*, 121(7), 2119-2156. <https://www.jstor.org/stable/10.2307/27083422>
- Comisión Brundtland. (1987). Reporte de World Commission on Environment and Development (WCED): Our Common Future. [sdgs.un.org: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf)
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2018). Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/43612-informe-nacional-monitoreo-la-eficiencia-energetica-mexico-2018>
- Comisión Interinstitucional de cambio climático de la Ciudad de México. (2021). Estrategia local de acción climática 2021-2050. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/docpub/sedema/PACCM_y_ELAC.pdf
- Comisión Nacional de Vivienda [CONAVI]. (2016). NAMA Mexicana de Vivienda Sustentable. <https://www.gob.mx/conavi/documentos/nama-mexicana-de-vivienda-sustentable-28728>

- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE]. (2017a). Costos y beneficios de la Norma Oficial Mexicana para envolvente de edificaciones residenciales (NOM-020- ENER). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/234755/Impacto_NOM-020-junio-2017-FINAL.pdf
- Comisión Reguladora de Energía [CRE]. (2020). Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630693/Aviso_FEE_2020.pdf
- CONAVI. (2017a). Código de Edificación de Vivienda 3ª Edición. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/320345/CEV_2017__FINAL_.pdf
- CONAVI. (2017b). Suelo para la vivienda de la población de menores ingresos en la Zona Metropolitana del Valle de México. Facultad de Arquitectura. México: CONAVI. https://www.conavi.gob.mx/conavi-conacyt/docs/tercer_encuentro/Libro_Suelo_para_vivienda.pdf
- CONAVI. (2020). Estadística SISEVIVE .
- CONAVI]. (2021). Actualización del rezago habitacional. Censo de Población y Vivienda 2020: <https://www.gob.mx/conavi/documentos/actualizacion-del-rezago-habitacional>
- CONUEE. (2017b). Catálogo de tecnologías. https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/GUIAS/Municipios/CatalogoDeTecnologias_V1.00.pdf
- CONUEE. (2018). Energía y edificaciones en Mexico: Importancia y políticas públicas presentes y futuras. Cuadernos de la Conuee(10). <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos>
- CONUEE. (2021a). Base de Indicadores de Eficiencia Energética (BIEE). <https://www.biee-conuee.net/site/index.php>
- CONUEE. (2021b). Normas Oficiales de Eficiencia Energética: Balance al 2021. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/739347/BALANCE_NOM-ENER_al_2021_ver_final_05072022__1_.pdf
- CONUEE. (2021c). Metodología para la evaluación del análisis beneficio-costo de las Normas Oficiales de Eficiencia Energética. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/752174/metodologia_analisis_B-C_de_NOMs_DNEE__final__JULIO2022.pdf
- Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos. (2020). Catálogo Nacional. Ley de Infraestructura de la Calidad: <https://catalogonacional.gob.mx/FichaRegulacion?regulacionId=5570>
- Dahmen, J., von Bergmann, J., y Das, M. (2018). Teardown Index: Impact of property values on carbon dioxide emissions of single family housing in Vancouver. Energy and Buildings, 170, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.012>
- Davis, L., Martinez, S., & Taboada, B. (2018). How Effective is Energy-efficient Housing?: Evidence From a Field Experiment in Mexico. Inter-American Development Bank [IDB]. doi:<http://dx.doi.org/10.18235/0000989>
- Denniston, S. (2017). New Buildings Institute [NBI]. Multifamily Guide: <https://newbuildings.org/new-multifamily-guide-offers-solutions-deliver-25-energy-savings/>
- Energy Star. (2020). Energy Star Buildings. <https://www.energystar.gov/buildings>

- Energy-Efficient Codes Coalition. (25 de febrero de 2022). Webinar: ICF Cost Effectiveness of the Residential Provisions of the 2021 IECC.
- Enker, R., y Morrison, G. (2017). Analysis of the transition effects of building codes and regulations on the emergence of a low carbon residential building sector. *Energy and Buildings*, 156, 40-50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.059>
- Escobedo-Izquierdo, M. A. (2020). Introducción al Ahorro y a la Gestión Energética 2022-1. Apuntes. Ciudad de México.
- Escobedo Izquierdo, A., y Morillón Gálvez, D. (2013, Septiembre). Uso de la energía eléctrica en edificios de oficinas del centro del país. *EFICIENCIA ENERGÉTICA*, pp. 12-15. https://www.fide.org.mx/wp-content/uploads/REVISTAS/eficiencia_energetica_1.pdf
- Evans, M., Roshchanka, V., y Graham, P. (2017). An international survey of building energy codes and their implementation. *Journal of Cleaner Production*, 382-389. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.007>
- Evans, M., Yu, S., Staniszewski, A., Jin, L., y Denysenko, A. (2018). The international implications of national and local coordination on building energy codes: Case studies in six cities. *Journal of Cleaner Production*, 191, 127-134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.142>
- Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (2021). Building Codes Save: A Nationwide Study of Loss Prevention. U.S. Department of Homeland Security. <https://www.fema.gov/emergency-managers/risk-management/building-science/building-codes-save-study>
- Feng, W., Li, X., Zhou, N., Bendewald, M., Szum, C., Meng, Z., y Zeng, Y. (2017). From prescriptive to outcome-based - the evolution of building energy codes and standards in China. *Policies, Directives and Programmes*, 1381 - 1391. https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2017/6-buildings-policies-directives-and-programmes/from-prescriptive-to-outcome-based-the-evolution-of-building-energy-codes-and-standards-in-china/
- Fernández-Membrive, V., Lastra-Bravo, X., y Tolón-Becerra, A. (2015). Cost-benefit analysis of changes in energy in building technology. *Energy and Buildings*, 103, 29-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.026>
- Ferrari, L. (2020). Hacia un futuro energético y ambiental sustentable para México: diagnóstico y propuestas. UNAM. (UNAM, Ed.)
- Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica [FIDE]. (2018). Reporte de Resultados de los Proyectos y Programas del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica. www.fide.org.mx/wp-content/uploads/book/FIDE-RETOS-LOGROS-DESAFIOS-2013-2018-OPT.PDF
- FIDE (2012). Luz Sustentable, de México para el Mundo. Evolución y Energía. https://www.fide.org.mx/wpcontent/uploads/2018/05/REVISTAS/evolucion_energia_5fb/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- Foroushani, S., Bernhardt, R., y Bernhardt, M. (2022). On the use of the reference building approach in modern building energy codes. *Energy and Buildings*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111726>
- Fowle, M., Greenstone, M., & Wolfram, C. (2018). Do Energy Efficiency Investments Deliver? Evidence from the Weatherization Assistance Program. *The Quarterly Journal of Economics*, 133(3), 1597–1644. doi:<https://doi.org/10.1093/qje/qjy005>

