

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE PRESUPUESTOS DE CARBONO Y RUTAS DE DESCARBONIZACIÓN

para la acción climática en el sector eléctrico de Yucatán



El presente documento muestra los resultados del proyecto Desarrollo e Implementación de Presupuestos de Carbono y Rutas de Descarbonización para el sector energía eléctrica que contribuyan a la armonización entre la política de cambio climático y energía sustentable en Jalisco y Yucatán. El reporte es resultado de un proceso de colaboración entre la Iniciativa Climática de México (ICM) y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) a través del proyecto Convergencia de la Política Energética y de Cambio Climático en México (CONECC), el cual forma parte de la Iniciativa Internacional de Protección del Clima (IKI), y en coordinación con la Secretaría de Fomento Económico y Trabajo (SEFOET) del estado de Yucatán. El Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) apoya esta iniciativa con base en la decisión adoptada por el parlamento alemán. Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de las personas autoras y no necesariamente representan la opinión de la GIZ o de la Iniciativa Climática de México. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando sea sin fines de lucro y se cite la fuente de referencia.

GIZ México / Iniciativa Climática de México

Desarrollo e implementación de Presupuestos de Carbono y Rutas de Descarbonización para la acción climática en el sector eléctrico de Yucatán, 2021.

Supervisión y coordinación

Dahely Castelán, Quentin Bayart, Juan Carlos Mendoza y Felipe Borja

Elaboración

Melissa Chavana, Fernando Ramones y Mariano Birlain

Diseño

Laguna · www.lagunadentro.com

Maquetación

Constanza Miranda Ruiz y Paulo Alcocer Miller

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-565760 Eschborn/Alemania

www.giz.de

Oficina de Representación de la GIZ en México

Torre Hemicor, PH

Av. Insurgentes Sur 826

Col. del Valle, Benito Juárez

C.P. 03100, Ciudad de México

T +52 55 55 36 23 44

giz-mexiko@giz.de

Iniciativa Climática de México

Amores 1120, oficina 102

Col. del Valle, Benito Juárez

C.P. 03100, Ciudad de México

www.iniciativaclimatica.org

Las y los autores agradecen el apoyo en la elaboración de este informe a Quentin Bayart, Camila Ramírez Rea, a la Mtra. Mirelle Segovia, al equipo de la Secretaría de Fomento Económico y Trabajo y de la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Yucatán.

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE
PRESUPUESTOS DE CARBONO
Y RUTAS DE DESCARBONIZACIÓN
para la acción climática en el sector eléctrico de Yucatán

ÍNDICE

Resumen Ejecutivo	9
1. Introducción	11
1.1. Estructura	11
2. Definición de los conceptos relevantes	13
3. Experiencias internacionales en presupuestos de carbono y rutas de descarbonización a nivel subnacional	15
3.1. Experiencias internacionales en presupuesto de carbono	15
3.2. Lecciones aprendidas: presupuestos de carbono	17
3.3. Experiencias internacionales en rutas de descarbonización	18
3.4. Lecciones aprendidas: rutas de descarbonización nacionales y subnacionales	21
4. Marco legal y estratégico en materia energía-clima	23
4.1. Plan Estatal de Desarrollo 20182024	23
4.2. Programa Especial Acción por el Clima	24
4.3. Programa Especial de Innovación, conocimiento y tecnología y el Programa de Mediano Plazo: Yucatán con economía inclusiva	24
4.4. Programas Regionales 20192024	25
4.5. Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán y el Reglamento de la Ley de Desarrollos Inmobiliarios del Estado de Yucatán	25
4.6. Acuerdo entre gobernadores de la península de Yucatán en materia de cambio climático	25
4.7. Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Yucatán	26
5. Metodología	27
6. Resultados	31
6.1. Presupuesto de carbono y metas de mitigación del sector eléctrico	31
6.2. Ruta de descarbonización para el sector eléctrico	32
6.2.1. Catálogo de medidas identificadas	33
6.2.2. Implicaciones y evaluación crítica de los resultados	46
7. Recomendaciones	51
7.1. Realizar programas de difusión y sensibilización continuos	51
7.2. Implementar un sistema de monitoreo, reporte y verificación	51
7.3. Fortalecer el marco jurídico para una Política de Presupuesto de Carbono	52
7.4. Recuperar el desarrollo de la economía posterior a la pandemia de COVID-19	52
8. Conclusiones	53
9. Referencias	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Presupuesto de carbono del Reino Unido	19
Tabla 2: Emisiones totales de GEI del Estado de Yucatán para el año 2005 por sectores.	26
Tabla 3: Emisiones totales de gei del sector Energía del estado de Yucatán para el año 2005.	26
Tabla 5: Capacidad instalada de energía eléctrica por Tecnología.	32
Tabla 6: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector público.	34
Tabla 7: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector público.	35
Tabla 8: Potencial de mitigación de medidas de usuario calificado en el estado de Yucatán.	36
Tabla 9: Potencial de mitigación de medidas de generación distribuida en el sector público.	36
Tabla 10: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por sustitución de motores eficientes.	37
Tabla 11: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por implementación de ASD.	38
Tabla 12: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por sustitución de refrigeradores eficientes.	38
Tabla 13: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por eliminación de fugas en aire comprimido.	39
Tabla 14: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por sustitución de focos LED.	39
Tabla 15: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por implementación de aparatos para control de demanda.	40
Tabla 16: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en sector industrial por implementación de ASD.	40
Tabla 17: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector comercial por sustitución de aires acondicionados.	41
Tabla 18: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector comercial por sustitución de focos ahorradores LED.	41
Tabla 19: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector comercial por la instalación de aparatos para control de demanda.	42
Tabla 20: Potencial de mitigación de generación distribuida en el sector comercial.	43
Tabla 21: Potencial de mitigación por medio de la sustitución de calentadores solares en el sector residencial.	44

Tabla 22: Potencial de mitigación por medio de la sustitución de refrigeradores de más de 10 años en el sector residencial.	44
Tabla 23: Potencial de mitigación por medio de la sustitución de aires acondicionados de más de 10 años en el sector residencial.	45
Tabla 24: Potencial de mitigación por medio de la generación distribuida en el sector residencial.	46
Tabla 25: Resumen del catálogo de medidas de mitigación para el estado de Yucatán	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trayectoria del estado de Yucatán para alcanzar una TMG de 1.5°C	28
Figura 2: Propuesta de metas de mitigación del estado para el periodo 2020-2050 para mantener la TMG en 1.5°C	29
Figura 3: Resumen de metodología de cálculo del presupuesto de carbono para el sector eléctrico desarrollado por ICM.	30
Figura 4: Propuesta de metas de mitigación del sector eléctrico estatal para el periodo 2020-2060 para mantener la TMG en 1.5°C.	31
Figura 5: Consumo de energía eléctrica en 2019 en el estado de Yucatán.	32
Figura 6: Potencial de Mitigación para el estado de Yucatán.	47

Desde 2019, el proyecto *Desarrollo e implementación de Presupuestos de Carbono y Rutas de Descarbonización para el sector energía eléctrica que contribuyan a la armonización entre la política climática y energética en Jalisco y Yucatán* trabaja con el objetivo principal de brindar elementos metodológicos y de asesoría jurídica para la maduración e implementación de estos dos conceptos. Este reporte engloba un análisis de las estimaciones subnacionales de presupuesto de carbono y las rutas de descarbonización del sector eléctrico de Yucatán, además de sintetizar casos de estudio internacionales que podrían inspirar medidas y políticas públicas de mitigación de cambio climático. Simultáneamente, presenta la revisión de los instrumentos de planeación, normativas e inventarios de gases de efecto invernadero que posee el estado de Yucatán, así como la relación que éstos tienen con instrumentos nacionales y acuerdos internacionales.

De acuerdo con la estimación de presupuesto de carbono, se proponen también metas de mitigación para el sector eléctrico de Yucatán para los años 2030, 2040, 2050 y 2060 hasta lograr alcanzar su descarbonización total. **Se identificó que al sector eléctrico del estado de Yucatán le corresponde un presupuesto de carbono de 34.72 MtCO₂e para el período 2019-2100 alineado a un incremento de la temperatura media global en 1.5°C.** De igual manera, se encontró que el límite de emisiones que el estado debe de procurar para los años 2024, 2030 y 2050 corresponde a 1.97, 1.67 y 0.57 MtCO₂e respectivamente. **De no mitigar sus emisiones, la tendencia actual llevaría a que el sector eléctrico en Yucatán agote su presupuesto asignado en el año 2030, generando un total acumulado de 160.63 MtCO₂e para el año 2060.**

Previo a la elaboración de la ruta de descarbonización eléctrica de Yucatán, se realizó un diagnóstico de infraestructura de generación, consumo eléctrico, potencial de energías renovables, así como un análisis del balance de energía estatal para la identificación de pérdidas generadas por la transformación y distribución. El diagnóstico del sector eléctrico realizado para el año 2019 indicó que el sector industrial fue responsable del 45.03% de la energía eléctrica consumida por Yucatán, seguido por el sector residencial con 40.45%, el sector comercial con 9.44% y el sector público con 2.78%.

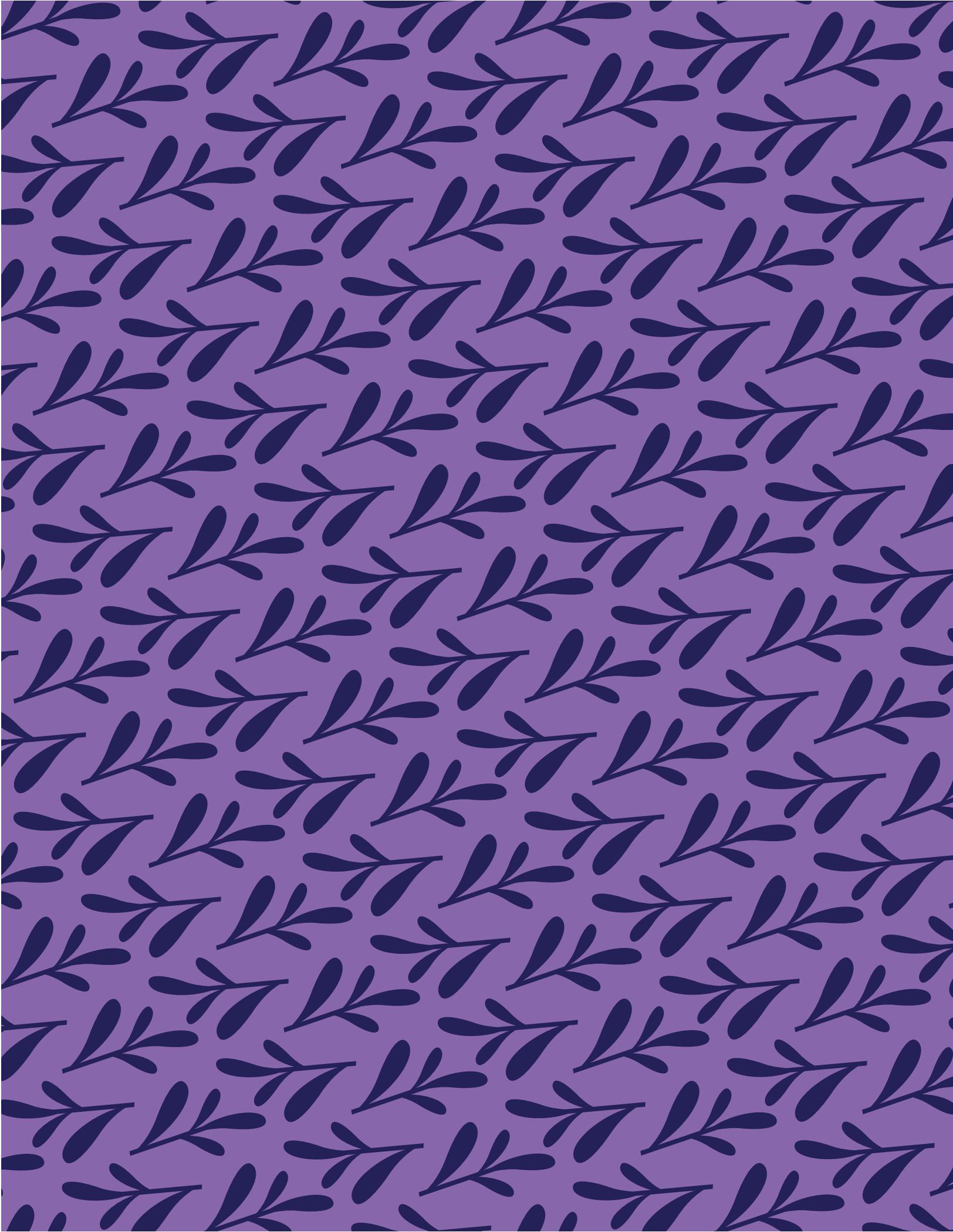
A partir de la detección de los sectores con mayor consumo eléctrico, se propuso una ruta de descarbonización, compuesta de un catálogo de 21 medidas de mitigación,

que incluyen 19 medidas de eficiencia energética y la implementación de la generación distribuida con tecnología fotovoltaica en los sectores residencial, comercial e industrial; así como la de “usuario calificado”, la cual propone que el sector público adquiera suministro eléctrico directamente del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) mediante el registro de sus edificios ante la Comisión Reguladora de Energía (CRE) a través de un suministrador de servicios calificados (SSC) que ofrezca “tarifas verdes”, mediante las cuales se certifica un mayor suministro de energías limpias al consumidor.

Dichas medidas fueron contextualizadas para el estado de Yucatán, según las necesidades de cada uno de los sectores mencionados. Este proceso implicó estudios de factibilidad técnica y financiera para evaluar diferentes aspectos como lo son: el potencial de mitigación a mediano y largo plazo; el costo de inversión; el beneficio total de mitigación; así como la cuantificación de co-beneficios traducidos en generación de empleos. Alineado a lo anterior, se realizaron talleres de sensibilización con diferentes actores clave de Yucatán para evaluar la factibilidad de la implementación del catálogo de medidas y fomentar el proceso participativo en el desarrollo de nuevos instrumentos públicos en materia de cambio climático.

La implementación de la ruta de descarbonización propuesta para el sector eléctrico de Yucatán permitiría alcanzar la descarbonización total del sector eléctrico en el año 2029. Mientras que hacia el año 2060, el nivel de mitigación podría continuar a un ritmo de 13.39 MtCO₂e evitadas anualmente.

Finalmente, se presentan una serie de recomendaciones para la implementación de la Ruta de Descarbonización del sector eléctrico en Yucatán. Dentro de estas recomendaciones se encuentran el llevar a cabo programas de difusión y sensibilización continuos, con el objetivo de darle mayor exposición al tópico del cambio climático y lograr una participación integral en la sociedad en Yucatán; aplicar sistemas de monitoreo, reporte y verificación que garanticen la correcta implementación de las medidas de mitigación del sector eléctrico en el estado; fortalecer el marco jurídico estatal para que pueda adoptar una política de presupuesto de carbono y desarrollar programas que consideren la mitigación de emisiones como una propuesta de valor ante la recuperación económica post-COVID-19.



1. INTRODUCCIÓN

El Acuerdo de París para el cambio climático establece la necesidad de “(...) mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y continuar con los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5°C” (UNFCCC, 2015). En consecuencia, el Estado Mexicano se comprometió a reducir de manera no condicionada el 22% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el 2030 con respecto a las emisiones de un escenario de línea base a través de sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés), considerando una serie de medidas con potenciales de mitigación específicos.

Sin embargo, el agregado mundial de las NDC vigentes es insuficiente para cumplir el objetivo menos ambicioso de 2°C del Acuerdo de París (Roelfsema *et al.* 2020, UNFCCC, 2021). Al mismo tiempo, México necesitaría fortalecer de manera importante sus objetivos para que éstos se alineen a las metas de 2°C y 1.5°C (WRI, 2021). Lo anterior abre la puerta al diseño e instrumentación de acciones más ambiciosas por parte de las administraciones mexicanas en los distintos niveles de gobierno.

En 2019, el proyecto “Convergencia de la Política Energética y de Cambio Climático en México” (CONECC), de la Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable en México (GIZ), brindó acompañamiento técnico a la Iniciativa Climática de México (ICM) en el análisis y validación de una metodología para la estimación de presupuestos de carbono del sector eléctrico. El resultado de dicha cooperación fue el documento *Presupuestos de Carbono: Una Oportunidad para Ampliar la Ambición Climática del Sector Eléctrico*, que tuvo el objetivo de contribuir a los esfuerzos de planeación transversal que permitan alinear la política energética y climática del país con las metas internacionales. El documento presentó una primera estimación de presupuestos de carbono para México y para el sector eléctrico, alineado a una trayectoria que mantuviera la temperatura media global (TMG) por debajo de los 2°C y con algunos elementos para un escenario de 1.5°C (Ramones *et al.*, 2019).

Durante el 2019, en el marco de la Alianza de Gobernadores Mexicanos por el Clima, los Gobiernos Estatales se comprometieron a establecer compromisos realizables y estratégicos, para las siguientes acciones: 1) Conformar rutas estatales para la descarbonización congruentes con escenarios para limitar el aumento de la TMG a 1.5°C; 2)

Desarrollar e implementar Presupuestos de Carbono a nivel Estatal, alineados a dichas rutas; 3) Crear y consolidar alianzas estratégicas con los organismos de cooperación internacional y el sector privado; y 4) Fortalecer las capacidades de sus municipios y ciudades.

En línea con lo anterior, y considerando los avances de la política internacional, nacional y estatal, es que surge la necesidad de desarrollar un estudio contextualizado del estado de Yucatán en materia de presupuesto de carbono, descarbonización del sector eléctrico y de desarrollo de medidas factibles para favorecer la reducción de emisiones y avanzar hacia la transición energética de una manera costo eficiente, en línea con los esfuerzos sectoriales, y en concordancia con las últimas recomendaciones de la ciencia climática.

En este sentido, este documento presenta el concepto y metodología para el cálculo del presupuesto de carbono, los argumentos a favor del diseño de rutas de descarbonización como medida de mitigación sectorial, el cálculo del presupuesto de carbono para el estado de Yucatán, así como la ruta de descarbonización teórica para su sector eléctrico hasta el año 2050.

1.1. Estructura

En primera instancia, se realiza una breve introducción hacia el concepto de presupuesto de carbono y la relación que existe entre el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y el incremento de la temperatura. En segunda, se analizan cuatro casos de estudio subnacionales a nivel internacional, a partir de los cuales se ha estimado un presupuesto de carbono, a saber: Victoria, Australia; Järfälla, Suecia; Gran Manchester, Reino Unido; y Copenhague, Dinamarca. Esto con el fin de extraer las lecciones aprendidas por estas representaciones subnacionales, para el desarrollo de un presupuesto de carbono del estado de Yucatán.

En tercera instancia, se define el concepto de rutas de descarbonización del sector eléctrico y los elementos fundamentales que debe de tener una trayectoria de reducción de emisiones de carbono para este sector en el futuro. Asimismo, se exponen tres casos de estudio donde ya se han comenzado a desarrollar líneas de acción de descarbonización para el sector eléctrico (Reino Unido,

Londres y Alemania). Seguido por el análisis del contexto jurídico del estado de Yucatán para describir su estructura orgánica y las atribuciones de las entidades que conforman al Poder Ejecutivo para el desarrollo de su presupuesto de carbono.

Posteriormente, a partir de la metodología desarrollada por la Iniciativa Climática de México (ICM), se llevó a cabo el cálculo del presupuesto de carbono para el estado de Yucatán, así como la estimación de las metas de reducción de emisiones que deberán alcanzarse hacia los años 2030, 2040 y 2050 con el objetivo de alcanzar la neutrali-

dad de carbono a mitad de siglo. Dichas metas incluyen una propuesta detallada de rutas de descarbonización eléctrica para los sectores industrial, comercial, público y residencial de Yucatán. Cada una de estas medidas de mitigación presentan las características técnicas, los costos de implementación, los costos de mitigación y algunos co-beneficios relacionados. Finalmente, se presenta un análisis de las oportunidades estatales para concentrar la implementación de las diferentes medidas sectoriales y alcanzar la descarbonización del estado según las metas del presupuesto de carbono de Yucatán.

2. DEFINICIÓN DE LOS CONCEPTOS RELEVANTES

La ciencia climática de la última década ha demostrado en forma concluyente que el aumento de la temperatura media global (TMG) es prácticamente proporcional a la cantidad total de emisiones de carbono acumuladas en la atmósfera (MacDougall, Zickfeld, Knutti, y Matthews, 2015; Knutti & Rogelj, 2015). A partir de esta relación es posible determinar la cantidad finita de emisiones de carbono que podrían ser liberadas a la atmósfera con el propósito de mantener el incremento de la TMG por debajo de los límites establecidos en el Acuerdo de París (Rogelj *et al.*, 2019). En este sentido, se puede definir a un presupuesto de carbono como “la cantidad total finita de CO₂ que puede ser emitida a la atmósfera, como consecuencia de las actividades humanas, para mantener el calentamiento global en un límite de temperatura deseado” (Rogelj *et al.*, 2019).

La metodología para definir un presupuesto de carbono está alineada con el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en el que se esbozan las condiciones necesarias para mantener el aumento de la TMG por debajo de 1.5°C o 2°C (Ramonés *et al.*, 2019). Particularmente, los presupuestos de carbono para un límite de temperatura específico se calculan en función de cinco parámetros distintos: calentamiento antropogénico hasta la actualidad, emisiones históricas de CO₂, fracción antropogénica de emisiones diferentes a CO₂, el calentamiento no efectuado de las emisiones pasadas de CO₂ y la fracción de emisiones antropogénicas diferentes de CO₂ al momento de las emisiones netas (Matthews *et al.*, 2021). Sin embargo, el presupuesto de carbono se presenta convencionalmente en términos de emisiones de CO₂, ya que las propiedades físicas o químicas de otros GEI varían en función de su duración, además de provocar efectos de calentamiento diferentes y presentar grandes incertidumbres en su contabilidad (Davies *et al.*, 2017).

