

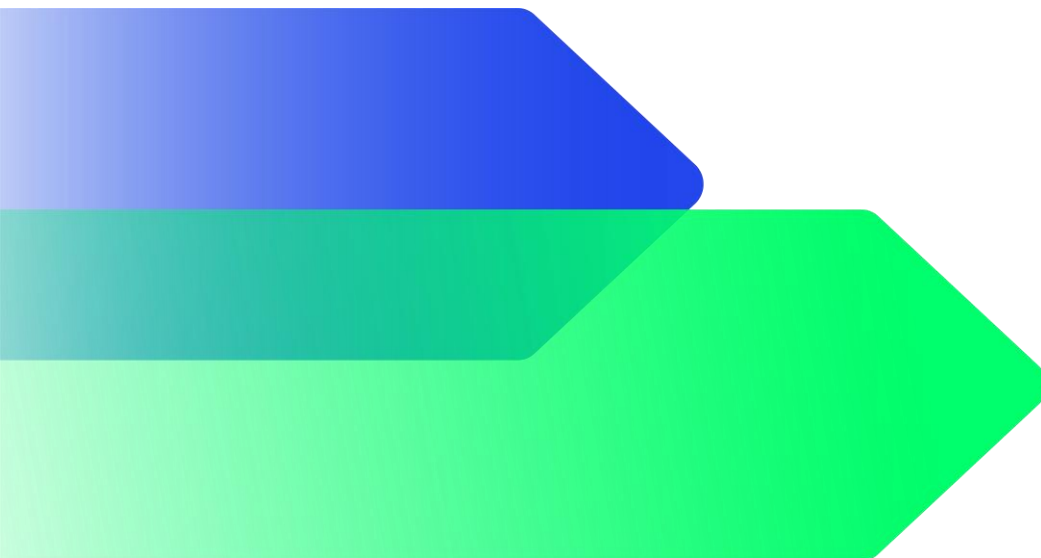


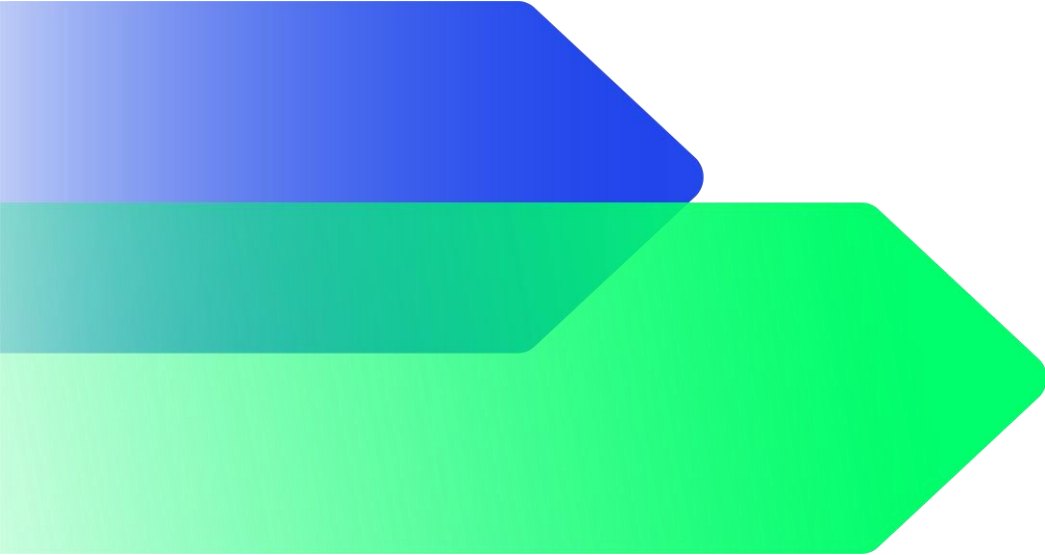
REPORTE

Análisis de la demanda de enfriamiento y de su potencial de flexibilidad en Colombia

Apoyo al despliegue de redes inteligentes en Colombia - fase 2

Marzo de 2023





Acerca del reporte

Este estudio tiene como objetivo caracterizar la demanda de enfriamiento (refrigeración y uso de aire acondicionado), tanto actual como futura (2030), de Colombia a nivel nacional, junto con un enfoque regional. Asimismo, analizar de forma horaria el comportamiento del consumo por enfriamiento y por sector: residencial, comercial e industrial. Por último, hacer una priorización de medidas de enfriamiento energéticamente eficientes, que permitan generar mayor flexibilidad en la red eléctrica, minimizando las emisiones del sector eléctrico colombiano.

Agradecimientos

El reporte corresponde a uno de los entregables de la fase 2 del programa 'Apoyo al Despliegue de Redes Inteligentes en Colombia' cuyo objeto es proporcionar asistencia técnica al sector público y privado para el desarrollo sus capacidades de implementación de tecnologías de redes inteligentes. El proyecto es desarrollado por Carbon Trust y la Universidad Nacional de Colombia, y financiado por el fondo de Asociaciones para las Transiciones Climáticas Aceleradas de la Embajada Británica (cuyas siglas en inglés son UK-PACT), en el marco de la Alianza Colombia – Reino Unido para el Crecimiento Sostenible y llevado a cabo en colaboración con el Ministerio de Minas y Energía y la Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia.

Carbon Trust escribió este informe basado en un análisis imparcial de fuentes primarias y secundarias y desea agradecer a todos los que han contribuido con su tiempo y experiencia durante la preparación y finalización de este informe. Un agradecimiento especial al personal involucrado del Gobierno de Colombia y en particular de los Ministerios de Minas y Energía (MinEnergía) y de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente).

Quienes somos

Somos una guía confiable y experta de Net Zero, que aporta experiencia vital y dirigida por un propósito desde la primera línea del cambio climático. Hemos sido pioneros en la descarbonización durante más de 20 años para empresas, gobiernos y organizaciones de todo el mundo.

Nos basamos en la experiencia de más de 300 expertos a nivel internacional, acelerando el progreso y brindando soluciones a esta crisis existencial. Hemos apoyado a más de 3,000 organizaciones en 50 países con su planificación de acción climática, colaborando con 150 + socios en el establecimiento de objetivos basados en la ciencia y apoyando a ciudades en los 5 continentes en el viaje hacia Net Zero.



**La misión de Carbon Trust es acelerar la transición
hacia un futuro libre de emisiones de carbono.**

Autores:

Sebastián Del Cueto Placeres

Carlos Eduardo Gaitán Lastras

Revisado por:

Mauricio Riveros Rodríguez

Contenido

Acerca del reporte.....	1
Resumen Ejecutivo	1
La importancia del enfriamiento en Colombia	1
Potencial de las soluciones de enfriamiento limpio	1
Evaluación y priorización de sectores y soluciones de enfriamiento.....	2
Seis recomendaciones para acelerar la implementación de soluciones de enfriamiento2	
1. Introducción	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Objetivo del estudio.....	5
1.3. Conceptos básicos.....	6
1.4. Metodología	7
2. Caracterización de la demanda de enfriamiento de Colombia a nivel nacional	10
2.1. Consumo de electricidad para enfriamiento: presente y futuro	10
2.2. El rol del enfriamiento en la demanda horaria de la red.....	12
3. Análisis de la demanda de enfriamiento de Colombia a nivel regional.....	17
3.1. Demanda actual y futura por ciudad.....	17
3.2. Patrones regionales de consumo horario de enfriamiento por sector	19
4. Identificación de oportunidades de enfriamiento limpio y eficiente para Colombia	41
4.1. Mejoras de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios	41
4.2. Sistemas de enfriamiento eficientes	42
4.3. Automatización y control	44
4.4. Tecnologías de almacenamiento térmico	45
4.5. Distritos térmicos.....	46
5. Priorización de sectores para la implementación de soluciones de enfriamiento ...	49
5.1. Criterios de evaluación.....	49
5.2. Evaluación del impacto de la demanda de enfriamiento en la red eléctrica	50
5.3. Evaluación de soluciones de enfriamiento limpio y eficiente	50
5.4. Matriz de priorización de sectores y tecnologías	57
6. Recomendaciones y Conclusiones	60
6.1. Conclusiones	60
6.2. Recomendaciones	60
7. Anexos.....	63
8. Referencias.....	76

Índice de Tablas

Tabla 1. Distribución de las ciudades conforme a su región de análisis.....	20
Tabla 2. Regiones prioritarias por sector y tipo de enfriamiento	34
Tabla 3. Sectores prioritarios por región.....	34
Tabla 4. Ficha resumen: Región Caribe	35
Tabla 5. Ficha resumen: Región Nordeste	36
Tabla 6. Ficha resumen: Región Antioquia	37
Tabla 7. Ficha resumen: Región Suroccidental	38
Tabla 8. Ficha resumen: Región Oriental	39
Tabla 9. Caso de uso: Distritos Térmicos Colombia	47
Tabla 10. Ponderación de los criterios de impacto de la demanda	50
Tabla 11. Tecnologías de enfriamiento a evaluar por sector	51
Tabla 12. Descripción de los niveles de madurez tecnológica (European Commission, 2017).....	51
Tabla 13. Nivel de madurez tecnológica y aplicabilidad por sector	52
Tabla 14. Emisiones indirectas de enfriamiento y potencial de reducción al 2030 (GIZ, s.f.)	52
Tabla 15. Perspectiva general de los servicios de flexibilidad que pueden ofrecer las soluciones de enfriamiento	54
Tabla 16. Matriz de priorización de sectores.....	57
Tabla 17. Porcentaje de enfriamiento aplicado al total nacional, 2018	63
Tabla 18. Porcentaje de la demanda de enfriamiento por subsector industrial	64
Tabla 19. Resultados por sector, 2018	64
Tabla 20. Datos de las diez ciudades de Colombia incluidas en el Inventario de GEI .	66
Tabla 21. Tasa de crecimiento de la demanda de aire acondicionado y refrigeración, promedio anual 2022-2030	69
Tabla 22. Número de medidores y sectores incluidos por región	70
Tabla 23. Ejemplos de curvas de demanda representativas.....	70
Tabla 24. Evaluación de tecnologías de enfriamiento	75

Índice de Figuras

Figura 1. Emisiones de GEI, total, sector energía, uso para enfriamiento.....	5
Figura 2. Categorías de intervenciones de enfriamiento limpio	7
Figura 3. Desglose de la demanda de enfriamiento (GWh) 2018	10
Figura 4. Proyecciones del crecimiento de demanda eléctrica para enfriamiento (GWh)	11
Figura 5. Diagrama de flujo sobre la metodología utilizada para la caracterización de la demanda horaria de enfriamiento, 10 ciudades y a nivel nacional.....	13
Figura 6. Perfil de demanda horaria de enfriamiento por sectores	14
Figura 7. Impacto potencial del crecimiento de la demanda de enfriamiento en la demanda total. (MW vs tiempo) Año base (2018) y año futuro 2030 con generación solar distribuida	15
Figura 8. Consumo total (GWh) y % del uso para enfriamiento en 10 ciudades colombianas, sector residencial, 2018	17
Figura 9. Consumo total (GWh) y % del uso para enfriamiento en 10 ciudades colombianas, sector comercial, 2018	18
Figura 10. Consumo total (GWh) y % del uso para enfriamiento en 10 ciudades colombianas, sector industrial, 2018.....	18
Figura 11. Tasa de crecimiento de la demanda de enfriamiento por ciudad y por sector, promedio anual 2018-2030	19
Figura 12. Distribución porcentual del consumo de enfriamiento regional por sector	20
Figura 13. Curvas de demanda residencial de electricidad para refrigeración por región	21
Figura 14. Curvas de demanda residencial de electricidad para aire acondicionado por región.....	22
Figura 15. Curvas de demanda comercial de electricidad para refrigeración por región	23
Figura 16. Curvas de demanda comercial de electricidad para aire acondicionado por región.....	24
Figura 17. Curvas de demanda industrial de electricidad para refrigeración por región	26
Figura 18. Curvas de demanda industrial de electricidad para aire acondicionado por región.....	26
Figura 19. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Caribe.....	28
Figura 20. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Caribe.....	28

Figura 21. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Oriental.....	29
Figura 22. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Oriental	29
Figura 23. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Nordeste.....	30
Figura 24. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Nordeste	31
Figura 25. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Suroccidental.....	31
Figura 26. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Suroccidental	32
Figura 27. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Antioquia.....	32
Figura 28. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Antioquia	33
Figura 29. Soluciones de enfriamiento por orden de prioridad/integración	41
Figura 30. Tipos de tecnología de almacenamiento térmico para enfriamiento.....	46
Figura 31. Criterios de evaluación de la matriz de priorización.....	49
Figura 32. Resultados visuales de la matriz de priorización por sector	58
Figura 33. Regiones de Colombia de acuerdo con el consumo eléctrico (UPME) y de acuerdo a la caracterización de medidores inteligentes (UNAL).....	65
Figura 34. Departamentos de Colombia con ciudades analizadas.....	67
Figura 35. Proyección de demanda en Colombia al 2030 (UPME, 2022)	68
Figura 36. Curvas de demanda normalizadas, todos los sectores - refrigeración	72
Figura 37. Curvas de demanda normalizadas, residencial - aire acondicionado	73
Figura 38. Curvas de demanda normalizadas, comercial - aire acondicionado	73
Figura 39. Curvas de demanda normalizadas, industrial - aire acondicionado.....	74

Resumen Ejecutivo

La importancia del enfriamiento en Colombia

Debido a las condiciones climáticas tropicales de Colombia, con altas temperaturas y humedad durante todo el año en muchas regiones, el enfriamiento es un proceso fundamental para gran parte de la población, los edificios y las empresas. En las zonas urbanas, especialmente en las ciudades de clima caluroso y húmedo, el uso de sistemas de aire acondicionado en hogares, edificios de oficinas, centros comerciales y otros espacios es esencial para proporcionar confort térmico. Así mismo, en todos los sectores y particularmente en los sectores de agroindustria y farmacéutico, la refrigeración es vital para evitar la descomposición de los alimentos y la medicina, así como la proliferación de microorganismos patógenos que pueden causar enfermedades.

Las tecnologías que proveen frío como equipos de refrigeración y aire acondicionado funcionan en su gran mayoría a partir de la electricidad y refrigerantes con alto potencial de calentamiento global, lo cual genera emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero. Las emisiones asociadas al uso de electricidad para enfriamiento representaron **1.65% de las emisiones totales de Colombia** en 2018. Esto sin contabilizar las emisiones directas asociadas a la fuga de refrigerantes en equipos de enfriamiento.

Los equipos de refrigeración y aire acondicionado son de los principales consumidores de electricidad en viviendas y edificios comerciales. A partir de los datos obtenidos en este estudio, se estimó que la demanda total de electricidad para este uso en 2018 fue de 22.9 TWh lo cual representó **33% del consumo total a nivel nacional**. Considerando que el aumento de temperaturas, particularmente en zonas urbanas llevará a un mayor consumo de electricidad, se espera que la **demanda de enfriamiento crezca un 42.8% para 2030**, aumentando a un total 32.7 TWh y que, de forma horaria, el periodo de mayor demanda se presente entre las 12 pm y las 5 pm a nivel nacional.

La altura y el clima de las ciudades colombianas son determinantes en la cantidad de energía consumida para enfriamiento. En edificios comerciales de ciudades calurosas como Barranquilla, Cartagena y Montería, la demanda de electricidad para aire acondicionado es el 45% del consumo total de electricidad en promedio. En contraste, en ciudades de clima frío como Bogotá, los refrigeradores en las viviendas son responsables de más del 35% del total del consumo eléctrico de los usuarios en promedio. Cada región analizada tiene un sector prioritario de acuerdo con su consumo de la electricidad para enfriamiento. Así mismo, los periodos de mayor consumo por región no necesariamente coinciden con el periodo máximo estimado a nivel nacional.

Potencial de las soluciones de enfriamiento limpio

Las soluciones de enfriamiento limpio que, de acuerdo con la definición provista en este estudio, incluyen medidas de enfriamiento pasivo, equipos de enfriamiento y almacenamiento de frío, pueden ayudar a dos propósitos fundamentales: **1) reducir la demanda eléctrica**, lo cual trae beneficios económicos y ambientales para los usuarios y para el sistema eléctrico en general; **2) flexibilizar la demanda eléctrica**, lo cual permitirá al sistema eléctrico gestionar mejor los retos que implica la integración de una gran capacidad energía renovable en línea con los compromisos de reducción de emisiones de Colombia.

- **Las medidas de enfriamiento pasivo**, aunque ayudan principalmente a reducir la demanda eléctrica de los edificios, también son medidas habilitadoras de la gestión de la demanda y por tanto de provisión de flexibilidad al sistema eléctrico. Por ejemplo, un mejor aislamiento térmico

ayuda a reducir la transferencia de calor en climas cálidos, manteniendo fresco el espacio por más tiempo y, por consiguiente, ayudando a desplazar la demanda de electricidad del aire acondicionado a horas futuras. Son también las medidas iniciales que todos los usuarios deben considerar como prioridad en su búsqueda de reducir el consumo eléctrico.

- **Utilizar equipos de refrigeración y aire acondicionado más eficientes**, además de reducir el consumo eléctrico para enfriar, pueden ajustar la cantidad requerida de energía por hora dependiendo de las necesidades del espacio, y por tanto ser grandes fuentes de provisión de servicios de respuesta en demanda y flexibilidad. Utilizados en conjunto con controles inteligentes y/o sistemas de automatización de edificios tienen el potencial de suavizar las rampas de consumo horario para enfriamiento.
- **Las tecnologías de almacenamiento térmico de frío** tienen el potencial de cambiar las cargas de enfriamiento de las horas pico a las horas valle. Aunque se identificaron 8 tipos de tecnologías distintas, las que pueden ser implementadas en el corto plazo por su disponibilidad comercial son los sistemas de almacenamiento de hielo y los tanques de almacenamiento de agua fría. Una forma eficaz de implementar este tipo de soluciones a múltiples edificios y usuarios es a través de los **distritos térmicos**.

Evaluación y priorización de sectores y soluciones de enfriamiento

Las soluciones de enfriamiento limpio que tienen la capacidad de enfriar y que también pueden almacenar frío están bien posicionadas para aliviar la restricción que la demanda de enfriamiento puede representar para la operación del sistema de energía y contribuir en la provisión de flexibilidad a la red. El estudio priorizó las estrategias de enfriamiento limpio desde dos perspectivas: **(1) la identificación de sectores** donde hay mayor oportunidad para reducir la demanda de enfriamiento y brindar servicios de flexibilidad de la red, y **(2) identificación de soluciones de enfriamiento** limpio que reducen la demanda, aportan flexibilidad a la red y tienen el potencial de ser escalables con el objeto de contribuir a la disminución de las emisiones de GEI en Colombia.

A través de las evaluaciones realizadas bajo las perspectivas antes indicadas, se concluye que **el sector comercial es prioritario para la implementación de soluciones limpias y eficientes de enfriamiento que logren dar flexibilidad a la red eléctrica**; a pesar de que la demanda sea mayor en el sector residencial, y que la mayor cantidad de usuarios que tienen la posibilidad de cambiarse a tarifa horaria, esté en el sector industrial, dentro del sector no regulado. Así mismo, se determinaron cuatro soluciones de enfriamiento que, por su nivel de madurez tecnológico, potencial de reducción de la demanda, los servicios de flexibilidad que pueden proveer y las barreras que enfrentan, pueden estar ya disponibles para su implementación en Colombia. Estos son: **1) controles inteligentes; 2) unidades de aire acondicionado/sistemas de refrigeración energéticamente eficientes; 3) tanques de almacenamiento de agua fría; 4) distritos térmicos**.

Seis recomendaciones para acelerar la implementación de soluciones de enfriamiento

En la búsqueda de influir en las decisiones de política pública sobre enfriamiento, se recomienda:

- 1) Realizar una evaluación integral de las necesidades de enfriamiento
- 2) Desarrollar políticas e incentivos específicos para el sector
- 3) Fomentar la integración con el sistema de energía
- 4) Promover la investigación y el desarrollo
- 5) Fomentar las asociaciones público-privadas
- 6) Promover la concienciación y la educación del público

A satellite-style map of the world. A large region in the North Atlantic, including parts of North America, Europe, and Africa, is highlighted in yellow. A large region in the South Atlantic, including parts of South America and Africa, is highlighted in red. The rest of the world is shown in natural colors.

1

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

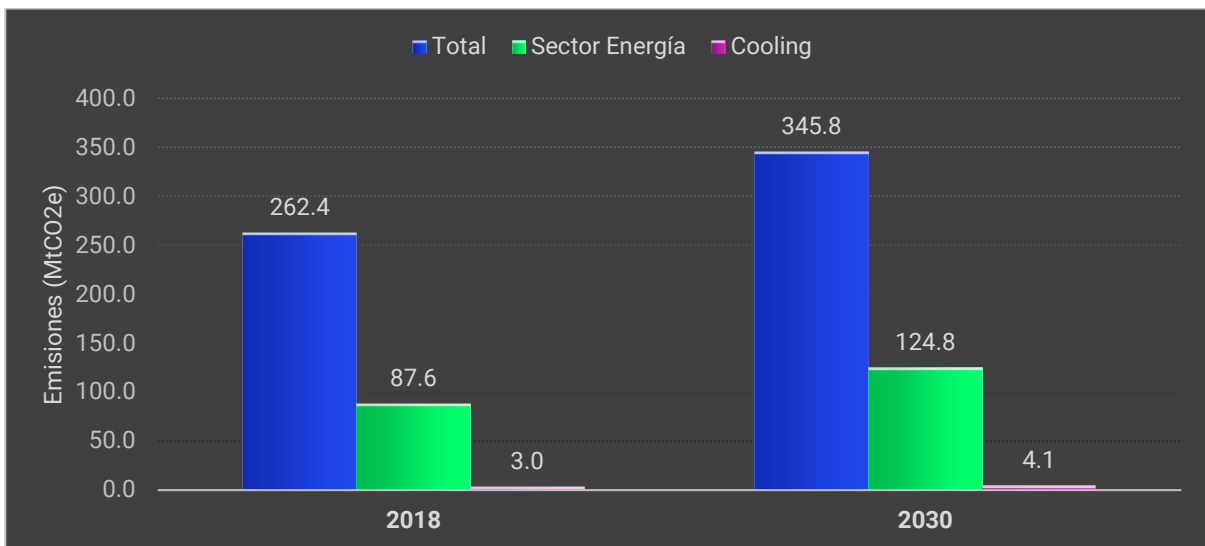
1.1. Antecedentes

En diciembre de 2020, Colombia incrementó su ambición climática e hizo un compromiso para reducir 51% de sus emisiones en 2030 comparado con el escenario de línea base (Gobierno de Colombia, 2020). Además, su contribución nacionalmente determinada (NDC, por sus siglas en inglés) establece metas adicionales para electrificación y renovables (Climate Action Tracker, 2021).

La demanda de enfriamiento representa 33% del consumo de electricidad en Colombia, lo que equivale a 22.9 TWh. Se espera que esta demanda incremente en un 43% a 32.7 TWh para 2030.

Las emisiones de gases de efecto invernadero del enfriamiento a partir de electricidad fueron de 2.97 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2018, aproximadamente 4.96% de las emisiones del sector energía y 1.65 % del total de emisiones nacional¹ y están proyectadas a 4.13 M tCO₂eq en 2030 si los productos y servicios de enfriamiento se siguen implementando de la forma usual.

Figura 1. Emisiones de GEI, total, sector energía, uso para enfriamiento



En el marco del proyecto de Apoyo al despliegue de redes inteligentes en Colombia – Fase 2, financiado por UK PACT, el Ministerio de Energía y Minas de Colombia ha encargado a Carbon Trust que investigue el papel del enfriamiento limpio como vector energético para apoyar la transición energética de Colombia.

1.2. Objetivo del estudio

Este estudio tiene como objetivo caracterizar la demanda de enfriamiento (refrigeración y uso de aire acondicionado), tanto actual como futura (2030), de Colombia a nivel nacional, junto con un enfoque

¹ Valores calculados a partir del promedio anual de emisiones de 2015-2020 reportados en la NDC de Colombia actualizada en 2022.

regional y por sectores (residencial, comercial e industrial). Asimismo, analizar de forma horaria el comportamiento del consumo por enfriamiento y por sector: residencial, comercial e industrial. Por último, hacer una priorización de medidas de enfriamiento energéticamente eficientes, que permitan generar mayor flexibilidad en la red eléctrica, minimizando así las emisiones del consumo de enfriamiento y facilitando la penetración de energía renovable que permita la descarbonización del sistema eléctrico.