- Gerarden, T., Newell, R., y Stavins, R. (2017). Assessing the Energy-Efficiency Gap. *Journal of Economic Literature*, 55(4), 1486-1525. doi:10.1257/jel.20161360
- Giraudet, L.-G. (2020). Energy efficiency as a credence good: A review of informational barriers to energy savings in the building sector. *Energy Economics*, 87(104698). doi:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104698
- Global Alliance for Buildings and Construction. (2019). *Global Status Report for Buildings and Construction Sector*. UN Environment Programme.
- Goldstein, B., Gounaridis D., Newell, J.P. (2020). The carbon footprint of household energy use in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117, 19122-19130. https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1922205117
- Guadalupe M. G., J., y Reza, C. (2019). Tlatelolco. Decadencia urbana y arquitectónica de un proyecto simbólico del modernismo. (E. R. C.V., Ed.) Gremium. *Esempi Di Architettura*, págs. https://editorialrestauro.com.mx/tlatelolco-decadencia-urbana-y-arquitectonica-de-un.
- Hirata-Nagasako, E. (26 de octubre de 2016). Códigos de edificación y el desarrollo sustentable. Panel: Normas para la construcción urbana. https://ejkrause.com.mx/camp-green16/bitacora/greencity/green27-EvangelinaHirata.pdf
- Hirata-Nagasako, E. (11 de abril de 2019). Marco normativo de la construcción en México para promover la construcción sustentable. Panel 1. http://www.alianzafiidem.org/pdfs/Foro-normalizacion-2019/1-1-Evangelina_HIRATA-PANEL-1.pdf
- Holian, M. J. (2020). The impact of building energy codes on household electricity expenditures. *Economic Letters*, 186 (108841). doi:https://doi.org/10.1016/j.econlet.2019.108841
- ICC Performance Code for buildings and facilities. (2018). *ICC Digital Codes*. https://codes.iccsafe.org/content/ICCPC2018/foreword
- IEA. (2017). Roadmap for Building Energy Codes and Standards for Mexico. *Policies Database*: https://www.iea.org/policies/2474-roadmap-for-building-energy-codes-and-standards-for-mexico
- IEA. (2019). What are the steps? Implementing building energy codes and standards: https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/613/Buildings.7_Codes_and_standards.pdf
- IEA. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*. https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020
- IEA. (2021). *Achievements of Energy Efficiency Appliance and Equipment Standards and Labelling Programmes*. https://www.iea.org/reports/achievements-of-energy-efficiency-appliance-and-equipment-standards-and-labelling-programmes
- IEA Technology Collaboration Programmes. (2022). *Reports. Technology and Innovation Pathways for Zero-carbon-ready Buildings by 2030*: https://www.iea.org/reports/technology-and-innovation-pathways-for-zero-carbon-ready-buildings-by-2030
- IFP. (2021). *Energy Transition Innovation Towards Low Carbon Future*. Apuntes.
- INEGI. (2020a). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares [ENIGH]*. https://inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/nc/2020/doc/enigh2020_ns_nota_tecnica.pdf
- INEGI. (2020b). *Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI)*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/envi/ENVI2020.pdf

- Infante-Barbosa, E. (12 de Junio de 2021). Consulta técnica sobre el modelo de evaluación de vivienda verde "Sisevive-Ecocasa". (M. Flores, Entrevistador)
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2019). Glosario. <http://elcambioclimaticodefrente.inecc.gob.mx/glosario>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares 2018. <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>
- Interagency Working Group on the Social Cost of Greenhouse Gases. (2021). Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990: https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocument_SocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf
- International Code Council [ICC]. (s.f.). Advocacy. Code Adoption: <https://www.iccsafe.org/>
- International Energy Agency [IEA]. (2016). Manual de indicadores de eficiencia energética: Fundamentos estadísticos. Biblioteca Olade: <https://biblioteca.olade.org/opac-trmpl/Documentos/cg00332.pdf>
- International Finance Corporation [IFC]. (2017). Green Buildings Market Intelligence. Mexico, Country Profile. <https://edgebuildings.com/wp-content/uploads/2017/09/Mexico-Green-Building-Market-Intelligence.pdf>
- International Organization for Standardization [ISO]. (2017). ISO 15686-1:2011. Buildings and constructed assets-Service life planning-Part 1: General principles and framework: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:15686:-5:ed-2:v1:en>
- International Panel on Climate Change [IPCC]. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2, Energy: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- Kellogg, K., & La Cumbre-Gibbs, N. (2022). The impact of state level residential building code stringency on energy consumption in the United States. *Energy and Buildings*, 278(112607). doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112607>
- Khosla, R. (2016). Closing the Policy Gap: Building Energy Code Lessons from Andhra Pradesh. *Economic and Political Weekly*, 51(2), 66-73. <https://www.jstor.org/stable/44003082>
- Langevin, J., Harris, C., y Reyna, J. (2019). Assessing the Potential to Reduce U.S. Building CO2 Emissions 80% by 2050. *Joule*, 3, 2403-2424. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.013>
- Levinson, A. (2016). How Much Energy Do Building Energy Codes Save? Evidence from California Houses. *American Economic Review*, 106(10), 2867-94. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.20150102>
- Ley de Vivienda. (2006). http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LViv_230617.pdf
- Ley Federal sobre Metrología y Normalización [LFMN]. (1992). <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/107522>
- Ley General de Cambio Climático [LGCC]. (2012). Observatorio del principio 10 en América Latina: <https://observatoriop10.cepal.org/es/instrumentos/ley-general-cambio-climatico>
- Lin, B., Peng, B., y Wu, X. (2017). A dynamic life cycle carbon emission assessment on green and non-green buildings in China. *Energy and Buildings*, 149, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.041>

- Mahapatra, K. (2015). Energy use and CO2 emission of new residential buildings built under specific requirements - The case of Växjö municipality, Sweden. *Applied Energy*, 152, 31-38. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915005528>
- Martínez-Montejo, S., y Sheinbaum-Pardo, C. (2016). The impact of energy efficiency standards on residential electricity consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 32, 50-61. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082616300473>
- McCoy, D., y Kotsch, R. (2018). Why the energy efficiency gap is smaller than we think: quantifying heterogeneity and persistence in the returns to energy efficiency. The Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment - Working Paper. <https://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2018/11/working-paper-306-McCoy-Kotsch.pdf>
- McFarlane, A., Li, J., y Hollar, M. (2021). Building Codes: What are they good for? Regulatory Reform and Affordable Housing. *US Department of Housing and Urban Development*, 23(1), 101-132. <https://www.jstor.org/stable/10.2307/26999942>
- Mendoza, A. G. (1998). Evaluación de proyectos de inversión. McGraw - Hill. <https://www.urbe.edu/UDWLibrary/InfoBook.do?id=7900>
- Moreno, S. H. (2017). Casos prácticos sobre estimación de la vida útil en proyectos arquitectónicos. (Verbolibre, Ed.) Universidad Autónoma del Estado de México. : <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/67991/CasosPracticos.pdf?sequence=1>
- Morillón G., D., García K., I., y Escobedo I., M. (2015). Retos y oportunidades para la sustentabilidad energética en edificios de México: Consumo y uso final de energía en edificios residenciales, comerciales y de servicio. UNAM Instituto de Ingeniería. <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/consultasspii/DetallePublicacion.aspx?id=5001>
- Morrison Hershfield. (2017). Energy Step Code. Building Beyond the Standard. Metrics Research Summary Report: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/construction-industry/building-codes-and-standards/reports/bc_energy_step_code_metrics_research_report_summary.pdf
- Novan, K., Smith, A., y Zhou, T. (2022). Residential Building Codes Do Save Energy: Evidence from Hourly Smart-Meter Data. *The Review of Economics and Statistics*, 104(3), 483-500. doi:https://doi.org/10.1162/rest_a_00967
- Ochoa, R. G. (junio de 2020). Pobreza energética, tecnología y calidad de vida en México. *Revista del Fideicomiso para el Ahorro Energético*, 7(26). https://www.fide.org.mx/wp-content/uploads/Revistas/eficiencia_energetica_26.pdf
- O'Brien, W., Tahmasebi, F., Korsholm-Andersen, R., Azar, E., Barthelmes, V., Deme-Belafif, Z., . . . Zhou, J. (2020). An international review of occupant-related aspects of building energy codes and standards. *Building and Environment*, 179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106906>
- O'Mahony, T. (2021). Cost-Benefit Analysis and the environment: The time horizon is of the essence. *Environmental Impact Assessment Review*, 89(106587). doi:<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106587>
- ONU-Hábitat, Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT). (2018). Diagnóstico y estrategias para la vivienda alineada a los Objetivos del Desarrollo Sostenible. ONU-Habitat.

- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2018). Cost-benefit Analysis and the Environment. <https://www.oecd.org/env/tools-evaluation/CBA-brochure-web.pdf>
- Oropeza-Pérez , I., y Petzold-Rodríguez, A. (2018). Analysis of the Energy Use in the Mexican Residential Sector by Using Two Approaches Regarding the Behavior of the Occupants. *Applied Sciences*, 8, 2136. doi:<https://doi.org/10.3390/app8112136>
- Pacific Northwest National Laboratory [PNNL]. (2021). Impacts of Model Building Energy Codes - Interim Update. Battelle Memorial Institute. https://www.energycodes.gov/sites/default/files/2021-07/Impacts_of_Model_Energy_Codes_2010-2040_Interim_Update_07182021.pdf
- Procuraduría Social de la Ciudad de México. (2011). Gaceta Oficial. Aviso por el que se dan a conocer los lineamientos y mecanismos de operación del programa social para las Unidades Habitacionales de interés social: <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/4014.htm>
- Ramírez, J., Ortiz-Arango, F., y Rosellón, J. (2021). Impact of Mexico's energy reform on consumer welfare. *Utilities Policy*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101191>
- Ramírez, José Diego Morales. (2019). Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética. PAPIME PE 400516 Facultad de Arquitectura, UNAM. http://www.librosoa.unam.mx/bitstream/handle/123456789/2995/maxima_eficiencia_energetica.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Registro Unico de Vivienda [RUV]. (2020). Registro Unico de Vivienda [RUV]. <http://portal.ruv.org.mx/>
- Rodríguez, O. d. (2009). Greenhouse Gas Emission Baselines and Reduction Potentials from Buildings in Mexico. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31006/SBCI-Mexicoreport.pdf>
- Rodríguez, O. d., Cuevas, P., y Navarro, J. (2015). Actualización de análisis de viabilidad y dimensionamiento del potencial de ahorro de un programa de sustitución de calentadores de agua. GIZ. https://energypedia.info/images/1/17/Actualizaci%C3%B3n_programa_sustituci%C3%B3n_CSA_2015.pdf
- Rosas, J., C. Sheinbaum y D. Morillon. (2010). "The structure of household energy consumption and related CO2 emissions by income group in Mexico", *Energy for Sustainable Development*. 14(2), 2010, 127-133 (DE) <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.04.002>
- Rosas-Flores, J., Rosas Flores , D., y Morillón Gálvez, D. (2011). Saturation, energy consumption, CO2 emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in Mexico. *Energy and Buildings*, 43, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.020>.
- Rosas-Flores, J., y Rosas-Flores, D. (2020). Potential energy savings and mitigation of emissions by insulation for residential buildings in Mexico. *Energy and Buildings*, 209. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819326763>
- Salvalai, G., Masera, G., & Sesana, M. M. (2015). Italian local codes for energy efficiency of buildings: Theoretical definition and experimental application to a residential case study. *Renewable and sustainable energy reviews*, 42, 1245-1259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.038>
- Schwarz, M., Nakhle, C., y Knoeri, C. (2020). Innovative designs of building energy codes for building decarbonization and their implementation challenges. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119260>
- Secretaría de Energía [SENER]. (2021). Balance Nacional De Energía. Dirección General de Planeación e Información Energéticas. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/805509/BNE-2021.pdf>

- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [SEDEMA]. (2021). Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2018/Inventario-de-emisiones-cdmx-2018.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2022). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2019 INEGYCEI. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737226/156_2022_INEGYCEI_1990-2019_NIR.pdf
- SEMARNAT. (2015). Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero. Artículo 87 Ley General de Cambio Climático: <https://www.gob.mx/inecc/documentos/acuerdo-que-establece-las-particularidades-tecnicas-y-las-formulas-para-la-aplicacion-de-metodologias-para-el-calculo-de-emisiones>
- SEMARNAT. (2020). Contribución Determinada a nivel Nacional: México. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Mexico%20First/NDC-Esp-30Dic.pdf>
- SENER. (2022). Gobierno de México. Secretaría de Energía - Blog: <https://www.gob.mx/sener/articulos/adios-al-horario-de-verano>
- Singhal, P., Pahle, M., Kalkuhl, M., Levesque, A., Sommer, S., y Berneiser, J. (2022). Beyond good faith: Why evidence-based policy is necessary to decarbonize buildings cost-effectively in Germany. *Energy Policy*, 169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113191>
- Sistema de Información Energética [SIE]. (2021). Balance Nacional de Energía: Consumo de energía en los sectores residencial, comercial y público, períodos 2011-2019. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadrosubAction=applyOptions>
- Sociedad Hipotecaria Federal [SHF]. (2021). Índice SHF de precios de la vivienda en México. <https://www.gob.mx/shf/documentos/indice-shf-de-precios-de-la-vivienda-en-mexico-2021-a-2025?state=published>
- Solís, J. C. (8 de junio de 2021). Asesoría referente a la metodología para la cuantificación de emisiones domésticas por energéticos ejemplificada en la NADF-008-AMBT-2017.
- Stephan, A., y Crawford, R. (2016). The relationship between house size and life cycle energy demand: Implications for energy efficiency regulations for buildings. *Energy*, 116, 1158-1171. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.038>
- Stern, N. y Stiglitz J. (2021). The social cost of carbon. Risk, distribution, market failures: an alternative approach. National Bureau of Economics Research Working Paper Series: No. 28472.
- Tinsa. (2018). La eficiencia energética en la vivienda ahorra costes pero ¿la hace más cara? <https://www.tinsa.es/blog/eficiencia-energetica/eficiencia-energetica-vivienda/>
- Tinsa. (2021). Informe de Coyuntura Inmobiliaria. Zona Metropolitana de la CDMX / 2o trimestre 2021. https://www.tinsamexico.mx/wp-content/uploads/2021/07/NTC_2T2021.pdf
- Turiel, A. (2021). La crisis de la energía en el mundo de hoy: análisis del World Energy Outlook 2021. Repositorio Digital de la Universitat Pompeu Fabra [UPF]. <http://hdl.handle.net/10230/52600>
- Universidad de Minnesota, Center for Sustainable Building Research. (2019). SB 2030 in 2020: Program Update. <https://www.b3mn.org/wp-content/uploads/White-Paper-SB-2030-Moving-to-80.pdf>