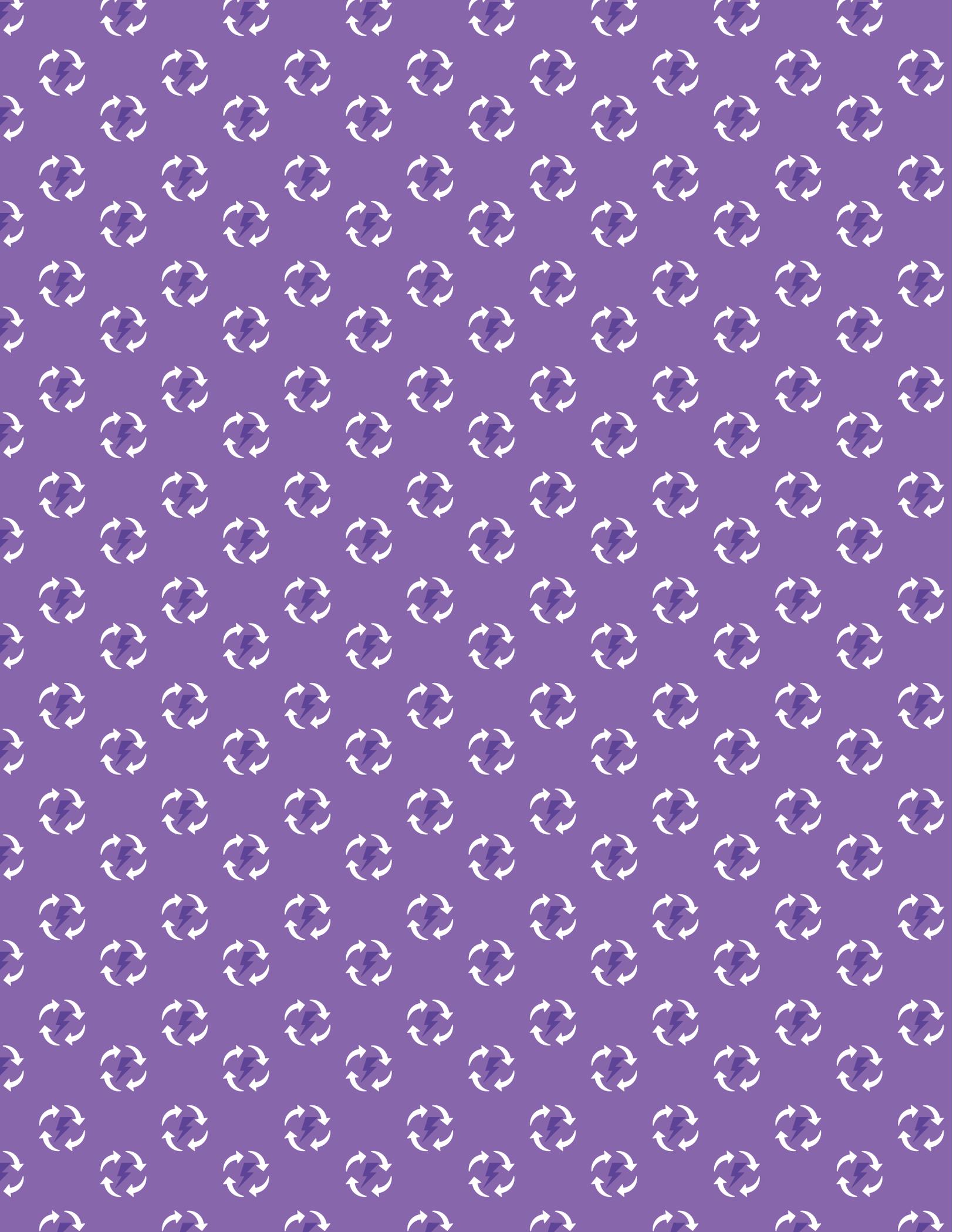
Esto también implica que, para limitar el aumento de la temperatura a cualquier nivel, las emisiones globales de CO₂ producidas por las actividades humanas deben ser reducidas a niveles netos igual a cero en algún momen-

to y, en promedio, permanecer dentro de estos niveles de ahí en adelante (Rogelj *et al.*, 2019). Desde el punto de vista del forzamiento radiativo¹, el calentamiento global adicional podría evitarse si las emisiones se detuvieran en la actualidad y podría invertirse si el CO₂ se retirara activamente de la atmósfera (Knutti y Rogelj, 2015). Por lo tanto, las rutas de descarbonización juegan un papel fundamental en el cumplimiento de los objetivos climáticos establecidos en el presupuesto de carbono de las naciones y las entidades subnacionales.

En relación con lo anterior, **existen cuatro frentes en los cuales es imprescindible realizar acciones: descarbonización del sector eléctrico; electrificación masiva con energías limpias donde es posible o realizar el cambio a combustibles fósiles bajos en carbono; alcanzar una mayor eficiencia y reducción de residuos en todos los sectores; así como mejoramiento de sumideros de carbono, tales como bosques, vegetación y suelo** (Fay *et al.*, 2015).

Como se puede observar, de dichas acciones, tres recaen directamente sobre el sector eléctrico, por lo que una ruta de descarbonización del sector eléctrico es indispensable para evitar el incremento de la TMG. En este aspecto, **una ruta de descarbonización para este sector se define como el conjunto de medidas de mitigación que permiten al sector eléctrico, atenerse a un presupuesto de carbono en línea con las metas establecidas en el Acuerdo de París con una probabilidad por encima del 66% (AIER, 2017)**. Por este motivo, el presente documento se dirige exclusivamente al análisis del sector eléctrico. Algunos ejemplos de estas medidas pueden ser el uso de energías renovables para la generación de electricidad, mayor penetración de la generación distribuida, la implementación de medidas de eficiencia energética en los sectores comercial e industrial, entre otras. No obstante, dependiendo de la infraestructura del sistema eléctrico y el marco regulatorio, la penetración de tecnologías bajas en carbono puede ser acelerada o frenada significativamente, repercutiendo en el cumplimiento de los compromisos climáticos.

¹ Este concepto se refiere al cambio en el flujo total de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12,000 m sobre el nivel del mar) como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar y se expresa en W/m². Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento.



3. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EN PRESUPUESTOS DE CARBONO Y RUTAS DE DESCARBONIZACIÓN A NIVEL SUBNACIONAL

Considerando que el andamiaje del Acuerdo de París introduce los conceptos de contribuciones justas y equitativas, pero carece de indicaciones más concretas para la formulación de objetivos nacionales alineados a dichos principios, así como la falta de un consenso internacional referente al cálculo de presupuesto de carbono, resulta complejo evaluar si las determinaciones individuales de los países y regiones están alineadas a las metas de dicho Acuerdo. Lo anterior deja a los gobiernos nacionales y subnacionales frente a un amplio panorama de posibles decisiones metodológicas. A continuación, se presentan de manera puntual cuatro casos de estudio a nivel subnacional que han avanzado de manera importante en la determinación de presupuestos de carbono a partir de tres enfoques metodológicos diferentes.

Por un lado, se presenta la metodología y las estimaciones realizadas por el estado de Victoria, en Australia, las cuales parten de información determinada por la Autoridad Australiana de Cambio Climático, así como metodología desarrollada por Meinshausen *et al.* (2018). Además, se presentan las estimaciones realizadas por la ciudad de Manchester, Inglaterra y la ciudad de Järfälla, Suecia, a partir de la información proporcionada por el IPCC (AR5) y algunos de los principios de asignación identificados en dicho reporte. Finalmente, se presenta el caso de Copenhague y la estimación de su presupuesto de carbono a partir del consumo energético de la ciudad alineado a una meta de neutralidad de carbono para el año 2050.

3.1. Experiencias internacionales en presupuesto de carbono

a) Estado de Victoria, Australia

En el año 2014, la Autoridad de Cambio Climático (CCA, por sus siglas en inglés) de Australia determinó un presupuesto global de carbono de 1700 GtCO₂e con una probabilidad

de 67% para limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C (Meinshausen, Du Pont y Talberg, 2018). Con base en dicho presupuesto global, la ACC determinó inicialmente que la “contribución justa” de Australia al presupuesto mundial era del 0.97%, es decir, 10.1 GtCO₂e para el período 2013–2050, incluyendo las emisiones del sector del uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura.

A partir del presupuesto nacional se realizó la colocación de emisiones para los diferentes estados territoriales de Australia (Meinshausen, Du Pont y Talberg, 2018). Para medir la sensibilidad de las propuestas de trayectorias de emisiones para el estado de Victoria, se llevaron a cabo cuatro diferentes enfoques. Por un lado, se consideró la distribución a partir del enfoque de contracción y convergencia. Dicha distribución pone como meta la igualdad de emisiones *per cápita* antes de la fecha de convergencia y a la vez considera que los derechos de emisión por persona se contraerán a lo largo del tiempo de forma lineal en todos los estados y territorios para alcanzar emisiones netas cero en el mismo punto temporal y dos fechas de convergencia: 2030 y 2050. Estas fechas fueron elegidas para explorar el horizonte de cero emisiones a largo plazo proyectado para 2050, de acuerdo con la narrativa internacional, así como un horizonte a corto plazo para reflejar el principio de equidad de manera más pronunciada hasta 2030.

Como segundo enfoque se consideró una acumulación de emisiones equitativa *per cápita*, donde cada uno de los individuos tienen el mismo derecho para generar emisiones a lo largo del periodo del presupuesto (Meinshausen, Du Pont y Talberg, 2018). En el tercer enfoque se consideró el Producto Estatal Bruto *per cápita*, es decir, la capacidad estatal para cubrir la reducción de emisiones proyectada. Finalmente, se consideró el enfoque de sostenimiento del *status quo* relativo donde los presupuestos de emisión entre los estados se mantienen desde el comienzo del período de asignación.

Dependiendo del tipo de enfoque utilizado para la distribución de emisiones, el presupuesto de carbono para el estado de Victoria osciló entre 1,758 y 1,918 MtCO₂e, con un promedio de 1,851 MtCO₂e (Meinshausen, Du Pont y

Talberg, 2018). La participación de Victoria en las emisiones australianas se estimó entre el 21.7% y el 23.7%, con un promedio del 22.9% de las emisiones nacionales.

Esta participación del 22.9% se utilizó como base para el análisis posterior de trayectorias que se podrían seguir dependiendo de diferentes porcentajes de reducción de emisiones, tomando como base los valores de 2005 (Meinshausen, Du Pont y Talberg, 2018). Una de las observaciones del estudio señaló que, si se seguía una trayectoria lineal, para el año 2030 podrían reducirse las emisiones generadas durante 2005 un 48.8%.

Si bien la Ley de Cambio Climático de Victoria de 2017 establece un objetivo a largo plazo de cero emisiones netas de GEI para 2050, hasta el momento no se han establecido metas basadas en el cálculo estatal de presupuesto de carbono.

b) Gran Manchester, Inglaterra

La Ley de Cambio Climático del Reino Unido de 2008 estableció el compromiso de reducir al menos en un 80% las emisiones de GEI para el año 2050 con respecto a los niveles de 1990, estableciendo cinco presupuestos anuales de carbono a modo de medidas de transición (HM Government, 2008 citado por Kuriakose *et al.*, 2018).

Por su parte, la Autoridad Conjunta de Gran Manchester (GMCA, por sus siglas en inglés) adoptó un objetivo de reducción del 48% de las emisiones para 2020 en comparación con 1990. Esto con el propósito de reducir sus niveles de emisión entre un 80% y 95% para el año 2050 (GMLCH, 2016, citado por Kuriakose *et al.*, 2018).

Como punto de partida, el presupuesto de carbono de GM considera los presupuestos de carbono globales publicados por el IPCC en su reporte AR5, así como la metodología propuesta por Anderson y Bows (2011). Como primer supuesto para el cálculo global se considera la generación de emisiones originadas por la producción mundial de cemento debido a su importancia para el desarrollo (Kuriakose *et al.*, 2018). Esto conlleva que 100 GtCO₂ tengan que deducirse del presupuesto global. De igual forma, el cálculo considera que no existe deforestación neta a nivel global.

Posteriormente, Kuriakose *et al.* (2018) realizó una asignación de emisiones a las naciones no pertenecientes a la OCDE, es decir, en vías de industrialización, dejando un remanente para los miembros más industrializados de dicha organización. Para el caso del Reino Unido, la asignación de la proporción correspondiente de emisiones se hizo con base en los dos criterios de distribución de emisiones: población y asignación soberana de emisiones recientes (2010 a 2015). Particularmente para las

emisiones por aviación, envíos y transporte militar, las cuales son consideradas como inevitables debido a la importancia de dichos sectores, se realizó el cálculo para la generación futura de éstas y se sustrajo del presupuesto nacional. Como resultado se obtuvo un presupuesto final real de emisiones generadas por consumo energía contextualizado a las necesidades de Reino Unido.

En la asignación del presupuesto de carbono para Gran Manchester, se repartió el presupuesto de carbono del Reino Unido a partir de tres enfoques con el fin de ofrecer un pequeño rango de presupuestos: población, asignación soberana y valor añadido bruto (Kuriakose *et al.* 2018). El promedio de dichos rangos se utilizó para realizar la propuesta de presupuesto de carbono recomendado, así como vías de emisión ilustrativas. A partir de dicho análisis se identificó que el rango de presupuesto para Gran Manchester estaba entre 45 y 104 MtCO₂ para el período de 2018 en adelante y así limitar la TMG en menos de 2°C.

c) Municipio de Järfälla, Suecia

Anderson *et al.* (2014) realizaron el presupuesto de carbono del municipio de Järfälla utilizando los presupuestos de carbono propuestos por el IPCC en su reporte AR5. A partir del presupuesto mundial realizaron un desglose de las emisiones para proporcionar a Suecia un rango de presupuesto nacional de carbono basado en las emisiones históricas (principio de soberanía) y la contribución poblacional (principio de igualdad).

Tales enfoques de reparto atribuyeron a Suecia el 0.361% del presupuesto global de carbono debido a emisiones pasadas y el 0.767% basado en la población para el período posterior a 2017. Esto significa que entre 140 y 20 GtCO₂ fueron asignadas como presupuesto nacional de carbono, fijando una tasa de mitigación inmediata de un mínimo del 10% anual e idealmente del 15% anual.

Este rango presupuestario de carbono para Suecia se desglosó a nivel municipal, considerando el principio de soberanía para la distribución de emisiones territoriales (Anderson *et al.*, 2014). A partir de información proporcionada por Estadística Suecia (SCB) y las estadísticas regionales del Sistema de Objetivos Medioambientales, Desarrollo y Colaboración (RUS) se generaron los presupuestos subnacionales. Particularmente el municipio de Järfälla recibió una asignación del 0.172% (RUS) y del 0.214% (SCB) del presupuesto sueco de carbono para el sector energía a partir de julio de 2017 y con una tasa de reducción de emisiones mínima de por lo menos un 10% por año con efecto inmediato.

El presupuesto regional de carbono resultante se tradujo en dos escenarios de reducción de emisiones necesarios

para que Järfälla contribuya de manera justa y con base científica al cumplimiento del Acuerdo de París (Anderson *et al.*, 2014). Dichos escenarios estaban basados en una tasa de reducción de emisiones anuales de 10% y 15% partiendo de julio 2017 hasta el año 2100.

El análisis de emisiones territoriales realizado por Anderson *et al.* (2014) permitió identificar que el sector transporte fue el responsable del 71% de las emisiones generadas por Järfälla durante el año 2014, mientras que el sector de generación de energía representó solo el 8%. Sin embargo, solo una lista general de posibles estrategias de mitigación de emisiones fue presentada. De tal forma que, el análisis anterior representó solo el resultado de una propuesta de investigación solicitada por el propio municipio de Järfälla para la toma de decisiones.

d) Copenhague, Dinamarca

Desde el año 2009, el ayuntamiento de Copenhague (CPH) adoptó de forma unánime un Plan Climático para el año 2015 (TCC, 2012). Las iniciativas contenidas en dicho plan ayudaron a reducir de forma significativa las emisiones de la ciudad, reduciendo en 21% las emisiones generadas entre el periodo de 2005 y 2011 y cumpliendo el objetivo de la ciudad de reducir un 20% las emisiones antes del 2015.

Particularmente, el Plan Climático CPH 2025 tiene el objetivo de convertir a la ciudad en la primera capital del mundo con emisiones neutras de carbono para el año 2025 (TCC, 2012). El objetivo de neutralidad de carbono establecido por Copenhague incluye las emisiones del sistema energético de la ciudad y las actividades de las empresas de servicios públicos propiedad de la ciudad en otros lugares.

La ciudad de Copenhague desarrolló en 2008 una calculadora de medición de carbono en conjunto con el Ministerio de Clima y Energía y el gobierno local, para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la ciudad (TCC, 2012). Dicha herramienta está basada en la metodología utilizada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para la realización de inventarios de GEI. En general, todas las emisiones de gases de efecto invernadero dentro de los límites de la ciudad son incluidos, así como las emisiones generadas por las empresas de propiedad municipal fuera de dichos límites. Del mismo modo, la energía generada a partir de fuentes renovables en la ciudad, así como la energía renovable producida por las empresas de servicios públicos de la ciudad de Copenhague fuera de

los límites también se deducen para realizar el cálculo (TEA, 2016b).

La calculadora de carbono², disponible solamente para las diferentes municipalidades, puede deducir la generación de energía proveniente de energías renovables (Dahal y Niemelä, 2017). Esto implica que el consumo de energía en la ciudad alcanzará la neutralidad de carbono cuando la producción de energía renovable iguale la cantidad consumida por la ciudad. Para el momento en que la generación de energía renovable de la ciudad de Copenhague resulte en exceso y ésta sea consumida en otros territorios, la calculadora ofrece la posibilidad de compensar las emisiones generadas por otros sectores de la ciudad gracias al exceso de energía limpia (TEA, 2016b)

No obstante, a medida que otras partes de Dinamarca se vayan descarbonizando, la intensidad de carbono del consumo de energía desplazada disminuirá, reduciendo a su vez el grado en que la ciudad podría compensar sus emisiones de carbono de esta manera (TCC, 2012). Esto se debe a que Dinamarca ha establecido el objetivo de reducir su dependencia del uso de combustibles fósiles para la generación de energía y electricidad para el año 2035.

Para el año 2017 la ciudad de Copenhague logró reducir 38% de las emisiones registradas en el año 2005 (TEA, 2016a). Mientras que la fase de implementación del periodo 2017–2020 se enfocó en la aplicación y evaluación de iniciativas a pequeña escala sobre optimización energética de edificios, plantas de ciclo combinado para biomasa, implementación de turbinas eólicas, acuerdos voluntarios con dueños de mobiliario, flujo mejorado en ciclovías, uso de vehículos eléctricos y de hidrógeno para el municipio, así como autobuses carbono neutral. Se espera que para el periodo 2020–2025 las mejores iniciativas puedan implementarse a gran escala para alcanzar la neutralidad de la ciudad.

3.2. Lecciones aprendidas: presupuestos de carbono

Los casos internacionales referentes al presupuesto de carbono a nivel subnacional demuestran que existen variaciones con respecto a su aplicación al tratarse de un concepto relativamente nuevo. La primera diferencia que se observa es cómo definen el horizonte temporal del presupuesto de carbono.

2 Calculadora basada en la web diseñada específicamente para los municipios de Dinamarca por el Instituto Nacional de Investigación Medioambiental (NERI) y COWI, una empresa consultora internacional (Dahal y Niemelä, 2017).

Por ejemplo, el estado de Victoria, Australia y la ciudad de Manchester, Inglaterra han establecido como límite temporal el año 2050 para reducir sus emisiones y limitar la TMG por debajo de 2°C. Por otro lado, el municipio de Järfälla, Suecia plantea la posibilidad de alcanzar la generación de cero emisiones hasta el año 2100. No obstante, establecer presupuestos de carbono con horizonte 2050, además de acelerar el proceso de descarbonización, permite identificar los picos de emisiones previas a la disminución progresiva de las mismas. Esto se debe a que existe el riesgo de que el largo horizonte temporal sea un pretexto para la inacción y retrase los esfuerzos hasta que sea demasiado tarde.

Mientras que los presupuestos de Victoria, Manchester y Järfälla fueron desarrollados a partir de su presupuesto nacional, es decir, enfoque descendente, la ciudad de Copenhague estimó su presupuesto de manera ascendente con base en la generación de emisiones actuales territoriales y la meta de neutralidad de carbono para el año 2025.

Ahora bien, el presupuesto subnacional del estado de Victoria está calculado a partir del promedio de cuatro asignaciones diferentes, incluyendo el método de contracción y convergencia modificada utilizado para calcular el presupuesto nacional. Por otro lado, el cálculo subnacional de Manchester aplica la metodología de asignación de Reino Unido y el enfoque de valor añadido bruto. Finalmente, el presupuesto de Järfälla se limita a utilizar la asignación soberana para realizar el cálculo del presupuesto de carbono subnacional.

Durante la asignación de presupuestos de carbono tanto nacionales como subnacionales se identifica la práctica de exclusión de sectores económicos. Si bien el cálculo de presupuesto de carbono de Victoria descartó las emisiones históricas estatales, el de Manchester excluyó las emisiones de los sectores aviación y transporte, mientras que el de Järfälla se enfocó solamente en las emisiones del sector energético.

Las experiencias anteriormente descritas resaltan, en primer lugar, la falta de una metodología internacional estandarizada para la estimación de un presupuesto de carbono subnacional debido a la diversidad en los conceptos de asignación. Asimismo, es posible identificar el estado emergente del concepto de presupuesto de carbono dada la ausencia de casos de éxito documentados en Latinoamérica. Finalmente, estas experiencias presentan la posibilidad de establecer un presupuesto de carbono subnacional con cierto grado de flexibilidad dependiendo de las características socioeconómicas del territorio.

De las conclusiones anteriores, podemos destacar que el presente documento muestra una metodología para la obtención de un presupuesto de carbono a nivel local.

Gracias a la flexibilidad de esta metodología, es posible ajustarla a distintos contextos estatales y estandarizarla a cualquier nivel subnacional.

3.3. Experiencias internacionales en rutas de descarbonización

Una gran cantidad de países han asumido el compromiso de descarbonizar su sector de generación eléctrica para alcanzar sus metas de reducción de emisiones de GEI, establecidas en sus NDC, y cumplir con el Acuerdo de París. Desde el año 1996 se definió la descarbonización del sector energético como el decrecimiento en una cantidad específica de dióxido de carbono emitido por cada unidad de energía primaria consumida (Grübler y Nakicenovic, 1996). Sin embargo, la falta de compromisos pasados, así como los retos actuales suponen una transformación del sistema energético mundial sin precedentes, con el objetivo de limitar la TMG a finales de siglo.

Por ejemplo, McKinsey (2020) analiza tres trayectorias de descarbonización del sector eléctrico hacia el 2040 por medio de la penetración del 50-60% de energías renovables, 80-90% de energías renovables y 100% de energías renovables. Para el caso de una descarbonización del 50-60% se destaca que no es necesario una inversión más allá de decisiones tomadas por los actores de mercado. Esto se debe a que los costos de tecnologías como solar fotovoltaica, eólica y de almacenamiento se han reducido considerablemente, llegando al punto en que estas opciones pueden representar la opción de mejor costo y eficiencia. Para una descarbonización del 80-90% en el año 2040 es necesario llevar a cabo acciones más costosas y específicas como el uso de tecnologías de almacenamiento de carbono. Por último, una descarbonización total del sector eléctrico resultaría en un costo adicional del 25% sobre la primera trayectoria, así como también requeriría de la introducción de tecnologías limpias adicionales como biocombustibles, captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés), bioenergía con captura y almacenamiento de carbono, hidrógeno y tecnologías de captura directa de aire (DAC, por sus siglas en inglés).