1.3. Conceptos básicos

El **enfriamiento** se refiere a cualquier actividad humana, diseño o tecnología que disipa o reduce las temperaturas y contribuye a lograr un confort térmico razonable para las personas, o la conservación de productos (medicamentos, alimentos, etc.) y procesos efectivos y eficientes (por ejemplo, centros de datos, producción industrial o agrícola y minería). Este enfriamiento se puede lograr de diversas formas, tales como por ejemplo el acondicionamiento de aire, la refrigeración, la ventilación, etc.

Para el análisis de la demanda de enfriamiento que se lleva a cabo en el capítulo 2, es importante tener claridad sobre los siguientes conceptos:



La **refrigeración** es un proceso de eliminación de calor de una sustancia o espacio para bajar su temperatura por debajo de la temperatura ambiente. La refrigeración generalmente se logra utilizando un sistema de refrigeración que usa un refrigerante para absorber el calor de la sustancia que se enfría y liberarlo al exterior. Para efectos de este reporte, cuando se habla de refrigeración se hace referencia a los equipos que llevan a cabo este proceso, como refrigeradores, neveras, congeladores, cuartos fríos, etc.



El **aire acondicionado** es un proceso de control de la temperatura, la humedad y la calidad del aire de un espacio para crear un ambiente interior cómodo y saludable. El aire acondicionado generalmente implica enfriar el aire eliminando el calor y la humedad mediante un sistema de refrigeración y haciendo circular el aire enfriado y deshumidificado de regreso al espacio. En este reporte, cuando se menciona aire acondicionado se hace referencia a equipos como minisplits, equipos centrales o de pared, chillers, etc.



La **ventilación** es el proceso de proporcionar aire fresco a un espacio y eliminar el aire viciado y los contaminantes para mantener un ambiente interior saludable. La ventilación se puede lograr por medios naturales, como abrir ventanas o usar sistemas de ventilación pasiva, o por medios mecánicos, como usar ventiladores o sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado). Cuando se menciona este concepto en este reporte, se hace referencia únicamente a ventiladores. En la evaluación de la demanda no se analiza este mecanismo de enfriamiento.

En este estudio se define **enfriamiento limpio** como soluciones que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero de enfriamiento durante la vida operacional de los productos. Esta definición tan amplia y sus múltiples aplicaciones resultan en soluciones que son diversas en tipos de tecnología y dependientes del sector de aplicación.

Figura 2. Categorías de intervenciones de enfriamiento limpio



Las intervenciones de enfriamiento limpio se pueden agrupar en las categorías definidas en la figura anterior, correspondientes a:

- **Enfriamiento pasivo:** medidas que evitan o reducen la necesidad de refrigeración mecánica, incluida la reducción de las cargas de refrigeración, diseño inteligente y centrado en el ser humano, y planificación urbana.
- **Equipos de enfriamiento:** donde cualquier equipo de refrigeración utilizado es eficiente (tecnología de mayor rendimiento en el mercado) y utiliza refrigerantes con potencial mínimo de calentamiento global² (GWP, por sus siglas en inglés).
- **Almacenamiento de frío:** soluciones de energía térmica que utilizan materiales de cambio de fase³ (PCM, por sus siglas en inglés) criogénicos u otros que permiten el almacenamiento a corto y largo plazo de energía eléctrica producida por fuentes renovable y transformada a energía térmica a temperaturas bajas o bajo cero.

Esta clasificación se utiliza en el capítulo 4 al momento de identificar las tecnologías que se ocupen bajo cada tipo de intervención.

1.4. Metodología

El estudio utiliza una combinación de datos primarios cuantitativos e investigación secundaria sobre las características de la demanda de enfriamiento y el sistema de energía actual y futuro de Colombia. Algunas de las fuentes más relevantes incluyen:

- La demanda sectorial y total del sistema eléctrico interconectado de Colombia obtenidos de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios) y XM

² GWP: Global Warming Potential

³ PCM: Phase-change material

- El inventario de gases de efecto invernadero de fuentes estacionarias para ciudades de Colombia elaborado para la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO) y Distritos Térmicos Colombia y provista por el Minambiente.
- Proyecciones de consumo y demanda eléctrica elaboradas por la UPME.
- La caracterización de la demanda eléctrica horaria a nivel nacional y a nivel regional a partir de datos de medidores inteligentes, elaborada por la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) y Carbon Trust en 2022, como parte del proyecto de “Apoyo al despliegue de redes inteligentes en Colombia – Fase 2”.

Así mismo, este estudio utiliza datos cualitativos de fuentes secundarias para la identificación de soluciones de enfriamiento limpio y eficiente y una mezcla de estos con los resultados cuantitativos obtenidos para la priorización de sectores.

Ambos conjuntos de datos e ideas se utilizan para desarrollar el análisis descrito y presentado en los siguientes Capítulos:

Capítulo 2

- **Caracterización de la interacción actual entre la demanda de enfriamiento y el sistema de potencia:** una curva de demanda de enfriamiento se desarrolla en base a tres métricas sectoriales: (i) volumen actual de demanda de refrigeración; (ii) aumento esperado en la demanda de refrigeración; (iii) el perfil de la demanda de refrigeración en un día típico.
- **Evaluación de la evolución potencial de la interacción de los sistemas de refrigeración y energía:** La carga de enfriamiento potencial futura se estima a partir del crecimiento esperado en la demanda de enfriamiento para 2030 en 10 ciudades colombianas.

Capítulo 3

- **Análisis regional y por sector de la demanda total y la demanda horaria de enfriamiento en 2018:** La demanda total se analiza por ciudades y la demanda horaria se agrupa por regiones y se desagrega por sector y por uso de la energía. Se describen con mayor detalle los picos y los incrementos de la demanda.

Capítulo 4

- **Identificación soluciones de refrigeración limpias en términos de su potencial para reducir la demanda de enfriamiento y flexibilizar la red:** Basado en la gama de servicios de flexibilidad que necesita la red, el estudio identifica soluciones de refrigeración limpia que podrían proporcionar estos servicios.

Capítulo 5

- **Evaluación y priorización de los sectores y tecnologías con base en criterios definidos:** A partir de la definición de 8 criterios y su respectiva ponderación, el estudio identifica y prioriza soluciones para ser adoptadas por sectores dada la demanda de enfriamiento actual y futura de cada sector y describe cómo se espera que proporcione potencialmente servicios de flexibilidad a la red.

2

CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE ENFRIAMIENTO DE COLOMBIA A NIVEL NACIONAL

2. Caracterización de la demanda de enfriamiento de Colombia a nivel nacional

La demanda de enfriamiento representó 33% del consumo de electricidad en Colombia en 2018 y se espera que crezca un 43% entre 2018 y 2030. Además de tener un impacto directo en el tamaño de la demanda máxima de energía, la demanda de enfriamiento de sectores clave como los edificios comerciales y los hogares también puede afectar la red debido a los rápidos aumentos en la carga de aire acondicionado que desencadenan variaciones bruscas en la curva de demanda de energía.

Por otro lado, el crecimiento del componente de enfriamiento de la demanda de energía futura puede tener impactos importantes en el sector eléctrico en sentido de necesidad de aumento de capacidad instalada a lo largo de toda la cadena de valor del sistema, pero además el comportamiento de esta demanda puede generar cambios en los perfiles de demanda eléctrica ya sea a nivel agregado de una región o ciudad o de un sector particular de la red, alterando los momentos y magnitudes de los picos y valles de los perfiles horarios de demanda.

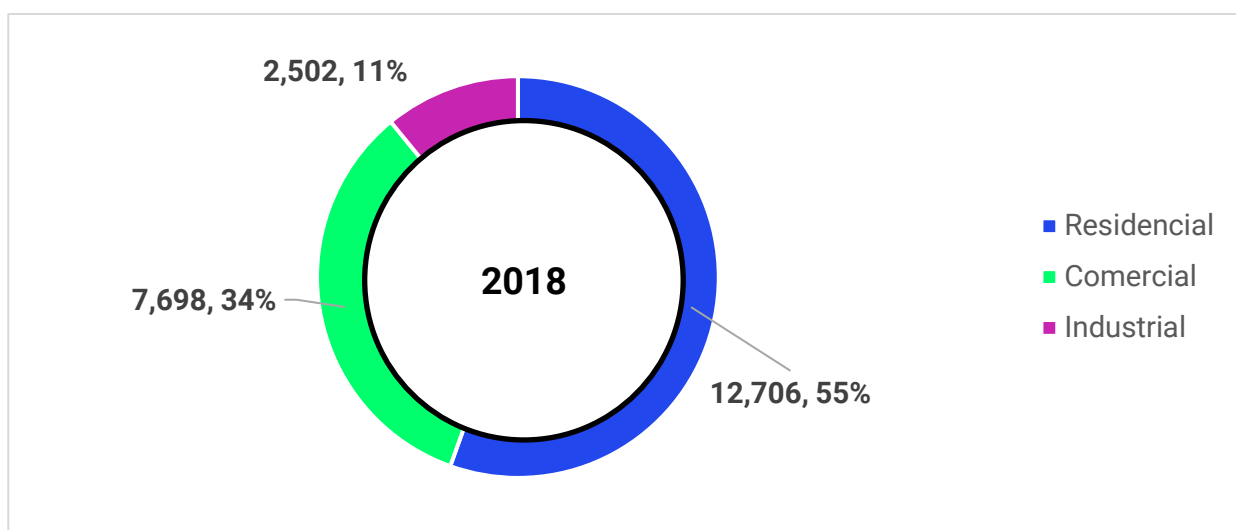
Gestionar el enfriamiento como un vector de energía y comprender cómo podría contribuir a proveer servicios de flexibilidad a la red puede por tanto contribuir a un desarrollo más eficiente del futuro sistema eléctrico, más aún frente a la esperada penetración de generación renovable en cantidades considerables que aumentarán la necesidad de flexibilidad del sistema eléctrico colombiano.

2.1. Consumo de electricidad para enfriamiento: presente y futuro

2.1.1. Demanda actual de electricidad para enfriamiento

El uso de la energía eléctrica para equipos de refrigeración y aire acondicionado en Colombia representó 22.9 TWh del total de la demanda en 2018, lo cual representa aproximadamente 33% del consumo total a nivel nacional.

Figura 3. Desglose de la demanda de enfriamiento (GWh) 2018



Sector residencial: Debido al uso de aire acondicionado, refrigeradores y congeladores, el sector residencial corresponde al sector de mayor demanda de enfriamiento, con un consumo total de 12.7 TWh en 2018, equivalente al 18.4% del consumo eléctrico total en Colombia.

Sector comercial: Este es el segundo sector con mayor demanda de enfriamiento, con un total de 7.7 TWh en 2018, que representó 11.1% del consumo eléctrico total en Colombia. Esta demanda es el resultado de las operaciones de edificios como oficinas, hoteles, hospitales, centros comerciales, tiendas de autoservicio y de conveniencia, depósitos de cerveza, farmacias, etc. que requieren electricidad para mantener el confort térmico de sus usuarios y/o para mantener a la temperatura requerida alimentos, bebidas y medicinas.

Sector industrial: Este sector en 2018 consumió 2.5 TWh de energía eléctrica para uso en equipos y sistemas de enfriamiento lo cual representó 3.6% de la demanda total al sistema eléctrico colombiano. Se identificaron 3 grupos de subsectores industriales que representan más del 85% del consumo de electricidad asociado a enfriamiento:

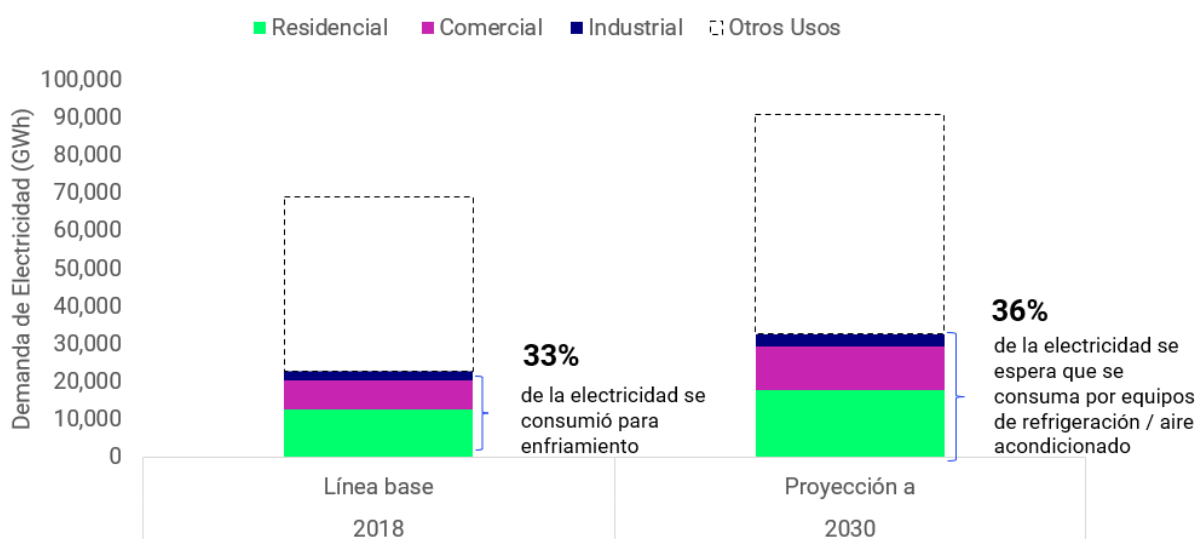
- Productos alimenticios, elaboración de bebidas, productos de tabaco, 62%
- Productos minerales no metálicos (Piedras, vidrio, cerámicas, otros no metálicos), 13%
- Sustancias y productos químicos, Productos farmacéuticos, Productos de caucho y de plástico, 11%

2.1.2. Demanda futura de electricidad para enfriamiento

En los siguientes años se espera que, en respuesta al incremento de temperaturas asociado al cambio climático y a una mayor urbanización que puede conllevar al efecto de isla de calor urbano, en que los edificios atrapan el calor durante el día de forma considerable, la demanda de enfriamiento aumente.

Para Colombia, el consumo de electricidad para uso final de enfriamiento se espera que crezca en un 42.8% para 2030, aumentando de 22.9 TWh en 2018 a 32.7 TWh. Esto está basado en el escenario medio de las proyecciones de crecimiento de la UPME y en el porcentaje de crecimiento de la demanda de enfriamiento en 10 ciudades colombianas al 2030 (ver el Anexo 4 para más detalle acerca de los supuestos utilizados).

Figura 4. Proyecciones del crecimiento de demanda eléctrica para enfriamiento (GWh)



Sector		Crecimiento entre 2018 y 2030 (%)	Crecimiento entre 2018 y 2030 (GWh)
Residencial		41.7%	5,304
Comercial		24.1%	3,859
Industrial		25.0%	625

El incremento estimado de 3 puntos porcentuales al 2030 está influenciado principalmente por un crecimiento destacado del uso de energía para enfriamiento en el sector residencial, potencialmente impulsado por la incorporación de un mayor número de equipos de aire acondicionado y refrigeración en las viviendas, así como un potencial mayor uso de los equipos actuales.

Por otro lado, la tasa de crecimiento de los sectores comercial e industrial se espera que sea muy similar al 2030.

2.2. El rol del enfriamiento en la demanda horaria de la red

Este estudio es el primero en su tipo que busca caracterizar la demanda de electricidad para usos específicos (refrigeración y aire acondicionado) de forma horaria en Colombia. Para determinar el rol del enfriamiento en la demanda horaria de la red a nivel nacional, se hizo uso de diversas fuentes de datos e información y se diseñó una metodología que permitió llegar a una estimación con un nivel de incertidumbre razonable. La metodología se presenta a continuación, los resultados se presentan a nivel nacional en este capítulo y a nivel regional en el capítulo 3.

2.2.1. Metodología para la caracterización de la demanda horaria de enfriamiento

En primer lugar, se obtuvo el consumo promedio diario por ciudad. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

1. Se obtuvieron datos de emisiones de alcance 2 para 10 ciudades colombianas de 2018 a 2030.
2. Se transformaron los datos de emisiones de alcance 2 a consumo eléctrico anual (GWh) por ciudad, utilizando los factores de emisión (kgCO₂e/kWh) aplicados en el inventario.
3. Se calculó el consumo promedio diario, dividiendo el consumo eléctrico anual por uso final de la energía y por ciudad entre 365 días.

Distribución horaria del consumo

Para distribuir el consumo promedio diario de forma horaria se utilizaron dos métodos. En el primer método, para la electricidad utilizada para refrigeración, se asumió que el consumo sigue un patrón idéntico a la temperatura ambiente.

1. Se obtuvieron datos horarios de temperatura de las 10 ciudades para un día aleatorio.
2. Se normalizaron las curvas por ciudad a 100% dividiendo la temperatura horaria entre la suma total de grados día.
3. Se distribuyó el consumo diario de electricidad para refrigeración con base en el porcentaje horario obtenido en el paso anterior.

En el segundo método, para la electricidad usada para aire acondicionado, se asumió que el consumo sigue el patrón de las curvas de demanda regionales por sector obtenidas a partir de datos de medidores inteligentes. Una descripción más detallada de estas curvas se puede encontrar en los Anexos 5 y 6.

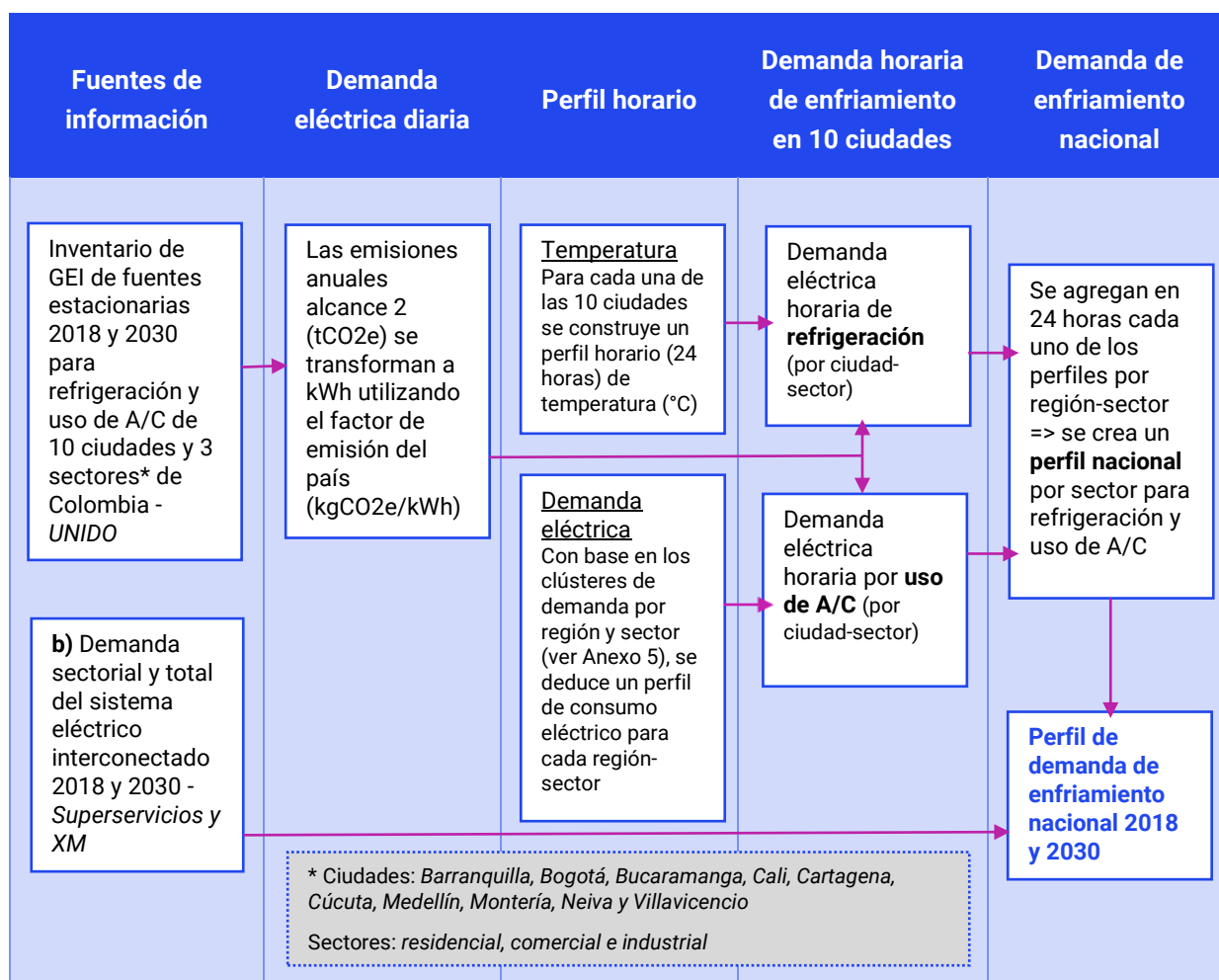
1. Se obtuvieron múltiples curvas horarias de consumo eléctrico por región y por sector.
2. Se obtuvo una curva horaria por región y por sector a partir de la agregación de las diferentes curvas asociadas a esa región y a ese sector. Para los casos donde no existe información disponible, se asignó el comportamiento nacional con base en la altura y el clima.
3. Se asociaron las ciudades del inventario de emisiones a sus respectivas regiones, como se muestra en la Tabla 1.
4. Se normalizaron las curvas por región a 100% dividiendo el consumo horario entre el consumo total.
5. Se distribuyó el consumo diario de electricidad para aire acondicionado por ciudad con base en el porcentaje horario obtenido en el paso 3 y se agregó por región de forma horaria.

Extrapolación a la demanda nacional de enfriamiento

El consumo total de las 10 ciudades representa el 35% del total nacional. Para obtener los resultados a nivel nacional, se utilizaron los valores obtenidos en la sección 2.1 y 2.2 respecto a la demanda total por sector y por uso final de la energía y se asumió que la demanda de enfriamiento del resto del país sigue el mismo comportamiento horario de que el deducido para la muestra representativa de 10 ciudades. Este procedimiento y supuestos se aplicaron tanto para la demanda del 2018 como la del 2030.

La Figura 5 a continuación resume cada uno de los pasos metodológicos utilizados para la caracterización horaria de la demanda de enfriamiento descritos en esta sección.

Figura 5. Diagrama de flujo sobre la metodología utilizada para la caracterización de la demanda horaria de enfriamiento, 10 ciudades y a nivel nacional



2.2.2. El rol actual de la carga de enfriamiento en la red eléctrica

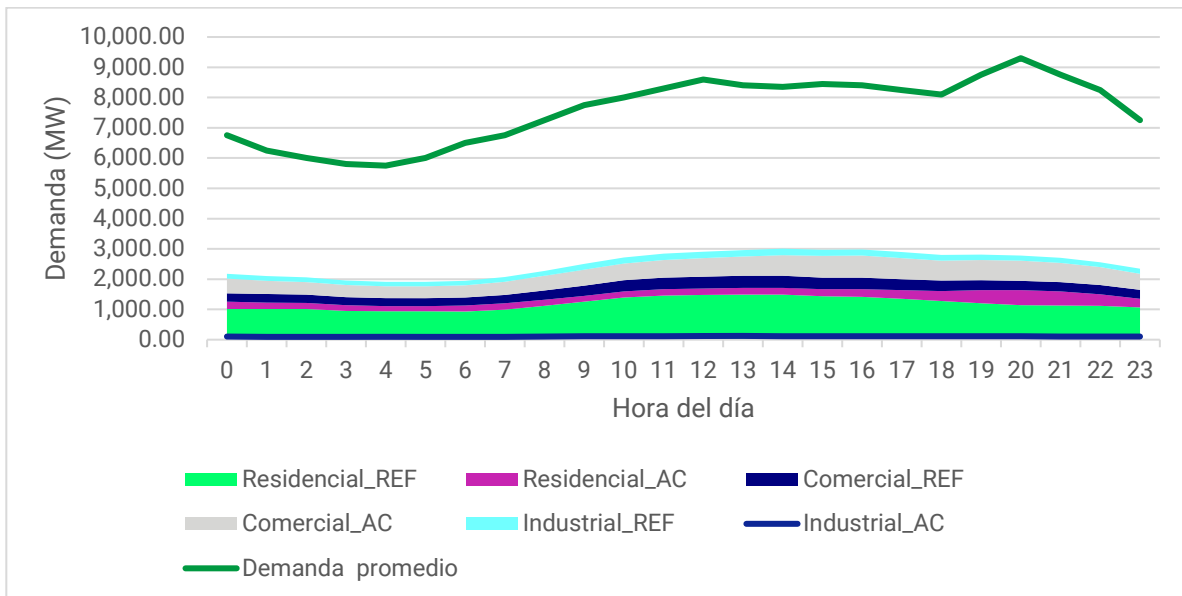
El sistema eléctrico de Colombia es altamente dependiente de la generación hidroeléctrica, la cual representa más del 68% de la capacidad instalada en el país. Actualmente, el sistema eléctrico es estable y presenta un margen de reserva alto, con un pico de demanda significativamente más bajo que la capacidad instalada.