- Vargas, A. P. (2022). Integración de normas oficiales mexicanas de eficiencia energética en reglamentos de construcción de estados y municipios. Tesiunam: <http://132.248.9.195/ptd2022/octubre/0832184/Index.html>
- Velazco, I. (2013). Estimación del potencial del ahorro eléctrico, económico y ambiental en la vivienda plurifamiliar vertical Tarifa 1. Tesiunam: <http://132.248.9.195/ptd2013/julio/0697913/Index.html>
- World Green Building Council. (2019). worldgbc.org. <https://www.worldgbc.org/news-media/WorldGBC-embodied-carbon-report-published>
- World Resources Institute [WRI]. (2014). Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/GHGP_GPC%20%28Spanish%29.pdf
- WRI. (2019). Accelerating building decarbonization: eight attainable policy pathways to net zero carbon for all. Working papers: <https://www.wri.org/research/accelerating-building-decarbonization-eight-attainable-policy-pathways-net-zero-carbon>
- WRI. (2020). Rutas sectoriales de descarbonización para México al 2030 y proyecciones al 2050. https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2020/08/Rutas-sectoriales-de-descarbonizacio%cc%81n-para-Me%cc%81xico_Documento-de-Poli%cc%81tica-1.pdf
- Yang, X., Hu, M., Zhang, C., y Steubing, B. (2022). Key strategies for decarbonizing the residential building stock: Results from a spatiotemporal model for Leiden, the Netherlands. *Resources, conservation and recycling*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106388>
- Yu, Y., Shijun, Y., Tianzhen, Y., Zhang, H., y Cheng, J. (2019). Effect of implementing building energy efficiency labeling in China: A case study in Shanghai. *Energy Policy*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110898>
- Zhou, Z., Zhang, S., Wang, C., Zuo, J., He, Q., y Rameezdeen, R. (2016). Achieving energy efficient buildings via retrofitting of existing buildings: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3605-3615. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.046>

Bibliografía

- Bondone, C. (2006). *Teoría de la relatividad económica: solución a las crisis monetarias crítica a las teorías económicas actuales*. https://www.carlosbondone.com/pdf/Teoria_de_la_Relatividad_Economica.pdf
- Clinch, J., & Healy, J. (2001). Cost-benefit analysis of domestic energy efficiency. *Energy Policy*, 29(2), 113-124. doi:[https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00110-5)
- Dréze, J., & Stern, N. (1987). Handbook of Public Economics. *Chapter 14: Theory of cost-benefit analysis* (Vol. 2, págs. 909-989). doi:[https://doi.org/10.1016/S1573-4420\(87\)80009-5](https://doi.org/10.1016/S1573-4420(87)80009-5)
- Koirala, B., Bohara, A., & Berrens, R. (2014). Estimating the net implicit price of energy efficient building codes on U.S. households. *Energy Policy*, 73, 667-675. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.022>
- Stiglitz, J. (1994). Discount rates: The rate of discount for benefit–cost analysis and the theory of the second best. *Cost-benefit analysis* (2 ed., págs. 116-159). Cambridge University Press. doi:[doi:10.1017/CBO9780511521942](https://doi.org/10.1017/CBO9780511521942)

Índice de Figuras

Figura 1 Programas y acciones para la construcción de vivienda sustentable	20
Figura 2 Esquema organizacional de la “Vivienda Sustentable en México”	22
Figura 3 Herramienta desarrollada por CONUEE para la clasificación climática en función de grados día.....	29
Figura 4 Contribución Prevista Determinada a Nivel Nacional de México, al 2020.....	34
Figura 5 Fuentes y límites de emisiones de GEI en la ciudad	40
Figura 6 Indicadores energéticos por nivel de detalle.....	45
Figura 7 Consumo eléctrico residencial en México con y sin medidas de ahorro	46
Figura 8 Consumo eléctrico residencial en México con y sin medidas de ahorro	47
Figura 9 Ubicación caso base.....	52
Figura 10 Edificio 3-C. Planta de entrepiso, fachada y departamento	53
Figura 11 Carta bioclimática modificada para la Cd. de México, Coyoacán	65
Figura 12 Diagrama bioclimático de de Olgay modificado para la Cd. de México, Coyoacán ..	65
Figura 13 Envoltente de edificio 3-C.....	68
Figura 14 Componentes del caso base según la herramienta de cálculo de CONUEE	70
Figura 15 Incumplimiento de envoltente del caso base	71
Figura 16 Cumplimiento de envoltente del caso base	71
Figura 17 Resumen de cargas del cálculo por radiación y conducción de la envoltente del caso base.....	72
Figura 18 Flujo de efectivo del caso base	91
Figura 19 Flujo de efectivo del Escenario 01.....	92
Figura 20 Flujo de efectivo del Escenario 02.....	93
Figura 21 Flujo de efectivo con reinversiones por sustitución de equipos	95

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Producción de vivienda sustentable en México.....	XI
Gráfica 2 Clasificación socio económica de la producción nacional de vivienda en México.....	XII
Gráfica 3 Consumo energético del sector residencial en México.....	10
Gráfica 4 Emisiones de CO ₂ por consumo de energía en la industria de la construcción.....	32
Gráfica 5 Proyección de demanda de vivienda nueva a nivel delegación.....	54
Gráfica 6 Consumo de energía por usos finales en viviendas de clima templado	55
Gráfica 7 Uso promedio diario de focos en viviendas particulares habitadas	56
Gráfica 8 Temperaturas horarias interiores y su relación con la zona de confort.....	66
Gráfica 9 Comportamiento térmico de la envoltente del caso base	67
Gráfica 10 Consumo energético anual por departamento	97
Gráfica 11 Proporción de emisiones anuales por energético.....	100
Gráfica 12 Inversión diferencial y valor presente de ahorros por sustitución de equipos	101

Índice de Tablas

Tabla 1 Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética (NOM-ENER) aplicables a vivienda.....	25
Tabla 2 Línea Base BAU (Business as usual) de NAMA.....	33
Tabla 3 Valores de potencial de calentamiento global (PCG) determinados por el IPCC	38
Tabla 4 Lámparas consideradas para el caso base	57
Tabla 5 Electrodomésticos considerados para el caso base	58
Tabla 6 Equipos de gas LP considerados para el caso base	59
Tabla 7 Selección de Lineamientos oficiales del capítulo 31 del CEV	60
Tabla 8 Criterios de mínimos de eficiencia para escenarios CEV	61
Tabla 9 Temperatura neutra y zona de confort mensual	63
Tabla 10 Temperaturas medias mensuales y su relación con la temperatura neutra y el rango de confort.....	63
Tabla 11 Humedades relativas mensuales y su relación con la temperatura neutra y el rango de confort.....	63
Tabla 12 Humedad relativa estimada para la Ciudad de México	64
Tabla 13 Radiación solar incidente para la Ciudad de México	64
Tabla 14 Propiedades térmicas de la envolvente del caso base	69
Tabla 15 Uso medio de energía por actividad/uso final	73
Tabla 16 Consumo eléctrico por iluminación del caso base	75
Tabla 17 Consumo eléctrico por electrodomésticos del caso base	75
Tabla 18 Consumo eléctrico anual del caso base	76
Tabla 19 Consumo de gas LP por aparato del caso base	77
Tabla 20 Consumo térmico anual del caso base.....	77
Tabla 21 Consumos totales por energético del caso base	78
Tabla 22 Consumo eléctrico por iluminación del Escenario 01.....	79
Tabla 23 Escenario 01. Consumo y ahorro por sustitución de electrodomésticos	80
Tabla 24 Escenario 01. Consumo y ahorro por sustitución de equipos de gas LP	81
Tabla 25 Consumo eléctrico por iluminación del Escenario 02.....	81
Tabla 26 Escenario 02. Consumo y ahorro por sustitución de electrodomésticos	82
Tabla 27 Escenario 02. Consumo y ahorro por sustitución de equipos de gas LP	82
Tabla 28 CE estimado para el caso base, Escenario 01 y 02.....	83
Tabla 29 Emisiones por consumo de electricidad para el caso base.....	84
Tabla 30 Emisiones por consumo de gas LP para el caso base	85
Tabla 31 Emisiones por consumo de gas LP para el Escenario 01	85
Tabla 32 Emisiones por consumo de electricidad para el Escenario 01	85
Tabla 33 Emisiones por consumo de gas LP para el Escenario 02.....	86
Tabla 34 Emisiones por consumo de electricidad para el Escenario 02	86
Tabla 35 Emisiones anuales por consumo energético considerando un periodo de operación de 20 años.....	86
Tabla 36 Importe por consumo de energía eléctrica del caso base.....	88
Tabla 37 Importe por consumo de gas LP del caso base.....	89
Tabla 38 Importe por consumo de energía eléctrica para Escenario 01	89
Tabla 39 Importe por consumo de gas LP para Escenario 01	90
Tabla 40 Importe por consumo de energía eléctrica para Escenario 02.....	90
Tabla 41 Importe por consumo de gas LP para Escenario 02.....	90