Por otro lado, la Agencia Internacional de Energía (IEA) considera que un escenario de cero emisiones netas para el sector eléctrico implica tanto un incremento en la demanda eléctrica como resultado de una mayor actividad económica, una rápida electrificación de servicios finales y la producción de hidrógeno por electrólisis, así como también una transformación radical en la generación de electricidad (IEA, 2021). De hecho, los mercados emer-

gentes y las economías en desarrollo representan el 75% del aumento mundial previsto de la demanda de electricidad hasta 2050. Particularmente para dichas economías se espera que en 2030 la demanda eléctrica se duplique y para 2050 se triplique debido al crecimiento poblacional, aumento en los ingresos y nivel de vida, así como a las nuevas fuentes de demanda eléctrica vinculadas a la descarbonización (IEA, 2021).

Por lo tanto, resulta relevante analizar la planeación, diseño e implementación de rutas de descarbonización para el sector eléctrico a nivel internacional con el objetivo de identificar estrategias exitosas para el estado mexicano, tanto a nivel nacional como subnacional.

a) Reino Unido

La descarbonización del sector eléctrico en el Reino Unido ha sido posible debido a que la reducción de emisiones de GEI del sector se encuentra delimitada por metas establecidas en la Ley de Cambio Climático del 2008. Estas metas son definidas a través de estimaciones de presupuesto de carbono de carácter vinculante. Dicho presupuesto ha sido establecido para periodos de 5 años, con el objetivo de reducir a emisiones netas cero para el año 2050. Si bien su Comisión de Cambio Climático ha informado sobre el cumplimiento de los primeros tres presupuestos de carbono, se han identificado dificultades para cumplir tanto el cuarto como el quinto presupuesto de carbono (Fankhauser, 2020).

Tabla 1: Presupuesto de carbono del Reino Unido	
Periodo	Nivel de presupuesto de carbono (MtCO ₂ e)
Primer presupuesto (2008-2012)	3,018
Segundo presupuesto (2013-2017)	2,782
Tercer presupuesto (2018-2022)	2,544
Cuarto presupuesto (2023-2027)	1,950
Quinto presupuesto (2028-2032)	1,725

Fuente: Committee on Climate Change. Reducing UK emissions: 2018 Progress Report to Parliament.

En un diagnóstico general, el sector eléctrico del Reino Unido ha tenido reducciones de emisiones importantes del 2012 al 2017 debido a tres razones: primero, a una reducción considerable de la generación de las plantas de carbón; segundo, a la existencia de un incremento en la proporción de energías renovables en la matriz energética del país; y tercero, a un incremento significativo en la eficiencia energética de los productos, lo cual ha causado una reducción en el consumo de electricidad (LSE, 2020).

La proporción de generación eléctrica utilizando carbón en el periodo 2021-2017 ha sido reducida considerablemente al pasar de 40% al 7% sobre el total de generación del país. Asimismo, el Gobierno Británico ha anunciado que para el 2025 eliminará de su matriz energética todas las plantas de carbón que no puedan ser convertidas con tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (LSE, 2020).

Alineado a esta reducción, una política importante que ha funcionado para la descarbonización del sector es la introducción de un precio al carbono³. Por ejemplo, los generadores de electricidad del Reino Unido tienen que pagar tanto por el precio del carbono, como por una cuota establecida por el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (RCDE UE), cantidad que equivale a 1,004.59 MXN por cada tonelada de CO₂ emitida.

Finalmente, el Reino Unido ya elaboró su sexto presupuesto de carbono (2033-2037) en diciembre del 2020, donde se proyecta una reducción de un 78% de las emisiones de GEI para el 2035 relativo a las emisiones de 1990. Dentro de las acciones en su ruta de descarbonización eléctrica neta cero al 2050 se encuentran la reducción de la intensidad del carbono de generación eléctrica de 220 gCO₂/KWh en el 2019 a 50 gCO₂/KWh en 2030, la eliminación de la generación de electricidad a partir de carbóelétricas, y el incremento de la generación de energías renovables a un 80% respecto del total de la matriz energética de ese país para el 2050 (CCC, 2020).

b) Londres, Reino Unido

En el 2018, la Alcaldía de Londres (2018) publicó su plan de carbono neto cero alineado a una TMG de 1.5°C. Su metodología para alcanzar emisiones netas cero para el 2050 está determinada de manera general en cinco pasos: 1) identificar medidas de política pública que apoyen a una transición de una red de transporte público de cero emisiones y activar un cambio en el uso del transporte público a través del uso de la bicicleta y movilidad peatonal; 2)

³ El precio del carbono es un instrumento que permite captar los costos externos de los GEI, los costos de las emisiones que paga la ciudadanía como daños a las cosechas, los costos de la atención sanitaria por las olas de calor y las sequías, así como la pérdida de propiedades por las inundaciones y el incremento del nivel del mar. El precio de carbono vincula dichos costos a sus fuentes mediante un precio, generalmente en forma de precio del dióxido de carbono emitido (The World Bank, 2021).

identificar medidas de políticas públicas necesarias para mejorar la eficiencia energética en los edificios de Londres; 3) usar los modelos de transporte y medidas de eficiencia energética de los edificios para desarrollar cuatro escenarios que proyecten emisiones netas cero en el sistema energético y en el sistema de transporte del 2050; 4) identificar medidas adicionales requeridas para alcanzar el objetivo de descarbonización del 2050; y 5) establecer presupuestos de carbono para los siguientes 15 años con la finalidad de direccionar los esfuerzos de mitigación en el camino adecuado (Greater London Authority, 2018).

Los cuatro escenarios de eficiencia energética se fundamentan en energía descentralizada enfocado en redes de calor; alta electrificación con bombas de calor; descarbonización de gas, sustitución por hidrógeno y tecnologías de captura y almacenamiento de carbono; así como una combinación de bombas de calor, redes de calor y red parcial de hidrógeno. Conociendo las rutas establecidas por los cuatro escenarios, la Alcaldía de Londres establece tres presupuestos de carbono (2018-2022, 2023-2027 y 2028-2032), alineados de manera proporcional al presupuesto de carbono total del Reino Unido. De esta forma, la planeación evita dejar la toma de decisiones relacionadas con política pública para el último minuto, y así minimizar también los costos de implementación.

Como lecciones aprendidas se identifica que la descarbonización del sector eléctrico de Londres depende de la transición energética de la red y acciones más ambiciosas por parte del Gobierno del Reino Unido. Para el caso del incremento de la demanda eléctrica, se requiere una compensación adicional con medidas de eficiencia energética, así como tecnologías inteligentes para suavizar los picos de demanda. Si bien se identifica que los costos asociados a las actualizaciones de la red eléctrica deben de ser asequibles, se reconoce que la ausencia de una transición energética significa indudablemente un mayor gasto futuro.

c) Alemania

Durante el 2019, Alemania emitió su Ley Nacional Climática (*Bundes-Klimaschutzgesetz*) con el propósito de alcanzar la neutralidad de carbono en el año 2050. Esta Ley señala que, a partir del 2025, se deberán establecer presupuestos de emisiones cada cinco años para los sectores de energía, industria, transporte, edificios, agricultura y residuos. Hasta el momento, el presupuesto de emisiones del sector energía para los años 2020 y 2022 corresponde a 280 y 257 MtCO₂e, respectivamente (FCCA, 2019).

Aunado a lo anterior, la política de transición energética de Alemania tiene el objetivo de alcanzar un 80% de la generación eléctrica del país con energías renovables para el 2050, a la vez que se retiran plantas nucleares e incrementan esfuerzos de eficiencia energética (Brick y Thernstrom, 2016). Desde el 2013, esta política ha causado un incremento de gran relevancia en las tecnologías de energías renovables como la solar fotovoltaica y eólica. Mientras que en el 2013 la penetración de energías renovables correspondía al 25%, la proporción de generación de energía renovable en el año 2020 fue del 45% (AGEE-Stat, 2021). De hecho, según el Instituto Fraunhofer de Sistemas Solares de Energía (2020) se establece que durante la primera mitad del 2020 se generaron 136.1 TWh a partir de fuentes de energía renovable en el país.

Si bien es cierto que, en los últimos años, los precios de la electricidad han incrementado en Alemania (Brick y Thernstrom, 2016), se han encontrado también trayectorias costo-efectivas para lograr la descarbonización a partir de simulaciones para los años 2025, 2035 y 2050. Estas trayectorias dependen principalmente de cuatro factores: 1) mayor integración de otras energías renovables para la generación de electricidad; 2) la transformación de la generación convencional de energía hacia tecnologías más flexibles con menos emisiones de carbono; 3) la electrificación de sectores que todavía son intensivos en su consumo de combustibles fósiles; y 4) un mayor incremento de la eficiencia energética (C. Müller *et al.*, 2019). Dichas trayectorias arrojaron un resultado para el 2050 de un incremento de la generación de energías renovables de 241 TWh, donde destacan las energías eólica y fotovoltaica, con una participación aproximada de 66% y 33%, respectivamente. Comparado con los niveles de generación del 2016, dichas energías renovables, prácticamente duplican su generación hacia mediados de siglo.

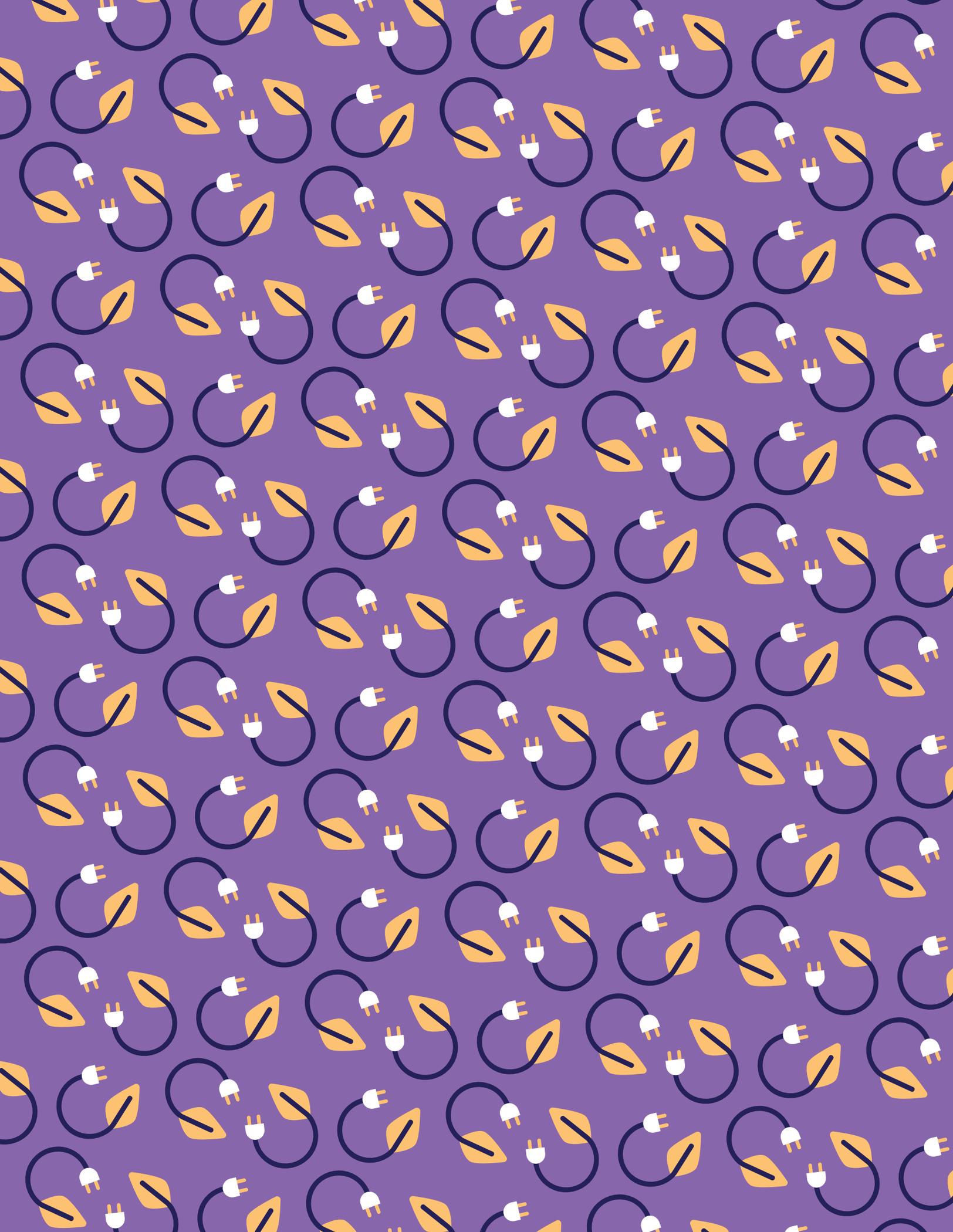
Por último, un análisis reciente realizado por *Agora Energiewende* (2020) establece que las metas principales que debe alcanzar la transición energética para cumplir con lo establecido en el Acuerdo de París son las siguientes: eliminar la generación de carbóelctricas para el 2030 en lugar del 2038, incentivar el uso del hidrógeno para las plantas generadoras de energía, incrementar la electrificación de todos los sectores e incrementar la capacidad instalada de las energías renovables (25 GW de energía eólica *offshore*, 80 GW de energía eólica y 150 GW de energía solar fotovoltaica). Estas metas podrán ser logradas si el sistema eléctrico de Alemania se convierte en un sistema significativamente más flexible a través de mayor almacenamiento, despliegue de bombas de calor y mayor comercialización de electricidad entre los países.

3.4. Lecciones aprendidas: rutas de descarbonización nacionales y subnacionales

Los casos internacionales referentes a las rutas de descarbonización, tanto a nivel nacional como subnacional, demuestran la importancia de elaborar leyes que apoyen la correcta implementación y cumplimiento de metas vinculantes. De hecho, el caso particular de Reino Unido y Londres, Inglaterra ejemplifican cómo la descarbonización del sector eléctrico ha sido posible de forma progresiva gracias a las metas establecidas en la Ley de Cambio Cli-

mático del 2008, así como al carácter vinculante del presupuesto de carbono a nivel nacional. Ambas situaciones señalan la necesidad de prescindir de combustibles fósiles, al mismo tiempo que se impulsa la implementación de tecnologías para la generación de energías renovables, y secuestro y aprovechamiento de emisiones. El caso anterior también pone sobre la mesa el horizonte temporal requerido para el desarrollo e implementación de instrumentos en materia de cambio climático a nivel subnacional.

Por otro lado, la ruta de descarbonización del sector energía en Alemania ejemplifica el compromiso por acelerar el cumplimiento de metas de cero emisiones por medio de la disminución de generación carboeléctrica y del potenciamiento de infraestructura para la generación de energía renovable. Además, el carácter vinculante del presupuesto de carbono en su ley nacional climática promueve el trabajo conjunto a largo plazo tanto para disminuir la generación de emisiones, así como para ajustar objetivos y líneas de acción.



4. MARCO LEGAL Y ESTRATÉGICO EN MATERIA ENERGÍA-CLIMA

Para determinar un punto de partida en el cual se encuentra el estado de Yucatán con respecto a metas y objetivos de mitigación de cambio climático y promoción de energías renovables, se analizaron diez documentos de instrumentos de planeación, normativas, declaratorias y el más reciente inventario de emisiones de GEI del estado. Dichos documentos fueron obtenidos a través del portal de la Suprema Corte de Justicia, la plataforma de Información sobre la implementación de la política climática subnacional del INECC y las páginas del Gobierno de Yucatán, particularmente la página de la Secretaría de Desarrollo Sustentable. Los documentos antes mencionados fueron validados por las autoridades estatales como los instrumentos a analizar para este ejercicio, e incluyen los siguientes:

- Plan Estatal de Desarrollo 2018-2024
- Estrategia de Cambio Climático de la Península de Yucatán
- Programa Especial Acción por el Clima
- Programa Especial de Innovación, Conocimiento y Tecnología
- Programa de Mediano Plazo: Yucatán con Economía Inclusiva
- Programa de Mediano Plazo: Regionales
- Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán
- Reglamento de la Ley de Desarrollos Inmobiliarios del Estado de Yucatán
- Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Yucatán
- Acuerdo entre Gobernadores de la Península de Yucatán en materia de Cambio Climático

En la siguiente subsección se sintetizan de manera puntual los instrumentos, estableciendo su objetivo principal y si dicho instrumento tiene alguna meta o acción asociada al tema del cambio climático, el despliegue de energías renovables o ambos.

4.1. Plan Estatal de Desarrollo 2018-2024

El *Plan Estatal de Desarrollo 2018-2024*, es el documento rector de la actual administración, el cual, de acuerdo con el Artículo 26 de la *Ley Estatal de Planeación* debe establecer los objetivos generales, estrategias y prioridades del desarrollo integral del estado. Asimismo, dicho instrumento incorporó el enfoque de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible a la planeación. Uno de sus cuatro ejes rectores es *Yucatán Verde y Sustentable*, el cual tiene como finalidad mejorar el manejo sustentable del medio ambiente en Yucatán y tiene como enfoque siete políticas públicas: 1) Conservación de recursos naturales; 2) Acción por el clima; 3) Agua limpia y saneamiento; 4) Manejo integral de residuos; 5) Energía asequible y no contaminante; 6) Vida submarina y ecosistemas terrestres; y 7) Movilidad sustentable.

Entre los dos objetivos que tiene la política pública *Acción por el clima* destaca el primero, el cual tiene como propósito *disminuir la vulnerabilidad del estado ante los efectos del cambio climático* y dos líneas de acción asociadas a dicho objetivo: promover la realización de estudios e investigaciones sobre posibles efectos derivados de este fenómeno; y promover ante la población la adopción de medidas de adaptación y mitigación ante el cambio climático. Por otra parte, para la política pública *Energía asequible y no contaminante*, resaltan los dos objetivos: incrementar la generación de energía no contaminante en Yucatán; y mejorar el acceso a energías limpias en el estado. Dichos objetivos en conjunto contienen cuatro estrategias y catorce líneas de acción, todas enfocadas, directa e indirectamente, al despliegue de energías limpias y a la eficiencia energética del mismo.

Tres de las estrategias establecidas en la política pública *Energía asequible y no contaminante* del Plan Estatal de Desarrollo Estatal se analizaron durante la elaboración de la ruta de descarbonización y serán claves para la implementación del presupuesto de carbono del sector eléctrico del estado. Estas tres estrategias son: impulsar el desarrollo tecnológico de energías limpias, impulsar la generación de energía de fuentes renovables y la eficiencia energética compatible con el entorno social y ambiental y fomentar la generación de energías limpias. En

conjunto, dichas estrategias tienen como meta generar por medio de energías limpias 19.45 GWh/a de electricidad (por encima del promedio nacional de 881 GWh/a) al 2024. Meta que, de acuerdo con la última información proporcionada por el estado de Yucatán⁴, ha sido alcanzada, al contar actualmente con una capacidad instalada de 300 MW a gran escala y 67.5 MW de generación distribuida, que en conjunto generan 915 GWh/a de electricidad (hasta octubre de 2021). No obstante, será relevante considerar la contribución de las energías limpias en el futuro al presupuesto de carbono, así como explorar posibles incrementos de capacidad para la generación de electricidad a través de este tipo de energías, habilitados por las estrategias antes mencionadas.

4.2. Programa Especial Acción por el Clima

Entre las herramientas de planeación con las que cuenta el estado que apoyan las líneas de acción del *Plan Estatal de Desarrollo son los Programas de Mediano Plazo*. Estos funcionan como guías que permiten tener una referencia clara durante toda la administración, consiguiendo que el trabajo realizado no dependa de una persona sino de una política que tenga como base las instituciones. Dicho esto, el programa a analizar a continuación es el *Programa Especial Acción por el Clima*, el cual tiene dos vertientes importantes: 1) mitigación para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Tema Estratégico 1); y 2) adaptación para incrementar la resiliencia local y reducir la vulnerabilidad sectorial a los impactos del cambio climático (Tema Estratégico 2).

Particularmente, dentro del Tema Estratégico 1, en su primer objetivo se encuentra la Estrategia 1.1.1 en donde establece la promoción de la generación de energías renovables y la eficiencia energética para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Dicha estrategia está conformada por ocho líneas de acción, donde se destacan las siguientes: reforzar la producción de la energía solar fotovoltaica como medio de reducción de emisiones de GEI; gestionar la producción de la energía eólica para reducir las emisiones de GEI; desarrollar campañas de sensibilización sobre las ventajas y oportunidades en eficiencia energética; y consolidar la vinculación efectiva de los sectores académico, centros de investigación e industriales para el desarrollo óptimo de las energías renovables. Estas líneas de acción se encuentran identificadas a nivel operativo por dos proyectos estratégicos el desarrollo de proyectos energéticos y el acceso a energías limpias en el Estado.

De la misma manera que el *Plan Estatal de Desarrollo*, el *Programa Especial de Acción por el Clima* y sus ocho líneas de acción asociadas a la estrategia de promoción de la generación de energías renovables y la eficiencia energética para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero serán parte fundamental del grupo de medidas que se enlistará en las próximas etapas del proyecto. Cada una de ellas será analizada, de existir, principalmente por su potencial de mitigación, lo cual contribuirá al fortalecimiento de los esfuerzos para cumplir el presupuesto de carbono del sector eléctrico del Estado de Yucatán. De esta forma se lograrán alinear los esfuerzos de planeación del Estado sobre el cumplimiento de las metas del Acuerdo de París de mantener una TMG en 1.5°C.

4.3. Programa Especial de Innovación, conocimiento y tecnología y el Programa de Mediano Plazo: Yucatán con economía inclusiva

Otro instrumento de mediano plazo es el *Programa Especial de Innovación, Conocimiento y Tecnología*, el cual tiene como visión hacer de Yucatán un estado competitivo e innovador que promueva e incentive de manera permanente, sostenible e inclusiva la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación. Este programa, en su tema estratégico *Innovación, ciencia y tecnología para los derechos económicos, sociales, culturales ambientales de las personas*, tiene como táctica fortalecer proyectos estratégicos de inversión pública con impacto regional para su gestión y financiamiento conjunto, donde tiene como línea de acción favorecer el desarrollo de proyectos de energías renovables de acuerdo con las aptitudes geográficas del estado.

Adicional a este programa, se encuentra el *Programa de Mediano Plazo: Yucatán con economía inclusiva*, el cual tiene como finalidad garantizar que la población pueda gozar del ejercicio de sus derechos económicos sin distinciones. Ahora bien, en su Tema Estratégico 1: Ventajas competitivas del estado en su cuarta estrategia, el cual busca impulsar la gestión de condiciones que promuevan la competencia y estabilidad energética, se resalta la primera línea de acción la cual menciona la necesidad

⁴ Información proporcionada durante los talleres de socialización, llevados a cabo de junio a octubre de 2021, durante la elaboración del presente reporte.

de incentivar la oferta y demanda de energía limpia, por medio de asesorías gratuitas para los nuevos productores y hacer de conocimiento público los beneficios del nuevo mercado de Certificados de Energías Limpias (CEL).