Contribución del enfriamiento a la demanda máxima: La demanda de electricidad para enfriamiento en Colombia es equivalente en promedio a 2,615 MW de potencia requerida por cada hora, bajo el supuesto de que la demanda se distribuye de forma homogénea durante el día. Esto representa casi un cuarto de la demanda pico y 15% de la capacidad instalada total al final del año 2021 (XM, 2022).

Basados en la estimación del consumo de enfriamiento por sector, se elaboró una estimación de la electricidad requerida por hora para satisfacer la demanda de enfriamiento en todos los sectores.

Perfil horario de la demanda horaria de enfriamiento: El consumo de energía para enfriamiento no es ni será constante a todas horas del día. Este patrón de consumo varía dependiendo de las actividades de cada sector y está correlacionado con variables ambientales como la temperatura y la humedad. Por medio de la metodología detallada en Figura 5 se dedujo el perfil de demanda de enfriamiento a nivel nacional por sector en un día tipo. El resultado se presenta en la Figura 6.

Figura 6. Perfil de demanda horaria de enfriamiento por sectores



De la gráfica de la Figura 6 se observa lo siguiente:

- La demanda de enfriamiento contribuye de forma significativa a la curva de demanda y la concentración de ésta en viviendas y edificios residenciales entre las 12 pm y las 5 pm está sincronizada con los momentos de mayor temperatura en el día.
- El segundo periodo de mayor demanda se presenta entre las 6 pm y las 9 pm, asociado con la demanda máxima horaria.
- En el punto de mayor demanda, el enfriamiento puede representar hasta el 37% de la demanda horaria en un día promedio.

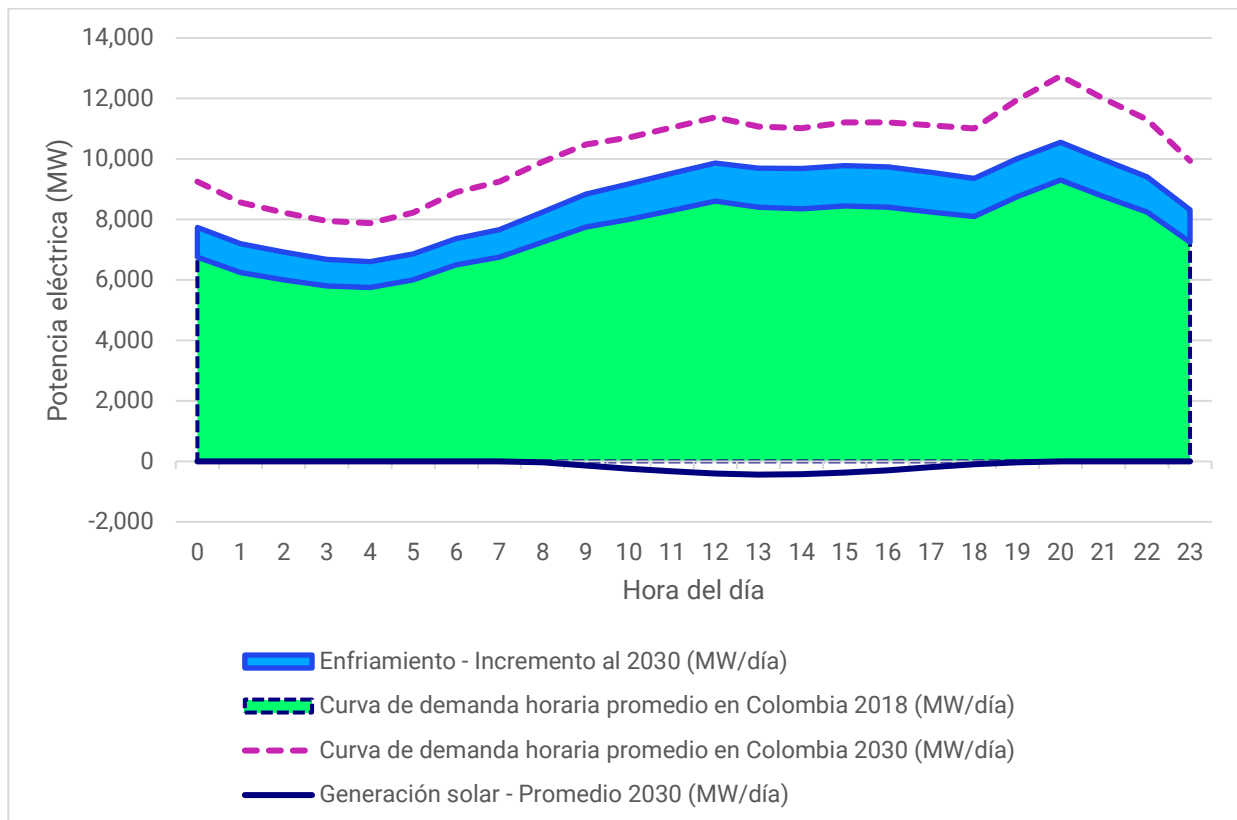
2.2.3. Impacto potencial del crecimiento de la demanda de refrigeración en la demanda pico y en la flexibilidad en la red.

La potencia máxima en Colombia está proyectada a alcanzar entre 10.7 y 15.1 GW en 2030 de acuerdo con las proyecciones de la UPME (UPME, 2022). El incremento de la demanda de enfriamiento puede impactar la curva de potencia máxima.

Por otro lado, el Incremento de la generación distribuida en el país al 2030 se espera que genere una potencia máxima de 251 MW-año y una generación anual de 1,098 GWh (UPME, 2022), lo cual cubriría 3.36% del total de la demanda de enfriamiento en ese año y reduciría la demanda total en el periodo de 10:00 hrs a 17:00 hrs.

La Figura 7 muestra el consumo de enfriamiento adicional que se espera con respecto a la demanda total del año 2018, así como el efecto de la presencia de generación distribuida esperada. Los resultados se obtuvieron mediante la metodología de la Figura 5 aplicada al inventario de emisiones proyectado para el 2030.

Figura 7. Impacto potencial del crecimiento de la demanda de enfriamiento en la demanda total. (MW vs tiempo) Año base (2018) y año futuro 2030 con generación solar distribuida



3

ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE ENFRIAMIENTO DE COLOMBIA A NIVEL REGIONAL



3. Análisis de la demanda de enfriamiento de Colombia a nivel regional

Analizar la demanda de electricidad para enfriamiento en Colombia de forma desagregada por región es importante por varias razones:

Planificación energética: comprender los patrones y la magnitud de la demanda de enfriamiento en diferentes regiones puede ayudar a los planificadores y formuladores de políticas energéticas a diseñar sistemas energéticos más efectivos que puedan satisfacer la demanda mientras minimizan las pérdidas y mejoran la eficiencia general.

Desarrollo de infraestructura: conocer mejor la demanda de enfriamiento puede ayudar a informar las decisiones sobre planificación y construcción de infraestructura energética, como plantas de generación o líneas de transmisión o distribución y, para garantizar que puedan satisfacer adecuadamente las necesidades de enfriamiento de diferentes regiones.

Estabilidad de la red: entender los patrones de demanda de enfriamiento también puede ayudar a los operadores de la red a administrar mejor el flujo de electricidad y mantener la estabilidad de la misma, especialmente durante períodos de alta demanda o condiciones climáticas extremas.

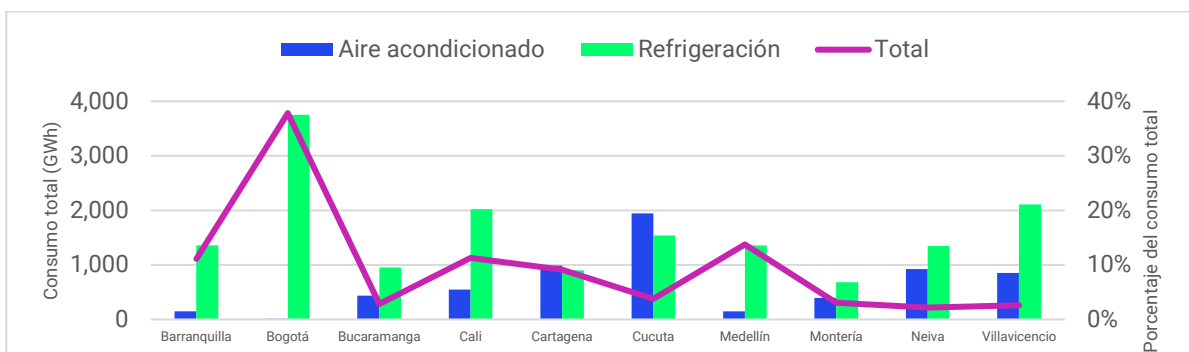
Cambio climático: a medida que las temperaturas continúan aumentando debido al cambio climático, se espera que aumente la demanda de enfriamiento. Caracterizar la demanda de electricidad para refrigeración en Colombia por ciudad/región puede ayudar a informar los esfuerzos para adaptarse a estas condiciones cambiantes y desarrollar sistemas de energía más resilientes.

3.1. Demanda actual y futura por ciudad

3.1.1. Demanda actual de enfriamiento en 10 ciudades colombianas

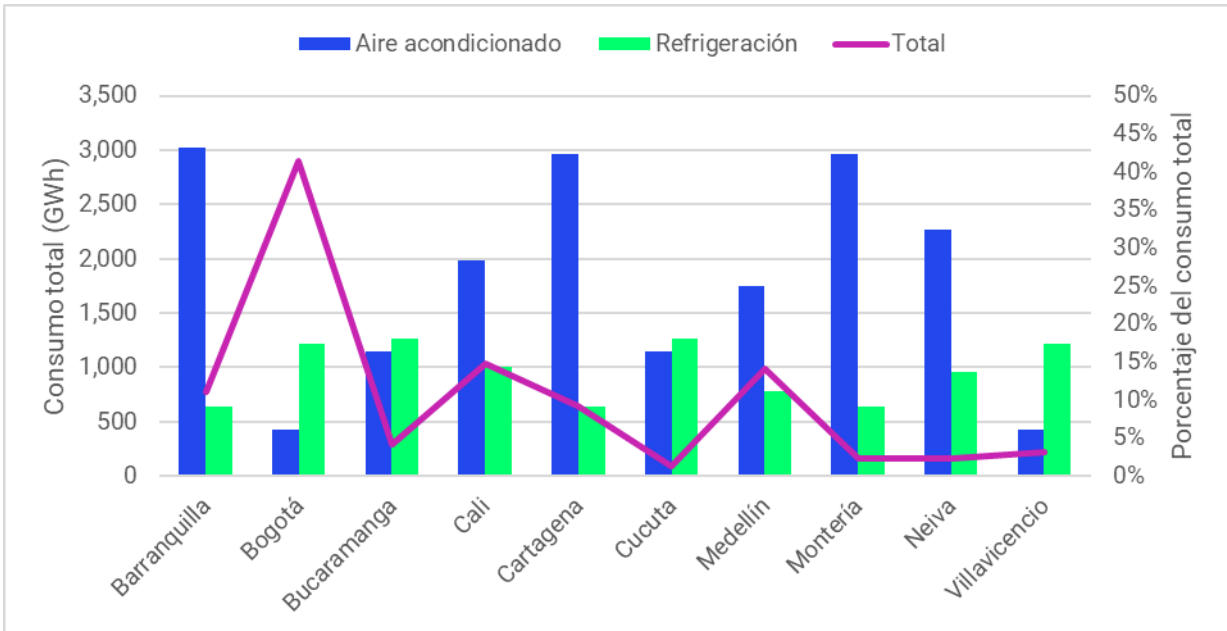
En esta sección se analiza con detalle la demanda de electricidad para enfriamiento según la información recolectadas de las 10 ciudades incluidas en el inventario de emisiones GEI. En la Figura 8 se observa que, en el sector residencial, el porcentaje del consumo total para aire acondicionado varía significativamente entre ciudades a pesar de que la mayoría de las ciudades son de clima cálido, siendo Barranquilla la de menor proporción y Cúcuta la de mayor porcentaje. En contraste, se observa que tal como esperado, la demanda de refrigeración es el principal componente de demanda de enfriamiento en climas fríos, como se observa en Bogotá, con un 36% del total del consumo.

Figura 8. Consumo total (GWh) y % del uso para enfriamiento en 10 ciudades colombianas, sector residencial, 2018



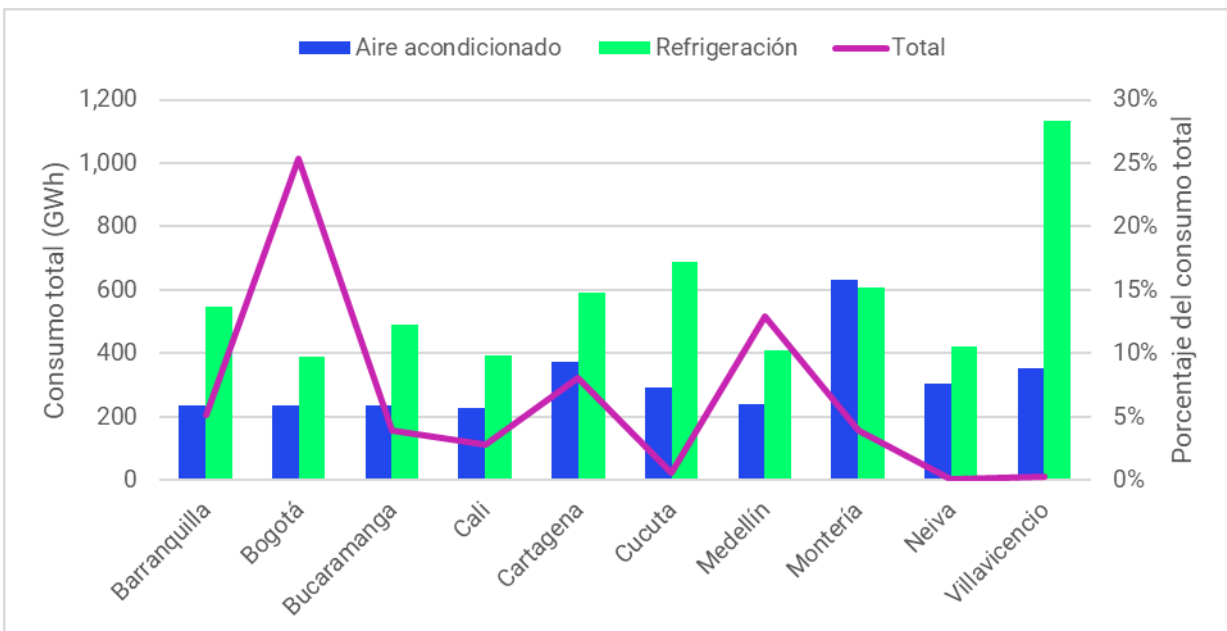
En el sector comercial, el uso del aire acondicionado es mayor que el uso de equipos de refrigeración y la proporción de la demanda de ambos en ciudades como Barranquilla y Cartagena llega al 50% del total de la demanda de enfriamiento como se observa en la Figura 9. Curiosamente, en Medellín, a pesar de tener un clima templado, la proporción de aire acondicionado también es mayor a la refrigeración.

Figura 9. Consumo total (GWh) y % del uso para enfriamiento en 10 ciudades colombianas, sector comercial, 2018



Por otra parte, según se observa en la Figura 10, en el sector industrial el uso de aire acondicionado está en un rango entre 5% y 15% en las ciudades mientras que el uso de electricidad para refrigeración se encuentra entre 10% y 16% en todas las ciudades excepto Villavicencio, donde representa el 28% del total del consumo industrial. Esto puede ser debido a que representa un punto estratégico entre las zonas de producción de alimentos y la capital.

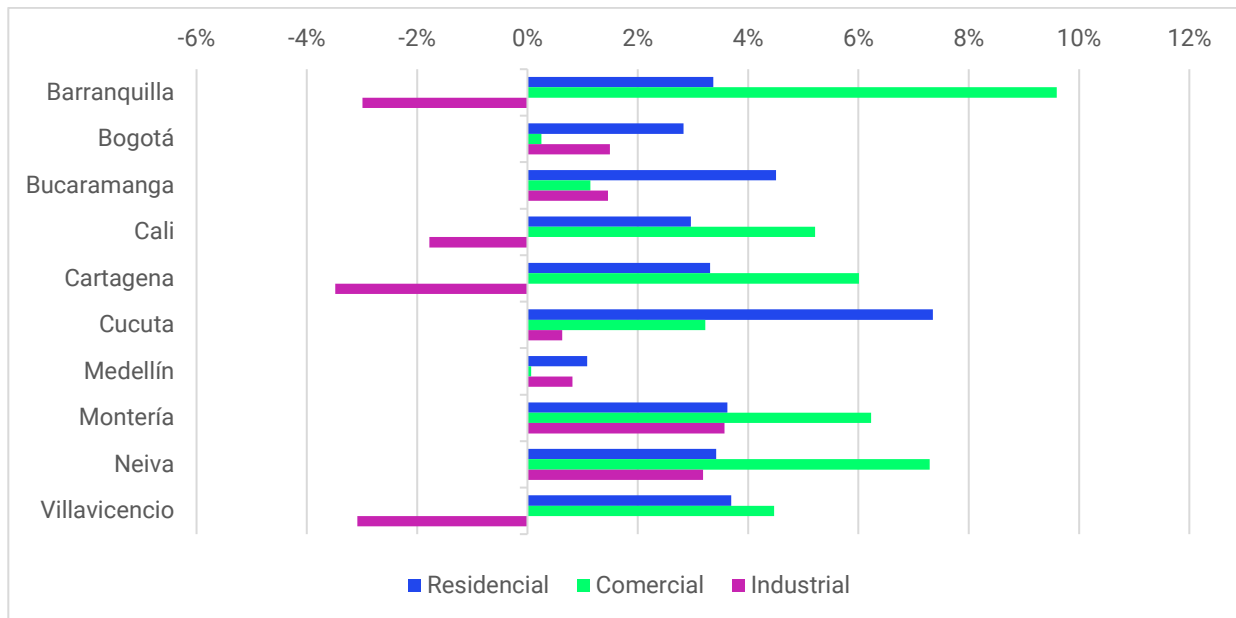
Figura 10. Consumo total (GWh) y % del uso para enfriamiento en 10 ciudades colombianas, sector industrial, 2018



3.1.2. Demanda futura de enfriamiento en 10 ciudades colombianas

Para las ciudades colombianas, el crecimiento de la demanda de enfriamiento no será homogénea ni estará directamente alineada con el resultado a nivel nacional. En la Figura 11 se puede observar la tasa de crecimiento o decrecimiento de la demanda de enfriamiento por ciudad y por sector.

Figura 11. Tasa de crecimiento de la demanda de enfriamiento por ciudad y por sector, promedio anual 2018-2030



En el sector residencial, se puede detectar que ciudades como Cúcuta y Bucaramanga tendrán un crecimiento en la demanda de enfriamiento superior a la media, probablemente debido a un aumento del número de viviendas en las ciudades. Una oportunidad para reducir la tasa de crecimiento de la demanda es que las nuevas viviendas se diseñen bajo principios de construcción sostenible y que a las viviendas existentes se les apliquen medidas de eficiencia energética que les permitan mantener adentro una temperatura agradable y confortable.

En el sector comercial, la mayoría de las ciudades espera tener un crecimiento de la demanda de enfriamiento superior al 4% anual, siendo únicamente Bogotá, Medellín y Bucaramanga las ciudades donde el crecimiento será mínimo.

En el sector industrial, el crecimiento de la demanda de enfriamiento en todos los casos será menor al 4% anual y en 4 de las 10 ciudades incluso habrá una disminución de la demanda en los próximos años. Es importante mencionar que en los supuestos utilizados en el Inventario de GEI de fuentes estacionarias de ciudades de Colombia, en la proyección del sector industrial ya se consideran ahorros de electricidad por mejoras tecnológicas y de eficiencia energética, lo cual podría ser una de las razones que explica la reducción del consumo eléctrico de este sector.

3.2. Patrones regionales de consumo horario de enfriamiento por sector

En esta sección se presentan los resultados de demanda horaria de enfriamiento por región para cada sector: residencial, comercial e industrial. Como se señaló en la sección 2.2.1, para modelar el consumo horario de equipos de refrigeración, se utilizó un enfoque basado en la temperatura. Por otro lado, para

modelar el consumo horario de equipos de aire acondicionado se asumió que el consumo sigue el patrón de consumo horario de la región, el cual fue construido a partir de la caracterización de curvas de demanda eléctrica características obtenidas por medio de un proceso de caracterización y clusterización de registros de una muestra de medidores inteligentes instalados en Colombia (Ver Anexos 4 y 5).

La conformación de las cinco regiones se establece de acuerdo con la distribución de las 10 ciudades, como se observa en la tabla siguiente.

Tabla 1. Distribución de las ciudades conforme a su región de análisis

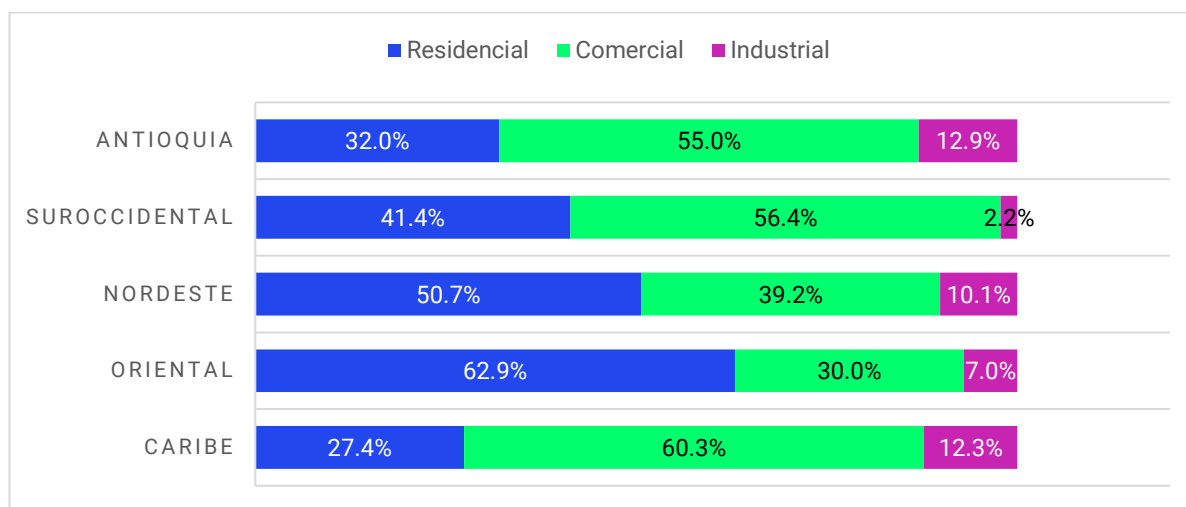
Caribe	Oriental	Nordeste	Suroccidental	Antioquia
<ul style="list-style-type: none"> • Barranquilla • Cartagena • Montería 	<ul style="list-style-type: none"> • Bogotá 	<ul style="list-style-type: none"> • Bucaramanga • Cúcuta 	<ul style="list-style-type: none"> • Cali • Neiva • Villavicencio* 	<ul style="list-style-type: none"> • Medellín

* Si bien esta ciudad se encuentra en la región Oriental, por sus características climáticas y para términos del análisis de este informe, se asoció y caracterizó dentro la región Suroccidental.