Tabla 42 Inversión original del caso base	91
Tabla 43 Inversión propuesta para el Escenario 01	92
Tabla 44 Inversión propuesta para el Escenario 02	93
Tabla 45 Inversión adicional por sustitución de equipos y sistema para el Escenario 01 y 02...	94
Tabla 46 Inversiones (equipos y sistema) para el Escenario 01 y 02	95
Tabla 47 Resumen de análisis energético, ambiental y económico por depto. tipo	96
Tabla 48 Ahorros por energético Escenario 01	98
Tabla 49 Ahorros por energético Escenario 02	99
Tabla 50 Emisiones por consumo energético y límites recomendados por el CEV	100
Tabla 51 Ahorro anual de energía eléctrica y térmica para la vivienda multifamiliar vertical...	108
Tabla 52 Emisiones evitadas anualmente para la CDMX	110
Tabla 53 Consumos y emisiones del caso base hacia 2050	111
Tabla 54 Consumos y emisiones de Escenarios 01 y 02 hacia 2050	112

Anexos

<https://drive.google.com/drive/folders/1edCVpVJCOv4Tugw2NXrEJC62XI1Ewfm3?usp=sharing>

Anexo 1 Cálculo energético depto. tipo para caso base

Caso base-análisis energético depto tipo

Usuarios/depto 4.00
Consumo bimestral 915.04 MJ/depto 254.18 kWh/depto

Datos

Lámparas

Espacio	Potencia unitaria (W)	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Habitación 1	60	1	2.28
Habitación 2	60	1	2.28
Cocina	20	1	2.55
Sala/comedor/pasillo	20	3	2.5
Baño	20	1	1.32
Total		7	

Electrodomésticos

Equipo/aparato	Potencia unitaria (W)	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Refrigerador	44	1	24
Lavadora	600	1	4hr /semana
Televisión plasma color (32 pul)	230	2	3.5
Computadora (laptop)	30	1	4
Plancha	1000	1	4hr /semana

Consumo por uso final

Iluminación	S_{Bd}	CU_B (kWh/luminaria)	S_{Fd}	CU_f (kWh/luminaria)	E_i (kWh)	diario	Mensual CU_s
Incandescente 60 W; LFCA 20 W	2.00	0.26	5.00	0.22	0.48		7.97

Donde:

E_i = Consumo eléctrico por iluminación
 S_{Bd} = Número de lámparas incandescentes por departamento
 CU_B = Consumo unitario por lámpara incandescente (kWh/luminaria*año)
 S_{Fd} = Número de LFCA por departamento
 CU_f = Consumo unitario por lámpara LFCA (kWh/luminaria*año)

Electrodomésticos

Equipo/aparato	S_{Ecd}	CU_{Ec} (kWh/equipo)	E_T (kWh/año)
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	1	1.055	385.00
Lavadora	1	0.343	125.07
Televisión plasma (30-39 pul)	2	1.610	587.33
Computadora (laptop)	1	0.120	43.78
Plancha	1	0.571	208.45
Total			1,349.62

Donde:

E_T = Consumo eléctrico por electrodomésticos (kWh/equipo*año)
 S_{Ecd} = Número de electrodomésticos por departamento
 CU_{Ec} = Consumo unitario por electrodoméstico (kWh/equipo)

Porcentaje del consumo eléctrico	Uso final	Consumo anual (kWh)	Consumo anual (MJ)
11.50%	Iluminación	175.44	631.58
63.25%	Equipos electrodomésticos	964.62	3,472.63
25.24%	Refrigerador	385.00	1,386.00
	Total anual	1,525.06	5,490.21
	Consumo bimestral	254.18	915.04

Especificaciones de equipos/aparatos:

Electrodomésticos

Refrigerador-congelador 11.3 pies Marca Daewoo modelo DFR-32210GN
 Lavadora automática marca Winia modelo DWF-DG241AWW3 16 kg carga superior
 TV Plasma 32LG6000-ZA
 Computadora marca Lenovo modelo 82H00013LM 4GB

Iluminación

Lámpara incandescente 40W, base E26, eficacia luminosa 12.25 lm/W, TCC 3000 K, 490 lm, vida útil 1000 hrs., y medida de alto 900mm.

Potencia (W)	40.00
Cantidad	2.00
Vida útil (horas)	1,000.00
Precio unitario	\$13.00
Horas de uso diario promedio	2.19
7 días a la semana	15.30
4.33 semanas	66.26
Vida útil estimada (meses)	15.09

Lámpara fluorescente compacta 20W autobalastada, base E27, eficacia luminosa 60 lm/W, CRI 82, TCC 6500 K, 1200 lm, vida útil de 10000 hrs., y medida de alto 244 mm.

Potencia (W)	20.00
Cantidad	5.00
Vida útil (horas)	10,000.00
Precio unitario	\$65.00
Horas de uso diario	2.19
7 días a la semana	15.30
4.33 semanas	66.26
Vida útil estimada (meses)	150.93

ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DEL CEV
CON RELACIÓN AL IMPACTO EN EMISIONES INDIRECTAS POR USOS FINALES

Caso base-análisis energético depto tipo							
Usuarios/depto	4.00						
Consumo bimestral	4,197 MJ/depto			84.78 kg/depto			
Datos				Consumo por uso final			
Aparato	Consumo promedio (kg/h)*	Cantidad	Horas de uso diario promedio	Aparato	Consumo unitario (kg/día)	Consumo (kg/mes)	Consumo (kg/año)
Calentador de agua de almacenamiento ^a	0.50	1	2.5	Calentador	1.24	37.77	453.26
Estufa de piso 6 quemadores, 1 horno ^b	0.07	1	2.25	Estufa	0.15	4.62	55.40
				Depto tipo			
				Uso final	Consumo anual (kg)	Consumo anual (kJ)	Consumo anual (MJ)
				Porcentaje del consumo térmico			
Conversión m ³ a kg de gas LP				10.89%	Cocción	55.40	2,742,654
	1 m3	2.0454 kg gas LP		89.11%	Calentamiento de agua	453.26	22,438,443
	0.033 m3	0.07 kg gas LP			Total anual	508.67	25,181,097
Conversión litros a kg de gas LP							
	1 litro	0.54 kg gas LP					
	litro	0.00 kg gas LP					
					Consumo bimestral	84.78	4,196,850
							4,197

Especificaciones de equipos/aparatos:

^a Calentador de almacenamiento marca Guardián modelo GA-DEP-060LP. Gas LP. Carga Térmica 3.2 kW. Número de servicios 1.5, capacidad 58 litros, medidas: 92.5 cm alto, 33 cm diámetro, peso 20.3 kg. Aislante térmico de espuma de poliuretano. Encendido piezoeléctrico. Tiempo de recuperación 27 min.