En los instrumentos mencionados en el párrafo anterior, es importante destacar que a través de ejes como innovación y economía se busca también promover el despliegue de energía limpia en la región. Aun siendo complicado considerarlos como medidas específicas de mitigación para el cumplimiento del presupuesto de carbono, dichos esfuerzos apoyan al fortalecimiento y la articulación del catálogo de medidas que se determinará para generar la ruta de descarbonización del sector eléctrico del Estado de Yucatán.

4.4. Programas Regionales 2019-2024

Finalmente, dentro de la categoría de programas de mediano plazo se tienen los *Programas Regionales 2019-2024*. Dicho documento tiene como objeto ser una hoja de ruta que permita delimitar y focalizar las acciones del gobierno en las regiones del estado. Asimismo, estos programas tienen la finalidad de promover el desarrollo equitativo y sustentable del estado y disminuir las disparidades regionales. Los programas se encuentran divididos en 7 regiones: poniente, noroeste, centro, litoral centro, noreste, oriente y sur con cinco ejes temáticos cada uno. Particularmente, el eje *Medio Ambiente, Verde y Sustentable* señala que solo cuatro regiones de las siete consideran políticas públicas de acción climática y energía asequible y no contaminante. Estas cuatro regiones son: poniente, centro, noreste y sur. El objetivo principal de la política pública de energía asequible y no contaminante es mejorar el acceso a energías limpias en la región, teniendo como indicador la variación porcentual de capacidad instalada de generación eléctrica limpia en la región. Asimismo, es importante destacar que para esta política cada región elaboró su diagnóstico de potencial de energías renovables y determinó los proyectos deseados en función a dicho diagnóstico y líneas de acción.

Igual que en los dos instrumentos anteriores, los *Programas Regionales 2019-2024* tendrán un papel importante en el diagnóstico que se realizará para medir el potencial de generación de energía limpia del estado, ya que dicha herramienta contiene el potencial de energías renovables para las regiones poniente, centro, noreste y sur de Yucatán. Esto fortalecerá el análisis realizado a través de las plataformas como el *Inventario Nacional de Energías Limpias*, el *Atlas de Zonas de Alto Potencial de Energías Limpias*, entre otras. Además, la información presentada en los programas regionales permite la corroboración de la información desarrollada para la generación de medidas de mitigación del sector eléctrico.

4.5. Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán y el Reglamento de la Ley de Desarrollos Inmobiliarios del Estado de Yucatán

La *Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán*, en su Artículo 1, Fracción I establece como su objeto *proteger el ambiente del Estado de Yucatán, con el fin de regular y evitar efectos nocivos de origen antropogénico y natural* (DOF del Estado de Yucatán, 2010). Particularmente, en el Art. 13, Fracción II se menciona que deberá incentivarse a quien proteja el medio ambiente y promueve o realice acciones de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático.

Por su parte, en el *Reglamento de la Ley de Desarrollos Inmobiliarios del Estado de Yucatán*, en el apartado Anexo Técnico de Tecnologías Alternativas se establece que los proyectos deberán considerar la utilización de un 5% de energía alternativa generada por medio de energías renovables. Como se puede observar, el *Reglamento de la Ley de Desarrollos Inmobiliarios del Estado de Yucatán* abona a las medidas consideradas para la elaboración de la ruta de descarbonización, lo que permite que no solo se considere aquellas medidas que se encuentren relacionadas con la generación de energías renovables, sino también que los proyectos inmobiliarios tengan la obligación de cumplir con la cuota de utilizar al menos un 5% de energía renovable. En este sentido, se explorarán acciones relacionadas con el despliegue de la generación solar distribuida.

4.6. Acuerdo entre gobernadores de la península de Yucatán en materia de cambio climático

En el marco de la COP16 que se llevó a cabo en Cancún, Quintana Roo, se firmó el Acuerdo entre gobernadores de la península de Yucatán en materia de cambio climático. Dicha acción, de acuerdo con el Estado de Yucatán, representa un modelo de gobernanza de las autoridades subnacionales para coordinar esfuerzos y recursos para

emprender iniciativas regionales de mitigación y adaptación al cambio climático. Particularmente, al revisar la agenda de trabajo de Yucatán se destaca la participación del Estado en la Conferencia de las Partes sobre el Cambio Climático (COP25) donde se expusieron iniciativas como *Yucatán Cero Residuos*, *Arborizando Yucatán*, y la promoción de la movilidad urbana sostenible.

Además, se estableció la existencia de una línea de acción para incentivar a los jóvenes a crear soluciones climáticas, desarrollo de tecnologías energéticamente eficientes y el fomento del consumo sostenible. Otro proyecto regional importante que forma parte de la estrategia mencionada es el *Fondo de Cambio Climático de la Península de Yucatán* el cual tiene como propósito obtener y distribuir los fondos y dirigirlos a cinco actividades entre ellas a acciones que apoyen a la reducción de emisiones de GEI. En particular, una de las líneas de acción específicas del dicho proyecto está enfocada en garantizar la sustentabilidad medioambiental del uso de energías renovables.

4.7. Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Yucatán

Para finalizar el análisis del marco jurídico y programático de Yucatán, se presenta el *Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Yucatán año base 2005*, elaborado en 2013. Los sectores considerados en este inventario son los sugeridos por el IPCC⁵: energía, procesos industriales, agricultura, uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSS) y desechos. En la siguiente tabla, se presenta un resumen de los GEI reportados:

Tabla 2: Emisiones totales de GEI del Estado de Yucatán para el año 2005 por sectores.

Sector	Emisiones (Gg de CO ₂ e)	Proporción sobre el total de emisiones (%)
Energía	6,006.28	59.29
Procesos Industriales	588.73	5.81

Sector	Emisiones (Gg de CO ₂ e)	Proporción sobre el total de emisiones (%)
Agricultura	1,844.80	18.21
USCUSS	1,360.08	13.43
Desechos	330.30	3.26
TOTAL	10,130.19	100

Fuente: Inventario de Gases de Efecto Invernadero del Estado de Yucatán, año base 2005

Para el sector energía, de acuerdo con el inventario, las emisiones provienen en su mayoría de la quema de combustibles fósiles en fuentes fijas de combustión (por ejemplo, la generación eléctrica e industria de la manufactura y la construcción) y fuentes móviles de combustión, principalmente transporte carretero, aviación y marítimo (Gobierno de Yucatán, 2013). En la tabla, que se presenta a continuación se resumen las subcategorías del sector, sus emisiones de CO₂e y su proporción sobre el total de emisiones del sector energía. Dichas proporciones nos ayudarán a determinar la asignación que se utilizará para la determinación del presupuesto de carbono del sector eléctrico del Estado. Es importante aclarar que los resultados expuestos en el presente documento están sujetos a la actualización de 2021 del Inventario Estatal de GEI.

Tabla 3: Emisiones totales de GEI del sector Energía del estado de Yucatán para el año 2005.

Subcategorías del sector energía	Emisiones CO ₂ e (Gg)	Proporción sobre el total de emisiones del sector energía (%)
Industrias de la energía	3,457.93	57.57
Industrias manufactureras	388.29	6.46
Transporte	2,155.97	35.89
Servicios	4.09	0.07
TOTAL	6,006.28	100

Fuente: Inventario de Gases de Efecto Invernadero del estado de Yucatán, año base 2005

5. METODOLOGÍA

La asignación de presupuestos de carbono tiene como objetivos una distribución justa de los esfuerzos de mitigación entre países o regiones y limitar la TMG por debajo de los 2°C (Rogelj *et al.*, 2018; Steininger *et al.*, 2020). El establecimiento de estándares y expectativas para los presupuestos de carbono nacionales se ha visto frenado por el estado de las negociaciones climáticas internacionales y la difícil redefinición del principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas. No obstante, distintas entidades nacionales y subnacionales han realizado estimaciones de un presupuesto de carbono con el objetivo de establecer metas de reducción de emisiones en línea con las metas climáticas globales.

Existen varios métodos propuestos para dividir el presupuesto de carbono global entre países y regiones (Rau-pach *et al.*, 2014). De acuerdo con Gignac y Matthews (2015), la asignación de los presupuestos de carbono sigue dos principales tendencias. Por un lado, las asignaciones pueden basarse en la proporción de emisiones nacionales de GEI (asignación soberana), mientras que, por otro lado, dichas asignaciones pueden estar basadas en emisiones *per cápita* (asignación de igualdad) (Gignac y Matthews, 2015).

El establecimiento de un presupuesto de carbono que se base en las cuotas de emisión de GEI (asignación soberana), es decir, emisiones acumuladas históricas por país divididas por las emisiones mundiales acumuladas históricas, es sencillo y para ello se pueden utilizar los datos históricos estimados por el Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto Climático (PIK) (Ramonés *et al.*, 2019).

Por su parte, la consideración de las emisiones *per cápita* se ha dado tradicionalmente a través del método de contracción y convergencia (asignación de igualdad) desarrollado por el *Global Commons Institute* (Meyer, 2000). Este método consiste en un proceso de dos etapas que establece un objetivo de emisiones *per cápita* para un año determinado que deben alcanzar todos los países o regiones (Ramonés *et al.*, 2019). El fundamento de este método se basa en un aumento o disminución inicial de las emisiones (en función de las emisiones *per cápita* del país concreto) y su convergencia con el objetivo *per cápita* establecido.

Si bien el enfoque de convergencia de la contracción toma en consideración las desigualdades que se ajustan gradualmente, no considera la responsabilidad histórica de los diferentes países. Por lo tanto, la cuestión de la inequidad y la asignación justa de un presupuesto de carbono es compleja y todavía requiere un mayor grado de análisis.

Además de los métodos de asignación nacional ya mencionados, Rogelj *et al.* (2016) señalan que existen dos enfoques que se pueden utilizar para clasificar presupuestos de carbono en términos de sus picos máximos de temperatura alcanzada. El primer enfoque considera sólo aquellos escenarios que se mantienen en todo momento por debajo del umbral de temperatura establecido, es decir, 1.5°C o 2°C de calentamiento y producen lo que se conoce como Presupuestos de Evitación de Temperatura (TAB, por sus siglas en inglés). El segundo enfoque considera escenarios de emisión que superan momentáneamente estos umbrales de temperatura pero que luego se estabilizan en el objetivo establecido de 1.5°C o 2°C, generando lo que se conoce como Presupuestos de Excedencia de la Temperatura (TEB, por sus siglas en inglés).

Dentro del marco conceptual para el diseño de una política climática acorde con los objetivos del Acuerdo de París, el método más adecuado es el seguido por los TAB (Meinshausen, Du Pont y Talberg, 2018). Desafortunadamente, los TEB son más frecuentes en la literatura. Las razones a favor de una acción temprana están relacionadas con el aprovechamiento de opciones de bajo costo y la creación de inercia para la transformación económica. En cuanto a los argumentos a favor de retrasar la acción, éstos corresponden a posturas optimistas con respecto al desarrollo tecnológico en el futuro, en especial el de tecnologías de emisiones negativas o de captura y almacenamiento de carbono.

Con base en la contribución histórica de México en las emisiones globales de GEI (1.39%), de la base de datos del Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), se determinó el porcentaje de emisiones que representa el estado de Yucatán a las emisiones globales. Después, como referencia para obtener la proporción del estado con respecto al país, se tomó en consideración la Actualización del Inventario de Gases de Efecto Invernadero de

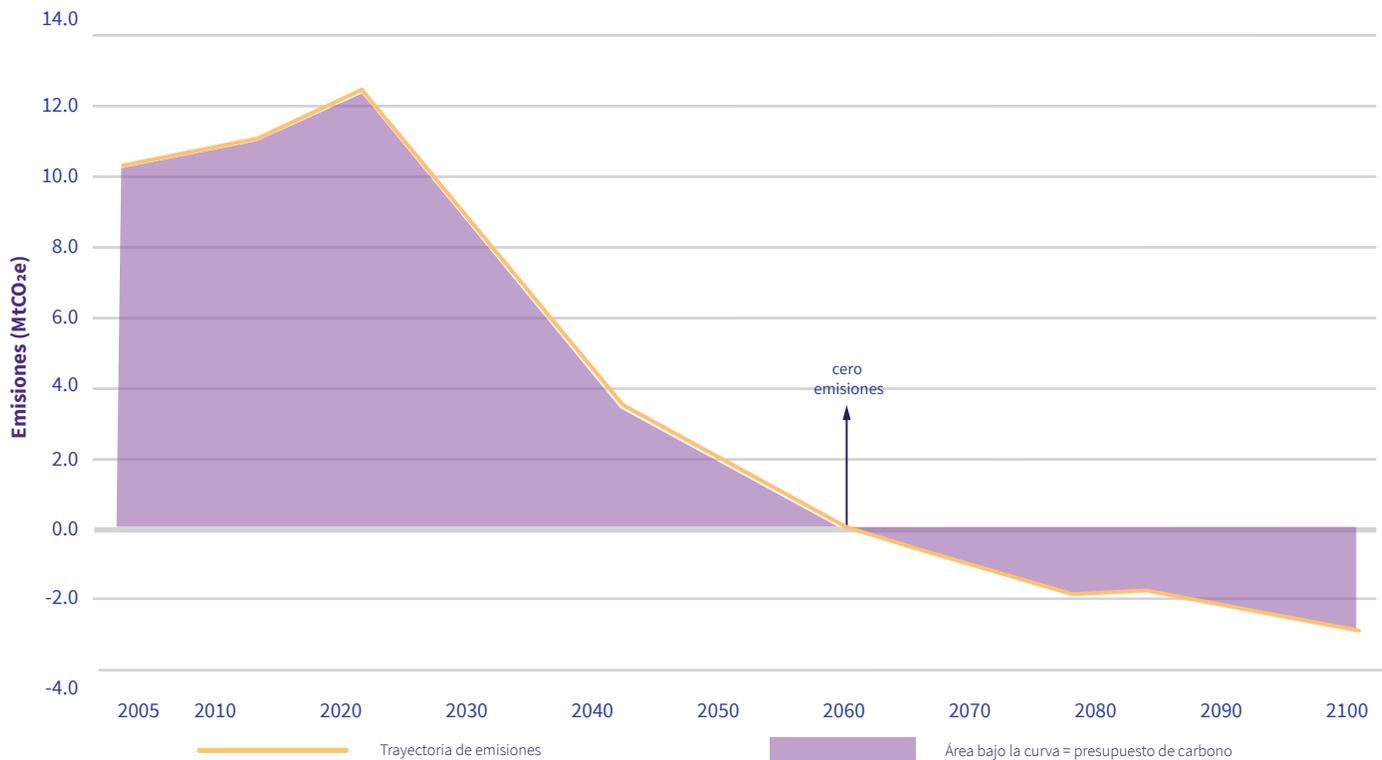
Yucatán 2005⁶ y sus respectivos sectores (energía, procesos industriales y uso de productos, AFOLU y residuos), así como las emisiones indirectas representadas por el consumo eléctrico.

Este último rubro es importante en el desarrollo de la metodología, ya que más adelante se presentará el presupuesto de carbono del estado de Yucatán correspondiente al sector eléctrico. La decisión de agregar el consumo eléctrico para el estado se debe a que el estado pertenece al Sistema Eléctrico Nacional. En este sistema existe un equilibrio entre la generación y la demanda eléctricas nacionales, esto significa que para determinar la responsabilidad del estado sobre sus emisiones del sector eléctrico es más adecuado considerar el consumo eléctrico del territorio⁷. Para encontrar las emisiones del consumo eléctrico de Yucatán, primero se obtuvo el consumo estatal para el año 2017 (3,717,774.91 MWh) y el factor emisión de la red (0.58 tCO₂/MWh⁸), resultando en 2.16 MtCO₂e. Sin embargo, si se consideran las pérdidas de la Red Nacional de Transmisión y la Red de Distribución reportadas por

el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) para el 2017, las emisiones del estado ascienden a 2.58 MtCO₂e.

Considerando lo anterior, el siguiente paso fue determinar las emisiones totales del país para el año 2017. Dicha cifra se calculó a través de un ejercicio de proyección para actualizar el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero del INECC, estimándose en 733.82 MtCO₂e para 2017. Obteniendo las emisiones totales nacionales y la cifra de emisiones del estado, la asignación del estado con respecto al país resultó en 1.6 %. **Para conseguir la trayectoria del estado, esta cantidad se multiplica por el 1.39 % de las emisiones históricas del país resultando en 0.022%, lo cual representa la proporción del estado de Yucatán dentro de las emisiones globales.** Con base en esta proporción, y de acuerdo con la trayectoria de emisiones estimada por el Instituto de Estudios Avanzados de Sostenibilidad (IASS, por sus siglas en inglés), a continuación, se presenta la trayectoria de emisiones que el estado de Yucatán tendría que seguir para cumplir con el objetivo de 1.5°C del Acuerdo de París (Figura 1).

Figura 1: Trayectoria del estado de Yucatán para alcanzar una TMG de 1.5°C



- 6 Es importante aclarar que los resultados expuestos en este entregable están sujetos a la actualización del Inventario que se está llevando a cabo el estado de Yucatán en el año 2021.
- 7 De acuerdo con la metodología del IPCC, se deben cuantificar las emisiones por la producción de electricidad que operan dentro del territorio inventariado. Sin embargo, para homologar la metodología se toma en cuenta como referencia las emisiones asociadas al consumo eléctrico y se elimina las emisiones de la industria eléctrica.
- 8 Factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional, 2017 CRE.

Como se puede observar, esta trayectoria muestra que, con base en la trayectoria del modelo para el cálculo del presupuesto de carbono, el estado de Yucatán alcanzaría la neutralidad de carbono en el año 2060. Sin embargo, es importante mencionar que esta trayectoria aún no incluye las medidas de mitigación consideradas en la Ruta de Descarbonización del estado, con lo cual esta neutralidad de carbono podría alcanzarse en 2029, lo cual se abordará en la siguiente sección del documento.

Una vez establecida la trayectoria de emisiones para el estado de Yucatán, el siguiente paso es obtener la ecuación que la represente:

Ecuación 1:

$$T_{Yucatán} = 0.000047t^3 - 0.288475t^2 + 588.8118t - 400438.6376$$

Donde, la variable dependiente corresponde a las emisiones anuales de dióxido de carbono equivalente ($T_{Yucatán}$) en Megatoneladas de dióxido de carbono equivalente ($MtCO_2e$) y la variable independiente es el tiempo (t) en años. Como se puede observar, la ecuación anterior es una función polinomial de tercer grado con un coeficiente de correlación

(R^2) de 0.9457, lo cual representa un alto nivel de asociación directa entre el tiempo y las emisiones anuales⁹.

Como siguiente paso, se debe obtener la integral ($B_{Yucatán}$) que represente el área bajo la curva de la trayectoria de emisiones del estado de Yucatán para el periodo 2019 al 2100. De esta forma, se determina la función integral de la Ecuación 1 y se evalúa para el intervalo 2019-2100, de la siguiente manera:

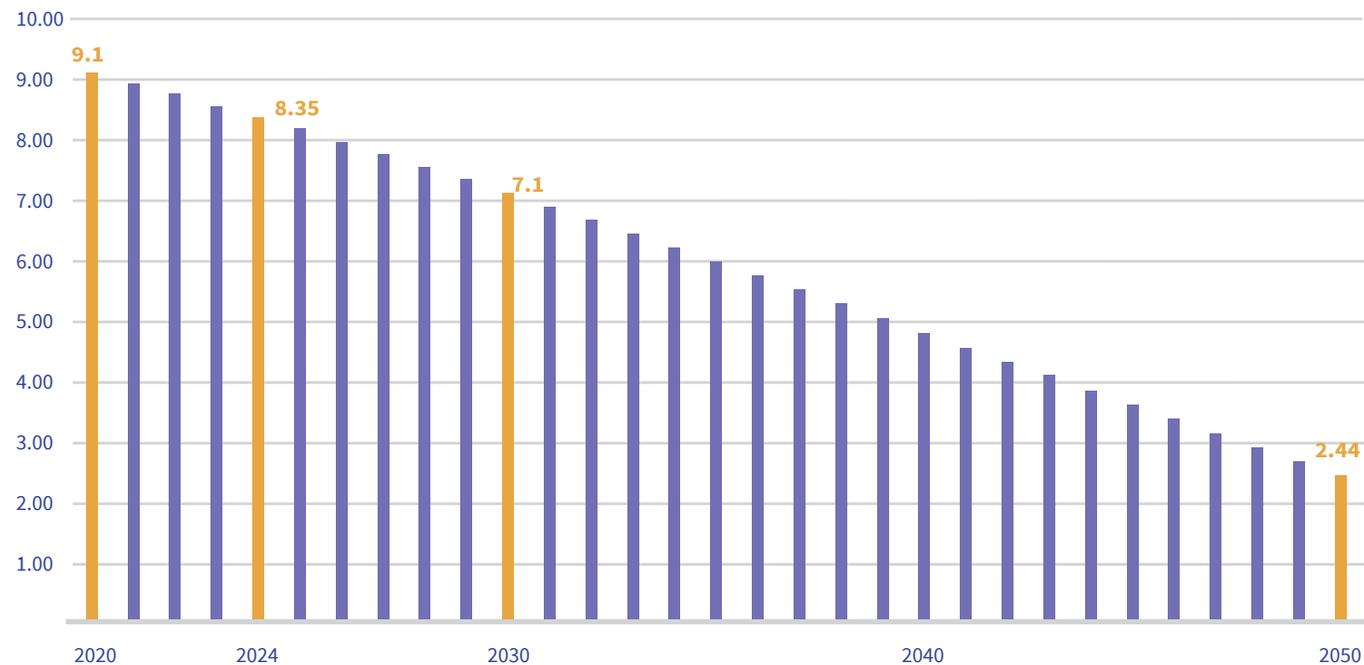
Ecuación 2:

$$B_{Yucatán} = \int_{2019}^{2100} (0.000047t^3 - 0.288475t^2 + 588.8118t - 400438.6376) dt$$

Resolviendo y evaluando la Ecuación 2, se estimó que el presupuesto de carbono para el estado es de Yucatán en 153.16 $MtCO_2e$.

Utilizando como punto de partida la misma metodología empleada para la estimación del presupuesto de carbono para el estado de Yucatán, donde se evalúa la ecuación 2 de manera anual, a continuación, el límite de emisiones que tendría que cumplir el estado para mantenerse en una trayectoria de emisiones alineada al escenario de 1.5°C.