Como se puede observar en la Figura 12, la región Oriental es donde el sector residencial tiene mayor peso (62.9%) dentro del consumo de enfriamiento, seguido de la región Nordeste (50.7%) y donde menos peso representa, es en la región Caribe (27.4%). Por su parte, el sector comercial tiene su mayor proporción en la región Caribe (60.3%), seguido de cerca por las regiones Suroccidental (56.4%) y Antioquia (55%); siendo la región Oriental, la que cuenta con menor proporción (30.0%) dentro de este sector. A su vez, el sector industrial tiene el menor peso dentro del consumo de enfriamiento, con un máximo en la 12.9% en la región Antioquia y un mínimo en la región Suroccidental (2.2%).

Lo anterior refleja una alta variabilidad de los consumos por enfriamiento de acuerdo con la región y sector; lo cual como se analiza más adelante (en esta sección y subsecuentes), y debe considerarse para el establecimiento de estrategias de desarrollo de la red y de señales económicas para incentivar la provisión de servicios de respuesta de demanda.

Figura 12. Distribución porcentual del consumo de enfriamiento regional por sector

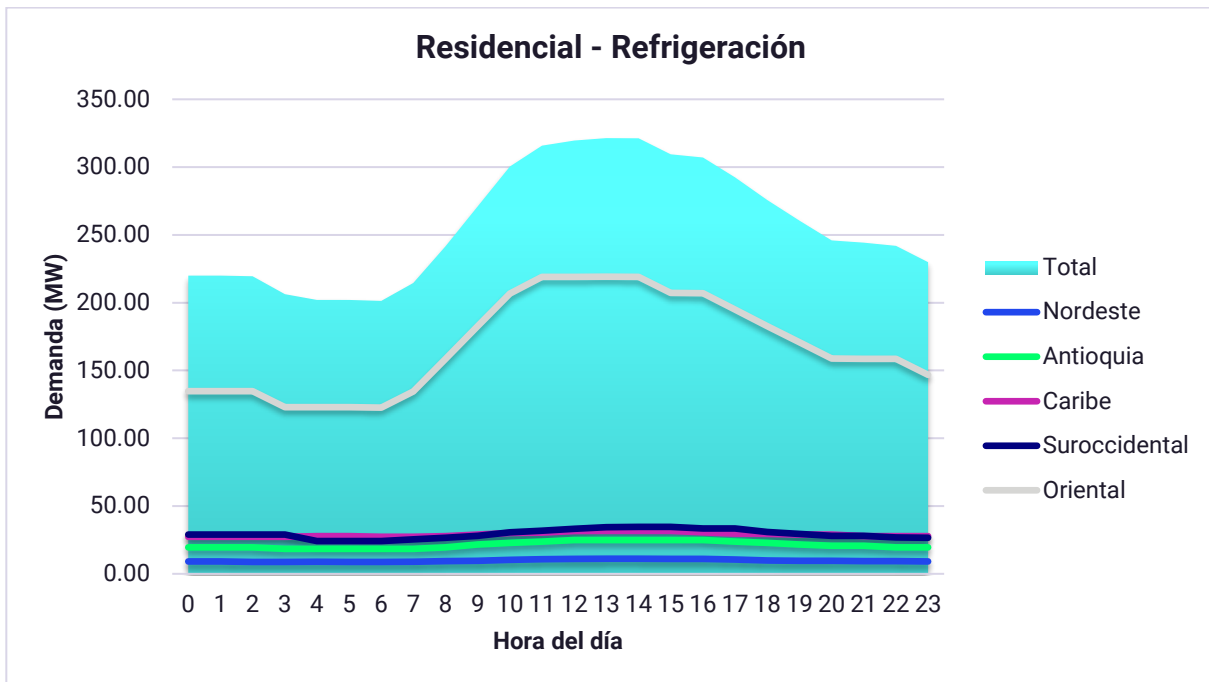


A continuación, se presenta el análisis de los patrones de la demanda de enfriamiento por sectores (residencial, comercial, industrial) con el objeto de identificar qué tipo de uso de enfriamiento puede ser más relevante de flexibilizarse y en qué zonas del país.

3.2.1. Patrón regional de consumo horario de enfriamiento en el sector residencial

La demanda diaria de electricidad para refrigeración y aire acondicionado en el sector residencial para las 10 ciudades analizadas se presentan en las Figura 13 y Figura 14, construida en base a los resultados obtenidos con la metodología de caracterización detallada en el Capítulo 2. De forma general, el periodo de mayor demanda de electricidad para refrigeración se presenta de las 10:00 hrs a las 16:00 hrs; alcanzando una demanda máxima agregada de 321 MW a las 13:00 hrs. A su vez, el periodo de mayor demanda para aire acondicionado va de 19:00 hrs a 22:00 hrs, alcanzando valores de 73 MW a las 20:00 hrs.

Figura 13. Curvas de demanda residencial de electricidad para refrigeración por región

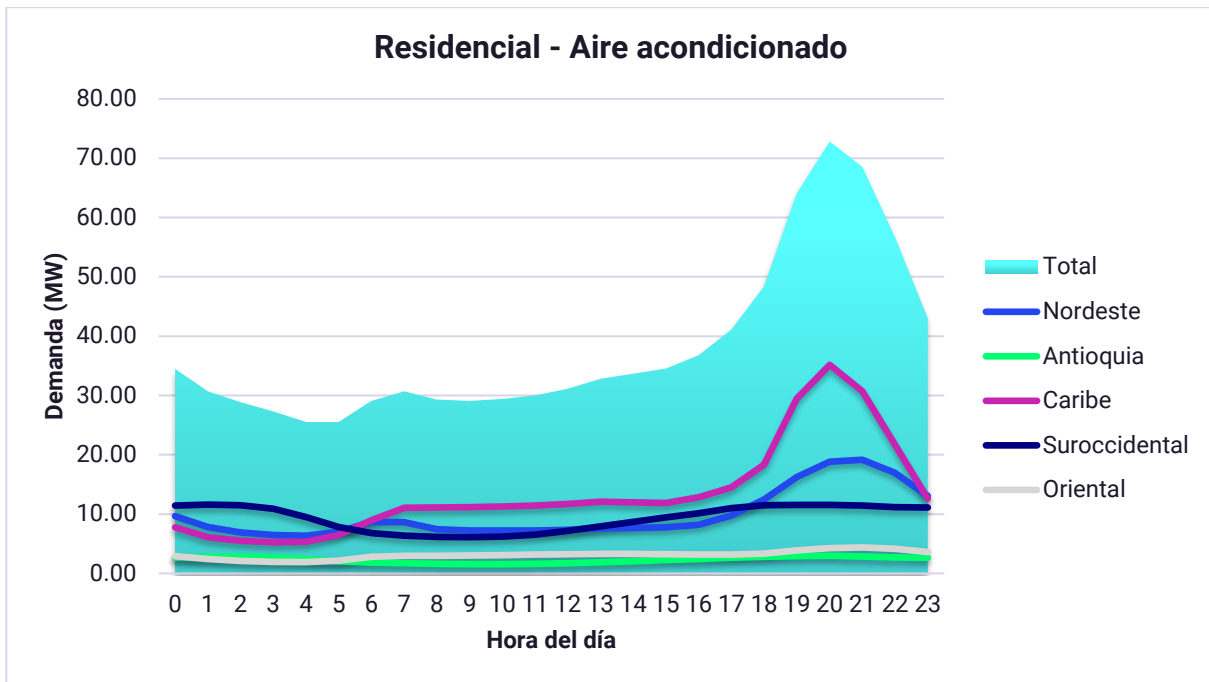


En cuanto a la característica regional de los perfiles de demanda de refrigeración, del análisis de la Figura 13 se observa lo siguiente para el sector residencial:

1. **Región Oriental:** Se observa que, dado que el comportamiento de la temperatura en la ciudad de Bogotá la demanda horaria presenta una mayor diferencia entre las horas del mediodía y el resto de las horas del día a diferencia de otras ciudades, y que la mayor cantidad de consumo asociado a refrigeración se encuentra en esta zona. Más aún la curva de demanda de refrigeración total es impactada en forma y magnitud por lo que sucede en esta región principalmente. Por ende, se concluye que en esta región es donde la flexibilización de la demanda de refrigeración puede ser de gran valor. Por cierto, esta magnitud de demanda es un reflejo de la cantidad de habitantes y viviendas con equipos de refrigeración, los que se concluye se concentran en la zona oriente.
2. **Región Suroccidental:** la zona donde se encuentra la ciudad de Cali es la segunda con mayor consumo de electricidad por refrigeración. A diferencia de la región Oriental, el pico de consumo no es tan pronunciado y se da en un periodo de 12:00 hrs a 18:00 hrs.
3. **Regiones Caribe, Antioquia y Nordeste:** debido a la poca variabilidad de la temperatura ambiente a lo largo del día en las ciudades analizadas de estas regiones, el consumo de electricidad es ligeramente superior en las horas de mayor sol. Finalmente, en base a los resultados de la Figura se concluye que la demanda de refrigeración en Caribe, Antioquia y

Nordeste incrementan la base de la curva de demanda de enfriamiento, pero no afectan la forma del perfil horario.

Figura 14. Curvas de demanda residencial de electricidad para aire acondicionado por región



Similar al caso de refrigeración, mediante los resultados presentados en la Figura 14, se describe a continuación la característica de los perfiles de demanda de aire acondicionado en el sector residencial por regiones.

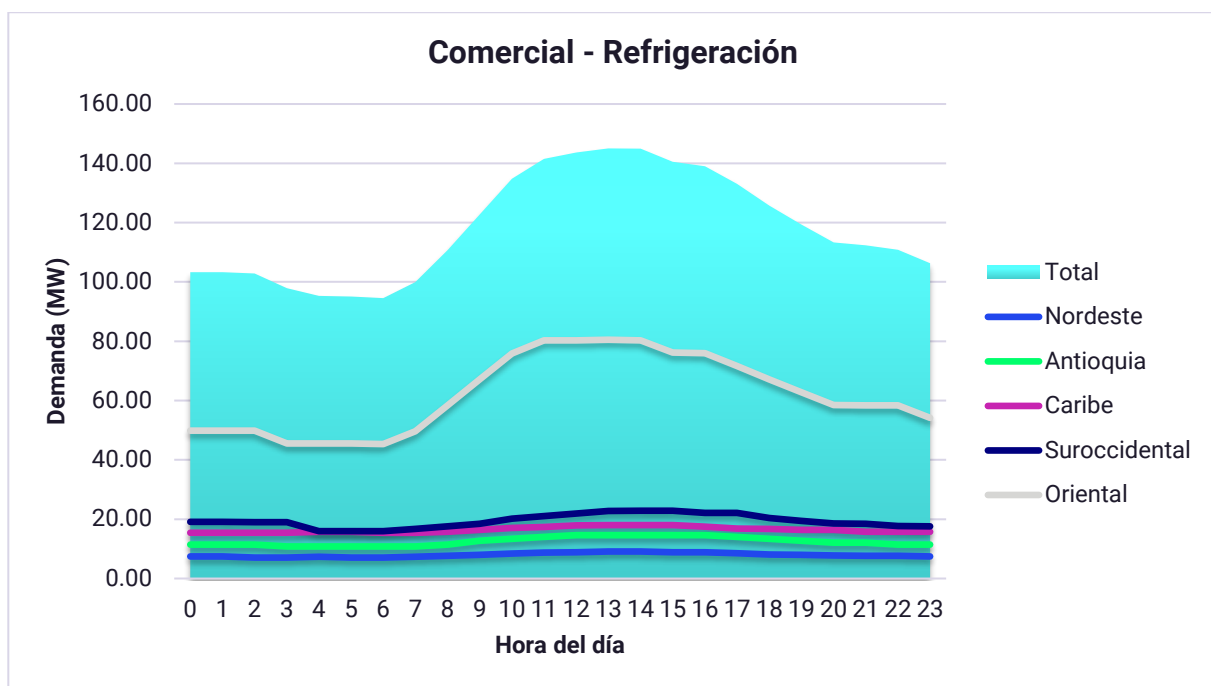
1. **Región Caribe:** El mayor consumo de electricidad para aire acondicionado en el sector residencial se da en esta región. Hay un incremento del consumo a partir de las 18:00 hrs, se alcanza el punto máximo a las 20:00 hrs y la demanda regresa a niveles normales a partir de las 23:00 hrs.
2. **Región Nordeste:** Esta región tiene también una contribución significativa en el punto de demanda máxima agregada; sin embargo, la rampa de crecimiento es más suave que en la región Caribe y el punto de máxima demanda se da de las 20:00 hrs a las 22:00 hrs.
3. **Regiones Suroccidental:** Esta región no determina la forma de la curva de demanda, pero si contribuye de manera significativa en el consumo de base, con un patrón de consumo mayor en la tarde noche y menor por las mañanas.
4. **Regiones Oriental y Antioquia:** A diferencia de las regiones anteriores, y como era de esperarse por su clima frío y templado respectivamente, ambas regiones contribuyen poco en la cantidad de demanda total de aire acondicionado en el sector residencial.

3.2.2. Patrón regional de consumo horario de enfriamiento en el sector comercial

La demanda de electricidad para refrigeración y aire acondicionado en el sector comercial para las 10 ciudades analizadas se detalla en esta sección. De forma general, el periodo de mayor demanda de electricidad para refrigeración se presenta de las 11:00 a las 16:00 hrs alcanzando una demanda máxima agregada de 145 MW a las 13:00 hrs. A su vez, el periodo de mayor demanda para aire acondicionado va de 14:00 a las 21:00 hrs, alcanzando valores de 226 MW a las 16:00 hrs. Esto se puede visualizar en la Figura 15. y en la

Figura 16, respectivamente.

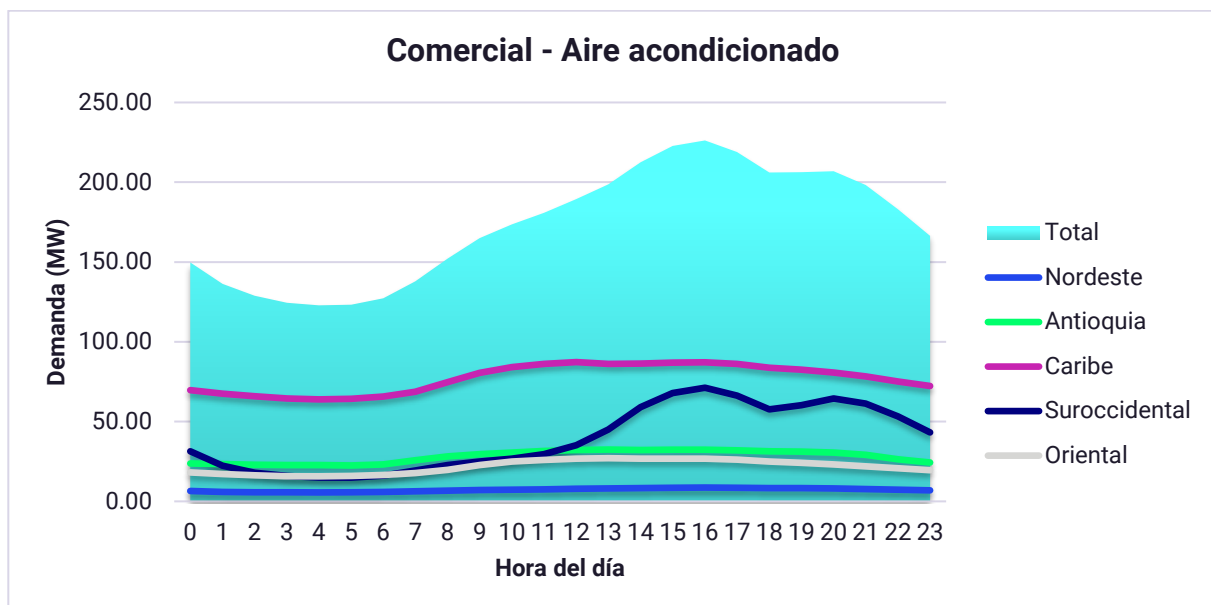
Figura 15. Curvas de demanda comercial de electricidad para refrigeración por región



En cuanto a la característica regional de los perfiles de demanda de refrigeración, del análisis de la Figura 15. se observa lo siguiente para el sector comercial:

1. **Región Oriental:** dado que el comportamiento de la temperatura en la ciudad de Bogotá presenta un mayor diferencial de cambio en las horas del mediodía a diferencia de otras ciudades y que la mayor cantidad de consumo asociado a refrigeración se encuentra en esta zona, la curva de demanda de refrigeración total es impactada en forma y magnitud por lo que sucede en esta región principalmente. Por ende, el mayor potencial de flexibilizar la demanda está asociado a esta región.
2. **Región Suroccidental:** la zona donde se encuentra la ciudad de Cali es la segunda con mayor consumo de electricidad por refrigeración. A diferencia de la región, el pico de consumo no es tan pronunciado y se da en un periodo de 12:00 a las 18:00 hrs.
3. **Regiones Caribe, Antioquia y Nordeste:** dado a la poca variabilidad de la temperatura ambiente a lo largo del día en las ciudades analizadas de estas regiones, el consumo de electricidad es ligeramente superior en las horas de mayor sol. Caribe, Antioquia y Nordeste incrementan la base de la curva de demanda.

Figura 16. Curvas de demanda comercial de electricidad para aire acondicionado por región



Similar al caso de refrigeración, mediante los resultados presentados en la Figura 16, se describe a continuación la característica de los perfiles de demanda de aire acondicionado en el sector comercial por regiones.

1. **Región Caribe:** El mayor consumo de electricidad para aire acondicionado en el sector comercial se da en esta región. Hay un incremento del consumo a partir de las 10:00 hrs y luego este se mantiene relativamente constante hasta las 22:00 hrs.
2. **Región Suroccidental:** El consumo que impacta más la forma de los picos de demanda de todo el sector comercial se da en esta región, con el pico más pronunciado ocurriendo de 14:00 a 18:00 hrs y el siguiente de 19:00 a 22:00 hrs.
3. **Regiones Antioquia, Oriental y Nordeste:** Dado a la poca variabilidad de la temperatura ambiente a lo largo del día en las ciudades analizadas de estas regiones, el consumo de electricidad es ligeramente superior en las horas de mayor sol. Caribe, Antioquia y Nordeste incrementan la base de la curva de demanda.

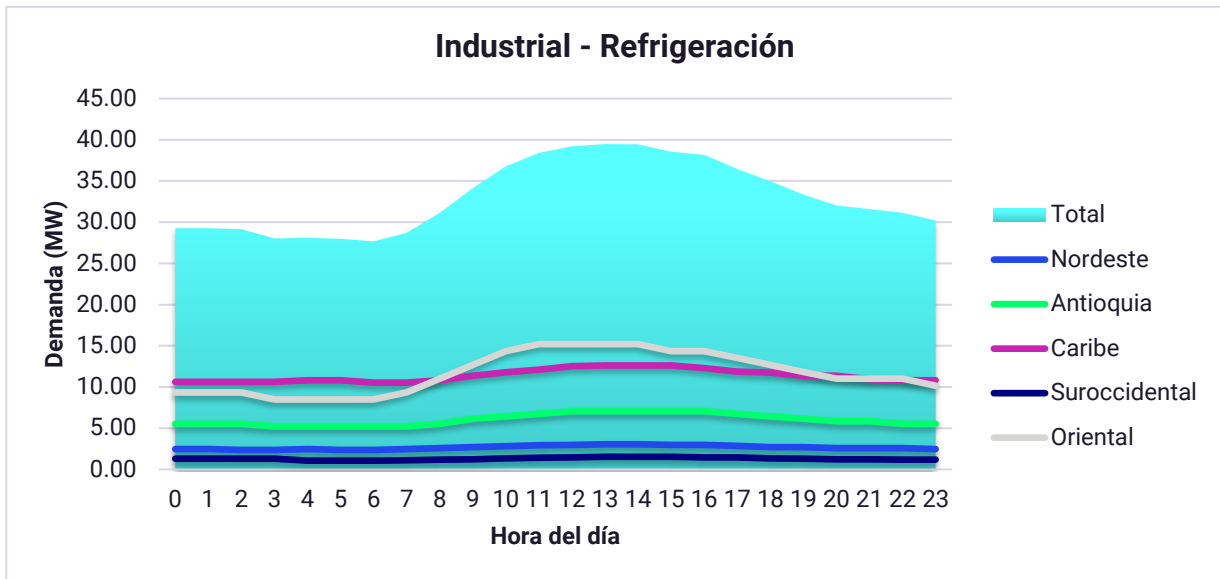
3.2.3. Patrón regional de consumo horario de enfriamiento en el sector industrial

La demanda de electricidad para refrigeración y aire acondicionado en el sector industrial para las 10 ciudades analizadas se detalla en esta sección. De forma general, el periodo de mayor demanda de electricidad para refrigeración se presenta de las 10:00 a las 20:00 hrs con una demanda máxima cercana a los 40 MW al medio día. Por otro lado, el periodo de mayor demanda para aire acondicionado va de 9:00 a 20:00 hrs alcanzando una demanda cercana a los 40 MW al medio día. Esto se puede visualizar en la Figura 15. 17 y en la

Figura 1618 respectivamente.

Debido a que la magnitud total de la demanda de enfriamiento es mucho menor que en los sectores residencial y comercial, no se realiza en esta sección una desagregación adicional por región.

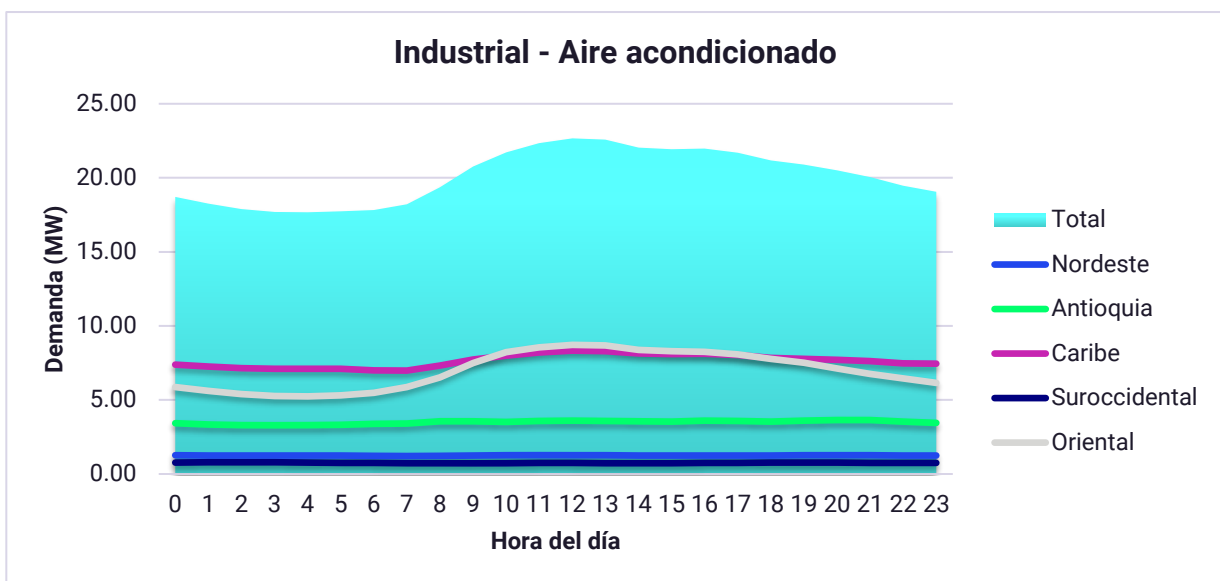
Figura 17. Curvas de demanda industrial de electricidad para refrigeración por región



En cuanto a la característica regional de los perfiles de demanda de refrigeración, del análisis de la Figura 17 se observa lo siguiente para el sector industrial:

1. **Región Oriental:** El consumo que le da la forma a la curva de demanda de refrigeración industrial se presenta principalmente en esta región, empezando el incremento a las 7:00 hrs, alcanzando el punto máximo a las 13:00 hrs y estabilizándose a las 19:00 hrs.
2. **Regiones Caribe y Antioquia:** Por su magnitud, el consumo en estas regiones incrementa de forma considerable la base de la demanda agregada en este sector teniendo su demanda máxima entre las 12:00 y las 17:00 hrs.
3. **Regiones Nordeste y Suroccidental:** Dado a la poca variabilidad de la temperatura ambiente a lo largo del día en las ciudades analizadas de estas regiones, el consumo de electricidad es ligeramente superior en las horas de mayor sol. Caribe, Antioquia y Nordeste incrementan la base de la curva de demanda.