^b Estufa de piso, 6 quemadores, 1 horno, encendido manual. Marca mabe modelo EM 7647 BSIS0A. Capacidad de horno 12,387 kJ/h. Eficiencia 56%
Poder calorífico nominal gas L.P. (MJ/kg) 46318
Promedio nacional densidad del gas LP = 0.540 de kilogramo por litro. Comisión Reguladora de Energía (CRE)
Calentadores de gas más comunes (ENCEVI, 2018) el 29% reporta de 38 a 40 litros (2 personas)

* Consumo de gas LP para estufas de piso según cifras reportadas en el estudio de calidad de estufas de gas y parrillas. Modelos analizados: 13. Ciclos de prueba 30 min.
Consumo de gas LP para calentador de almacenamiento según cifras reportadas en el estudio de calidad de calentadores de agua de uso doméstico. Modelos analizados: 33.
Ambos elaborados por el Laboratorio Nacional de Protección de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) y publicados en la Revista del consumidor, 2011.

Ac
Go

Anexo 2 Cálculo energético depto. tipo para Escenario 01

Escenario 01-análisis energético depto tipo
Usuarios/depto 4.00
Consumo bimestral 516.39 MJ/depto 143.44 kWh/depto

Dato	Potencia unitaria (W)	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Lámparas			
Espacio			
Habitación 1	20	1	2.28
Habitación 2	20	1	2.28
Cocina	20	1	2.55
Sala/comedor/pasillo	20	3	2.5
Baño	20	1	1.32
Total		7	

Dato	Potencia unitaria (W)	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Electrodomésticos			
Equipo/aparato			
Refrigerador	38	1	24
Lavadora	590	1	4hr /semana
Televisión plasma color (32 pul)	28	2	3.5
Computadora (laptop)	23	1	4
Plancha	1000	1	4hr /semana

Consumo por uso final

Iluminación	S_{Ba}	CU_L (kWh/luminaria)	S_{Pa}	CU_L (kWh/luminaria)	E_L diario (kWh)	Mensual CU_L	Mensual CU_L	E_L (kWh/mensual)	E_L (kWh/año)	Ahorro (kWh/año)
Lámpara fluorescente compacta 20W	0.00	0.00	7.00	0.31	0.31	0.00	0.30	0.30	111.64	63.80

Donde:

E_L = Consumo eléctrico por iluminación
 S_{Ba} = Número de lámparas incandescentes por departamento
 CU_L = Consumo unitario por lámpara incandescente (kWh/luminaria*año)
 S_{Pa} = Número de LFCA por departamento
 CU_L = Consumo unitario por lámpara LFCA (kWh/luminaria*año)

Electrodomésticos

Equipo/aparato	S_{Eca}	CU_{Eca} (kWh/equipo)	E_T (kWh/año)	Consumo máximo según NOM ENER	Ahorro (kWh/año)
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	1	0.858	313.00	317.7 (kWh/año)	72.00
Lavadora	1	0.337	123.00	190 (kWh/año)	2.00
Televisión plasma color (30-39 pul)	2	0.195	70.99	1W	516.34
Computadora (laptop)	1	0.092	33.56	1W *	10.21
Plancha	1	0.571	208.45		0.00
Total			749.00		600.62

Donde:

E_T = Consumo eléctrico por electrodomésticos (kWh/equipo*año)
 S_{Eca} = Número de electrodomésticos por departamento
 CU_{Eca} = Consumo unitario por electrodoméstico (kWh/equipo)
 * Potencia eléctrica máxima en modo de espera (W)

Porcentaje del consumo eléctrico	Uso final	Consumo anual (kWh)	Consumo anual (MJ)
12.97%	Iluminación	111.64	401.92
50.66%	Equipos electrodomésticos	436.00	1,569.81
36.37%	Refrigerador	313.00	1,128.79
	Total anual	860.64	3,098.32
	Consumo bimestral	143.44	516.39
	Ahorro bimestral	110.74	398.65
	% de ahorro respecto al caso base	43.57%	

Especificaciones de equipos/aparatos:

Electrodomésticos

Refrigerador-congelador 11.1 pies Marca LG modelo LT32WPP
 Lavadora automática Marca Samsung modelo WA19J6750LV 16 kg carga superior 10490
 TV NEC - E327 Direct-lit LED Resolución 1080p. Potencia en modo de espera 0.5 W
 Computadora marca Samsung modelo XE520QAB-K03US 4 GB

Iluminación

Lámpara fluorescente compacta 20W autobalastada, base E27, eficacia luminosa 80 lm/W, CRI 82, TCC 6500 K, 1200 lm, vida útil de 10000 hrs., y medida de alto 244 mm.

Potencia (W)	20.00
Cantidad	7.00
Vida útil (horas)	10,000.00
Precio unitario	\$85.00
Horas de uso diario	2.19
7 días a la semana	15.30
4.33 semanas	66.26
Vida útil estimada (meses)	150.93

ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DEL CEV CON RELACIÓN AL IMPACTO EN EMISIONES INDIRECTAS POR USOS FINALES

Escenario 01-análisis energético depto tipo

Usuarios/depto 4.00
Consumo bimestral 3,583 MJ/depto 72.38 kg/depto

Datos	Consumo promedio (kg/h)*	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Aparato			
Calentador de agua de almacenamiento ^a	0.44	1	2.5
Estufa de piso 6 quemadores, 1 horno ^b	0.04	1	2.25

Consumo por uso final	Consumo unitario (kg/día)	Consumo (kg/mes)	Consumo (kg/año)	Ahorro (kg/año)
Aparato				
Calentador	1.09	33.11	397.33	55.93
Estufa	0.10	3.08	36.94	18.47

Conversión m ³ a kg de gas LP	Cantidad	kg gas LP
1 m ³	2.0454	kg gas LP
0.213 m ³	0.44	kg gas LP
0.022 m ³	0.04	kg gas LP

Conversión litros a kg de gas LP	Cantidad	kg gas LP
1 litro	0.54	kg gas LP
litro	0.00	kg gas LP

Depto tipo	Consumo anual (kg)	Consumo anual (kJ)	Consumo anual (MJ)
Uso final			
Cocción	36.94	1,828,436	1,828
Calentamiento de agua	397.33	19,669,539	19,670
Total anual	434.27	21,497,975	21,498
Consumo bimestral	72.38	3,582,996	3,583
Ahorro bimestral	12.40	613,853.65	613.85
% de ahorro respecto al caso base	14.63%		

Especificaciones de equipos/aparatos:

^a Calentador de depósito marca Cinsa modelo CL-151. Gas L.P. Carga Térmica 3 kW. Número de servicios 1.5, capacidad 59 litros, medidas: 118 cm alto, 35 cm diámetro, peso 32 kg. Aislante térmico de espuma de poliuretano. Encendido chispa o piezoeléctrico. Tiempo de recuperación 30 min. Eficiencia 77%

De acuerdo con la NOM-003-ENER-2021, porcentaje de eficiencia térmica mínima es 74% para calentadores de almacenamiento con capacidades de 40 L o menos, de 75% cuando sea entre 40 L y 62 L y de 77% para capacidades de 62 a 106 L.

^b Estufa de Piso, 6 quemadores, 1 horno, encendido electrónico. marca Mabe modelo EM7651NN0. Capacidad de horno 11,106 kJ/h. Eficiencia 60%

De acuerdo con la NOM-025-ENER-2013, con un porcentaje de eficiencia térmica de quemadores de mínimo 45% para capacidades térmicas de hasta 11,500 kJ/h, y mínimo 30% para más de 11,500 kJ/h.