Figura 2: Propuesta de metas de mitigación del estado para el periodo 2020-2050 para mantener la TMG en 1.5°C



Por último, es importante señalar que existen diferentes elementos metodológicos que fueron considerados y aso-

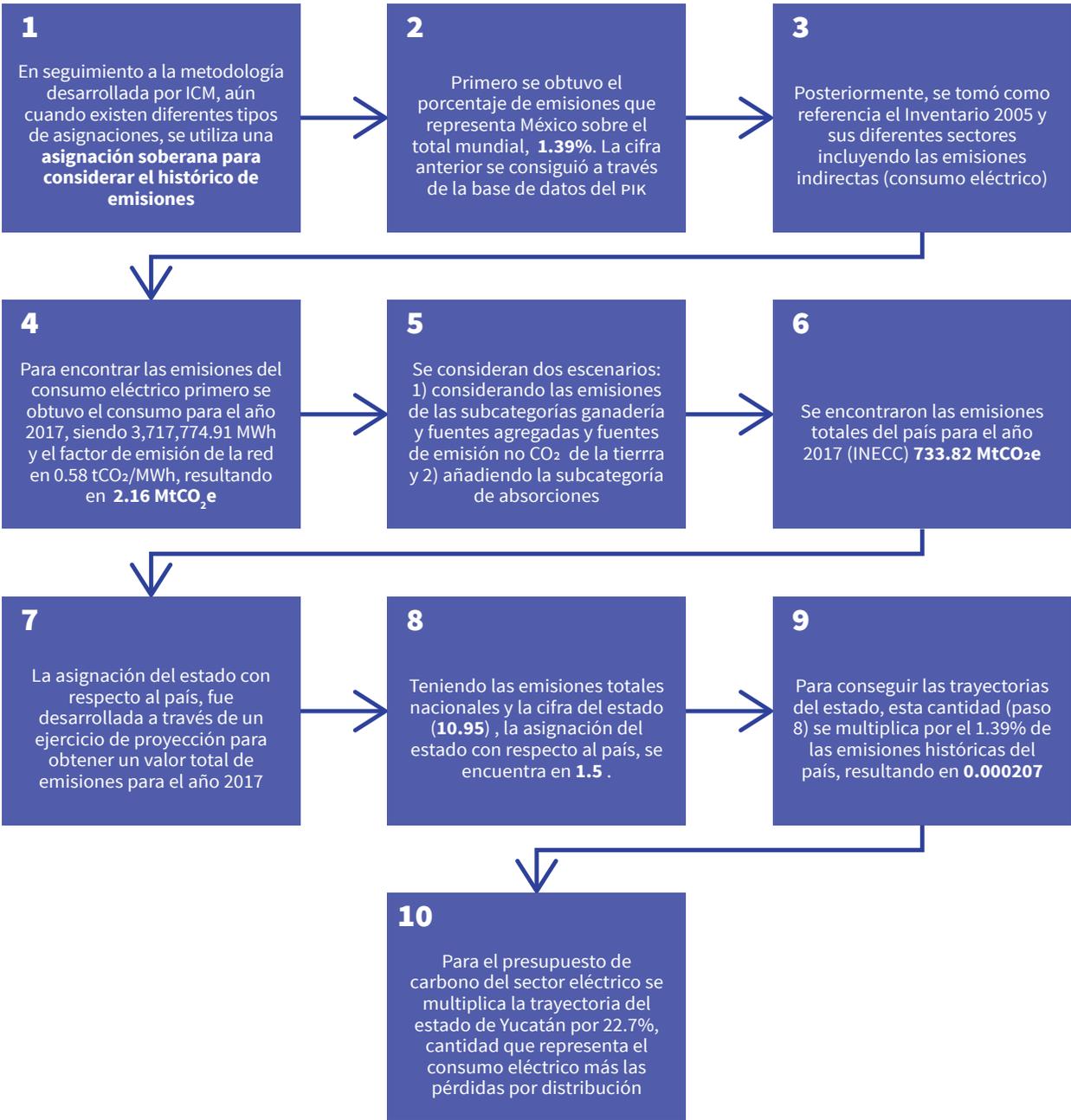
ciados a la estimación de presupuesto de carbono subnacional. El primero son las cero emisiones netas que, como

⁹ El coeficiente de correlación indica el grado o nivel de vinculación directa que existe entre las variables de la ecuación, en este caso, las emisiones y el tiempo. Mientras más cercano a 1 sea el valor del coeficiente de correlación, más certera es la validez de los datos.

se pueden observar en la sección 3 del presente documento, los diferentes compromisos internacionales establecidos en los últimos años tienen como meta lograr las cero emisiones netas de dióxido de carbono en el año 2050. Sin embargo, debido a que la metodología desarrollada por la ICM considera las estimaciones de dióxido de carbono equivalente del Reporte Especial del IPCC, los resultados arrojan que las cero emisiones netas se lograrían hasta el año 2060. No obstante, como se mencionó anteriormente, este escenario puede cambiar una vez considerada la Ruta de Descarbonización en la metodología.

Otro aspecto metodológico, son las subcategorías de tierras y absorciones, dichos sectores son de gran relevancia para muchas entidades federativas y se reconoce el potencial de mitigación de las absorciones y el efecto que puede tener en la estimación de presupuesto de carbono. No obstante, no es posible crear una proporción consistente en estas subcategorías, ya que todavía no se han estimado dichos valores para el país. Esto significa que las estimaciones de las proporciones de asignación de los estados están en función de las emisiones totales brutas y no de las netas.

Figura 3: Resumen de metodología de cálculo del presupuesto de carbono para el sector eléctrico desarrollado por ICM.



6. RESULTADOS

6.1. Presupuesto de carbono y metas de mitigación del sector eléctrico

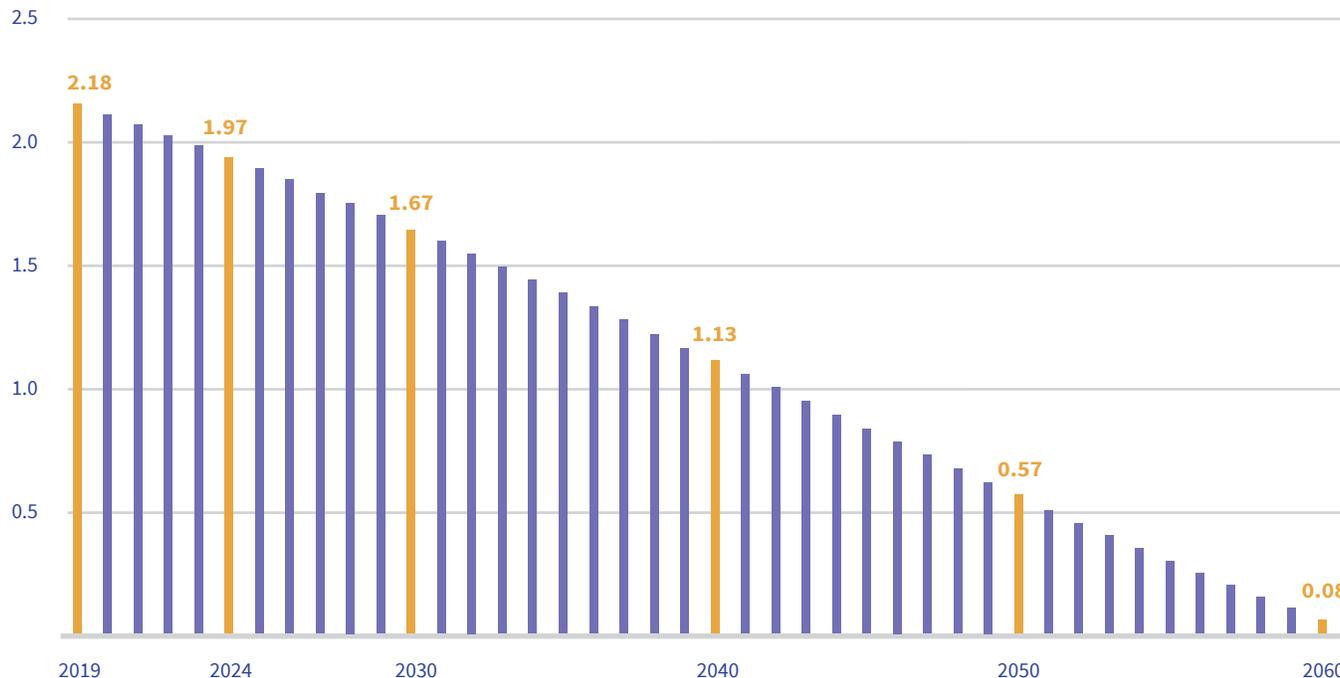
Para el cálculo del presupuesto de carbono del sector eléctrico del estado de Yucatán, se consideró que las emisiones del consumo eléctrico representan el 23% de las emisiones totales. Esta proporción fue calculada a partir del consumo eléctrico del estado durante el año 2017 y de la energía perdida debido a transformación y distribución reportada por el CENACE en 2021 y utilizando como

factor de conversión el factor de emisión establecido para el Sistema Eléctrico Nacional.

Como resultado, se obtuvo un presupuesto de carbono del sector eléctrico de 34.72 MtCO₂e para el período 2019-2100. Poniendo en perspectiva dicho valor, si se continuara el ritmo de generación de emisiones actuales por parte del sector eléctrico, el presupuesto de carbono se agotaría en el año 2030.

Al igual que el presupuesto de carbono del estado, para el sector eléctrico de Yucatán se calcularon las metas de mitigación anuales para el período 2020-2060, las cuales se presentan en la Figura 4.

Figura 4: Propuesta de metas de mitigación del sector eléctrico estatal para el periodo 2020-2060 para mantener la



TMG en 1.5°C.

En la Figura 4, es posible observar que para los años 2024, 2030 y 2050 el límite de emisiones que el estado debe de procurar es de 1.97, 1.67 y 0.57 MtCO₂e. Dichas cifras se-

rán el punto de referencia para la elaboración de metas de mitigación para el sector eléctrico que ayuden a construir la ruta de descarbonización para el sector.

6.2. Ruta de descarbonización para el sector eléctrico

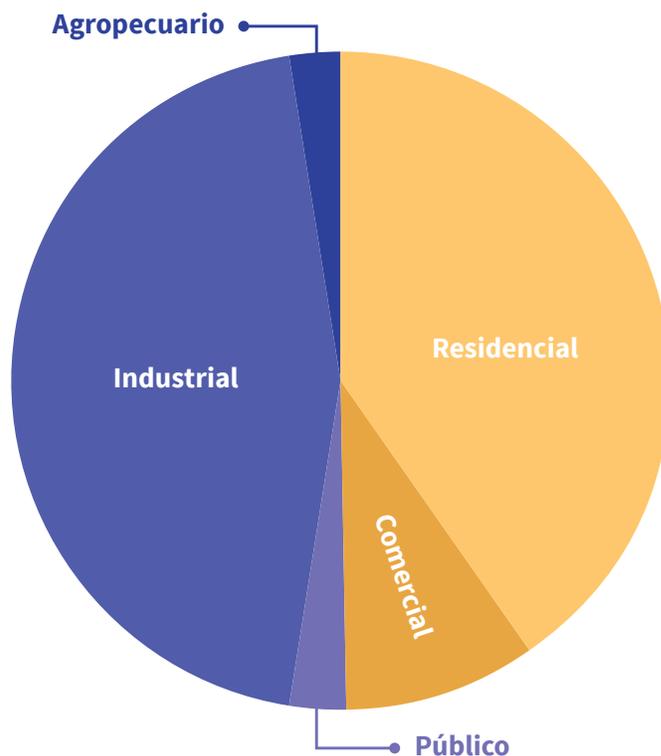
Antes de elaborar la ruta de descarbonización del sector eléctrico estatal, es importante contar con un diagnóstico del sector eléctrico que ayude a identificar el potencial del estado para el despliegue de energías renovables y medidas de eficiencia energética. La caracterización de la demanda del sector eléctrico encontró que el estado de Yucatán tuvo un consumo total de 3,950 GWh durante el 2017, así como un excedente energético, ya que el estado exportó 1,973.6 GWh para satisfacer la demanda de otros estados. Si bien el estado de Yucatán fue responsable de la generación de 5,917.1 GWh durante el 2019, solo el 8% provino de centrales eléctricas con tecnologías renovables como solar y eólica.

Dentro del consumo de energía eléctrica en el estado en 2019, el sector industrial destaca por representar el sector más intensivo, con un consumo de 1,819 GWh, seguido por el sector residencial con un consumo de 1,595 GWh.

Tecnología	Capacidad (MW)
Ciclo Combinado	1404.90
Combustión Interna	19.55
Turbogas	60.00
Turbina de Vapor	168.00
Fotovoltaica	51.78
Eólica	217.35 ¹⁰
TOTAL	1921.58

Fuente: Elaboración propia con datos de PRODESEN 2017-2031, PRODESEN 2018-2032 e información proporcionada por el Gobierno de Yucatán.

Figura 5: Consumo de energía eléctrica en 2019 en el estado de Yucatán.



Fuente: Elaboración propia con datos de usuarios y consumo de electricidad por municipio (2010-2017) y usuarios y consumo de electricidad por municipio (a partir de 2018).

Para poder identificar el potencial de generación de energías renovables de Yucatán, se realizó un análisis detallado de los principales proyectos de generación renovable propuestos por el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL), una evaluación a nivel municipal de los mapas de distribución y caracterización de cada recurso, así como la información sobre los Costos Nivelados de Energía reportados por organismos líderes en la materia. Los resultados del análisis realizado señalan que el potencial eólico permitiría la generación de 2,890.5 GWh adicionales de energía eléctrica, mientras que el potencial de energía solar podría contribuir en la generación de 317.85 GWh de energía eléctrica en Yucatán. En total, la inversión en proyectos de estas 2 energías renovables permitiría abastecer el 81.4% de la demanda actual de energía eléctrica limpia en el estado.

¹⁰ Al momento de elaborar este reporte, el estado de Yucatán contaba con una capacidad instalada de 244MW, que aún no había sido actualizada en la nueva versión del PRODESEN.

De igual forma, se calculó que 79,853 usuarios podrían hacer uso de sistemas fotovoltaicos para generación distribuida, de tal forma que el estado de Yucatán podría tener un potencial total de 764.5 MW a partir del establecimiento de la tecnología, particularmente en el sector comercial. Lo cual está en línea con la capacidad instalada estimada por el CENACE para el estado, la cual puede alcanzar 1.8 GW hacia el 2034 (CENACE, 2021).

Por otro lado, el Balance Energético del estado permitió señalar que la pérdida energética por transformación de electricidad en Yucatán es similar a la demanda eléctrica del sector residencial. Por lo tanto, la optimización en el proceso de transformación de energía podría mejorar el aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles, así como permitir la exportación de más energía.

El diagnóstico eléctrico del estado de Yucatán permite identificar los consumos sectoriales, así como la infraestructura de la red eléctrica del estado, para llevar a cabo la planeación e implementación de medidas de descarbonización contextualizadas.

El catálogo de medidas que será presentado a continuación tiene como propósito acelerar en el corto plazo la transición energética en el territorio estatal mediante el desarrollo de proyectos de alto impacto para descarbonizar el consumo de electricidad de Yucatán. Esta acción será una contribución significativa a la mitigación de GEI estatal, y servirá de ejemplo para que el resto de los factores económicos del estado se vean también involucrados.

Parte del análisis de las medidas considera la implementación de tecnologías para la eficiencia energética y generación de energía limpia en dos horizontes de tiempo: periodo de transición de 10 años para establecer objetivos a corto plazo, así como también evaluación del efecto desencadenado en los diferentes sectores estatales hasta el año 2050.

6.2.1. Catálogo de medidas identificadas

La ruta de descarbonización del sector eléctrico de Yucatán considera la implementación de tres medidas generales: eficiencia energética, usuario calificado y generación distribuida. Por un lado, la categoría general de eficiencia energética considera la sustitución o adquisición de tecnología eficiente para la disminución de la intensidad energética en los sectores público, industrial, comercial y residencial.

Por el lado de la medida de Usuario Calificado, se considera la identificación y registro de edificios públicos ante la CRE y la adquisición del suministro eléctrico como participante del mercado o mediante suministrador de servicios calificados, que de acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), son los usuarios con un nivel de demanda mayor o igual a 1 MW. Finalmente, la medida de generación distribuida engloba la introducción de tecnología solar fotovoltaica eléctrica a pequeña escala interconectada a un circuito de distribución que posibilita la interacción con la red eléctrica en las áreas disponibles de sector público, industrial, comercial y residencial.

En total, el catálogo de medidas de descarbonización del sector eléctrico considera la implementación de 15 diferentes acciones para los sectores público, industrial, comercial y residencial en la forma de eficiencia energética, usuario calificado y generación distribuida. Cada una de las medidas presenta su descripción técnica y supuestos para el cálculo del potencial de mitigación para un horizonte de 10 años. De igual manera, cada una de las medidas de mitigación presenta el co-beneficio¹¹ asociado en forma de creación de empleos directos e indirectos, la inversión total, así como el beneficio de mitigación por tonelada de CO₂e evitada al llevar a cabo la implementación de la medida.

6.2.1.1. Sector Público

En las siguientes secciones se presentan las medidas de mitigación para el sector público del estado de Yucatán. El sector público es uno de los que menos demanda eléctrica requiere, ya que sólo representa el 2.78% del consumo estatal, sin embargo, su participación en la implementación de las medidas de mitigación tanto en eficiencia energética, generación distribuida y registro de edificios en el esquema de usuario calificado es relevante para sentar el precedente y el ejemplo en el cumplimiento de las metas climáticas estatales por parte de los otros sectores.

6.2.1.1.1. Sustitución de focos LED en edificios de la administración pública de Yucatán

Esta medida de eficiencia energética contempla la sustitución total de las luminarias públicas de vapor de sodio del ayuntamiento de Mérida por iluminarias eficientes.

¹¹ El término co-beneficios hace referencia a los efectos positivos que se derivan de la implementación de una o varias políticas, estrategias o planes de acción de mitigación y adaptación para hacer frente al cambio climático (TWB, 2010; IAS, 2013; IPCC, 2014).

Particularmente la medida de eficiencia energética se enfoca en la ciudad de Mérida por ser la cabecera municipal, contar con más del 50% de la población estatal, las acciones en materia de eficiencia energética y renovables especificados en su plan municipal, así como la infraestructura de edificaciones y servicios.

La tecnología propuesta contempla lámparas LED T8 de 15W, con un potencial de ahorro entre 30% (Islas-Sampeiro *et al.*, 2020) y 90% con respecto al luminarias convencionales (SECOVISA-SENER, 2015).

Para llevar a cabo la medición del potencial estatal con respecto a focos ahorradores LED, se utilizó como referencia la lista de edificios públicos con sus respectivas facturas de consumo eléctrico del año 2019. Además, se hizo una segmentación de los edificios públicos dependiendo de sus funciones, es decir, oficinas administrativas, escuelas y hospitales públicos. Posteriormente se realizó el agregado de consumo eléctrico anual por tipo de edificio y se calculó el gasto energético correspondiente a la iluminación para cada tipología de inmuebles. De acuerdo con Acosta *et al.* (2019), CONUEE (2019) y Comisión Europea (2011) se identificó que la iluminación corresponde al 50% del consumo eléctrico en oficinas, el 30% en hospitales y el 15% en escuelas. Por lo tanto, utilizando dichos valores, se calculó el consumo eléctrico ac-

tual por el uso de luminarias en cada uno de los edificios públicos de Yucatán según su tipología.

Con base en lo anterior, se estimó que 226,011 lámparas deberán ser sustituidas por lámparas eficientes de tecnología LED de 15W. De igual forma, la medida considera el recambio de 67,803 lámparas a los 7 años. Utilizando de manera convencional un ahorro del 60% en consumo eléctrico por iluminación con focos ahorradores LED, se calculó también el nuevo gasto energético al llevar a cabo la sustitución.

Para el cálculo de los co-beneficios, es decir, creación neta de empleos a partir de medidas de eficiencia energética, se utilizó como referencia el análisis realizado por el Consejo Americano para la Economía de Eficiencia Energética (ACEEE, por sus siglas en inglés). Como supuesto se consideró una creación de 21 empleos netos por cada millón de dólares de inversión en la medida de eficiencia energética (ACEEE, 2011) y se consideró una tasa de cambio de 19.26 MXN por cada dólar.

Los resultados de la aplicación de la medida de sustitución de focos LED en edificios de la administración pública de Mérida, se presentan a continuación:

Tabla 6: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector público.

Edificio Público	Número de Edificios	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Oficinas administrativas	557	569,760	1,173	34.7	2,712
Escuelas públicas	1,953	71,150	152	4.3	11,952
Hospitales públicos	123	56,990	122	3.5	11,952
Total	2,633	697,900	1,447	42.5	26,616

En la tabla 6 se destaca el hecho de que, en solo 10 años, hacia el 2030, la aplicación de esta medida reduce un total de 697,900 tCO₂e, representando un beneficio económico para el estado superior a los de 26,000 MXN por cada tonelada de CO₂ equivalente que se mitiga, aunado a la generación de más de 1,400 empleos.

6.2.1.1.2. Sustitución de luminarias públicas de vapor de sodio por eficientes

Esta medida de eficiencia energética contempla la sustitución total de las luminarias públicas de vapor de sodio del ayuntamiento de Mérida por luminarias eficientes.

La tecnología propuesta contempla lámparas LED T8 de 15W, con un potencial de ahorro entre 30% (Islas-Sampeiro *et al.*, 2020) y 90% con respecto al luminarias convencionales (SECOVISA-SENER, 2015).

Con base en el consumo de iluminación de servicios públicos, se estimó que 85,938 lámparas deberán ser sustituidas por lámparas eficientes de tecnología LED de 15W. De igual forma, la medida considera la sustitución de 8,595 lámparas por año durante un periodo de transición de 10 años. Utilizando de manera convencional un ahorro del 60% en consumo eléctrico por iluminación con luminarias ahorradoras LED, se calculó también el nuevo gasto energético al llevar a cabo la sustitución.

Tabla 7: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector público.

Concepto	Luminarias	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Ayuntamiento de Mérida	85,938	105,072	2,482	70.3	9,774

En comparación con la medida implementación de focos LED, la sustitución de luminarias públicas por iluminación eficiente, a pesar de requerir una inversión 65% mayor, esta medida mitiga 7 veces menos emisiones. Sin embargo, tiene la capacidad de generar 72% más empleos.

6.2.1.1.3. Registro de edificios de la administración pública como Usuario Calificado

Esta medida contempla la capacidad del sector público de adquirir suministro eléctrico directamente del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) mediante el registro de sus edificios ante la Comisión Reguladora de Energía (CRE) a través de un suministrador de servicios calificados (SSC) que ofrezca “tarifas verdes”, con las cuales se certifica un mayor suministro de energías limpias al consumidor.

Los edificios considerados para la implementación de esta medida son aquellos que cuenten con un nivel de demanda mayor o igual a 1 MW, así como también por medio de la unión de puntos de carga.