Figura 18. Curvas de demanda industrial de electricidad para aire acondicionado por región



Similar al caso de refrigeración, mediante los resultados presentados en la En cuanto a la característica regional de los perfiles de demanda de refrigeración, del análisis de la Figura 17 se observa lo siguiente para el sector industrial:

, se describe a continuación la característica de los perfiles de demanda de aire acondicionado en el sector industrial por regiones.

1. **Región Oriental:** El consumo que le da la forma a la curva de demanda de aire acondicionado industrial se presenta principalmente en esta región, empezando el incremento a las 8:00 hrs, alcanzando el punto máximo a las 12:00 hrs y estabilizándose a las 20:00 hrs.
2. **Regiones Caribe y Antioquia:** Por su magnitud, el consumo en estas regiones incrementa de forma considerable la base de la demanda agregada en este sector teniendo su demanda máxima entre las 12:00 y las 17:00 hrs.
3. **Regiones Nordeste y Suoccidental:** Dado a la poca variabilidad de la temperatura ambiente a lo largo del día en las ciudades analizadas de estas regiones, el consumo de electricidad es ligeramente superior en las horas de mayor sol. Caribe, Antioquia y Nordeste incrementan la base de la curva de demanda.

3.2.4. Patrón de demanda total de enfriamiento por regiones

Finalmente, luego de haber analizado los patrones de la demanda de enfriamiento por sector y sus diferencias geográficas por cada tipo de uso de enfriamiento (refrigeración y aire acondicionado), en esta sección se analizan los resultados y patrones de las demanda total de enfriamiento por región con el fin de determinar en qué zonas geográficas la flexibilización de la demanda de enfriamiento puede tener mayor valor e interés.

3.2.4.1. Región Caribe

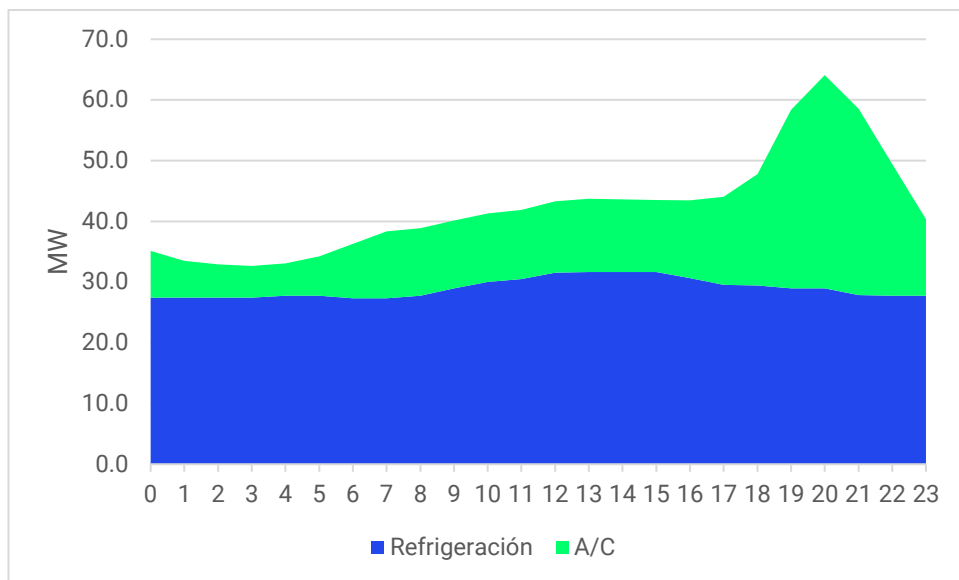
En el agregado, dentro del sector residencial, el consumo por refrigeración representa el 68.2% del total por enfriamiento, quedando el consumo por uso de aire acondicionado en 31.8%. Es decir, dos terceras partes es consumido por equipos de refrigeración que se encuentran en los hogares de la región.

No obstante, como se observa en la

Figura 19, a partir de las 05:00 hrs comienza un incremento pronunciado en el uso del aire acondicionado que dura hasta las 08:00 hrs, el cual se estabiliza a partir de esa hora hasta a las 16:00 hrs. A partir de esta hora, comienza un nuevo incremento en el uso del aire acondicionado mucho más pronunciado que el observado en la mañana; alcanzando su pico de consumo en la hora de las 20:00 a las 21:00 hrs. La energía consumida por uso de aire acondicionado en este pico de tres horas -entre las

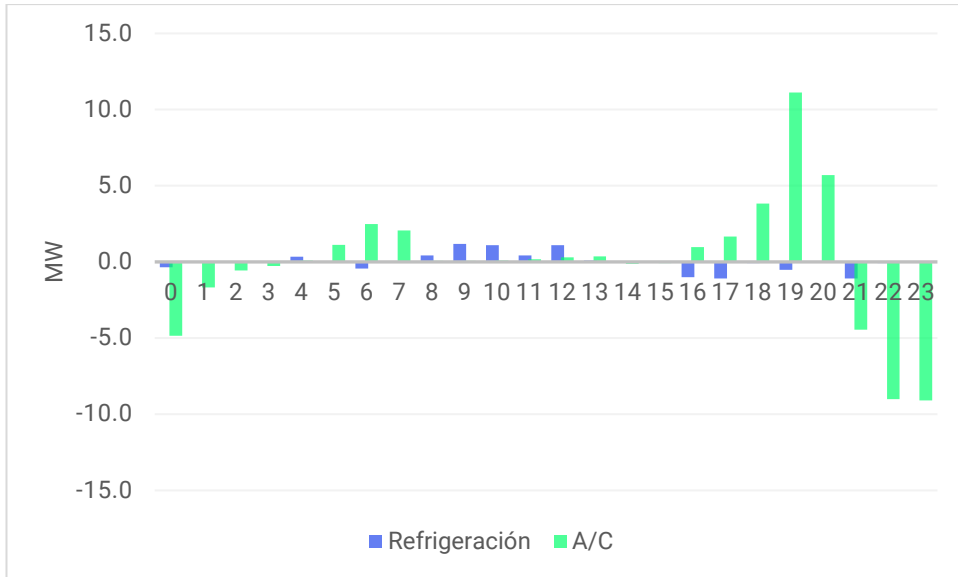
19:00 hasta las 22:00 hrs- (95.3 MWh) es superior en 11.2% al consumo en ese mismo periodo que el correspondiente por refrigeración (85.7 MWh).

Figura 19. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Caribe



Como complemento a lo anterior, la Figura 20 muestra los incrementos (tasa de cambio respecto a la hora anterior) detectados y donde se recomienda prestar atención para el análisis y propuestas de flexibilidad dentro de este sector en la región Caribe.

Figura 20. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Caribe

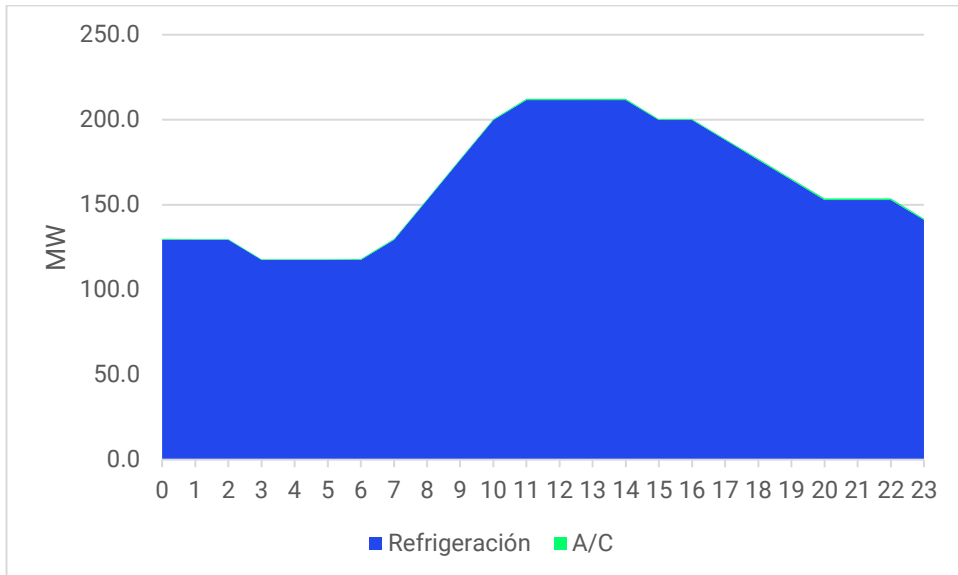


3.2.4.2. Región Oriental

Por las condiciones climáticas de Bogotá y la cantidad de habitantes-viviendas en esta ciudad, casi la totalidad (99.6%) del consumo para enfriamiento se concentra en refrigeración.

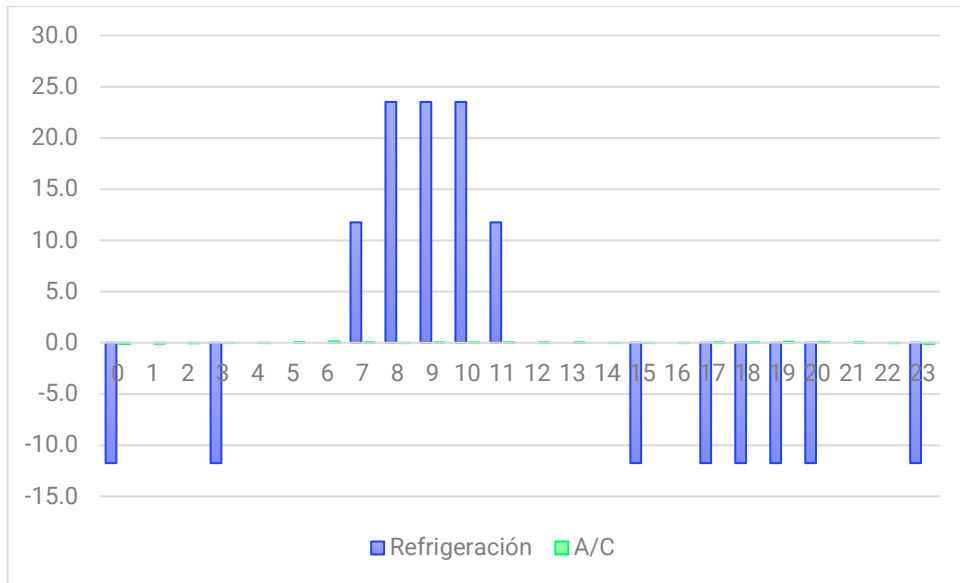
Al respecto, el comportamiento del consumo por refrigeración se da conforme el perfil de temperatura a lo largo del día. Como se observa en la Figura 21, el aumento inicia a partir de las 7:00 hrs, llegando a un consumo máximo a las 11:00 hrs, que se mantiene hasta las 14:00 hrs, y a partir de las 15:00 comienza un descenso.

Figura 21. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Oriental



Los incrementos más altos de consumo energético por refrigeración se dan entre las 8:00 y 10:00 hrs, como se observa en la Figura 22.

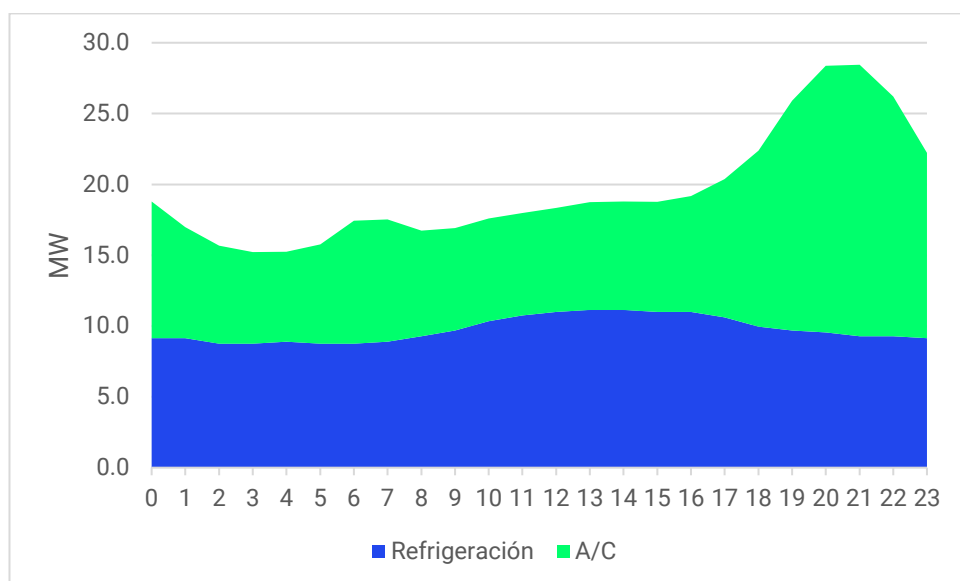
Figura 22. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Oriental



3.2.4.3. Región Nordeste

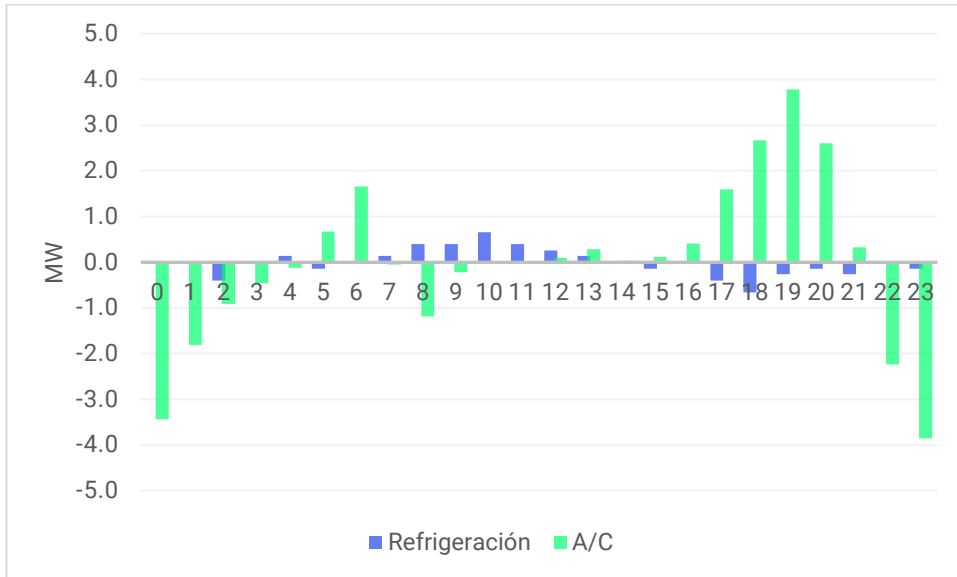
Esta región presenta un balance entre el consumo por refrigeración (49.8%) y uso de aire acondicionado (50.2%). No obstante, como se observa en la Figura 2323, a partir de las 5:00 hasta las 7:00 hrs hay un incremento en el uso del aire acondicionado. Posteriormente, el consumo por uso de aire acondicionado se estabiliza hasta las 17:00 hrs, a partir de esta hora comienza un nuevo incremento en el uso del aire acondicionado más pronunciado que el observado en la mañana; alcanzando su pico de consumo entre las 20:00 y las 22:00 hrs. La energía consumida por uso de aire acondicionado desde las 18:00 hasta las 23:00 hrs (83.6 MWh) es superior en 75.0% al consumo en ese mismo lapso de horas que el correspondiente por refrigeración (47.8 MWh).

Figura 23. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Nordeste



Como complemento a lo anterior, la Figura 244 muestra los incrementos (tasa de cambio respecto a la hora anterior) detectados y donde se recomienda prestar atención para el análisis y propuestas de flexibilidad dentro de este sector en la región Caribe.

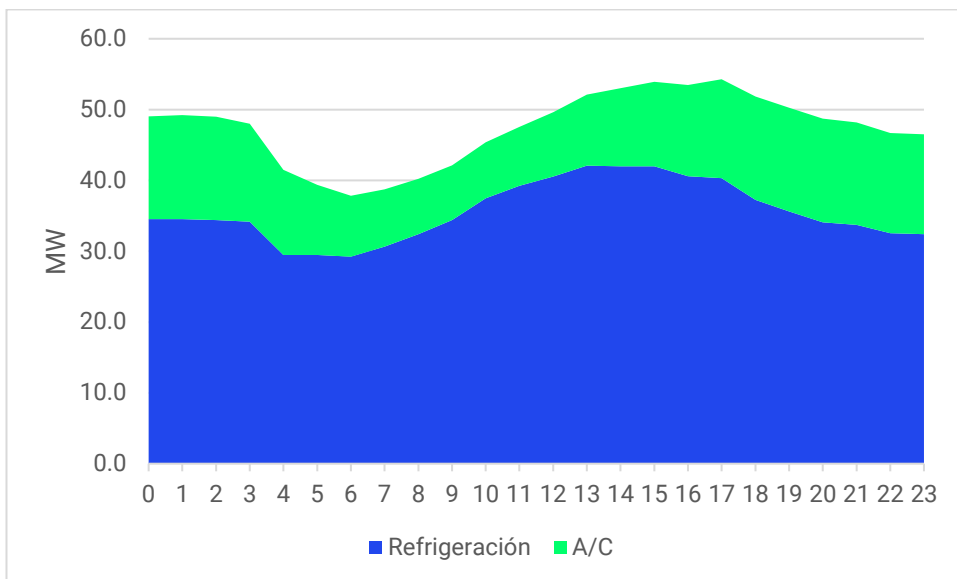
Figura 24. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Nordeste



3.2.4.4. Región Suroccidental

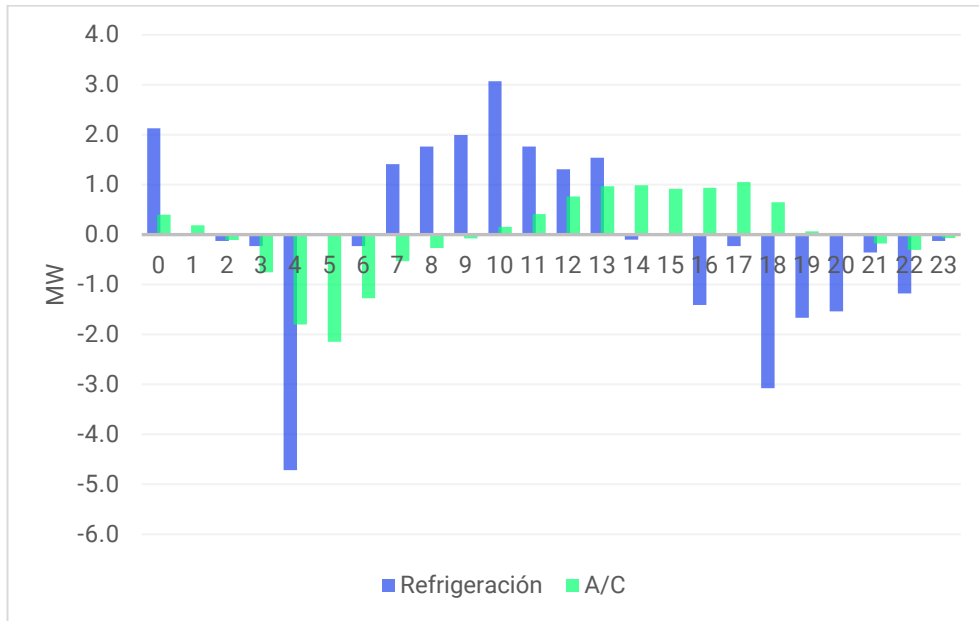
En esta región, tres cuartas partes del consumo por enfriamiento se debe a la refrigeración (75.0%), y una cuarta parte (25%) se da por el uso de aire acondicionado. Al respecto, el consumo por refrigeración comienza a incrementar a partir de las 7:00 hrs y mantiene una tendencia creciente hasta la hora entre las 12:00 y 13:00 hrs, ver Figura 255; donde a partir de entonces se estabiliza hasta las 16:00 hrs, donde inicia a descender.

Figura 25. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Suroccidental



Por su parte, si bien el consumo por uso de aire acondicionado es sólo una cuarta parte del consumo por enfriamiento en esta región, éste comienza a aumentar a partir de las 10:00 hrs hasta las 21:00 hrs, teniendo su punto más alto de consumo entre las 18:00 hasta 22:00 hrs; siendo los incrementos más pronunciados entre las 13:00 hasta las 17:00 hrs, como se puede observar en la Figura 28 siguiente. Asimismo, las disminuciones de uso de aire acondicionado más pronunciadas son entre las 4:00 a las 7:00 hrs. En el caso de los incrementos por refrigeración, éstos son más estables y se observa el incremento máximo en la hora entre las 10:00 y 11:00 hrs.

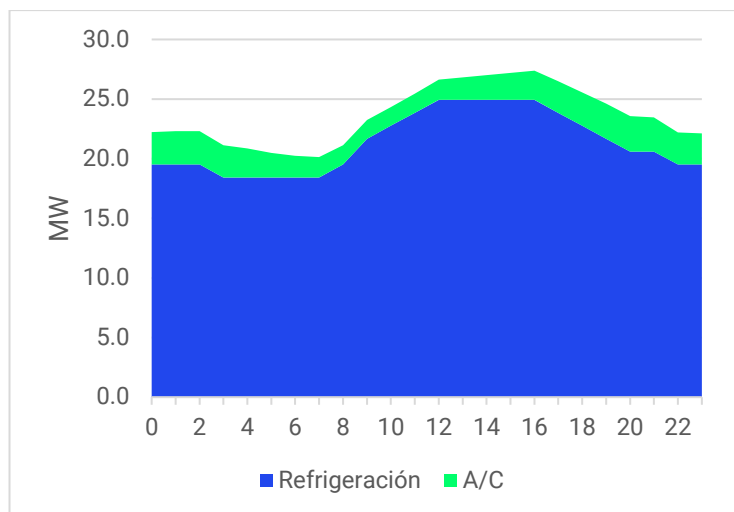
Figura 26. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Suroccidental



3.2.4.5. Región Antioquia

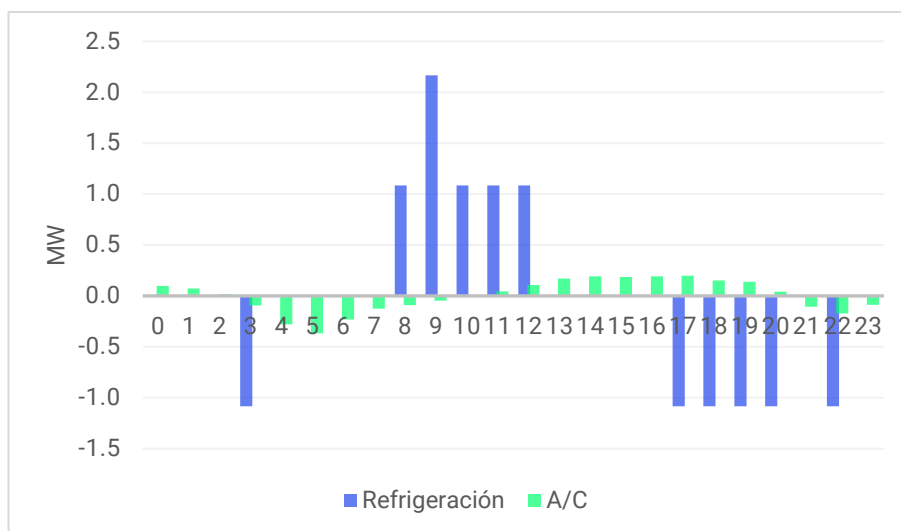
En esta región y sector es muy marcado el predominio de la refrigeración como el principal consumidor de enfriamiento. El consumo por refrigeración representa el 90.2% del total, quedando tan sólo 9.8% como consumo por uso de aire acondicionado. Al respecto, el consumo por refrigeración comienza a incrementar a partir de las 8:00 hrs y mantiene una tendencia creciente hasta la hora entre las 12:00 y 13:00 hrs, ver Figura 27; donde a partir de entonces se estabiliza hasta las 17:00 hrs, donde inicia a descender.

Figura 27. Distribución horaria del consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Antioquia



Por su parte, si bien es muy bajo el consumo por uso de aire acondicionado en esta región, éste comienza a aumentar a partir de las 11:00 hrs hasta las 21:00 hrs, teniendo su punto más alto de consumo en la hora entre las 20:00 y 21:00 hrs; siendo los incrementos más pronunciados entre las 13:00 a las 17:00 hrs, como se puede observar en la Figura 28 siguiente. Asimismo, las disminuciones de uso de aire acondicionado más pronunciadas son entre las 4:00 a las 7:00 hrs y en la hora de las 22:00 a 23:00 hrs.