* Consumo de gas LP para estufas de piso según cifras reportadas en el estudio de calidad de estufas de gas y parrillas. Modelos analizados: 13. Ciclos de prueba 30 min.

Consumo de gas LP para calentador de almacenamiento según cifras reportadas en el estudio de calidad de calentadores de agua de uso doméstico. Modelos analizados: 33.

Ambos elaborados por el Laboratorio Nacional de Protección de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) y publicados en la Revista del consumidor, 2011.

Anexo 3 Cálculo energético depto. tipo para Escenario 02

Escenario 02-análisis energético depto tipo			
Usuarios/depto	4.00		
Consumo bimestral	468.03 MJ/depto	130.01 kWh/depto	
Datos			
Lámparas	Potencia unitaria (W)	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Espacio			
Habitación 1	7	1	2.28
Habitación 2	7	1	2.28
Cocina	7	1	2.55
Sala/comedor/pasillo	7	3	2.5
Baño	7	1	1.32
Total		7	
Electrodomésticos			
Equipo/aparato	Potencia unitaria (W)	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Refrigerador	38	1	24
Lavadora	561	1	4hr /semana
Televisión plasma color (32 pul)	28	2	3.5
Computadora (laptop)	23	1	4
Panchar	1000	1	4hr /semana

Consumo por uso final									
Iluminación	S ₉₉	CU ₉ (kWh/luminaria)	S ₉₉	CU ₂ (kWh/luminaria)	E ₁ diario (kWh)	Mensual CU ₁	Mensual E ₁ (kWh/mensual)	E ₁ (kWh/año)	Ahorro (kWh/año)
Foco LED 7W (equivalente a 60W foci)	0.00	0.00	7.00	0.11	0.11	0.00	3.25	3.25	39.08
Donde: E ₁ = Consumo eléctrico por iluminación S ₉₉ = Número de lámparas incandescentes por departamento CU ₉ = Consumo unitario por lámpara incandescente (kWh/luminaria/año) S ₉₉ = Número de lámparas LED por departamento CU ₂ = Consumo unitario por lámpara LED (kWh/luminaria/año)									
Electrodomésticos									
Equipo/aparato	S ₉₉	CU ₉ (kWh/equipo)	E ₁ (kWh/año)	Consumo máximo según NOM ENER	Ahorro (kWh/año)				
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	1	0.853	311.00	317.7 (kWh/año)	74.00				
Lavadora	1	0.321	116.98	160 (kWh/año)	8.09				
Televisión plasma color (30-39 pul)	2	0.195	70.99	1W *	516.34				
Computadora (laptop)	1	0.062	33.56		10.21				
Panchar	1	0.571	208.45		0.00				
Total			740.98		608.64				
Donde: E ₁ = Consumo eléctrico por electrodomésticos (kWh/equipo/año) S ₉₉ = Número de electrodomésticos por departamento CU ₉ = Consumo unitario por electrodoméstico (kWh/equipo) * Potencia eléctrica máxima en modo de espera (W); NOM-032-ENER-2013									
Depto tipo									
Uso final	Consumo anual (kWh)	Consumo anual (MJ)							
Iluminación	30.08	140.67							
Equipos electrodomésticos	429.98	1,547.92							
Refrigerador	311.00	1,116.81							
Total anual	780.06	2,898.20							
Consumo bimestral	130.01	468.03							
Ahorro bimestral	124.17	447.00							
% de ahorro respecto al caso base	48.95%								

Especificaciones de equipos/aparatos:

Electrodomésticos

Refrigerador-congelador 11.5 pies Marca Vissani modelo MDTF12SS
Lavadora automática Marca LG modelo WT7300C 16kg carga superior
TV NEC - E327 Direct-lit LED Resolución 1080p. Potencia en modo de espera 0.5 W
Computadora marca Samsung modelo XE520QAB-K03US 4 GB

Iluminación

Foco LED 7W (equivalente a 60W foco incandescente), base E26, eficacia luminosa 71.4 lm/W, CRI 93, TCC 2700 K, 1200 lm, vida útil de 25000 hrs., y medida de alto 112 mm.

Potencia (W)	7.00
Cantidad	7.00
Vida útil (horas)	25,000.00
Precio unitario	\$85.60
Horas de uso diario promedio	2.19
7 días a la semana	15.30
4.33 semanas	66.26
Vida útil estimada (meses)	377.31

Escenario 02-análisis energético depto tipo			
Usuarios/depto	4.00		
Consumo bimestral	1,825 MJ/depto	36.87 kg/depto	
Datos			
Aparato	Consumo promedio (kg/h)*	Cantidad	Horas de uso diario promedio
Calentador de agua de almacenamiento ^a	0.22	1	2.5
Estufa de piso 6 quemadores, 1 horno ^b	0.03	1	2.25
Consumo por uso final			
Aparato	Consumo unitario (kg/día)	Consumo (kg/mes)	Consumo (kg/año)
Calentador	0.54	16.48	197.73
Estufa	0.06	1.96	23.50
Ahorro (kg/año)			
			255.53
			31.90
Depto tipo			
Uso final	Consumo anual (kg)	Consumo anual (kJ)	Consumo anual (MJ)
Cocción	23.50	1,163,550	1,164
Calentamiento de agua	197.73	9,789,597	9,789
Total anual	221.24	10,952,147	10,952
Consumo bimestral	36.87	1,825,358	1,825
Ahorro bimestral	47.90	2,371,491.67	2,371
% de ahorro respecto al caso base	56.51%		
Conversiones			
Conversión m³ a kg de gas LP			
	1 m ³	2.0454 kg gas LP	
	0.106 m ³	0.22 kg gas LP	
	0.014 m ³	0.03 kg gas LP	
Conversión litros a kg de gas LP			
	1 litro	0.54 kg gas LP	
	litro	0.00 kg gas LP	

Especificaciones de equipos/aparatos:

^a Calentador de depósito marca Bosch modelo Classic Clic 40. Gas LP. Carga Térmica 2.8 kW. Número de servicios 1, capacidad 40 litros, medidas: 92 cm alto, 33 cm diámetro, peso 32 kg. Aislante térmico de espuma de poliuretano. Sin piloto. Tiempo de recuperación 24 min. Eficiencia 79%

De acuerdo con la NOM-003-ENER-2021, porcentaje de eficiencia térmica mínima es 74% para calentadores de almacenamiento con capacidades de 40 L o menos, de 75% cuando sea entre 40 L y 62 L y de 77% para capacidades de 62 a 106 L.

^b Estufa de Piso, 6 quemadores, 1 horno, encendido electrónico. marca Koblenz modelo EK-34G. Capacidad de horno 12,814 kJ/h. Eficiencia 62% De acuerdo con la NOM-025-ENER-2013, con un porcentaje de eficiencia térmica de quemadores de mínimo 45% para capacidades térmicas de hasta 11,500 kJ/h, y mínimo 30% para más de 11,500 kJ/h.

* Consumo de gas LP para estufas de piso según cifras reportadas en el estudio de calidad de estufas de gas y parrillas. Modelos analizados: 13. Ciclos de prueba 30 min. Consumo de gas LP para calentador de almacenamiento según cifras reportadas en el estudio de calidad de calentadores de agua de uso doméstico. Modelos analizados: 33. Ambos elaborados por el Laboratorio Nacional de Protección de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) y publicados en la Revista del consumidor, 2011.