Para el caso de Yucatán, se utilizó como referencia la lista de edificios de la administración pública del estado con sus respectivas facturas de consumo eléctrico. Posteriormente, se realizó una diferenciación entre los edificios que tenían una demanda contratada mayor a 1 MW, así como también los edificios con un consumo anual superior a 700 MWh. Lo anterior se realizó con la intención de darle oportunidad a los edificios con alto consumo de catalogarse bajo el esquema de Usuario Calificado a partir de la unión de puntos de carga para las diferentes dependencias. De un total de 2,639 edificios públicos, solamente se seleccionaron 21 inmuebles para la medición del potencial de mitigación por medio del registro de usuario calificado ante la CRE.

La medida también considera que no se requiere de una inversión económica inicial por la implementación de la acción, ya que se asume que la nueva tarifa como usuario calificado cubrirá tales costos.

Con respecto al proveedor de energía limpia, para el cálculo de esta medida se consideró una tarifa ponderada, la cual se compone en parte por la energía adquirida por dicho proveedor, de distintas fuentes de energía limpia, y en parte por la energía adquirida a un “ejido solar”, que representa el 33% del valor total de la tarifa; en términos de la cantidad de energía que este ejido puede otorgar al proveedor de energía.

El ejido solar es un mecanismo que ofrece la oportunidad de incluir a la tecnología solar fotovoltaica en un segmento de la población, que habitualmente ha sido relegado del desarrollo económico y social, a partir de una granja solar con capacidad instalada de 499 kW, de acuerdo con el límite establecido por la legislación para ser considerado como generador exento, para descarbonizar respectivamente el consumo eléctrico. Particularmente, el beneficio del ejido solar sería bilateral puesto que los ejidatarios se verían beneficiados económicamente gracias a la venta total de la energía eléctrica generada por la granja solar, mientras que a la red eléctrica se le suministraría con fuentes renovables.

Además, para la realización del cálculo de ahorro se considera que la tarifa de Gran Demanda en Media Tensión horaria (GDMTH)¹² presenta el precio de 2.51 MXN/kWh, mientras que la tarifa ponderada de usuario calificado radica en 2.4 MXN/kWh. Aunado a lo anterior, se considera también que ambas tarifas eléctricas presentarán un incremento anual del 4% debido a la inflación.

Para el cálculo de los co-beneficios, es decir, la creación neta de empleos a partir del registro de edificios de la administración pública de Yucatán como Usuarios Calificados y el desarrollo del proyecto de ejido solar, se utilizó como referencia el Modelo internacional de empleo y desarrollo económico (I-JEDI) con un año base 2020.

¹² La Tarifa GDMTH aplica para los servicios cuya demanda es mayor o igual a los 100 kW y tiene la particularidad de que el costo de energía (kWh) depende de la hora en la que ésta sea consumida.

Tabla 8: Potencial de mitigación de medidas de usuario calificado en el estado de Yucatán.

Medida	Edificios	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Ahorro (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Usuario Calificado	21	95,382	453	117	1,226

De todas las medidas propuestas para el sector público, esta medida es la única que no precisa de una inversión inicial para poder ser llevada a cabo. A pesar de que los co-beneficios de generación de empleos y ahorros para el sector pudieran no ser representativos en comparación con otras medidas propuestas, es importante destacar que esta medida evita una cantidad considerable de emisiones y puede ser aplicada en el corto plazo y reflejando sus beneficios en un periodo menor de tiempo.

6.2.1.1.4. Generación distribuida en edificios públicos de la administración pública de Yucatán

Para ser considerado como generador exento, de acuerdo con el límite establecido por la legislación, la medida de generación distribuida considera la instalación de paneles solares de hasta 499 kW en las áreas potenciales disponibles. Para el cálculo del potencial de mitigación de emisiones estatales en los edificios del sector público, se calcularon las emisiones mitigadas por año para un total de 1,477 edificios de la administración pública del estado de Yucatán. En particular, para esta medición se consideraron ciertos supuestos para la estimación del área disponible por edificio.

La capacidad de los módulos fotovoltaicos es considerada en 345 W. Dependiendo del tipo de edificio de administración de la lista proporcionada, se consideró que, para un clima cálido húmedo, se tiene un consumo de 199.7 kWh/m²año en oficinas, 98.2 kWh/m²año en escuelas y 393.4 kWh/m²año en hospitales (CONUEE, 2019). A partir del consumo anual de cada uno de los edificios, así como las relaciones de consumo por área dependiendo del edificio

se estimó el área aproximada disponible para la instalación de paneles solares.

Posterior a un análisis de mapas digitales del muestreo representativo de 37 edificios públicos, se consideró como supuesto que, en promedio, los inmuebles cuentan con dos niveles de construcción, así como una disponibilidad del 80% de techos sin sombras. Por lo tanto, dichas características permitieron establecer el estimado de área disponible para los módulos fotovoltaicos.

Para estimar la capacidad instalada de tecnología fotovoltaica en estos edificios, se aplicó el supuesto de que por cada 1 kW instalado de tecnología fotovoltaica se necesitan 15m² por kW. Se excluyó de la estimación aquellos edificios cuya área disponible requiriera una capacidad instalada mayor a 499 kW. De tal manera que el resultado permitió estimar la capacidad instalada potencial por edificio. Finalmente, se determinó que las áreas disponibles de estos edificios permiten la instalación de hasta 11.6 MW de paneles solares a nivel estatal y una generación de 21.2 GWh por año.

Para el primer año de operación de los paneles solares a nivel estatal se espera una mitigación de 10,713 tCO₂e. Dicho valor resulta de multiplicar la generación de 21,214.1MWh anuales por un factor de emisión de 0.505tCO₂e/MWh en el año 2019.

Para el cálculo de los co-beneficios, es decir, creación neta de empleos a partir del desarrollo de proyectos solar fotovoltaicos, se utilizó como referencia el Modelo internacional de empleo y desarrollo económico (I-JEDI) con año base 2020.

Tabla 9: Potencial de mitigación de medidas de generación distribuida en el sector público.

Medida	Edificios	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Generación Distribuida	1,477	104,721	8,600	289.4 ¹³	1,255

¹³ Considera el costo por mantenimiento mayor (sustitución de inversores) durante el año 13.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 9, podemos destacar que hacia el 2030 la aplicación de esta medida sí genera un retorno de inversión, en comparación con la misma aplicada a otros sectores como el industrial o el comercial, como se analizará en las siguientes secciones. Además, reduce más de 104,000 tCO₂e y genera alrededor de 8,600 empleos.

6.2.1.2. Sector Industrial

En las siguientes secciones se presentan las medidas de mitigación para el sector industrial del estado de Yucatán. A pesar de que el sector industrial de Yucatán demanda y consume la mayor cantidad de energía del estado con un consumo de 1,819 GWh en 2019, la realidad es que el consumo eléctrico industrial es localizado en muy pocos usuarios y centros de carga. Por lo tanto, las siguientes medidas representan el promedio de las diferentes escalas que podrían presentarse e implementarse por los diferentes usuarios del sector industrial.

6.2.1.2.1. Eficiencia energética por medio de la sustitución de motores eléctricos

Alrededor del 70% de la electricidad que se consume en el sector industrial corresponde al uso de motores eléctricos (De Almeida y Fong, 2011). La medida considera que un motor convencional consume un promedio anual de 46 MWh, y su sustitución por uno más eficiente permitirá un ahorro del 20% del consumo eléctrico por unidad (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

Dicha medida toma en cuenta el incremento de la demanda del consumo eléctrico del sector industrial y el consecuente incremento de motores que se encuentran en operación. Aunado a lo anterior, se asumió un costo promedio de motor industrial de 41,028 MXN, una tasa media de crecimiento anual de 2.07%, una tasa de interés de 4.25% y una inflación del 4% (BANXICO, 2021).

Al igual que para otras medidas de eficiencia energética, el cálculo de los co-beneficios (creación neta de empleos a partir de medidas de eficiencia energética), se utilizó como supuesto una creación de 21 empleos netos por cada millón de dólares de inversión en la medida de eficiencia energética (ACEEE, 2011) y se consideró una tasa de cambio de 19.26 MXN por cada dólar.

Tabla 10: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por sustitución de motores eficientes.

Medida	Motores	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Ahorro (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Sustitución de motores	13,566	332,466	13,566	333	2,268

Como se verá en esta sección, las medidas de eficiencia energética son de las más costo-efectivas para los sectores industrial y comercial. Tal es el caso de la medida de sustitución de motores, la cual duplica, en términos de un beneficio económico, la inversión necesaria para su aplicación.

Para el cálculo de potencial de mitigación, se considera un escenario de transición de 40 años para sustituir la totalidad de los motores por equipos más eficientes, es decir, hasta 64,449 motores eficientes en dicho escenario a largo plazo para el estado de Yucatán.

6.2.1.2.2. Eficiencia energética por medio de la implementación de variadores de velocidad ajustables (ASD)

Los ASD se utilizan como método para controlar el uso de la energía y la salida de potencia mecánica, ajustando la velocidad de los motores eléctricos para que el motor pueda funcionar a la velocidad más eficiente según el tamaño del motor y su uso final (Kent, 2018). La medida considera la instalación de variadores de velocidad ajustables (ASD) en motores eléctricos para mejorar la eficiencia operativa. Dicha acción permite un incremento del 20% adicional en el ahorro por consumo eléctrico del motor (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

Además, la medida considera el incremento de la demanda del consumo eléctrico del sector industrial y el consecuente incremento de motores operando, así como sus respectivos ASD. Aunado a lo anterior, se asumió un costo

promedio ASD de 62,852 MXN, una tasa media de crecimiento anual de 2.07%, una tasa de interés de 4.25% y una inflación del 4% (BANXICO, 2021).

Tabla 11: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por implementación de ASD.

Medida	ASD	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Implementación de ASD	13,566	332,466	13,566	855	1,553

Para el cálculo de potencial de mitigación hasta la neutralidad, se considera un escenario de transición de 40 años para instalar en la totalidad de los motores su respectivo ASD. Es decir, hasta 64,449 ASD en el sector industrial del estado.

con un consumo promedio anual de 995 MWh por unidad (FSTC, 2004). No obstante, la sustitución del refrigerador por uno más eficiente permitirá un ahorro del 25% del consumo eléctrico por equipo de refrigeración (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

6.2.1.2.3. Eficiencia energética por medio de la sustitución e instalación de refrigeradores eficientes en el sector industrial de Yucatán

Los refrigeradores industriales son responsables del consumo del 5% de la electricidad en el sector industrial,

La medida considera el incremento de la demanda del consumo eléctrico del sector industrial y el consecuente incremento de refrigeradores operando. Aunado a lo anterior, se asumió un costo promedio de refrigerador industrial de 16,798 MXN, una tasa media de crecimiento anual de 2.07%, una tasa de interés de 4.25% y una inflación del 4%.

Tabla 12: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por sustitución de refrigeradores eficientes.

Medida	Refrigeradores	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Sustitución de refrigerador eficiente	45	29,684	45	0.74	3,591

Para un escenario de transición de 40 años, donde se intente sustituir la totalidad de los refrigeradores por equipos más eficientes, tendrían que considerarse hasta 212 refrigeradores eficientes en dicho escenario de transición.

sistemas de aire comprimido (DOE, 2002). Sin embargo, la eliminación de fugas en tales sistemas podría promover un ahorro energético del 20% (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

6.2.1.2.4. Eficiencia energética por medio de la eliminación de fugas en aire comprimido

En promedio, cerca del 18% de la energía eléctrica consumida por un motor eléctrico se debe a la operación de

Esta medida de mitigación considera el incremento de la demanda del consumo eléctrico del sector industrial y el consecuente incremento de motores operando, así como la respectiva presencia de potenciales de fugas en sistemas de aire comprimido. Por lo tanto, para la modelación se asumió un consumo eléctrico promedio anual por sistema de aire comprimido de 114 MWh y un costo

promedio de 4,924 MXN para la eliminación de fugas en sistemas de aire comprimido (Islas-Samperio *et al.*, 2020). Además, se consideró como supuesto una tasa media de crecimiento anual de 2.07%, una tasa de interés de 4.25% y una inflación del 4%.

Además, su implementación considera un periodo de transición de 10 años, de tal forma que 930 sistemas de aire comprimido serán revisados y recibirán el mantenimiento necesario para la eliminación de fugas y mejorar la eficiencia energética de los sistemas.

Tabla 13: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por eliminación de fugas en aire comprimido.

Medida	Sistemas de Aire Comprimido	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Eliminación de fugas en aire comprimido	930	54,591	930	4.6	3,390

Para un escenario de transición de 30 años, donde se intenta eliminar la totalidad de fugas de aire comprimido por equipos más eficientes, tendrían que considerarse hasta 4,563 sistemas de aire comprimido eficientes en dicho escenario de transición.

uso medio de 15 horas/día (CONUEE, 2010). Esta medida de eficiencia energética contempla la sustitución total de las lámparas del sector industrial en un escenario de transición a 10 años. La tecnología propuesta contempla lámparas LED de 15W, con un potencial de ahorro entre 30% (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

6.2.1.2.5. Eficiencia energética por medio de la sustitución por focos eficientes LED en el sector industrial

Se estima que los sistemas de iluminación representan el 9% del consumo eléctrico del sector industrial con un

Con base a lo anterior, se estimó que 3,756,255 lámparas deberán ser sustituidas por lámparas eficientes de tecnología LED de 15W. Utilizando de manera convencional un ahorro del 60% en consumo eléctrico por iluminación con focos ahorradores LED, se calculó también el nuevo gasto energético al llevar a cabo la sustitución.

Tabla 14: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por sustitución de focos LED.

Medida	Foco LED	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Sustitución de focos LED	3,756,255	4,592,584	4,611	3,073	32,052

6.2.1.2.6. Instalación de aparatos para control de demanda en edificaciones industriales

Esta medida considera la instalación de sensores para medir la ocupación de un lugar, así como el uso de enchufes inteligentes capaces de medir el consumo de corriente, lo que permite ahorrar entre 20% (NAMA PYME, 2021) y 34% de energía eléctrica al cortar la alimentación de los aparatos que funcionan innecesariamente (Jun y Seo, 2015).

Para el cálculo del potencial de mitigación, se consideró el consumo eléctrico por iluminación del sector industrial y se asumió que hasta un 20% del consumo eléctrico de la iluminación podría ser ahorrado a partir de la implementación de la medida. Por lo tanto, se asumió un costo promedio de 262 MXN por cada MWh ahorrado a partir de la implementación de aparatos de control de demanda, una tasa media de crecimiento anual de 2.07%, una tasa de interés de 4.25%, una inflación del 4% y un costo de tarifa de 1.81 MXN por cada kWh.

Tabla 15: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector industrial por implementación de aparatos para control de demanda.

Medida	MWh Ahorrados	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Aparatos para control de demanda en sector industrial	234,390	115,789	96	470	2,056

6.2.1.2.7. Generación distribuida en edificios del sector industrial de Yucatán

La medida de generación distribuida considera la instalación de paneles solares de hasta 499 kW en las áreas potenciales disponibles de los edificios del sector industrial en Yucatán. El potencial de GD para el estado de Yucatán se trata de una estimación basada únicamente en el atractivo económico de utilizar sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica. No es un potencial técnico, ya que dentro del análisis no se considera la factibilidad técnica de instalación de los sistemas en los techos o terrenos de los usuarios potenciales ni la disponibilidad de interconexión eléctrica.

No obstante, según los datos de GD de la CRE corte junio 2020 se identificaron 2,728 usuarios del sector industrial para los cuales la tarifa de instalación de un sistema fotovoltaico resultaría atractiva. Con base en la capacidad promedio de la oferta comercial de módulos fotovoltaicos (345 W/módulo) (GIZ, 2020) para se obtuvo el potencial total de capacidad instalada en generación distribuida para el sector industrial de Yucatán de 630 MW.

Debido a la falta de facturas de consumo eléctrico para el sector industrial, se estimó el potencial de generación distribuida por unidad identificada en dicho sector. Este ejercicio resultó en la instalación de 231 kW de tecnología solar fotovoltaica por cada uno de los 2,728 edificios detectados. Sin embargo, para esta acción de mitigación, se considera un escenario de transición de 10 años donde inicialmente se instalarán los paneles solares en 682 edificios.

Además, como supuesto de generación eléctrica se consideró un factor de planta del 25%, es decir, una generación de 5.5 horas por día. Se asumió un costo promedio de 23,055 MXN por la instalación de cada W de sistema fotovoltaico, una tasa de descuento de 8.40%, una inflación del 4% y un costo de tarifa de 0.767 MXN por cada kWh.

Para el cálculo de los co-beneficios, es decir, creación neta de empleos a partir del desarrollo de proyectos solar fotovoltaicos, se utilizó como referencia el Modelo internacional de empleo y desarrollo económico (I-JEDI) con un año base 2020.

Tabla 16: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en sector industrial por implementación de ASD.

Medida	Edificios	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Generación distribuida en sector industrial	682	1,526,862	2,520	3,921	-618 ^a

^a El signo negativo indica que durante los primeros 10 años del escenario, la inversión no se ha recuperado, lo cual puede suceder hacia el final del periodo de estudio 2019-2050.

Contrario a lo que se presentó para el sector público, la aplicación de la generación solar distribuida en el sector industrial no propicia un retorno de inversión positivo

durante el periodo de análisis (10 años). Sin embargo, es muy posible que este retorno de inversión se vuelva positivo hacia el final del escenario.

Para un escenario de transición de 30 años, donde se intenta implementar la tecnología de paneles solares fotovoltaicos en el sector industrial, tendrían que considerarse hasta 2,728 edificios para dicho escenario de transición.

6.2.1.3. Sector Comercial

En las siguientes secciones se presentan las medidas de mitigación para el sector comercial del estado de Yucatán. El análisis de la caracterización de la demanda eléctrica detalla que dicho sector es responsable del 9.5% del consumo eléctrico en Yucatán. Por lo tanto, su participación en la implementación de las medidas de mitigación de eficiencia energética y generación distribuida es clave para la reducción de actividades intensivas energéticamente y contribuir a las metas climáticas estatales para la descarbonización del sector eléctrico de Yucatán.

6.2.1.3.1. Eficiencia energética por medio de la sustitución de aires acondicionados

Se estima que los sistemas de aire acondicionado representan el 17% del consumo eléctrico de los motores utilizados por el sector comercial (Islas-Samperio *et al.*, 2015). Esta medida de eficiencia energética contempla la sustitución total de los aires acondicionados en un escenario de transición a 10 años.

Se considera que un aire acondicionado promedio consume 480 mil MWh por año y presenta un potencial de ahorro entre 40% (Islas-Samperio *et al.*, 2015). Se asumió un costo promedio de 13,143 MXN para la eliminación de fugas en sistemas de aire comprimido, una tasa media de crecimiento anual de 2.07%, una tasa de interés de 4.25% y una inflación del 4% de acuerdo con el Banco de México.

Tabla 17: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector comercial por sustitución de aires acondicionados.

Medida	Aire acondicionado	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Sustitución de aire acondicionado	66	33,853	66	0,868	3,590

Al igual que las medidas de eficiencia energética propuestas para el sector industrial, el beneficio económico de estas medidas, propuestas para el sector comercial, supera ampliamente la inversión necesaria para su implementación. Además de ser medidas generadoras de empleo.

6.2.1.3.2. Eficiencia energética por medio de la sustitución por focos eficientes LED en el sector comercial

Se estima que la iluminación representa el 40% del consumo eléctrico del sector comercial, representado por un

uso de 13.5 horas por día (Islas-Samperio *et al.*, 2015). Por lo tanto, la medida de eficiencia energética contempla la sustitución total de las lámparas del sector comercial en un escenario de transición a 10 años. La tecnología propuesta contempla lámparas LED de 15W, con un potencial de ahorro entre 30% (Islas-Samperio *et al.*, 2020).

Con base a lo anterior, se estimó que 3,499,794 lámparas deberán ser sustituidas por lámparas eficientes de tecnología LED de 15W. Utilizando de manera convencional un ahorro del 60% en consumo eléctrico por iluminación con focos ahorradores LED, se calculó también el nuevo gasto energético al llevar a cabo la sustitución.

Tabla 18: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector comercial por sustitución de focos ahorradores LED.

Medida	Foco LED	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Sustitución de focos LED	3,499,794	4,279,023	4,297	2,863	32,052

6.2.1.3.3. Eficiencia energética por medio de la instalación de aparatos para control de demanda

Al igual que para el sector industrial, esta medida considera la instalación de sensores para medir la ocupación de un lugar, así como el uso de enchufes inteligentes capaces de medir el consumo de corriente, lo que permite ahorrar entre 20% (NAMA PYME, 2021) y 34% de energía eléctrica al cortar la alimentación de los aparatos que funcionan innecesariamente (Jun y Seo, 2015).

Para el cálculo del potencial de mitigación, se consideró el consumo eléctrico por iluminación del sector comercial y se asumió que hasta un 20% del consumo eléctrico de la iluminación podría ser ahorrado a partir de la implementación de la medida. Por lo tanto, se asumió un costo promedio de 266 MXN por cada MWh ahorrado a partir de la implementación de aparatos de control de demanda, una tasa media de crecimiento anual de 2.07%, una tasa de interés del 4.25%, una inflación del 4% y un costo de tarifa de 1.81 MXN por cada kWh de acuerdo con el valor indicado por CFE para el sector comercial de gran demanda con consumo de media tensión.

Tabla 19: Potencial de mitigación de medidas de eficiencia energética en el sector comercial por la instalación de aparatos para control de demanda.

Medida	MWh Ahorrados	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Aparatos para control de demanda en sector comercial	218,387	107,883	95	58.3	5,097

6.2.1.3.4. Generación distribuida en edificios del sector comercial de Yucatán

La medida de generación distribuida considera la instalación de paneles solares de hasta 499 kW en las áreas potenciales disponibles de los edificios del sector comercial en Yucatán. Así como se estableció para el sector industrial, el potencial de GD para el sector comercial del estado de Yucatán se trata de una estimación basada únicamente en el atractivo económico de utilizar sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica. No es un potencial técnico, ya que dentro del análisis no se considera la factibilidad técnica de instalación de los sistemas en los techos o terrenos de los usuarios potenciales ni la disponibilidad de interconexión eléctrica.

No obstante, según los datos de GD de la CRE, corte junio 2020, se identificaron 76,822 usuarios del sector comercial para los cuales la tarifa de instalación de un sistema fotovoltaico resultaría atractiva. Con base en la estimación de la capacidad promedio de un sistema fotovoltaico, es decir, 345 W por módulo, se obtuvo el potencial de generación

distribuida (MW) para el sector comercial en Yucatán. Como resultado, se estimó dicho potencial total en 132 MW.

Debido a la falta de facturas de consumo eléctrico para el sector comercial, se estimó el potencial de generación distribuida por unidad identificada en dicho sector. Este ejercicio resultó en la instalación de 1.72 kW de tecnología solar fotovoltaica por cada uno de los 76,822 edificios detectados. Sin embargo, para esta acción de mitigación, se considera un escenario de transición de 10 años donde inicialmente se instalarán los paneles solares en 19,205 edificios.