Figura 28. Incrementos horarios en el consumo de enfriamiento en el sector residencial de la región Antioquia



3.2.5. Discusión

A partir del análisis previo se puede determinar que regiones son más prioritarias dependiendo del sector y que uso final de la energía tiene mayor potencial de reducción y mayor potencial de flexibilidad a partir del consumo y la forma del perfil de demanda elaborado. La Tabla 2 muestra un resumen del análisis efectuado por medio de las figuras observadas en las secciones anteriores, el cual puede ser de utilidad para la elaboración de políticas públicas con diferenciación geográfica.

Tabla 2. Regiones prioritarias por sector y tipo de enfriamiento

Tipo de enfriamiento	Criterio	Sector		
		Residencial	Comercial	Industrial
Refrigeración	Mayor consumo de energía	Oriental	Oriental	Caribe
	Forma del perfil de demanda	Oriental	Oriental	Oriental
Aire acondicionado	Mayor consumo de energía	Caribe	Caribe	Caribe
	Forma del perfil de demanda	Caribe	Suroccidental	Oriental

Así mismo, el análisis anterior permite también identificar los sectores prioritarios por región. Las conclusiones de ello se indican en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Sectores prioritarios por región

Región	Sector prioritario
Caribe	Comercial
Nordeste	Residencial
Antioquia	Comercial
Suroccidental	Comercial
Oriental	Residencial

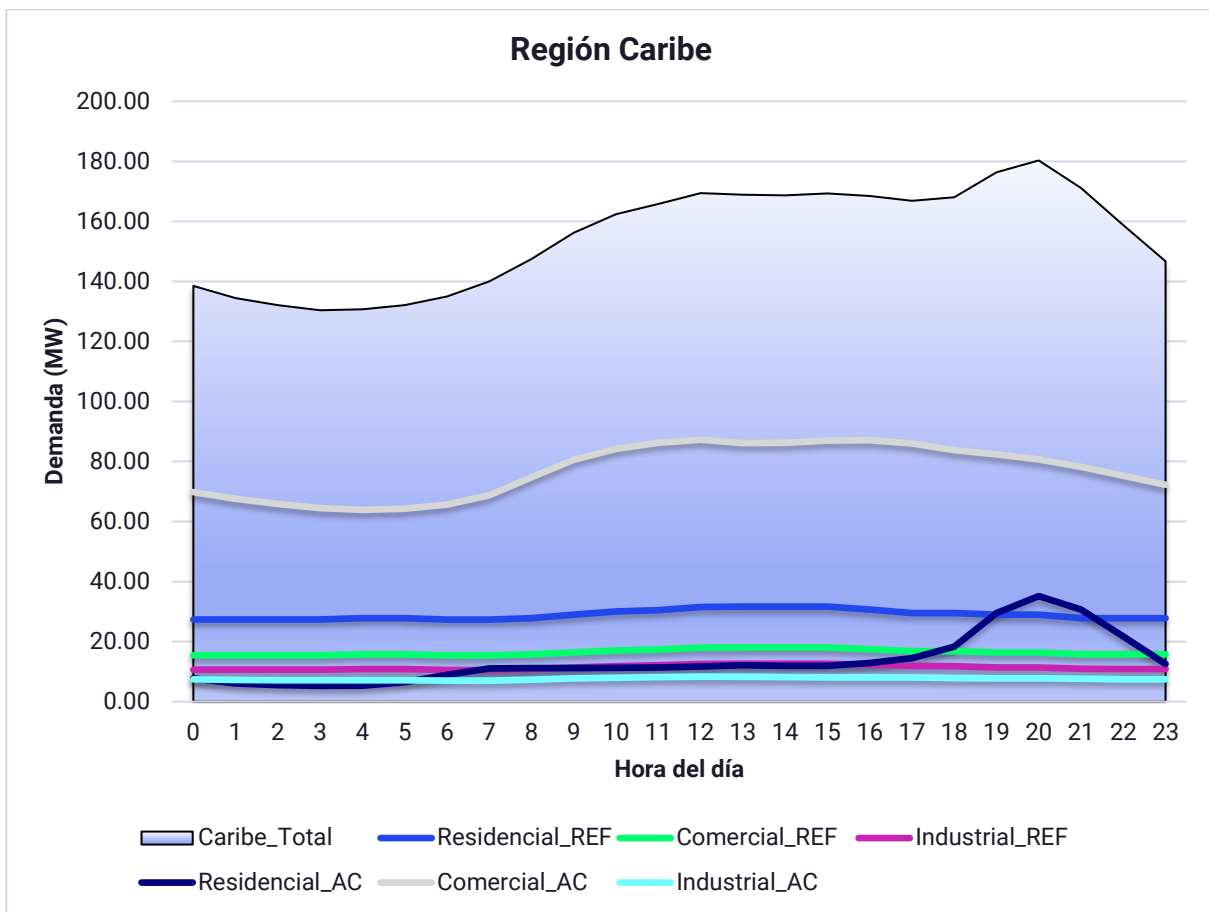
3.2.6. Fichas resumen por región

Con base en la sección anterior a continuación se presentan fichas que muestran las gráficas para cada región, la demanda y la potencia, así como los sectores más prioritarios tanto para reducir la demanda como para su potencial de flexibilidad.

Es importante mencionar que el área total en las gráficas representa la suma de la demanda de enfriamiento en todos los sectores y no el total de demanda eléctrica en la región.

3.2.6.1. Región Caribe

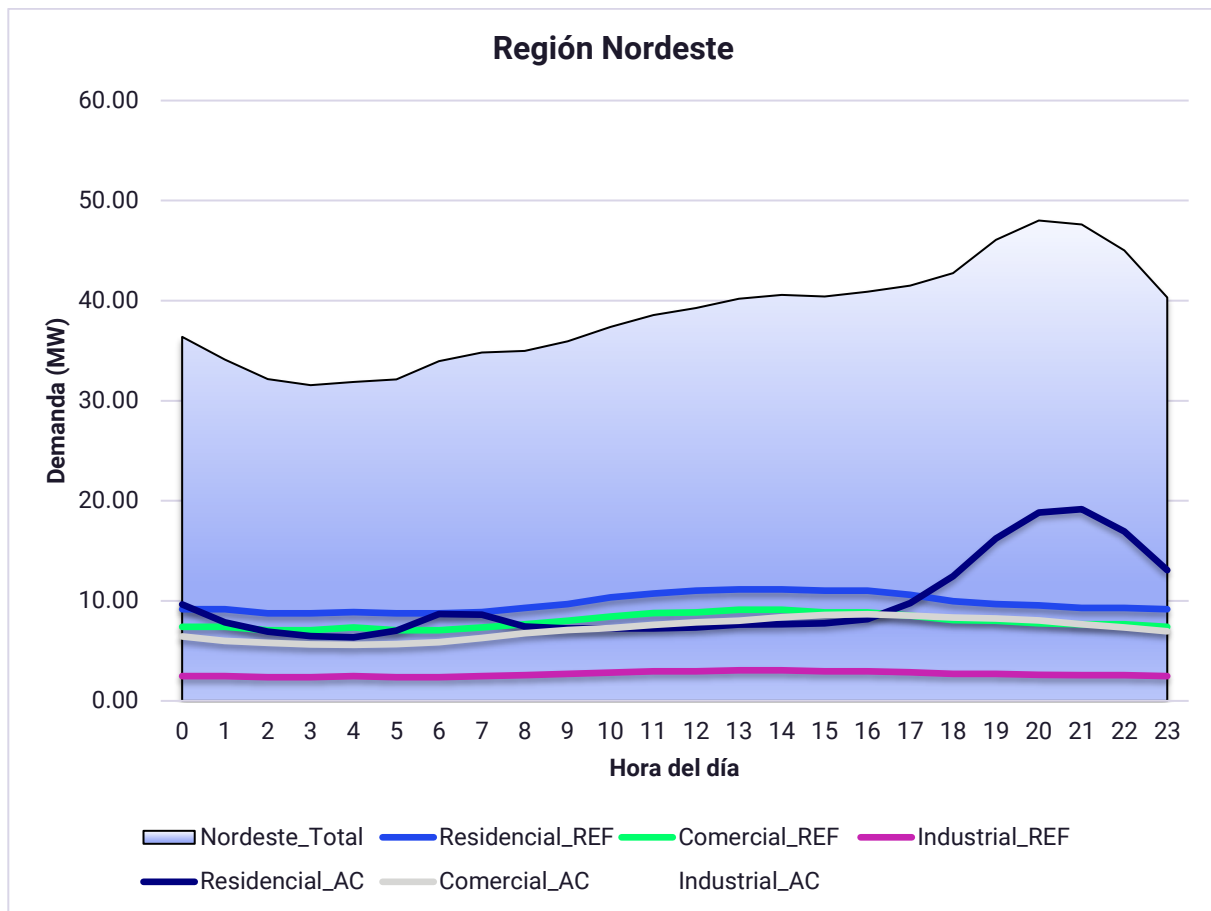
Tabla 4. Ficha resumen: Región Caribe



Ciudades incluidas:	Barranquilla, Cartagena y Montería
Demanda promedio diaria de enfriamiento:	3,717 MWh
Demanda máxima en la región:	180 MW a las 20:00 hrs
Mayor potencial de reducción de la demanda:	Comercial – Aire acondicionado 50% de la demanda total de enfriamiento
Mayor potencial de flexibilidad:	Residencial – Aire acondicionado

3.2.6.2. Región Nordeste

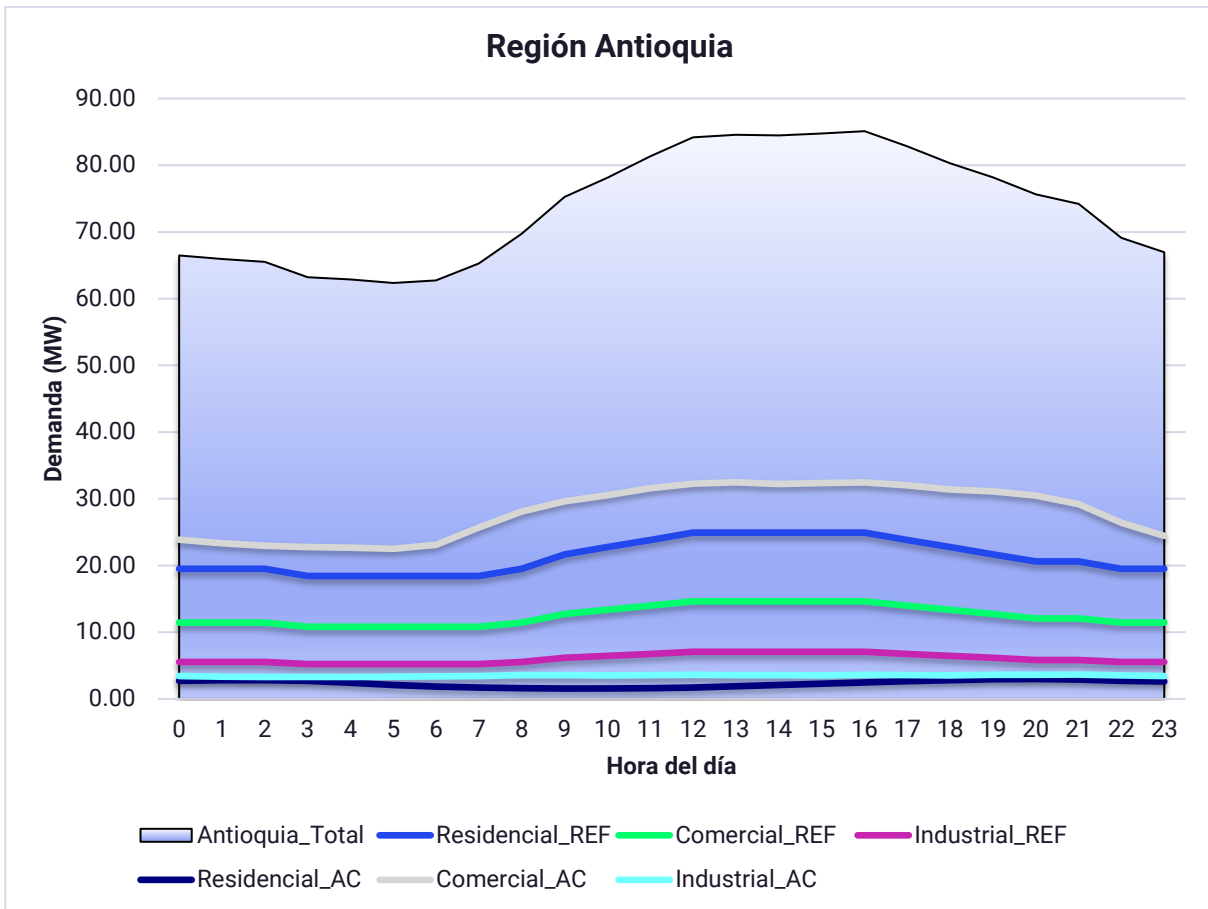
Tabla 5. Ficha resumen: Región Nordeste



Ciudades incluidas:	Bucaramanga y Cúcuta
Demanda promedio diaria de enfriamiento:	926 MWh
Demanda máxima en la región:	48 MW a las 20:00 hrs
Mayor potencial de reducción de la demanda:	Residencial – Todos 50% de la demanda total de enfriamiento
Mayor potencial de flexibilidad:	Residencial – Aire acondicionado

3.2.6.3. Región Antioquia

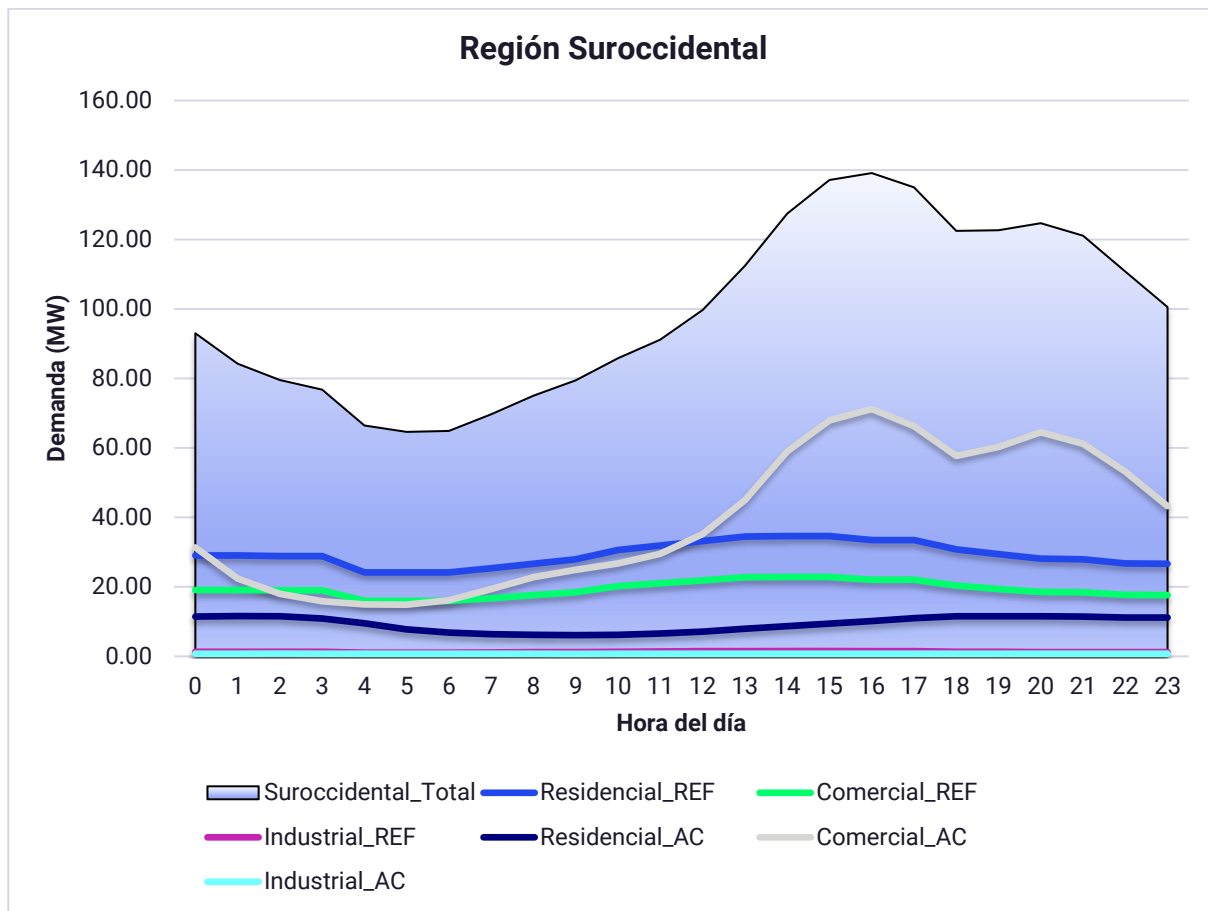
Tabla 6. Ficha resumen: Región Antioquia



Ciudades incluidas:	Medellín
Demanda promedio diaria de enfriamiento:	1,769 MWh
Demanda máxima en la región:	85 MW a las 16:00 hrs
Mayor potencial de reducción de la demanda:	Comercial – Aire acondicionado 38% de la demanda total de enfriamiento
Mayor potencial de flexibilidad:	Comercial y Residencial – Aire acondicionado

3.2.6.4. Región Suroccidental

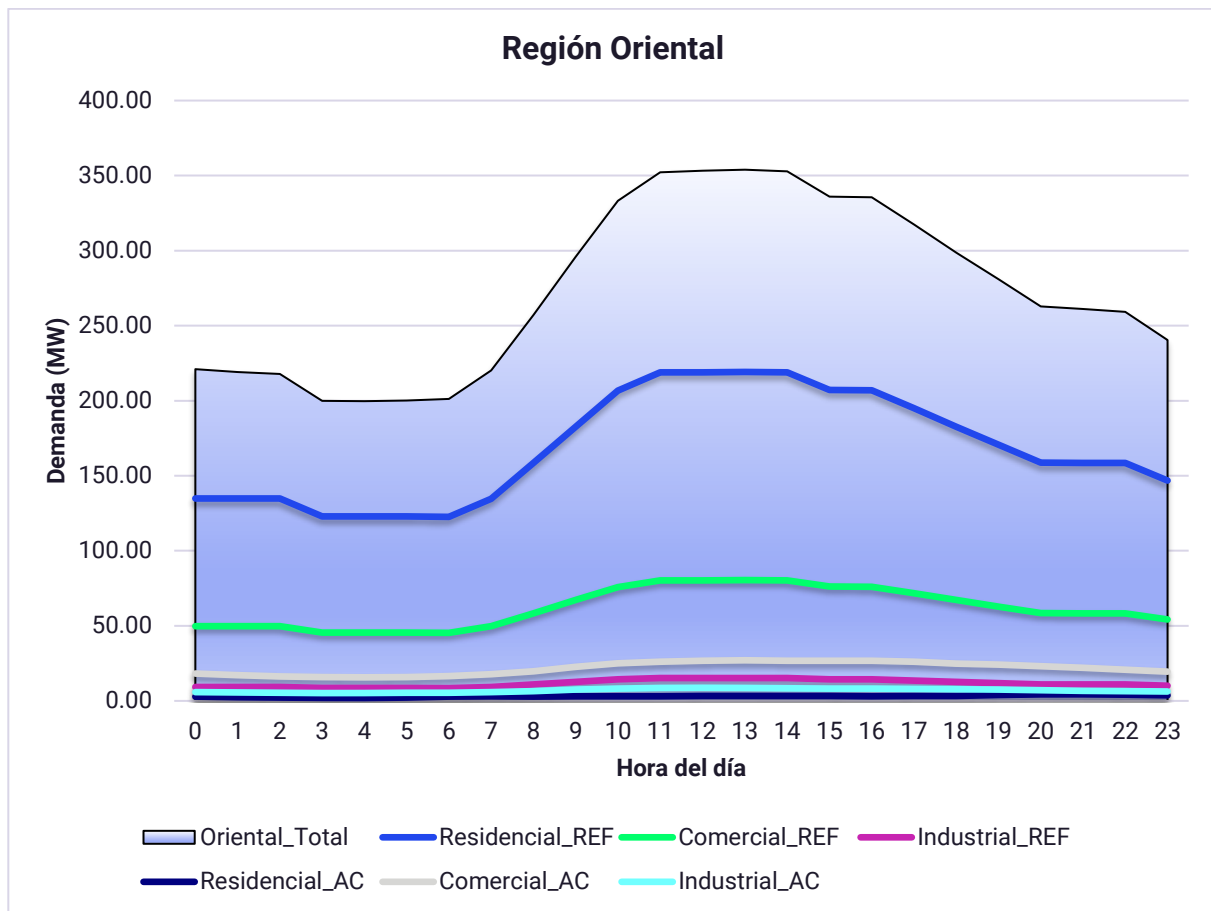
Tabla 7. Ficha resumen: Región Suroccidental



Ciudades incluidas:	Cali, Neiva
Demanda promedio diaria de enfriamiento:	2,384 MWh
Demanda máxima en la región:	139 MW a las 16:00 hrs
Mayor potencial de reducción de la demanda:	Comercial – Aire acondicionado 40% de la demanda total de enfriamiento
Mayor potencial de flexibilidad:	Comercial– Aire acondicionado

3.2.6.5. Región Oriental

Tabla 8. Ficha resumen: Región Oriental



Ciudades incluidas:	Bogotá, Villavicencio
Demanda promedio diaria de enfriamiento:	6,570 MWh
Demanda máxima en la región:	354 MW a las 13:00 hrs
Mayor potencial de reducción de la demanda:	Residencial – Refrigeración 61% de la demanda total de enfriamiento
Mayor potencial de flexibilidad:	Residencial y Comercial – Refrigeración

4

IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE ENFRIAMIENTO LIMPIO Y EFICIENTE PARA COLOMBIA

4. Identificación de oportunidades de enfriamiento limpio y eficiente para Colombia

Para abordar el impacto de la refrigeración en el sistema energético y su contribución a las emisiones, es necesario buscar soluciones de enfriamiento limpio que reduzcan la demanda de energía y aumenten la flexibilidad de la red. Específicamente:

1. La reducción de la demanda de enfriamiento se puede lograr a través de cambios de comportamiento, diseño pasivo y mejoras en la eficiencia energética de los edificios y equipos, reduciendo directamente el consumo de energía y, por consiguiente, las emisiones de carbono.
2. Se puede lograr una mayor flexibilidad de la red al cambiar la carga de enfriamiento a diferentes horas del día como parte de los esfuerzos por reducir los picos y usar el almacenamiento de energía fría como una solución a corto y largo plazo que puede almacenar electricidad renovable, en momentos de sobreproducción y luego liberar esta electricidad de vuelta a la red en momentos de aumento o pico de carga, ya sea para enfriamiento adicional o demanda de electricidad.

En este capítulo se presentan posibles acciones y soluciones tecnológicas de enfriamiento recolectadas de un proceso de revisión de fuentes bibliográficas en torno a prácticas internacionales y desarrollo tecnológico. Estas acciones y soluciones se agrupan en 5 grandes grupos: 1) diseño pasivo y mejoras de eficiencia energética en edificios, 2) sistemas de enfriamiento eficiente, 3) automatización y control, 4) almacenamiento térmico y 5) distritos térmicos.

Al respecto, cada una de estas alternativas o soluciones puede aportar a la reducción del consumo eléctrico y sus asociadas emisiones, o proveer respuesta en demanda y por ende, entregar servicios de flexibilidad a la red eléctrica. Si bien cada una de estas acciones y soluciones son independientes, al abordar un proyecto algunas son más prioritarias que otras y se pueden integrar siguiendo una secuencia como se observa en la Figura 29 siguiente.