Anexo 4 Equivalencias y referencias de equipos

Equivalencias

1 kilogramo de gas LP equivale a 1.785 litros

1 litro de gas LP equivale a 0.54 kg

1 kilogramo de gas LP equivale a 11,823.86 kcal. (mezcla nacional)

1 metro cúbico de gas natural equivale a 8,967.6 kilocalorías

1 kilocaloría equivale a 4.1868 kJ

1 kJ equivale a 238.84589662750 calorías

1 kJ equivale a 0.277777777778 watts-hora

1 barril equivale a 158.98730272810 litros

1 metro cúbico equivale a 6.2898104 barriles

1 metro cúbico equivale a 2.0454 kg/gas LP

1 gigajoule (GJ) equivale a 1000 megajoule (MJ)

1 terajoule (TJ) equivale a 1000000 megajoule (MG)

1 terajoule (TJ) equivale a 23.88 tonelada de petróleo equivalente

1 megajoule (MJ) equivale a 0.0000238845897 tonelada de petróleo equivalente (tep)

1 megajoule (MJ) equivale a 0.277777777778 kilowatt-hora

Fuente: Comisión Reguladora de Energía (CRE), Sener 2012; SENER Sistema de Información Energética, 2022

<https://www.biee-conuee.net/previsions/database/>

<https://www.energystar.gov/productfinder/>

<https://www.profeco.gob.mx/precios/canasta/home.aspx?th=1> (Ciudad de México y área metropolitana)

<https://www.gob.mx/profeco/documentos/comparativo-de-precios-de-estufas-de-gas>

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/332343/EC_Refrigeradores_Domesticos_.pdf

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/119173/Estudio_Estufas_de_Gas_42-55_Julio_2011.pdf

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/100448/RC442_Estudio_Calidad_Televisores.pdf

https://energypedia.info/images/c/c7/Sustituci%C3%B3n_lavadoras_2013.pdf

https://energypedia.info/images/1/17/Actualizaci%C3%B3n_programa_sustituci%C3%B3n_CSA_2015.pdf

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/100438/RC435_Estudio_Lavadoras_Automaticas.pdf

<https://www.gob.mx/profeco/documentos/grandes-electrodomesticos-lavadoras?state=published>

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/119180/Estudio_Calentadores_de_agua_48-65_Noviembre_2011.pdf

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082616300473?via%3Dihub>

<http://portal.ruv.org.mx/wp-content/uploads/2019/08/VVINC-Sisevive-Ecocasa2017.pdf>

<https://www.inegi.org.mx/app/preciospromedio/?bs=18>

https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/GUIAS/Municipios/CatalogoDeTecnologias_V1.00.pdf

ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DEL CEV
CON RELACIÓN AL IMPACTO EN EMISIONES INDIRECTAS POR USOS FINALES

Anexo 7 Evaluación económica con horizonte de proyecto de 240 meses y reinversiones

Datos			
Vida útil restante de edificación (años); considerando su	20.00	240.00	(meses)
Vida útil edificación (años)	82.00	984.00	(meses)
Vida promedio de equipos analizados (años)	12.50	153.00	(meses)
Tasa de rendimiento mínima atractiva	12.00% *		
Inversión por cumplimiento de NOM-020-ENER	\$5,802.26 **		
Caso Base			
Costos de equipos:			
Calentador Cinsa	\$2,850.00		
Estufa	\$8,999.00		
Refrigerador	\$9,140.00		
Iluminación (5 incandescentes)	\$65.00		
Iluminación (2 LFC)	\$130.00		
Lavadora	\$8,009.32		
Computadora	\$3,999.00		
Plancha	\$395.00		
Inversión equipos	\$33,587.32		
Escenario 01			
Ahorros anuales	\$3,268.63		
Ahorros mensuales	\$272.39		
Costos de equipos:			
Calentador Cinsa	\$5,976.00		
Estufa	\$9,370.50		
Refrigerador	\$10,325.13		
Iluminación (7 LFC)	\$455.00		
Lavadora	\$9,183.88		
TV	\$4,597.20		
Computadora	\$6,384.93		
Plancha	\$395.00		
Inversión equipos+ sistema	\$13,100.32		
Re-Inversión equipos+ sistema	\$4,101.39		
Tiempo simple de recuperación (meses)	84		
Tiempo simple de recuperación (años)	7		
Valor presente de ahorros	\$24,737.91		
Valor presente de inversiones	\$23,003.98		
Valor presente neto	\$1,224.71		
Anualidad de inversión	(\$253.29)		
Anualidad "meta" de inversión (beneficios)	\$13.49		
B/C	1.08		
Diferencia de anualidad de inversión y ahorros a valor pr	\$19.09		
TIR	13.17%		
Escenario 02			
Ahorros anuales	\$7,289.49		
Ahorros mensuales	\$607.46		
Costos de equipos:			
Calentador Cinsa	\$6,569.65		
Estufa	\$11,132.33		
Refrigerador	\$11,571.16		
Iluminación (7 LED)	\$599.00		
Lavadora	\$10,380.82		
TV	\$4,597.20		
Computadora	\$6,384.93		
Plancha	\$395.00		
Inversión	\$18,022.77		
Inversión equipos+ sistema	\$23,825.03		
Re-Inversión equipos+ sistema	\$3,226.21		
Tiempo simple de recuperación (meses)	91		
Tiempo simple de recuperación (años)	8		
Valor presente de ahorros	\$55,168.92		
Valor presente de inversiones	\$27,051.25		
Valor presente neto	\$0.00		
Anualidad de inversión	\$297.86		
Anualidad "meta" de inversión (beneficios)	\$0.00		
B/C	2.04		
Diferencia de anualidad de inversión y ahorros a valor pr	\$309.60		
TIR	29.35%		

Periodo	Escenario 01	Escenario 02	Escenario 03	Escenario 04
1	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
2	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
3	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
4	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
5	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
6	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
7	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
8	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
9	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
10	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
11	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
12	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
13	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
14	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
15	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
16	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
17	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
18	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
19	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
20	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
21	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
22	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
23	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
24	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
25	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
26	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
27	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
28	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
29	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
30	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
31	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
32	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
33	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
34	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
35	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
36	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
37	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
38	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
39	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
40	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
41	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
42	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
43	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
44	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
45	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
46	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
47	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
48	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
49	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
50	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
51	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
52	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
53	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
54	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
55	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
56	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
57	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
58	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
59	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
60	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
61	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
62	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
63	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
64	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
65	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
66	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
67	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
68	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
69	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
70	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
71	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
72	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
73	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
74	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
75	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
76	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
77	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
78	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
79	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
80	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
81	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
82	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
83	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
84	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
85	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
86	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
87	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
88	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
89	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
90	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
91	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
92	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
93	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
94	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
95	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
96	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
97	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
98	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
99	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
100	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
101	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
102	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
103	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
104	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
105	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
106	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
107	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
108	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
109	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
110	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
111	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
112	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
113	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
114	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
115	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
116	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
117	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
118	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
119	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
120	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
121	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
122	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
123	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
124	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
125	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
126	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
127	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
128	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
129	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
130	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
131	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
132	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
133	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
134	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
135	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
136	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
137	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
138	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
139	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
140	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
141	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
142	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
143	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
144	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
145	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
146	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
147	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
148	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
149	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
150	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
151	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
152	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
153	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
154	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
155	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
156	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
157	2772.00	2772.00	2772.00	2772.00
158	2772.00	2772.00		