Además, como supuesto de generación eléctrica se consideró un factor de planta del 25%, es decir, una generación de 5.5 horas por día. Se asumió un costo promedio de 22,540 MXN por la instalación de cada W de sistema fotovoltaico, una tasa de descuento de 8.40%, una inflación de 4% y un costo de tarifa de 0.767 MXN por cada kWh. Para el cálculo de los co-beneficios, es decir, la creación neta de empleos a partir del desarrollo de proyectos solar fotovoltaicos, se utilizó como referencia el modelo I-JEDI con un año base 2020.

Tabla 20: Potencial de mitigación de generación distribuida en el sector comercial.

Medida	Edificios	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de mitigación de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Generación Distribuida en Sector Comercial	19,205	319,908	528	743	-565 ^a

^a El signo negativo indica que durante los primeros 10 años del escenario, la inversión no se ha recuperado, lo cual puede suceder hacia el final del periodo de estudio 2019-2050

Al igual que en el sector industrial, la aplicación de la generación solar distribuida en el sector comercial no propicia un retorno de inversión positivo durante el periodo de análisis (10 años). Sin embargo, es muy posible que este retorno de inversión se vuelva positivo, hacia el final del escenario.

Para un escenario de transición de 30 años, esta medida considera la implementación de tecnología solar fotovoltaica en hasta 76,822 edificios del sector comercial.

6.2.1.4. Sector Residencial

En las siguientes secciones se presentan las medidas de mitigación para el sector residencial del estado de Yucatán. Tanto los cálculos como los supuestos fueron elaborados por el Centro Mario Molina como parte del proyecto *Desarrollo y socialización de rutas de descarbonización para dos Entidades Federativas alineadas a su respectivo Presupuesto de Carbono*. No obstante, la estimación de los potenciales de mitigación, así como los costos de abatimiento serán utilizados para la evaluación del potencial de reducción de emisiones para el sector eléctrico del estado de Yucatán.

Particularmente, la implementación de medidas de mitigación en el sector residencial es crítica para alcanzar las metas climáticas del presupuesto de carbono para Yucatán. Esto se debe porque el sector residencial destaca por ser el segundo sector más intensivo en cuestión energética del estado, representado por un consumo de 1,595 GWh y el 40.5% de las emisiones del sector eléctrico de Yucatán.

6.2.1.4.1. Implementación de calentadores de agua solares y calentadores de paso eficientes

Para esta medida se considera la implementación de calentadores de agua solares para la reducción de emisiones debido al suministro de agua caliente en el sector residencial. Particularmente se considera la disminución

de consumo de gas LP bajo tres escenarios: adición de calentadores solares a calentadores con gas LP, sustitución de calentadores existentes por calentadores nuevos de tipo instantáneo de paso y sustitución de calentadores con sistemas de calentamiento solar, junto con calentadores de paso como respaldo.

A partir de información de los resultados de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018 se estimó la cantidad de equipos utilizados para el calentamiento de agua en viviendas, así como los diferentes patrones de uso y el combustible utilizado. Para estimar el consumo de calentadores a gas, así como las posibles reducciones se utilizó el software RETScreen 4, desarrollado por el Ministerio de Recursos Naturales de Canadá (Natural Resources Canada, 2018).

Para la estimación del consumo de los calentadores de agua antiguos se consideró una demanda de 180 L de agua por día por vivienda con 4 ocupantes, una temperatura de salida de 45°C, así como una eficiencia mínima de 65%-84% dependiendo de la antigüedad de los calentadores identificados. Para el caso de los colectores solares se consideraron unidades con área de captación de 2m² y capacidad de almacenamiento de 150L de agua caliente, tal cual los propone la CONUEE en su Programa para la Promoción de Calentadores Solares en México (PROCALSOL).

Además, se consideró una inversión de 14,800 MXN por la adquisición e instalación de los calentadores, incluido el mantenimiento a los 5 años de uso. Para un calentador de paso eficiente se consideró un costo de 5,100 MXN por adquisición de equipo, instalación, accesorios y mantenimiento. Finalmente, para el sistema de calentador solar con respaldo a gas instantáneo se consideró una inversión de 19,900 MXN, considerando adquisición de equipo, instalación, accesorios y mantenimiento a los 5 años. De igual manera, se consideró un horizonte de 10 años, con una tasa de interés del 10%. Con respecto a los costos de abatimiento se considera una introducción gradual de los calentadores solares en el sector residencial de Yucatán, empezando con un 10% anual a partir de 2021, hasta lle-

gar a una introducción del 100% en 2030. Es importante mencionar que esta medida no contempla el costo de un mantenimiento preventivo derivado de la dureza que presenta el agua de la zona, ya que al momento de elaborar

el presente estudio, no se contaba con la información suficiente para considerar este supuesto. No obstante, esta puede ser una variable importante a considerar en futuras estimaciones.

Tabla 21: Potencial de mitigación por medio de la sustitución de calentadores solares en el sector residencial.

Medida	Calentadores Solares	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Sustitución de calentadores solares	92,109	20,350	2,207	1,413	1,354

Esta es la única medida que contempla la generación y ahorro de energía térmica en lugar de considerar a la energía eléctrica. Como se puede observar, supera los beneficios ambientales y de generación de empleos dentro de este sector, en comparación con las medidas de eficiencia energética mostradas más adelante. Aunque no necesariamente es la medida más costo-efectiva.

6.2.1.4.2. Sustitución de refrigeradores de más de 10 años

La medida considera el reemplazo de refrigeradores de más de 10 años de antigüedad en el estado de Yucatán. Con base en la información de la ENCEVI se identificó la cantidad de equipos en el estado, así como el consumo anual de electricidad para cada uno de los aparatos descritos por la encuesta. Además, se utilizó la información propuesta por Letscher *et al.* (2011) para realizar la clasificación de los refrigeradores según sus características principales, antigüedad y consumos eléctricos estimados. A partir del análisis, se consideró que los equipos susceptibles de ser reemplazados son aquellos con más de 10 años de antigüedad.

Dependiendo de la capacidad de los refrigeradores existentes, se consideraron cuatro diferentes costos de inversión en el equipo. Por ejemplo, para refrigeradores tipo bar con menos de 6 ft³, se consideró un precio de 5,056 MXN; para un refrigerador de 610 ft³, se identificó un precio de 8,824 MXN; para refrigeradores entre 1115 ft³ se estimó un precio de 8,549; para capacidades de 1620 ft³ se consideraron 9,835 MXN; mientras que para una capacidad mayor a 20 ft³ se consideró un precio de 19,413 MXN.

De igual manera, se consideró un horizonte de 10 años, con una tasa de interés de 10%. Con respecto a los costos de abatimiento se considera una introducción gradual de los refrigeradores en el sector residencial de Yucatán, empezando con un 10% anual a partir de 2021, hasta llegar a una introducción del 100% en 2030. Además, las emisiones abatidas corresponden a la electricidad que deja de utilizarse por los ahorros energéticos, así como gracias al efecto de la introducción de unidades con refrigerantes distintos comparados con los refrigerantes supuestos para los aparatos actuales.

Tabla 22: Potencial de mitigación por medio de la sustitución de refrigeradores de más de 10 años en el sector residencial.

Medida	Refrigeradores	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Sustitución de refrigeradores	117,058	12,290	1,620	1,043	22,309

6.2.1.4.3. Sustitución de aires acondicionados de más de 10 años

La medida considera el reemplazo de aires acondicionados de más de 10 años de antigüedad en el estado de Yucatán. A partir de información de la ENCEVI se obtuvo la potencia eléctrica y la capacidad de enfriamiento de los diferentes equipos disponibles, así como también el rendimiento energético. Además, como supuesto se consideró una disminución adicional de la generación de emisiones debido al cambio en el refrigerante en los aires acondicionados identificados.

Particularmente, se consideró un 10% de fugas anuales, y una carga inicial de 0.75 kg de refrigerantes para aires

tipo ventana, y de 0.81, 1.05, 1.58 y 2.1 kg de refrigerante para aires acondicionados tipo *split* de 9,000, 12,000, 18,000 y 24,000 BTU/h, respectivamente. Además, se parte del supuesto donde el 98% de los aires acondicionados entre 1020 años funcionan con refrigerante R22, mientras que el 2% restante lo hace con R104 (UNEP, 2011; GIZ, 2014).

La medida de sustitución de equipos considera 2 diferentes capacidades para los aires acondicionado tipo invertir. Para el caso de una capacidad de 12,000 BTU/h se consideró un costo de 8,107 MXN y una carga de 0.83 kg de R410a. Por otro lado, para la capacidad de 18,000 BTU/h se consideró un costo de 11,269 MXN y una carga de 1.1 kg del refrigerante R-410a.

Tabla 23: Potencial de mitigación por medio de la sustitución de aires acondicionados de más de 10 años en el sector residencial.

Medida	Equipos	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Sustitución de aires acondicionados	12,473	4,085	196	125.7	5,401

6.2.1.4.4. Generación distribuida en edificios del sector residencial de Yucatán

Esta medida considera la implementación de paneles solares fotovoltaicos en las áreas disponibles del sector residencial en el estado de Yucatán. La energía generada a través de la implementación de la tecnología permitirá el abastecimiento de la demanda eléctrica de las viviendas, mientras que el excedente será inyectado en la red por medio de un contrato de Medición Neta (*Net Metering* en inglés). Para la realización de dicho contrato se requerirá la instalación de un medidor bidireccional para la contabilización de los flujos eléctricos en ambos sentidos, es decir, de la vivienda a la red de CFE y viceversa.

Para la estimación de los beneficios de reducción sobre el consumo eléctrico residencial se utilizó la información proporcionada por la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018, elaborada por el INEGI (INEGI, 2019). Dicha fuente presenta información sobre las características de los diferentes equipos eléctricos y parámetros de consumo a nivel residencial segmentada por características socioeconómicas.

Para el cálculo de la capacidad fotovoltaica se utilizó el software de simulación del comportamiento de sistemas

de energía híbridos (HOMER, *Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*). Con respecto al detalle técnico de los módulos fotovoltaicos se consideró una potencia nominal de 305W y una eficiencia de inversores de 95%. Con respecto a la inversión, se consideró un costo de 1,425 MXN para el medidor bidireccional. Dicho software permite la modelación de diferentes sistemas solares, con información de la demanda eléctrica, recurso solar, y las características y costos de los equipos considerados (GIZ, CNBiogás, ASOLMEX, AMIF y ANES, 2020). Para sistemas fotovoltaicos de hasta 2.5 kW se consideró un costo de sistema de paneles de 26.83 MXN por W y un costo de inversores de 9.82 MXN por W. Para sistemas fotovoltaicos entre 2.5 y 5 kW se consideró un costo de sistema de paneles de 28.82 MXN por Watt y un costo de inversores de 8.42 MXN por Watt.

Con respecto a los costos de abatimiento se considera una introducción gradual de los sistemas fotovoltaicos en el sector residencial de Yucatán, empezando con un 10% anual a partir de 2021, hasta llegar a una introducción del 100% en 2030. Para el cálculo de los co-beneficios, es decir, la creación neta de empleos a partir del desarrollo de proyectos solar fotovoltaicos en sector residencial, se utilizó como referencia el modelo I-JEDI con un año base 2020.

Tabla 24: Potencial de mitigación por medio de la generación distribuida en el sector residencial.

Medida	Edificios	Potencial de mitigación en 10 años (tCO ₂ e)	Co-beneficio (creación de empleos)	Inversión (Millones MXN)	Beneficio de Mitigación (MXN/tCO ₂ e)
Generación distribuida en sector residencial	847,316	1,068,890	74,760	47,850	4,721

Como se puede observar, el sector residencial de Yucatán puede ser un gran detonante para evitar emisiones del sector eléctrico. A través de implementación de esta medida, se pueden llegar a mitigar más de un millón de tCO₂e en tan solo 10 años, triplicando la mitigación del sector comercial y no muy lejos de la ofrecida por el sector industrial. Lo que habla del gran potencial de esta medida que además puede ser implementada también en el corto plazo, reflejando sus beneficios en menor tiempo.

6.2.2. Implicaciones y evaluación crítica de los resultados

De acuerdo con los modelos utilizados para el cálculo del presupuesto de carbono, es posible identificar dos aspectos clave: 1) que la generación de emisiones por parte del sector eléctrico del estado de Yucatán debería limitarse, teóricamente, a 34.72 MtCO₂e durante el período 2019-2100, con la intención de limitar la TMG en 1.5°C; y 2) que la neutralidad de carbono tanto nacional como subnacional debería alcanzarse en 2060. Sin embargo, con la ruta de descarbonización propuesta para los sectores público, industrial, comercial y residencial del estado de Yucatán es posible acelerar dicho proceso, alcanzando la total descarbonización del sector eléctrico de Yucatán en el año 2029, y comenzando a evitar más emisiones que las que genera cada uno de los sectores descritos a partir del año 2030, tal como se muestra en el área gris de la Figura 6.

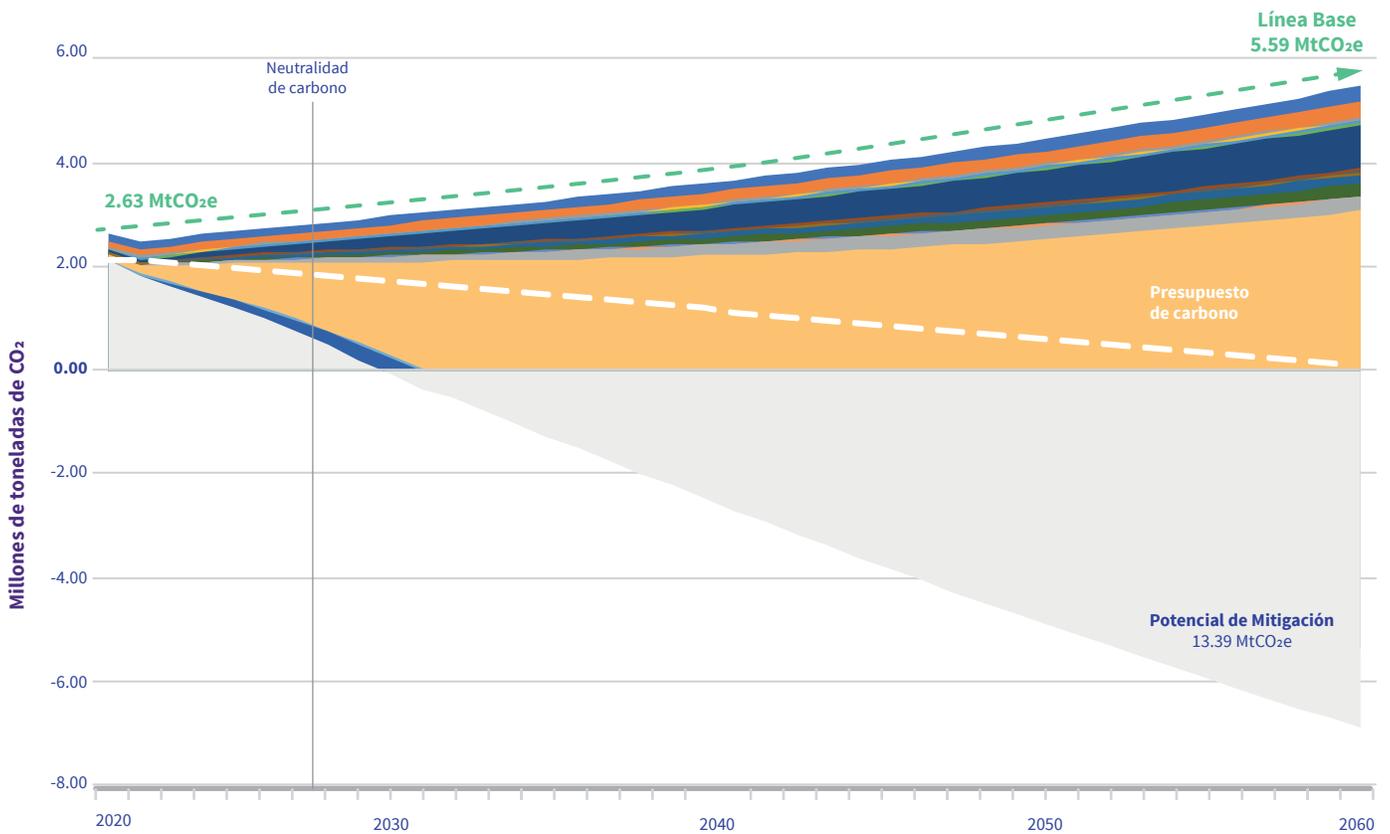
La implementación diversificada de medidas de eficiencia energética, generación distribuida y registro bajo esquema de usuario calificado ofrece la posibilidad de realizar la transición energética de forma paulatina y planeada para cada uno de los sectores del estado. Además de promover la reducción evidente de emisiones debido al consumo eléctrico, el catálogo de medidas anteriormente presentado ofrece soluciones costo efectivas

que disminuyen la demanda energética; promueven la generación descentralizada de energía limpia para autoconsumo; fomentan el ahorro y facilitan la identificación de proyectos para la asignación de recursos en inversiones estratégicas. De igual manera, la ruta de descarbonización impulsa el desarrollo económico a partir de la creación de empleos directos e indirectos en la cadena de valor de cada una de las diferentes tecnologías necesarias para la puesta en marcha de las medidas de mitigación.

No obstante, existen ciertas condiciones actuales en los cálculos que generan cierto grado de incertidumbre al momento de señalar una fecha específica para concretar la descarbonización del sector eléctrico de Yucatán. En primer lugar, el inventario estatal de gases de efecto invernadero se encuentra en proceso de actualización, por lo que el historial de emisiones aún no consideradas podría disminuir el presupuesto disponible para el periodo hasta 2100, lo que implica que los objetivos de reducción anuales para alcanzar la mitigación en el sector eléctrico podrían resultar mayores. Dicha situación tendría como efecto directo el retraso de la descarbonización del sector eléctrico a una fecha posterior a 2030.

Además, los continuos debates sobre los cálculos de presupuesto de carbono a nivel subnacional, así como también la posibilidad estandarizar una metodología internacional para homogenizar la asignación de emisiones entre las naciones podría traer como consecuencia un recálculo de las metas anuales de mitigación, así como también la integración de medidas de mitigación adicionales para compensar los requerimientos de descarbonización del sector eléctrico en el estado de Yucatán. Aunado a ello, se encuentra la expectativa de los resultados y propuestas del sexto reporte del IPCC por parte de los Grupos de Trabajo II y III, por lo que ciertas modificaciones en la metodología del presupuesto de carbono, así como la trayectoria de México y subnacional podrían verse modificados.

Figura 6: Potencial de Mitigación para el estado de Yucatán.



- | | | | |
|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ SI: Sustitución de motores ■ SI: Eliminación de fugas en aire comprimido ■ SI: Sustitución de focos por LED ■ SI: Generación Distribuida ■ SI: Uso de ADS ■ SI: Refrigeradores eficientes ■ SI: Control de demanda ■ SI: Sustitución de focos por LED | <ul style="list-style-type: none"> ■ SR: Generación Distribuida ■ SR: Cambio de aires acondicionados ■ SR: Emisiones restantes ■ SR: Refrigeradores eficientes ■ SR: Calentadores solares | <ul style="list-style-type: none"> ■ SC: Aire acondicionado ■ SC: Generación Distribuida ■ SC: Control de demanda ■ SC: Sustitución de focos por LED | <ul style="list-style-type: none"> ■ SP: Sustitución de luminarias ■ SP: Usuario Calificado ■ SP: Sustitución de luminarias en Edificios públicos |
|--|--|--|--|
- (SI) Sector Industrial; (SR) Sector Residencial; (SC) Sector Comercial; SP (Sector Público)

Tabla 25: Resumen del catálogo de medidas de mitigación para el estado de Yucatán

Medida	Mitigación acumulada en 10 años (MtCO ₂ e)	Co-beneficio (empleos)	Inversión (millones MXN)	Beneficio de mitigación (MXN/MtCO ₂ e)	Vínculo con el PED de Yucatán 2018-2024
Sector Industrial					
Sustitución de motores	0.33	13,566	333	2,268	Objetivo 4.5.1 Estrategia 4.5.1.1 Línea de acción 4.5.1.1.2
Uso de ASD	0.33	13,566	855	1,553	
Eliminación de fugas en aire comprimido	0.05	930	4.6	3,390	
Refrigeradores eficientes	0.03	45	0.74	3,591	
Sustitución de focos por LED	4.50	4,611	3,073	32,052	
Control de demanda	0.12	96	470	2,056	
Generación Distribuida en SI	1.52	2,520	3,291	-618	Objetivo 4.5.1 Estrategia 4.5.1.2 Líneas de acción 4.5.1.2.1, 4.5.1.2.4
Sector Comercial					
Sustitución de focos por LED	4.23	4,297	2,863	32,052	Objetivo 4.5.1
Aire Acondicionado	0.03	66	0.868	3,590	Estrategia 4.5.1.1
Control de demanda	0.11	95	58.3	5,097	Línea de acción 4.5.1.1.2
Generación Distribuida en Sector Comercial	0.32	528	743	-565	Objetivo 4.5.1 Estrategia 4.5.1.2 Línea de acción 4.5.1.2.4
Sector Público					
Sustitución de luminarias en Edificios Públicos	0.70	1,447	42.5	26,616	Objetivo 4.5.1 Estrategia 4.5.1.1 Línea de acción 4.5.1.1.2
Sustitución de luminarias en Servicio Público	0.11	2,482	70.3	9,774	Estrategia 4.5.1.2 Líneas de acción 4.5.1.1.3, 4.5.1.1.4, 4.5.1.1.5
Registro de Edificio Público como Usuario Calificado	0.10	453	117	1,226	Objetivo 4.5.1 Estrategia 4.5.1.2
Generación Distribuida en Edificios Públicos	0.10	8,600	289.4	1,255	Línea de acción 4.5.1.2.3, 4.5.1.2.4, 4.5.1.2.5

Medida	Mitigación acumulada en 10 años (MtCO ₂ e)	Co-beneficio (empleos)	Inversión (millones MXN)	Beneficio de mitigación (MXN/MtCO ₂ e)	Vínculo con el PED de Yucatán 2018-2024
Sector Residencial					
Generación Distribuida en Sector Residencial	1.07	74,760	47,850	4,721	Objetivo 4.5.2 Estrategia 4.5.2.1 Línea de acción 4.5.2.1.1, 4.5.2.1.2
Cambio de refrigeradores por nuevas unidades eficientes	0.01	1,620	1,043	22,309	Objetivo 4.5.1 Estrategia 4.5.1.1 Línea de acción 4.5.1.1.2
Cambio de aires acondicionados	0.01	196	125.7	5,401	
Calentadores solares, agua caliente residencial	0.02	2,207	1,413	1,354	
Total	13.68	132,085	62,643	157,122	

Como se puede observar, con esta ruta de descarbonización propuesta, se atienden en gran medida, los objetivos, estrategias y líneas de acción planteadas en el Plan

Estatal de Desarrollo (PED) 2018-2024, referentes al acceso a *Energía Asequible y no contaminante*.