Figura 29. Soluciones de enfriamiento por orden de prioridad/integración



4.1. Mejoras de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios

Existen varias acciones y mejoras potenciales que se pueden implementar en edificios para reducir el aumento anual de la demanda de refrigeración en Colombia. A continuación, se presentan alternativas identificadas por medio de una revisión de prácticas internacionales:

Integrar el diseño pasivo: considerar las condiciones climatológicas del lugar en el diseño de las edificaciones con el objeto de responder al clima local para maximizar el confort de los usuarios de la

edificación (tratando de controlar las variaciones de temperatura y humedad relativa al interior), minimizando la demanda energética y, por ende, el uso de energía a través de sistemas y equipos de enfriamiento. Por ejemplo, incluyendo dentro de los parámetros de diseño de las edificaciones la orientación y forma para maximizar la eficiencia energética. Así como, sistemas de ventilación cruzada para permitir el flujo de aire a través del interior de los edificios, y el uso de paredes o techos verdes para reducir la ganancia de calor.

Mejorar el aislamiento térmico: un aislamiento deficiente o con puentes térmicos puede resultar en pérdidas de energía significativas, particularmente en climas cálidos donde se requiere refrigeración. Por lo tanto, mejorar el aislamiento en paredes, techos y pisos puede reducir la cantidad de calor que ingresa al edificio y, por lo tanto, reducir la carga de enfriamiento.

Instalar techos reflectantes: los materiales para techos reflectantes, como los que tienen una superficie blanca o de color claro, pueden reflejar una gran parte de los rayos del sol y reducir la cantidad de calor absorbido por el techo. Esto puede ayudar a mantener el edificio más fresco y reducir la carga de enfriamiento.

Incrementar la sombra: los elementos que generan sombra, como toldos, voladizos, pantallas de sombra o celosías, se pueden instalar en ventanas y paredes exteriores para bloquear la luz solar directa y reducir la cantidad de calor que ingresa al edificio. Esto puede ayudar a reducir la carga de enfriamiento y también mejorar la comodidad interior.

Instalar ventanas energéticamente eficientes: las ventanas energéticamente eficientes, como las que tienen revestimientos de baja emisividad (low-e) y vidrios de doble o triple panel, pueden reducir la cantidad de calor que ingresa al edificio y mejorar la eficiencia energética.

Usar ventilación natural: la ventilación natural puede ser una forma eficaz de reducir la demanda de refrigeración, especialmente en áreas con temperaturas templadas. Esto se puede lograr mediante el uso de ventanas operables, ventilaciones y otras estrategias de enfriamiento pasivo.

Usar iluminación de bajo consumo: cambiar a iluminación de bajo consumo, como LED, puede ayudar a reducir la cantidad de calor que generan los accesorios de iluminación, lo que reduce la carga de enfriamiento.

Las medidas de enfriamiento pasivo, aunque ayudan principalmente a reducir la demanda eléctrica de los edificios, se reconoce que son medidas habilitadoras de la flexibilidad del lado de la demanda. Por ejemplo, un mejor aislamiento térmico ayuda a reducir la transferencia de calor en climas cálidos, manteniendo fresco el espacio por más tiempo y, por consiguiente, ayudando a desplazar la demanda de enfriamiento a horas futuras. Son también las medidas iniciales que todos los usuarios deben considerar como prioridad en su búsqueda de reducir el consumo eléctrico.

4.2. Sistemas de enfriamiento eficientes

4.2.1. Aire acondicionado más eficiente

Las unidades de aire acondicionado energéticamente eficientes están diseñadas para usar menos energía que las unidades de aire acondicionado convencionales, mientras brindan el mismo o mejor rendimiento de enfriamiento. Hay varias maneras en que las unidades de aire acondicionado pueden ser más eficientes energéticamente:

- *Calificación SEER mejorada:* SEER (relación de eficiencia energética estacional, por sus siglas en inglés) es una medida de cuánto enfriamiento puede proporcionar un acondicionador de aire por unidad de energía consumida durante una temporada. Una clasificación SEER más alta significa que el acondicionador de aire es más eficiente energéticamente. Las unidades de aire acondicionado energéticamente eficientes suelen tener una calificación SEER de 14 o superior.
- *Compresores de velocidad variable:* las unidades de aire acondicionado con compresores de velocidad variable pueden ajustar la salida de refrigeración en función de las necesidades de refrigeración del espacio. Esto permite que la unidad utilice menos energía cuando los requisitos de refrigeración son menores, lo que se traduce en ahorros de energía.
- *Motores y ventiladores de alta eficiencia:* las unidades de aire acondicionado que usan motores y ventiladores de alta eficiencia consumen menos energía que las unidades que usan equipos convencionales.
- *Instalación y mantenimiento adecuados:* la instalación y el mantenimiento adecuados de las unidades de aire acondicionado también pueden mejorar su eficiencia energética. Por ejemplo, las unidades que se instalan en áreas sombreadas o con el aislamiento adecuado pueden consumir menos energía.

Algunas opciones de estos sistemas de enfriamiento eficiente a considerar son: enfriamiento geotérmico, ciclo de absorción, ventilación mecánica de doble flujo o por suelo o techo radiante. Al respecto, la selección del sistema de enfriamiento más adecuado dependerá de varios factores, como las necesidades de enfriamiento específicas, la ubicación geográfica, la disponibilidad de recursos energéticos y los requisitos de costos.

4.2.2. Sistemas de refrigeración evaporativa

Estos sistemas utilizan el principio de refrigeración por evaporación para reducir la temperatura del aire. El enfriamiento por evaporación es un proceso natural que ocurre cuando el agua se evapora en el aire, que absorbe el calor del entorno circundante y enfría el aire.

En un sistema de enfriamiento por evaporación, el agua se bombea sobre una almohadilla de enfriamiento o un medio, que luego se expone al aire caliente y seco. A medida que el aire caliente pasa sobre la almohadilla de enfriamiento, evapora el agua, que enfría el aire. El aire enfriado luego circula a través de un edificio o espacio usando ventiladores.

Estos sistemas de enfriamiento a menudo se usan en áreas con climas cálidos y secos, ya que pueden proporcionar un enfriamiento efectivo usando menos energía que los sistemas de aire acondicionado convencionales. Además, también tienen el beneficio adicional de aumentar la humedad del aire, lo que puede ayudar a aliviar la sequedad y los problemas respiratorios.

Hay dos tipos principales de sistemas de enfriamiento evaporativo: enfriamiento evaporativo directo y enfriamiento evaporativo indirecto. Los del tipo directo usan agua para enfriar el aire directamente, mientras que los del tipo indirecto usan un intercambiador de calor para enfriar el aire indirectamente sin agregar humedad.

Dentro de las limitaciones de estos sistemas de enfriamiento evaporativo, es posible que no sean efectivos en áreas con mucha humedad o en espacios que requieren un control preciso de la temperatura y humedad. Además, requieren de un suministro constante de agua, lo que puede ser un desafío en áreas con escasez de agua.

En general, los sistemas de enfriamiento por evaporación pueden ser una solución de enfriamiento rentable y energéticamente eficiente para ciertas aplicaciones, particularmente en climas cálidos y secos. Sin embargo, su idoneidad y eficacia deben evaluarse caso por caso.

4.3. Automatización y control

Una vez que los edificios en Colombia ya cuenten con diseño pasivo y medidas de eficiencia energética implementadas, así como sistemas de refrigeración y aire acondicionado más eficientes; el siguiente paso será automatizar y controlar el uso de la electricidad. Para esto, existen diversas tecnologías que se pueden utilizar.

4.3.1. Controles inteligentes

Los controles inteligentes se refieren a sistemas de control avanzados que se pueden usar para optimizar el funcionamiento de los sistemas de construcción, incluidos los sistemas HVAC, iluminación y otros sistemas. Los controles inteligentes suelen incluir sensores y algoritmos que pueden ajustar automáticamente el funcionamiento del sistema en función de la ocupación, las condiciones climáticas y otros factores. En el contexto de reducir la demanda de electricidad para enfriamiento, los siguientes tres son los más relevantes:

1. **Termostatos programables:** estos dispositivos se pueden programar para que automáticamente ajusten los puntos de temperatura en función de la ocupación, la hora del día, humedad relativa u otros factores.
2. **Sensores de ocupación:** estos sensores pueden detectar cuándo los espacios están ocupados y ajustar la iluminación y los sistemas HVAC en consecuencia.
3. **Controles de respuesta a la demanda:** estos controles pueden ajustar automáticamente los sistemas del edificio para reducir el consumo de energía durante períodos de alta demanda o cuando los precios de la electricidad son altos. Estos controles serán altamente relevantes bajo un contexto donde los usuarios finales vean señales de precio por medio de tarifas horarias.

Asimismo, es recomendable considerar para edificios comerciales, instalaciones industriales, hospitales, hoteles, centros comerciales y otros espacios grandes que requieran sistemas de enfriamiento a gran escala; sistemas de control de enfriamiento centralizado. Los cuales permiten el control centralizado de múltiples unidades de enfriamiento o equipos de climatización desde una ubicación central, lo que brinda mayor eficiencia, comodidad y flexibilidad en la gestión del enfriamiento.

Aunque teóricamente este tipo de controles es aplicable a edificios de cualquier sector, la realidad es que su implementación es técnica y económicamente más viable, en el corto plazo, en edificios comerciales e industriales, que en viviendas.

4.3.2. Sistemas de automatización de edificios

Los sistemas de automatización de edificios (BAS, por sus siglas en inglés) son más completos que los controles inteligentes y, por lo general, implican la integración de múltiples sistemas de construcción en un sistema de control centralizado. BAS se puede usar para monitorear y controlar HVAC, iluminación, seguridad y otros sistemas de construcción, lo que permite una operación más eficiente y efectiva. Los sistemas de automatización de edificios, bajo el contexto de este reporte, se pueden utilizar para

optimizar el funcionamiento del sistema de enfriamiento y reducir el desperdicio de energía. Los controles automatizados pueden ayudar a garantizar que los sistemas de enfriamiento funcionen de manera eficiente y sólo cuando sea necesario.

A pesar del costo inicial, los sistemas de automatización de edificios pueden proporcionar ahorros significativos a largo plazo a través de una mayor eficiencia energética y costos operativos reducidos. La cantidad de ahorro que se puede lograr dependerá de una serie de factores, incluido el tipo de edificio, los sistemas existentes y los controles inteligentes específicos, y las tecnologías de automatización que se implementen.

Según un informe del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, los sistemas de automatización de edificios pueden ahorrar entre un 5 % y un 30 % del consumo de energía de un edificio, según los sistemas específicos que se instalen y el nivel de integración con otros sistemas del edificio (Harris & Diamond, 2011). De manera similar, un estudio del *American Council for an Energy-Efficient Economy* encontró que el uso de controles inteligentes, como termostatos programables y sensores de ocupación, puede generar ahorros de energía de hasta un 20% (King, 2018).

Los ahorros logrados a través de controles inteligentes y sistemas de automatización de edificios pueden ser aún mayores cuando se combinan con otras medidas de eficiencia energética, como mejoras en el aislamiento y la iluminación. En algunos casos, los propietarios y operadores de edificios pueden lograr un retorno de la inversión en unos pocos años, sólo mediante el ahorro de energía.

4.4. Tecnologías de almacenamiento térmico

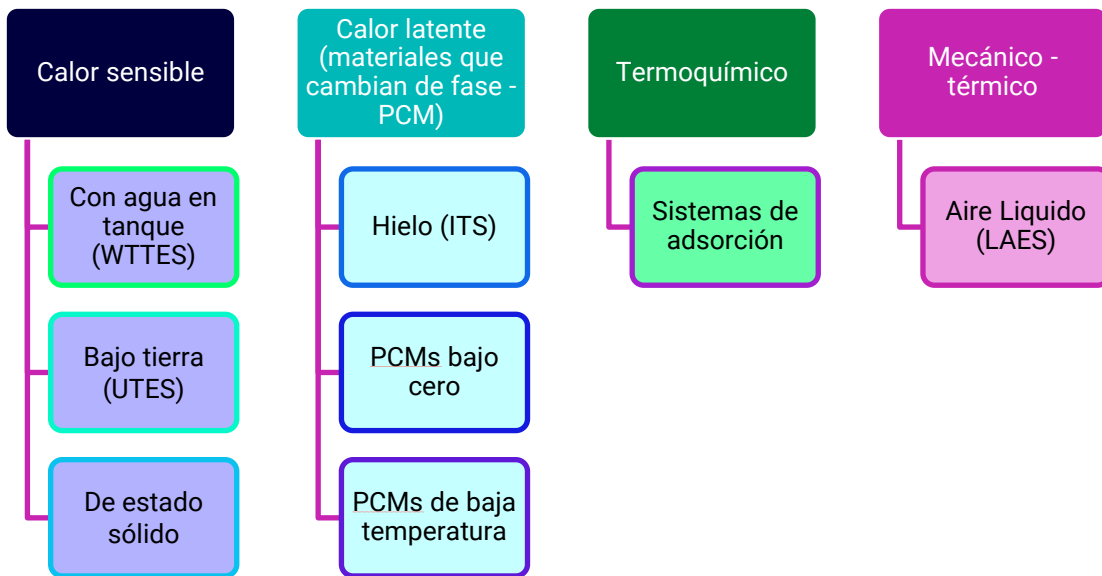
Los sistemas de almacenamiento de energía térmica tienen el potencial de ser una forma altamente efectiva de reducir la demanda de refrigeración en Colombia, particularmente en áreas con altas temperaturas y humedad. Al almacenar energía térmica durante las horas de menor actividad y liberarla durante los períodos de alta demanda de enfriamiento, los sistemas de almacenamiento de energía térmica pueden ayudar a reducir la necesidad de sistemas de enfriamiento que consumen mucha energía durante los períodos de máxima demanda y proveer flexibilidad a la red eléctrica.

Una de las principales ventajas de los sistemas de almacenamiento de energía térmica es su capacidad para cambiar las cargas de enfriamiento de las horas pico a las horas valle. Esto puede ayudar a reducir la tensión en la red eléctrica durante momentos de alta demanda, lo que puede ser particularmente importante en regiones con capacidad limitada de generación o transmisión, como la región del Caribe.

Además, los sistemas de almacenamiento de energía térmica pueden ayudar a mejorar la eficiencia de los sistemas de refrigeración al permitirles operar a su capacidad más eficiente durante las horas de menor actividad. Esto puede resultar en ahorros de energía significativos y costos operativos reducidos a largo plazo.

Se identificaron ocho tipos de tecnologías de almacenamiento térmico que pueden proveer enfriamiento y se pueden aplicar en pequeña escala o a nivel distrito (IRENA, 2020).

Figura 30. Tipos de tecnología de almacenamiento térmico para enfriamiento⁴



De estas tecnologías de almacenamiento térmico, se determinó, con base en su disponibilidad comercial a nivel internacional, las que pueden ser implementadas en el corto plazo para todos los sectores; siendo éstas las relativas a sistemas de almacenamiento de hielo y los tanques de almacenamiento de agua fría. Adicionalmente, existen oportunidades en el mediano plazo para integrar materiales de cambio de fase en unidades de aire acondicionado y en sistemas de absorción.

4.5. Distritos térmicos

Un distrito térmico, también conocido como sistema de calefacción y enfriamiento de distrito, es un sistema centralizado que proporciona calefacción y/o enfriamiento a varios edificios o instalaciones dentro de un área geográfica definida. Los distritos térmicos normalmente funcionan con una planta central que genera calor o frío, que luego se distribuye a través de una red de tuberías subterráneas a los edificios dentro del distrito.

En un distrito térmico, los edificios están conectados a la red del distrito a través de intercambiadores de calor, que transfieren calor o frío desde la red del distrito al sistema HVAC del edificio. Esto elimina la necesidad de que los edificios individuales tengan sus propios sistemas de calefacción o enfriamiento, lo que reduce el consumo total de energía y los costos operativos.


Los distritos térmicos pueden usar una variedad de fuentes para calentar y enfriar, incluido el calor residual de los procesos industriales, la energía geotérmica, la biomasa, la energía solar térmica y el gas natural. También pueden incorporar sistemas de almacenamiento de energía, como depósitos de almacenamiento de energía térmica, para almacenar el exceso de calor o frío para su uso posterior.

El uso de distritos térmicos tiene varios beneficios, entre ellos:

⁴ WTTES: Water Tank Thermal Energy Storage, UTES: Underground Thermal Energy Storage, ITS: Ice Thermal Storage, PCMs: Phase-change materials, LAES: Liquid Air Energy Storage

- **Mayor eficiencia energética:** los distritos térmicos pueden lograr una mayor eficiencia energética que los sistemas de edificios individuales, ya que pueden aprovechar el calor residual u otras fuentes de energía renovable.
- **Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero:** mediante el uso de fuentes de energía renovables y calor residual, los distritos térmicos pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir al combate al cambio climático.
- **Ahorro de costos:** los distritos térmicos pueden resultar en ahorros de costos para los propietarios y operadores de edificios, ya que pueden eliminar la necesidad de sistemas de calefacción y refrigeración individuales.
- **Fiabilidad mejorada:** mediante el uso de un sistema centralizado, los distritos térmicos pueden proporcionar servicios de calefacción y refrigeración más fiables, incluso en condiciones climáticas extremas.

Tabla 9. Caso de uso: Distritos Térmicos Colombia

<p><i>“Colombia es país pionero en Latinoamérica en cuanto a la promoción de Distritos Térmicos. Grandes ciudades como Medellín, con el Distrito Térmico La Alpujarra, y Cartagena, con el proyecto Serena del Mar, han dado los primeros pasos en su adopción.</i></p> <p><i>Estos sistemas que prometen beneficiar a la población en aspectos de costos, confort, y menor impacto al medio ambiente y a la capa de ozono.” (Distritos Térmicos Colombia, 2023)</i></p>	
--	--

5

PRIORIZACIÓN DE SOLUCIONES DE ENFRIAMIENTO LIMPIO Y EFICIENTE PARA SU IMPLEMENTACIÓN



5. Priorización de sectores para la implementación de soluciones de enfriamiento

Luego de haber caracterizado la demanda de enfriamiento en cuanto a su magnitud y comportamiento horario, identificando las oportunidad en que medidas de flexibilización de dicha demanda por zonas o sector en el Capítulo 3 y las distintas soluciones y tecnologías para disminuir el uso de la red en la demanda de enfriamiento el Capítulo 4 en este capítulo se presentan los resultados de priorización de sectores donde puede tener más valor flexibilizar la demanda de enfriamiento y con qué soluciones.

Para ello se utilizó una matriz de priorización que combinó las conclusiones del impacto de la demanda de enfriamiento en la red eléctrica (analizado en los capítulos 2 y 3), con una evaluación de las soluciones identificadas en el capítulo 4 a través de determinados criterios de evaluación.

5.1. Criterios de evaluación

Para generar la matriz de priorización se definieron ocho criterios de evaluación agrupados en dos categorías, como se puede ver en la Figura 31.

Figura 31. Criterios de evaluación de la matriz de priorización



5.2. Evaluación del impacto de la demanda de enfriamiento en la red eléctrica

Los cuatro criterios relacionados con el impacto de la demanda de enfriamiento se evaluaron por sector como se muestra en la Tabla 10 y siguiendo la metodología de evaluación presentada en el estudio *Decarbonising Singapore's Energy System in the Context of Cooling* (The Carbon Trust, 2022).

Tabla 10. Ponderación de los criterios de impacto de la demanda

Criterio	Alto (5)	Medio (3)	Bajo (1)
1 Demanda de enfriamiento actual	Sectores que contribuyen con más del 30 % de la demanda total de enfriamiento	Sectores que contribuyen entre el 10 y el 30 % de la demanda total de enfriamiento	Sectores que contribuyen con menos del 10 % de la demanda total de enfriamiento
2 Crecimiento de la demanda de enfriamiento	Sectores proyectados para experimentar un crecimiento entre 50% y 100 % en la demanda de enfriamiento	Sectores proyectados para experimentar entre un 25 % y un 50 % de crecimiento en la demanda de enfriamiento	Sectores proyectados para experimentar menos del 25 % de crecimiento en la demanda de enfriamiento
3 Disponibilidad de tarifas horarias	Muchos usuarios pueden cambiar de una tarifa fija a una tarifa horaria	Algunos usuarios pueden cambiar de una tarifa fija a una tarifa horaria	Pocos usuarios pueden cambiar de una tarifa fija a una tarifa horaria
4 Potencial de flexibilidad	La alta flexibilidad es cuando existe una variación significativa en el perfil de la demanda de refrigeración del sector junto con una gran oportunidad de influir en la interacción de la demanda de refrigeración con el sistema de energía	Flexibilidad media es cuando hay alguna variación en el perfil de demanda de refrigeración del sector junto con algunas oportunidades para influir en la interacción de la demanda de refrigeración con el sistema de energía	Baja flexibilidad es cuando hay una variación mínima en el perfil de demanda de enfriamiento del sector y una oportunidad limitada para influir en la interacción de la demanda de enfriamiento con el sistema de energía

5.3. Evaluación de soluciones de enfriamiento limpio y eficiente

A continuación, se presenta la Tabla 11 donde se mencionan las tecnologías de enfriamiento a ser evaluadas, con excepción de las asociadas a la categoría de enfriamiento pasivo, descritas en el Capítulo 4. Vale la pena señalar que las soluciones de enfriamiento limpio más adecuadas para cada sector pueden depender de factores como las necesidades específicas de enfriamiento, el clima local y

la disponibilidad de recursos. Esta tabla es un punto de partida que se puede personalizar aún más en función de las necesidades y circunstancias específicas.

Tabla 11. Tecnologías de enfriamiento a evaluar por sector

Categoría	Residencial	Comercial	Industrial
Enfriamiento pasivo	Sombreado, ventilación natural y aislamiento		
Servicios de enfriamiento	Unidades de aire acondicionado energéticamente eficientes		Sistemas de refrigeración energéticamente eficientes
	Unidades de aire acondicionado con energía solar	Torres de refrigeración evaporativa	
	Bombas de calor	Distritos térmicos	Sistemas de recuperación de calor
Energía fría	Sistemas de almacenamiento de hielo Tanques de almacenamiento de agua fría		
	Materiales de cambio de fase (PCM) integrados con unidades de aire acondicionado		Sistemas de refrigeración por adsorción

5.3.1. Criterio 1: Disponibilidad tecnológica

El primer criterio de evaluación es la disponibilidad de las tecnologías en Colombia. Para éste se utilizó el nivel de madurez tecnológica; el cuál es un índice que va del 1 al 9, donde 1 es que los principios básicos de la tecnología han sido observados, mientras que el 9 es que la tecnología está madura y disponible a nivel comercial.

Tabla 12. Descripción de los niveles de madurez tecnológica (European Commission, 2017)

TRL	Nivel de madurez tecnológica (<i>Technological Readiness Level</i>)	Ponderación
1	Principios básicos observados	Bajo
2	Concepto de tecnología formulado	
3	Prueba experimental de concepto	
4	Tecnología validada en laboratorio	
5	Tecnología validada en un entorno relevante (entorno industrialmente relevante en el caso de tecnologías habilitadoras clave)	Medio
6	Tecnología demostrada en un entorno relevante (entorno industrialmente relevante en el caso de tecnologías habilitadoras clave)	
7	Demostración del prototipo del sistema en un entorno operativo	
8	Sistema completo y calificado	Alto
9	Sistema real probado en el entorno operativo (fabricación competitiva en el caso de tecnologías habilitadoras clave; o en el espacio)	

Tabla 13. Nivel de madurez tecnológica y aplicabilidad por sector

Tecnología / Sector	TRL	Residencial	Comercial	Industrial
A. Unidades de aire acondicionado/sistemas de refrigeración energéticamente eficientes	9			
B. Unidades de aire acondicionado con energía solar	7			
C. Torres de refrigeración evaporativa	8			
D. Bombas de calor	8			
E. Distritos térmicos	8			
F. Sistemas de almacenamiento de hielo	9			
G. Tanques de almacenamiento de agua fría	9			
H. Materiales de cambio de fase (PCM) integrados con unidades de aire acondicionado	7			
I. Sistemas de almacenamiento termoquímico (Refrigeración por adsorción)	3-5			
J. Controles inteligentes	9			

5.3.2. Criterio 2: Potencial de reducción de la demanda

Dado que el alcance de este estudio se enfoca principalmente en flexibilidad, para la evaluación de este criterio se utilizó información de emisiones de la *Green Cooling Initiative*. Esta iniciativa considera dos escenarios: el *business-as-usual* o la línea base y el escenario de mitigación, que considera mejoras en la eficiencia energética de los equipos para la reducción en emisiones indirectas (GIZ, s.f.). Por consiguiente, es posible obtener un estimado del potencial de reducción del consumo eléctrico asumiendo un factor de emisión de 0.19 kgCO₂e/kWh para el año 2030.