7. RECOMENDACIONES

Durante la realización de este proyecto se llevaron a cabo dos talleres de sensibilización con diferentes actores de Yucatán con el propósito de dar a conocer información relevante sobre la importancia del presupuesto de carbono, la metodología para su cálculo, así como también las diferentes posibilidades de medidas para el diseño e implementación de una ruta de descarbonización para el sector eléctrico en el estado.

7.1. Realizar programas de difusión y sensibilización continuos

Estas experiencias permitieron, en primer lugar, avanzar a un consenso con respecto a la viabilidad técnica y financiera del presupuesto de carbono y la ruta de descarbonización para los sectores público, comercial y residencial. Particularmente, se señaló la importancia de presentar los ahorros esperados por medio de la implementación de la ruta de descarbonización para impulsar la participación del sector industrial y comercial. De igual forma se sugirió la difusión de casos prácticos y exitosos sobre la implementación de medidas de mitigación, así como ahorros asociados, para sensibilizar al respecto de la ruta de descarbonización. Una forma de alcanzarlo sería, por ejemplo, a partir de programas piloto con algunos actores de dichos sectores para impulsar las medidas propuestas, así como potenciar la adopción de nuevas tecnologías por parte del mercado gracias a incentivos económicos. En especial, es relevante el aprovechamiento de los diferentes foros para difundir los conceptos y medidas de mitigación particulares para cada uno de los sectores.

Para darle mayor exposición al tema y lograr una participación integral en la sociedad de Yucatán, se recalcó la importancia de comunicar y difundir el concepto de presupuesto de carbono en diferentes canales, así como también en formatos y lenguajes atrayentes para los diferentes sectores de la población. Esto con el objetivo de disminuir resistencias, aumentar la recepción por parte de la comunidad y de enfatizar la necesidad de contar con metas climáticas ambiciosas que vayan de la mano con la adopción costo-efectiva de medidas de mitigación. De igual forma se enfatizó sobre la adopción de los conceptos de presupuesto de carbono, mitigación de emisiones y adopción de tecnologías renovables en los planes de estudio de las universidades, así como de los co-beneficios.

7.2. Implementar un sistema de monitoreo, reporte y verificación

Con respecto a las tecnologías propuestas en las diferentes medidas de mitigación, es indispensable realizar un análisis más profundo sobre el ciclo de vida de los equipos, además de la factibilidad técnica y financiera. Esto permitirá tener una idea más completa de los impactos ambientales reales de cada una de las propuestas, particularmente de equipos importados, y permitirá también el desarrollo de alternativas nacionales, por ejemplo, a través del fomento a la innovación tecnológica, para disminuir las emisiones asociadas con la extracción de materiales, producción de los equipos, distribución y gestión final de los mismos.

De igual manera, debe considerarse un sistema de monitoreo, reporte y verificación que garantice la correcta implementación de las medidas de mitigación del sector eléctrico en el estado de Yucatán, fortalezca el intercambio de ideas de manera transparente, y asegure la contabilidad de la reducción de emisiones. Además, con base en lecciones aprendidas de administraciones pasadas, es necesario fortalecer las propuestas ejecutivas que tienden a desarrollarse para la puesta en marcha de iniciativas. Es pertinente llevar estudios de factibilidad técnica a la par de considerar las fases de implementación y mantenimiento de los diferentes proyectos con el propósito de avalar su robustez. No obstante, es importante mencionar que algunos de estos servicios públicos están concesionados y, por ende, no es posible tener tanta influencia sobre la adopción de medidas de eficiencia energética.

Para alcanzar la descarbonización del sector eléctrico se propone considerar la evaluación del desempeño de las medidas de manera anual y pública. Dicho monitoreo permitirá la actualización de información con respecto al avance en indicadores como el porcentaje de penetración de energía renovable, así como también facilitará la identificación de estrategias para reconfigurar medidas de descarbonización actualizadas. Particularmente, el ejercicio de evaluación vinculante permitirá ajustar y actualizar los diferentes instrumentos de planeación climática para atender necesidades reales. De igual forma, se sugiere la necesidad de potencializar un sistema de impuesto al carbono para interiorizar costos por emisiones y acelerar el potencial de acción dentro del estado.

7.3. Fortalecer el marco jurídico para una Política de Presupuesto de Carbono

En el marco jurídico se establece que la Federación, las entidades federativas y los municipios tienen facultades concurrentes en materia de protección al medio ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico. Por lo tanto, el estado de Yucatán tiene la capacidad de instrumentar políticas públicas que se traduzcan en medidas para la descarbonización del sector eléctrico. En este sentido, la propuesta de Ley de Cambio Climático del Estado de Yucatán (LCCEY), próxima a aprobarse, permitirá fortalecer el marco regulatorio y la coordinación de acciones en dependencias y entidades de la Administración Pública Estatal relacionadas con la mitigación al cambio climático.

Para asegurar la creación, desarrollo y obligatoriedad de un presupuesto de carbono con un alcance transexenal, se recomienda establecer sus bases en la LCCEY. Los titulares de la SDS y de la SEFOET tienen facultades para proponer al Gobernador cambios a la LPMAEY en el que se establezca una política de presupuesto de carbono. En el PED, en el PEAC y en el Programa Yucatán Verde y Sustentable, se encuentran medidas acordes a la descarbonización del sector eléctrico, pues se promueven proyectos de energías renovables en hogares, industria y el gobierno, así como de energía distribuida a través de fuentes renovables, entre otros. Sin embargo, se recomienda que en el PED queden especificados los objetivos, metas, estrategias e indicadores del presupuesto de carbono. También se recomienda establecer un programa especial de mediano plazo de presupuesto de carbono en el que se señalen las metas y las medidas para acelerar en el corto plazo la descarbonización de la electricidad, con el propósito de que la política sea vinculante para las entidades públicas del estado de Yucatán.

La Subsecretaría del Energía es una entidad clave para el desarrollo e implementación del presupuesto de carbono, pues cuenta con facultades para fomentar el desarrollo de la competitividad del estado a través de la implementación de planes, procesos y actividades que permitan el uso eficiente de los recursos energéticos. Por su parte, el Consejo de Energía Renovable del estado de Yucatán debe ser un vehículo para lograr compromisos y participación entre entes del sector público y privado.

También se recomienda que se reforme la Ley de Bienes del Estado de Yucatán se establezcan las bases y disposiciones generales que se deben observar las dependencias y entidades en el estado para lograr la eficiencia energética en los bienes destinados a la prestación de un servicio público.

Por último, con la finalidad de que los PED no varíen significativamente en el tiempo ante los cambios en la administración pública, y tengan una visión de largo plazo, se recomienda que en la LPDEY se establezca una duración de los PED transexenal, pues actualmente su vigencia no debe exceder del periodo constitucional que le corresponda. En adición, para que los PED no varíen ante los cambios en la administración pública, se recomienda su presentación ante el Congreso del Estado de Yucatán para su aprobación.

7.4. Recuperar el desarrollo de la economía posterior a la pandemia de COVID-19

Finalmente, como parte de la reactivación económica posterior a la pandemia ocasionada por SARS-CoV-2, se sugiere el desarrollo de programas que consideren la mitigación de emisiones como parte de la propuesta de valor de los diferentes negocios y emprendimientos. El diseño, desarrollo e implementación de las diferentes medidas de mitigación de la ruta de descarbonización requiere de una fuerza laboral competente y capacitada en materia de eficiencia energética, así como energías renovables en las diferentes etapas de la cadena de valor. Actualmente, la mayoría de las actividades que se realizan en México recaen en operaciones de ensamblado, instalación y mantenimiento de la nueva tecnología, así como disposición de los equipos antiguos y obsoletos.

Por lo tanto, el desarrollo de capacidades en forma de cursos de actualización y fomento al desarrollo de profesionistas como parte de la nueva ola de empleos verdes en programas universitarios permitirá, en primer lugar, crear la fuerza laboral necesaria para abastecer la demanda pronosticada para la próxima década. De igual manera, el apoyo a las pequeñas y medianas empresas por medio de la contratación para la implementación de las diferentes medidas de eficiencia energética promoverá el apoyo financiero en tiempo de crisis, disminuyendo el recorte de personal por falta de recursos económicos, así como también la creación de nuevas vacantes. La implementación de medidas de eficiencia energética en los sectores industrial y comercial, por ejemplo, permitirá ahorros significativos y directos en gastos operativos debido a la disminución de consumo eléctrico. Como consecuencia a lo anterior, y tras una auditoría energética, las PYMES podrán ser acreedoras a fondos verdes para el desarrollo económico estatal.

8. CONCLUSIONES

Considerando las modificaciones en el escenario *business as usual* a partir de las cuales se desarrolló la trayectoria del modelo para la estimación del presupuesto de carbono en el estado de Yucatán, la neutralidad de carbono debería alcanzarse a más tardar en el año 2060. No obstante, la implementación de la ruta de descarbonización propuesta, compuesta por un conjunto de 19 medidas de mitigación costo-efectivas y contextualizadas a las necesidades de energía eléctrica de los sectores industrial, comercial, público y residencial de Yucatán, permitirá la descarbonización del sector eléctrico del estado en el año 2029.

Existen ciertas condiciones actuales que pueden mejorarse en vías de perfeccionar la estimación del presupuesto de carbono del estado de Yucatán y arrojar resultados aún más ambiciosos para concretar la descarbonización del sector eléctrico de Yucatán, entre la cuales están: la actualización del inventario estatal de gases de efecto invernadero, los debates internacionales sobre la metodología de presupuesto de carbono para garantizar mayor transparencia, así como los próximos reportes especiales del IPCC. Finalmente, para poder beneficiar la adopción de un presupuesto de carbono, se sugieren cambios a la LPMAEY liderados por titulares de la SDS y de la SEFOET

con la intención de establecer una política de presupuesto de carbono vinculante con bases en la LCCEY.

Los presupuestos de carbono son sumamente importantes en el contexto actual de acciones en contra del cambio climático ya que permiten establecer metas de mitigación y políticas públicas basadas en la ciencia y alineadas a un escenario donde la temperatura media global no incrementa en más de 1.5°C.

Ante el reto que representa la emergencia climática, Yucatán es uno de los estados que ha comenzado a liderar acciones en contra del cambio climático desde el ámbito local, como es el caso de la estimación del presupuesto de carbono del sector eléctrico, su ruta de descarbonización y la vinculación en su marco normativo. En los próximos años, será fundamental que el estado siga impulsando el proceso participativo en la actualización y desarrollo de nuevos instrumentos públicos en materia de cambio climático para beneficio de la sociedad.

9. REFERENCIAS

Anderson, K. y Bows, A. (2011). Beyond ‘dangerous’ climate change: emission scenarios for a new world. *Phil. Trans. R. Soc.* 36920–44. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0290>

Anderson, K., Stoddard, I., y Schrage, J. (2017). Carbon budget and pathways to a fossil-free future in Järfälla Municipality. CEMUS, 41 pp. http://www.web.cemus.se/wp-content/uploads/2018/05/Carbon-Budget-and-Pathways-to-a-Fossil-Free-J%C3%A4rf%C3%A4lla_CEMUS.pdf

BANXICO. (9 noviembre de 2021). Encuesta sobre las expectativas de los especialistas en economía del sector privado: agosto 2021. BANXICO. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/encuestas-sobre-las-expectativas-de-los-especialis/%7BEDEC419A-2AD4-D108-B7ED-47722C3313A7%7D.pdf>

Brick, S. y Thernstrom, S. (2016). Renewables and decarbonization: studies of California, Wisconsin and Germany. *The Electricity Journal*, 29(3), 6-12.

Climate Group. (9 noviembre de 2020). *Under2 Coalition 2020 highlights report*. Climate Group. https://www.theclimategroup.org/our-work/publications/Under2Coalition_highlights2020

Código de la Administración Pública de Yucatán. (2019) Gobierno del estado de Yucatán https://consejeria.yucatan.gob.mx/documentos/Codigo_de_la_Administracion_Publica.pdf

Committee on Climate Change. (2018). *Reducing UK emissions: 2018 Progress Report to Parliament*. Committee on Climate Change. 267 pp. <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/06/CCC-2018-Progress-Report-to-Parliament.pdf>

Committee on Climate Change. (2020). *The Sixth Carbon Budget: The UK's path to Net Zero*. Committee on Climate Change. <https://www.theccc.org.uk/publication/sixth-carbon-budget/>

Constitución política del estado de Yucatán. (2021) Gobierno del estado de Yucatán. <https://www.poderjudicialyucatan.gob.mx/digestum/marcoLegal/01/2012/DI-GESTUM01001.pdf>

Dahal, K. y Niemelä, J. (2017). Cities Greenhouse Gas Accounting Methods: A Study of Helsinki, Stockholm, and Copenhagen. *Climate*. 5(2). 31. <https://doi.org/10.3390/cli5020031>

Davis, S. J., Caldeira, K., y Matthews, H. D. (2010). Future CO2 emissions and climate change from existing energy infrastructure. *Science*. 329(5997), 1330–1333.

Fay, M., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Rosenberg, J., Narloch, U., Kerr, T. (2015). Decarbonizing Development: Three Steps to a Zero-Carbon Future. *Climate Change and Development*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/21842>

Fankhauser, S. (2020). What are Britain's carbon budgets?. *The London School of Economics and Political Science*. <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/what-are-carbon-budgets-and-why-do-we-have-them/>

Federal Climate Change Act. (2018). Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.

Finkelstein, J., Frankel, D., Noffsinger, J. (2020). *How to decarbonize global power systems*. McKinsey. <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/how-to-decarbonize-global-power-systems>

Gignac, R. y Matthews, H. D. (2015). Allocating a 2 C cumulative carbon budget to countries. *Environmental Research Letters*. 10(7). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/7/075004/pdf>

GIZ e ICM. (2019). Presupuestos de Carbono: Una oportunidad para ampliar la ambición climática del sector eléctrico. <https://iki-alliance.mx/presupuestos-de-carbono-una-oportunidad-para-ampliar-la-ambicion-climatica-del-sector-electrico/>

GIZ. (2020). Monitor de información comercial e índice de precios de Generación Solar Distribuida en México. https://anes.org.mx/wp-content/uploads/2020/04/Estudio_primer-monitor-de-informacio%CC%81n-comercial-e-i%CC%81ndice-de-precios-de-Generacio%C-C%81n-Solar-Distribuida-GSDANES_AMIF_ASOLMEX_GIZ.pdf

- Greater London Authority (2018).** *Zero carbon London: 1.5°C compatible plan.* Greater London Authority. https://www.london.gov.uk/sites/default/files/1.5c_compatible_plan.pdf
- Groves, D. et al. (2020).** The Benefits and Costs of Decarbonizing Costa Rica's Economy: Informing the Implementation of Costa Rica's National Decarbonization Plan Under Uncertainty. *Rand Corporation*. <https://doi.org/10.7249/RRA633-1>
- Grubler, A., y Nakicenovic, N. (1996).** Decarbonizing the global energy system. *Technological Forecasting and Social Change*. 53(1), 97-110.
- Huber, M., y Knutti, R. (2012).** Anthropogenic and natural warming inferred from changes in Earth's energy balance. *Nature Geoscience*. 5(1), 31-36.
- INECC. (2018b).** Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 199-2015. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Obtenido de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/MEXNIR_Revisada_0.pdf
- INECC. (2015).** Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Periodo 2020-2030. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162974/2015_indc_esp.pdf
- Knutti, R., & Rogelj, J. (2015).** The legacy of our CO 2 emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics. *Climatic Change*. 133(3), 361-373.
- Kuriakose, J., Anderson, K., Broderick, J., & Mclachlan, C. (2018).** *Quantifying the implications of the Paris Agreement for Greater Manchester.* University of Manchester.
- Ley General de Cambio Climático. (2012).** Diario Oficial de la Federación. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_061120.pdf
- LSE. (2020).** *What is "decarbonisation" of the power sector? Why do we need to decarbonise the power sector in the UK?* The London School of Economics and Political Science. [https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/what-is-decarbonisation-of-the-power-sector-why-do-we-need-to-decarbonise-the-power-sector-in-the-uk/#:~:text=Why%20do%20we%20need%20to%20decarbonise%20the%20power%20sector%20in%20the%20UK%3F,-29%20January%2C%202020&text=Decarbonising%20the%20power%20sector%20means,dioxide%20per%20kilowatt%2Dhour\)](https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/what-is-decarbonisation-of-the-power-sector-why-do-we-need-to-decarbonise-the-power-sector-in-the-uk/#:~:text=Why%20do%20we%20need%20to%20decarbonise%20the%20power%20sector%20in%20the%20UK%3F,-29%20January%2C%202020&text=Decarbonising%20the%20power%20sector%20means,dioxide%20per%20kilowatt%2Dhour))
- Llavador, H., Roemer, J. E. (2019).** *Global Unanimity Equilibrium on the Carbon Budget.* Discussion Paper No. 2172. Cowles Foundation for Research in Economics. Yale University. <https://cowles.yale.edu/sites/default/files/files/pub/d21/d2172.pdf>
- Ley de Protección al Medio Ambiente del estado de Yucatán. (2021)** Gobierno del estado de Yucatán <https://www.poderjudicialyucatan.gob.mx/digestum/marcoLegal/05/2012/DIGESTUM05034.pdf>
- Ley de Cambio Climático del Estado de Yucatán (2021) Gobierno del estado de Yucatán. https://www.yucatan.gob.mx/docs/diario_oficial/diarios/2021/2021-11-04_2.pdf
- MacDougall, A. H., Zickfeld, K., Knutti, R., y Matthews, H. D. (2015).** Sensitivity of carbon budgets to permafrost carbon feedbacks and non-CO2 forcings. *Environmental Research Letters*. 10(12), 125003.
- Marchi, M., Pulselli, R. Maria, Marchettini, N., Pulselli, F. Maria, & Bastianoni, S. (2015).** Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. *Ecological modelling*. 306, 46-56. 10.1016/j.ecolmodel.2014.08.013
- Matthews, H. D., y Solomon, S. (2013).** Irreversible does not mean unavoidable. *Science*. 340(6131), 438-439.
- Meinshausen, M., Robiou Du Pont, Y. y Talberg, A. (2018).** *Greenhouse Gas Emissions Budgets for Victoria.* University of Melbourne. https://www.climatechange.vic.gov.au/_data/assets/pdf_file/0016/421702/Greenhouse-Gas-Emissions-Budgets-for-Victoria.pdf
- Meyer, A. (2000).** Contraction & convergence: the global solution to climate change. *Green Books*.
- Ministry for Urban Development and Environment BSU. (2011).** *The Hamburg Climate Action Plan.* <https://www.hamburg.de/contentblob/4028914/6bdf8a2548ec-96c97aa0b0976b05c5d9/data/booklet-englisch.pdf>
- Müller, C., Falke, T., Hoffrichter, A., Wyrwoll, L., Schmitt, C., Trageser, M., ... y Most, D. (2019).** Integrated planning and evaluation of multi-modal energy Systems for Decarbonization of Germany. *Energy Procedia*, 158, 3482-3487.
- Naciones Unidas. (2015).** *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.* UN.ORG. un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/
- Plan Estatal de Desarrollo 2018-2024. (2019)** Gobierno del estado de Yucatán https://www.yucatan.gob.mx/docs/transparencia/ped/2018_2024/2019-03-30_2.pdf

Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. (2019). Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565599&fecha=12/07/2019

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Towards a Climate-Neutral Germany. Executive Summary conducted for Agora Energiewende, Agora Verkehrswende and Stiftung Klimaneutralität. Raupach, M. R., Davis, S. J., Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Ciais, P., & Le Quere, C. (2014). Sharing a quota on cumulative carbon emissions. *Nature Climate Change*. 4(10), 873–879.

Programa Especial de Acción por el Clima. (2020) Gobierno del estado de Yucatán <http://www.leyccyucatan.com/descargas/4-6.pdf>

Programa de Mediano Plazo: Yucatán Verde y Sustentable 2019-2024. (2021) Gobierno del estado de Yucatán <https://seplan.yucatan.gob.mx/archivos/pmps/4PMPYucatanverdeysustentable.pdf>

Reglamento de la Ley para la Acción ante el Cambio Climático del Estado de Jalisco. (2016). Gobierno del Estado de Jalisco. <https://congresoweb.congresoal.gob.mx/bibliotecavirtual/legislacion/Reglamentos/Reglamento%20de%20la%20Ley%20para%20la%20Acci%C3%B3n%20ante%20el%20Cambio%20Clim%C3%A1tico%20del%20Estado%20de%20Jalisco%20.doc>

RENEW.BIZ (2020). German renewables deliver record high in 1H 2020. reNEWS.BIZ. <https://renews.biz/61419/german-renewables-deliver-record-high-in-1h-2020/>

Riahi, K., Dentener, F., Gielen, D., Grubler, A., Jewell, J., Klimont, Z., ... y Van Ruijven, B. (2012). *Energy pathways for sustainable development*. Cambridge University Press.

Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., & Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. *Nature*. 534(7609), 631-639.

Rogelj, J., Forster, P. M., Kriegler, E., Smith, C. J., y Séférian, R. (2019). Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. *Nature*. 571(7765), 335–342.

SEMARNAT. (2015). *Estrategia Nacional de Cambio Climático: Visión 10-20-40*. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/estrategia-nacional-de-cambio-climatico-vision-10-20-40>

SEMARNAT. (2014). *Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el periodo 2020–2030*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162974/2015_indc_esp.pdf

SEMARNAT. (2020). *Aprueba Comisión Intersecretarial el PECC 2020-2024 y refrenda los compromisos de México ante el Acuerdo de París*. SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/aprueba-comision-intersecretarial-el-pecc-2020-2024-y-refrenda-los-compromisos-de-mexico-ante-el-acuerdo-de-paris>

SENER. (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018–2033*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/prodesen-2019-2033-221654>

SENER. (2019). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2019–2034*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/prodesen-2020-2034>

Steininger, K. W., Meyer, L., Nabernegg, S., & Kirchengast, G. (2020). Sectoral carbon budgets as an evaluation framework for the built environment. *Buildings and Cities*. 1(1), 337–360. <http://doi.org/10.5334/bc.32>

Technical and Environmental Administration (TEA). (2016a). *Copenhagen Climate Project: Annual Report 2016*. https://kk.sites.itera.dk/apps/kk_pub2/index.asp?mode=detalje&id=2068.

Technical and Environmental Administration (TEA). (2016b). *Copenhagen Climate Project: Roadmap 2017–2020*. https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Copenhagen-2025-Climate-Plan-Roadmap-2017-2020?language=en_US.

The City of Copenhagen TCC. (2012). *CPH 2025 Climate Plan: A green, smart and carbon neutral city*. <https://urban-developmentcph.kk.dk/node/5>.

The World Bank. (2021). *What is Carbon pricing*. World Bank. <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/what-carbon-pricing>