En la Tabla 14 se muestran los datos de emisiones y el resultado estimado de la reducción de consumo eléctrico.

Tabla 14. Emisiones indirectas de enfriamiento y potencial de reducción al 2030 (GIZ, s.f.)

Sector - Tecnologías	Escenario de línea base 2030 (MT CO ₂ e)	Escenario de mitigación 2030 (MT CO ₂ e)	Potencial de reducción de emisiones (MT CO ₂ e)	Potencial de reducción de consumo eléctrico (GWh)
Residencial - Refrigeración	0.55	0.518	0.032	168.42
Comercial - Refrigeración	0.287	0.245	0.042	221.05
Industrial -	0.0852	0.0754	0.0098	51.58

Sector - Tecnologías	Escenario de línea base 2030 (MT CO2e)	Escenario de mitigación 2030 (MT CO2e)	Potencial de reducción de emisiones (MT CO2e)	Potencial de reducción de consumo eléctrico (GWh)
Refrigeración				
Todos – Aire acondicionado	1.06	0.876	0.184	968.42
Comercial e Industrial - Chiller	0.082	0.071	0.011	57.89
Total	2.0642	1.7854	0.2788	1,467.37

Considerando que en la proyección realizada a 2030 en el capítulo 2, ya se consideran mejoras por eficiencia energética, el potencial de reducción del consumo obtenido es en realidad la energía adicional que se consumiría para enfriamiento en caso de que no se implementen políticas públicas e incentivos que lleven al consumo de equipos de refrigeración y aire acondicionado más eficientes. Si este fuera el caso, la demanda total de enfriamiento al 2030 en lugar de ser 32.7 TWh, incrementaría a 34.1 TWh.

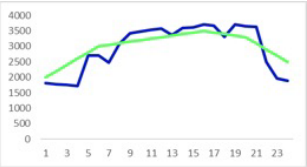

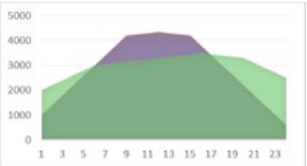
Es importante destacar que esta evaluación demuestra que los equipos de aire acondicionado unitarios son los que mayor potencial tienen de reducir la demanda y, aunque no se desglosa por sector, el sector con mayor potencial de reducción de la demanda es el comercial, seguido del residencial.

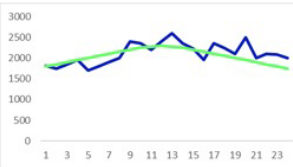
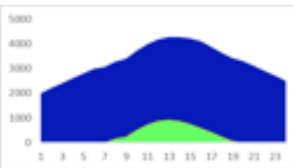
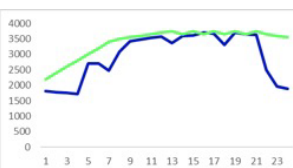
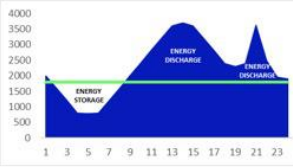
Por otro lado, el hecho de que se considere ya la eficiencia energética en el análisis no limita a que se puedan generar reducciones adicionales de consumo eléctrico a partir de la implementación de distritos térmicos, considerando que pueden generar ahorros entre el 30 y el 50% de energía primaria (Distritos Térmicos Colombia, 2023).

5.3.3. Criterio 3: Flexibilidad a la red eléctrica

En la siguiente tabla se mencionan siete servicios de flexibilidad (The Carbon Trust, 2022) que pueden proveer las soluciones de enfriamiento conforme al sector y la región donde se prevé generarían mayor impacto en la flexibilidad.

Tabla 15. Perspectiva general de los servicios de flexibilidad que pueden ofrecer las soluciones de enfriamiento

Servicio	Ejemplo visual (The Carbon Trust, 2022)	Duración	Soluciones potenciales	Sectores	Regiones
1. Rampas suaves de la demanda de enfriamiento		De minutos a pocas horas	<ul style="list-style-type: none"> • E. Distritos térmicos (con capacidad de almacenamiento térmico) • F. Sistemas de almacenamiento de hielo • G. Tanques de almacenamiento de agua fría 	Todos	Suroccidental
2. Limitar la aparición de nuevos picos de demanda		De minutos a pocas horas	<ul style="list-style-type: none"> • E. Distritos térmicos (con capacidad de almacenamiento térmico) • F. Sistemas de almacenamiento de hielo • G. Tanques de almacenamiento de agua fría 	Todos	Todas
3. Reducir la demanda máxima de energía		Algunas horas	<ul style="list-style-type: none"> • A. Unidades de aire acondicionado/sistemas de refrigeración energéticamente eficientes • E. Distritos térmicos (con capacidad de almacenamiento térmico) • F. Sistemas de almacenamiento de hielo • G. Tanques de almacenamiento de agua fría • J. Controles inteligentes 	Todos	Caribe Nordeste

Servicio	Ejemplo visual (The Carbon Trust, 2022)	Duración	Soluciones potenciales	Sectores	Regiones
4. Suavizar pequeñas variaciones horarias en la demanda de energía		De segundos a horas	<ul style="list-style-type: none"> • E. Distritos térmicos (con capacidad de almacenamiento térmico) • F. Sistemas de almacenamiento de hielo • G. Tanques de almacenamiento de agua fría • J. Controles inteligentes 	Comercial e Industrial	Todas
5. Integrar la energía solar fotovoltaica		De segundos a horas (por variabilidad de la generación) Algunas horas (para almacenamiento de excedentes)	<ul style="list-style-type: none"> • B. Unidades de aire acondicionado con energía solar • H. Materiales de cambio de fase (PCM) integrados con unidades de aire acondicionado 	Residencial y Comercial	Oriental
6. Incrementar la demanda en horas de bajo consumo para maximizar el uso de la infraestructura de generación		De algunas horas a algunos días	<ul style="list-style-type: none"> • E. Distritos térmicos (con capacidad de almacenamiento térmico) • F. Sistemas de almacenamiento de hielo • G. Tanques de almacenamiento de agua fría • J. Controles inteligentes 	Todos	Caribe Nordeste
7. Proveer almacenamiento de energía para despachar en los picos			<ul style="list-style-type: none"> • I. Sistemas de almacenamiento termoquímico (Refrigeración por adsorción) 	Todos	Suroccidental Oriental

5.3.4. Criterio 4: Barreras para la implementación

Para el análisis de este criterio, se consideraron los factores económicos, técnicos, regulatorios y sociales. De forma general, se presentan las ocho barreras detectadas que se identificaron (The Carbon Trust, 2022).

1. **Costo inicial:** las tecnologías/sistemas de enfriamiento limpios tienen en general un costo inicial más alto que las tecnologías convencionales y las fuentes de financiamiento son limitadas para tecnologías innovadoras, lo que puede disuadir a los usuarios potenciales.
2. **Falta de marco regulatorio y políticas:** Sin directrices y reglamentos claros para el diseño, la instalación y el funcionamiento seguro de estas tecnologías, los usuarios potenciales pueden dudar en invertir en ellas. Actualmente no existe un marco regulatorio o políticas específicas en Colombia para apoyar el desarrollo de sistemas de enfriamiento de distrito. Esta falta de apoyo puede crear incertidumbre para los posibles inversores y desarrolladores, así como limitar el acceso a la financiación y otros recursos.
3. **Falta de conocimientos técnicos:** la implementación y el mantenimiento de tecnologías/sistemas de refrigeración limpios requiere conocimientos técnicos especializados, que pueden no estar fácilmente disponibles en Colombia. Esto puede crear desafíos para encontrar personal calificado para diseñar, construir y operar estos sistemas.
4. **Retos técnicos:** para diseñar, instalar y operar sistemas de enfriamiento pueden existir desafíos técnicos como la selección del medio de almacenamiento adecuado, la optimización del rendimiento del sistema y la integración con los sistemas de refrigeración existentes. Asimismo, los sistemas de enfriamiento limpio suelen incorporar tecnologías más avanzadas, como sistemas de recuperación de energía, controles automatizados, y componentes especiales, que requieren una mayor atención y mantenimiento especializado.
5. **Falta de conciencia/conocimiento:** es posible que algunos usuarios potenciales no estén al tanto de los beneficios de las tecnologías/sistemas de enfriamiento limpio o que no tengan el conocimiento necesario para implementarlos.
6. **Regulación actual:** las barreras regulatorias pueden incluir códigos de construcción, leyes de zonificación y otras reglamentaciones que pueden limitar el uso de sistemas de almacenamiento de energía térmica en ciertas áreas. Los reglamentos también pueden exigir permisos adicionales, inspecciones u otros requisitos que pueden aumentar el costo y la complejidad de la instalación.
7. **Limitaciones de infraestructura:** algunas áreas pueden carecer de la infraestructura necesaria para respaldar tecnologías/sistemas de enfriamiento limpios, como una red de enfriamiento de distrito o instalaciones de almacenamiento térmico.
8. **Desconfianza:** algunos adoptantes potenciales pueden percibir las tecnologías/sistemas de refrigeración limpia como menos fiables que las tecnologías convencionales, especialmente si no están familiarizados con la tecnología.

Estas barreras impactan más al sector residencial por la liquidez del usuario promedio o la falta de financiamientos adecuados para atender este sector, la escala de la mejora no es suficiente para ser rentable, el conocimiento de estos temas es mucho más limitado y, por ende, hay una mayor desconfianza en comparación con usuarios de otros sectores, entre otras cosas. Es por esto por lo que al sector residencial se le asigna un valor bajo y a los otros sectores un valor medio en la matriz de evaluación de criterios.

5.4. Matriz de priorización de sectores y tecnologías

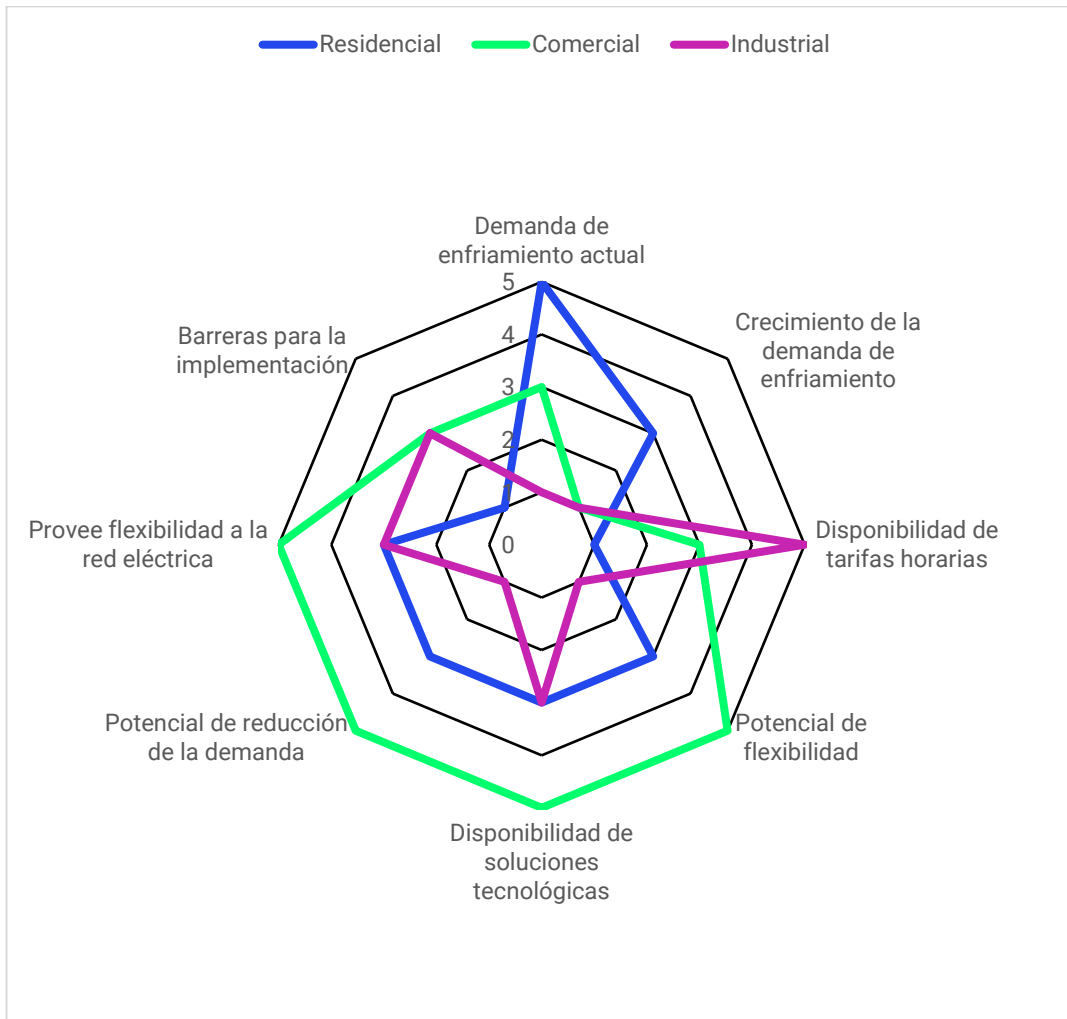
A continuación, se muestra a manera de resumen una tabla donde se presentan los resultados por criterio para cada uno de los sectores analizados de forma agregada.

Tabla 16. Matriz de priorización de sectores

Criterio de evaluación	Descripción	Residencial	Comercial	Industrial
Demanda de enfriamiento actual	El porcentaje de la demanda total de electricidad de enfriamiento aportada por el sector.	Alto	Medio	Bajo
Crecimiento de la demanda de enfriamiento	El crecimiento porcentual estimado en la demanda de electricidad de enfriamiento entre 2018 y 2030.	Medio	Bajo	Bajo
Disponibilidad de tarifas horarias	Posibilidad de los usuarios regulados y no regulados de migrar de una tarifa fija a un esquema horario	Bajo	Medio	Alto
Potencial de flexibilidad	Capacidad de la demanda de enfriamiento para cambiar o ajustar la demanda a diferentes horas del día	Medio	Alto	Bajo
Disponibilidad de soluciones tecnológicas	Gama relativa de soluciones de enfriamiento limpia disponibles en Colombia	Medio	Alto	Medio
Potencial de reducción de la demanda	Capacidad de las tecnologías de proveer el mismo enfriamiento con menor consumo de energía	Medio	Alto	Bajo
Provee flexibilidad a la red eléctrica	Grado en que las soluciones de refrigeración limpia disponibles en el sector pueden proporcionar servicios de flexibilidad	Medio	Alto	Medio
Barreras para la implementación	Grado en que existen barreras en el despliegue	Bajo	Medio	Medio
Prioridad del sector		Medio (22 pts)	Alto (30 pts)	Medio (18 pts)

Para poder visualizar de forma gráfica la tabla anterior, se asignó un valor a cada nivel: 1 a Bajo, 3 a Medio y 5 a Alto.

Figura 32. Resultados visuales de la matriz de priorización por sector



Para poder visualizar de forma gráfica la tabla anterior, se asignó un valor a cada nivel: 1 a Bajo, 3 a Medio y 5 a Alto. Tanto en la Tabla 16 como en la Figura 32 se puede apreciar claramente que **el sector comercial es prioritario para la implementación de soluciones limpias y eficientes de enfriamiento que logren dar flexibilidad a la red eléctrica**; a pesar de que la demanda sea mayor en el sector residencial, y que la mayor cantidad de usuarios que tienen la posibilidad de cambiarse a tarifa horaria, esté en el sector industrial.

En el Anexo 7 se hace una evaluación cualitativa por tecnología para determinar las tecnologías más prioritarias. Con base en esto, se determinaron cuatro soluciones de enfriamiento que, por su nivel de madurez tecnológico, potencial de reducción de la demanda, los servicios de flexibilidad que pueden proveer y las barreras que enfrentan, pueden estar ya disponibles para su implementación en Colombia. Estos son: **1) controles inteligentes; 2) unidades de aire acondicionado/sistemas de refrigeración energéticamente eficientes; 3) tanques de almacenamiento de agua fría; 4) distritos térmicos.**

6

RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

6. Recomendaciones y Conclusiones

6.1. Conclusiones

El sector comercial es prioritario para la implementación de soluciones limpias y eficientes de enfriamiento que logren dar flexibilidad a la red eléctrica; a pesar de que la demanda sea mayor en el sector residencial, y que la mayor cantidad de usuarios que tienen la posibilidad de cambiarse a tarifa horaria, esté en el sector industrial, particularmente en el sector no regulado.

En general, los distritos térmicos pueden ser una forma muy eficaz de proporcionar servicios de calefacción y refrigeración a múltiples edificios o instalaciones, al mismo tiempo que mejoran la eficiencia energética, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y reducen los costos operativos.

En general, si bien la implementación de sistemas de almacenamiento de energía térmica en Colombia puede enfrentar algunos desafíos, como costos iniciales y barreras regulatorias, tienen el potencial de ser una forma altamente efectiva de reducir la demanda de enfriamiento y mejorar la eficiencia energética en el país. A medida que las tecnologías de energía renovable continúan evolucionando y se vuelven más rentables, es probable que el uso de sistemas de almacenamiento de energía térmica se vuelva cada vez más común como una forma de cambiar las cargas de enfriamiento de las horas pico a las horas valle y reducir el consumo total de energía de los edificios e instalaciones.

6.2. Recomendaciones

Realizar una evaluación integral de las necesidades de enfriamiento: Aunque esta es una primera evaluación de las necesidades de enfriamiento de los diferentes sectores colombianos y el potencial de los servicios del sistema energético, se requiere de mayor granularidad de datos y de comportamiento de los usuarios para poder determinar las necesidades locales y regionales de enfriamiento. Un buen diagnóstico puede ayudar a identificar las soluciones de enfriamiento limpio más adecuadas que pueden brindar múltiples beneficios al sistema energético.

Desarrollar políticas e incentivos específicos para el sector: los formuladores de políticas deben desarrollar políticas e incentivos que se adapten a las necesidades específicas de cada sector y apoyen la provisión de servicios del sistema energético. Por ejemplo, las políticas podrían incluir:

- Programas de sustitución de equipos de refrigeración con una antigüedad mayor a 15 años para usuarios residenciales, principalmente, en la región Oriental Bogotá.
- Códigos de construcción que requieran el uso de sistemas de aire acondicionado energéticamente eficientes en edificios comerciales y residenciales, principalmente, en regiones cálidas (Caribe y Suroccidental).
- Tarifación horaria de la electricidad que habilite el cambio de comportamiento de los usuarios finales y/o la implementación de soluciones de almacenamiento de energía.
- Incentivos financieros para que las empresas inviertan en tecnologías de enfriamiento limpias que también pueden proporcionar almacenamiento de energía o servicios de respuesta a la demanda.

Fomentar la integración con el sistema de energía: las soluciones de refrigeración limpia deben diseñarse para integrarse con el sistema de energía para proporcionar beneficios adicionales, como almacenamiento de energía, respuesta a la demanda o integración de energía renovable. Por ejemplo, los sistemas de almacenamiento térmico se pueden usar para almacenar el exceso de capacidad de enfriamiento durante las horas de menor actividad y utilizarlo durante las horas de mayor demanda para reducir el consumo y los costos de energía, al mismo tiempo que brindan servicios de estabilidad de la red.

Promover la investigación y el desarrollo: los formuladores de políticas deben promover la investigación y el desarrollo para apoyar el desarrollo de nuevas tecnologías de refrigeración limpias que puedan brindar servicios al sistema energético. Esto puede incluir la financiación de proyectos de I+D que exploren el potencial del uso de sistemas de refrigeración para el almacenamiento de energía, la respuesta a la demanda o la integración de energías renovables.

Fomentar las asociaciones público-privadas: los formuladores de políticas deben fomentar las asociaciones entre los sectores público y privado para promover el desarrollo y la adopción de tecnologías de enfriamiento limpias que puedan brindar servicios al sistema energético. Esto puede incluir la creación de plataformas para el intercambio de conocimientos y la colaboración entre la industria, la academia y el gobierno, así como la provisión de incentivos financieros y apoyo para las inversiones del sector privado en tecnologías de refrigeración limpia.

Promover la concienciación y la educación del público: por último, los responsables de la formulación de políticas deben promover la concienciación y la educación del público sobre los beneficios de las soluciones de refrigeración limpias que pueden proporcionar servicios al sistema energético. Esto puede ayudar a generar apoyo público para la adopción de soluciones de enfriamiento limpias y aumentar la demanda de tecnologías de enfriamiento energéticamente eficientes que también pueden respaldar el sistema energético.

Al implementar estas acciones, se puede ayudar a acelerar la adopción de soluciones de enfriamiento limpias que brinden servicios al sistema energético, al tiempo que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, se mejora la eficiencia energética y se mejora la resiliencia de los sistemas de enfriamiento para los desafíos futuros.

7

ANEXOS



7. Anexos

Anexo 1: Estimando la demanda de enfriamiento de Colombia en 2018

El consumo total de electricidad en Colombia en el año 2018 fue de 69,126 GWh de acuerdo con datos obtenidos de XM. Combinando datos de Superservicios para el sector regulado y de XM para el sector no regulado, se obtuvo el desagregado de consumo total a nivel sectorial (residencial, comercial e industrial). A los resultados obtenidos, con base en referencias se asumió un porcentaje por sector para el uso de electricidad por refrigeración y por aire acondicionado, como se muestra en la Tabla 17.

[Demanda de energía nacional \(xm.com.co\)](http://xm.com.co)

Tabla 17. Porcentaje de enfriamiento aplicado al total nacional, 2018

Sector	Uso de la electricidad	% del total	Referencia / Supuesto
Residencial	Refrigeración	46%	De acuerdo con SUI, UPME 2018, en el estrato 4, 46% de la electricidad se usa para refrigeración mientras que otro 10% se usa para aire acondicionado. (UPME, 2020) Esto se toma como promedio para todo el sector, aunque es relevante reconocer que estratos socioeconómicos bajos por tema de costos usan más ventiladores que equipos de aire acondicionado para el enfriamiento de espacios en los hogares.
Residencial	Aire acondicionado	10%	
Comercial	Refrigeración	17%	De acuerdo con SUI, UPME 2018, 29% de la electricidad se usa para aire acondicionado mientras que otro 17% se usa para refrigeración. (UPME, 2020)
Comercial	Aire acondicionado	29%	
Industrial	Refrigeración	5%	De acuerdo con Energy Demand Situation in Colombia, en el sector industrial 5% del consumo de electricidad se utiliza para refrigeración mientras que 3% se utiliza para aire acondicionado. (DNP, Enersinc, 2017).
Industrial	Aire acondicionado	3%	

Para el sector industrial se hizo una validación de datos a nivel subsector con base en el Balance de Energía Útil 2015, particularmente de la Distribución de la energía eléctrica en usos bajo la metodología OLADE (UPME, IREES, TEP, Corpoema, 2019). Con base en los resultados que se muestran en la Tabla 18, se validaron los supuestos agregados a nivel sectorial de la Tabla 17 para el sector industrial.

Tabla 18. Porcentaje de la demanda de enfriamiento por subsector industrial

Subsector	EE - Aire acondicionado	EE - Refrigeración	Total Enfriamiento (% del total por subsector)	Total Demanda eléctrica, sector industrial	Total Cooling (% del total del sector)
Productos alimenticios, elaboración de bebidas, productos de tabaco	3.20%	17.80%	21.00%	23.50%	4.94%
Productos minerales no metálicos	0.70%	6.80%	7.50%	13.60%	1.02%
Sustancias y productos químicos	3.90%	3.00%	6.90%	12.60%	0.87%
Productos metalúrgicos básicos	0.30%	0.10%	0.40%	10.80%	0.04%
Productos textiles	4.80%	0.20%	5.00%	6.60%	0.33%
Papel, cartón e imprenta	3.40%	0.00%	3.40%	8.10%	0.28%
Maquinaria y equipos	5.40%	0.10%	5.50%	2.60%	0.14%
Subtotal					7.62%
Otros subsectores	1.26%	0.40%	1.66%	22.20%	0.37%
Total				100%	7.98%

Basados en la información de la demanda eléctrica y los supuestos previos con respecto al uso de la electricidad para enfriamiento por sector, se calculó la demanda total de enfriamiento en 2018 y las emisiones de carbono asociadas a este uso, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados por sector, 2018

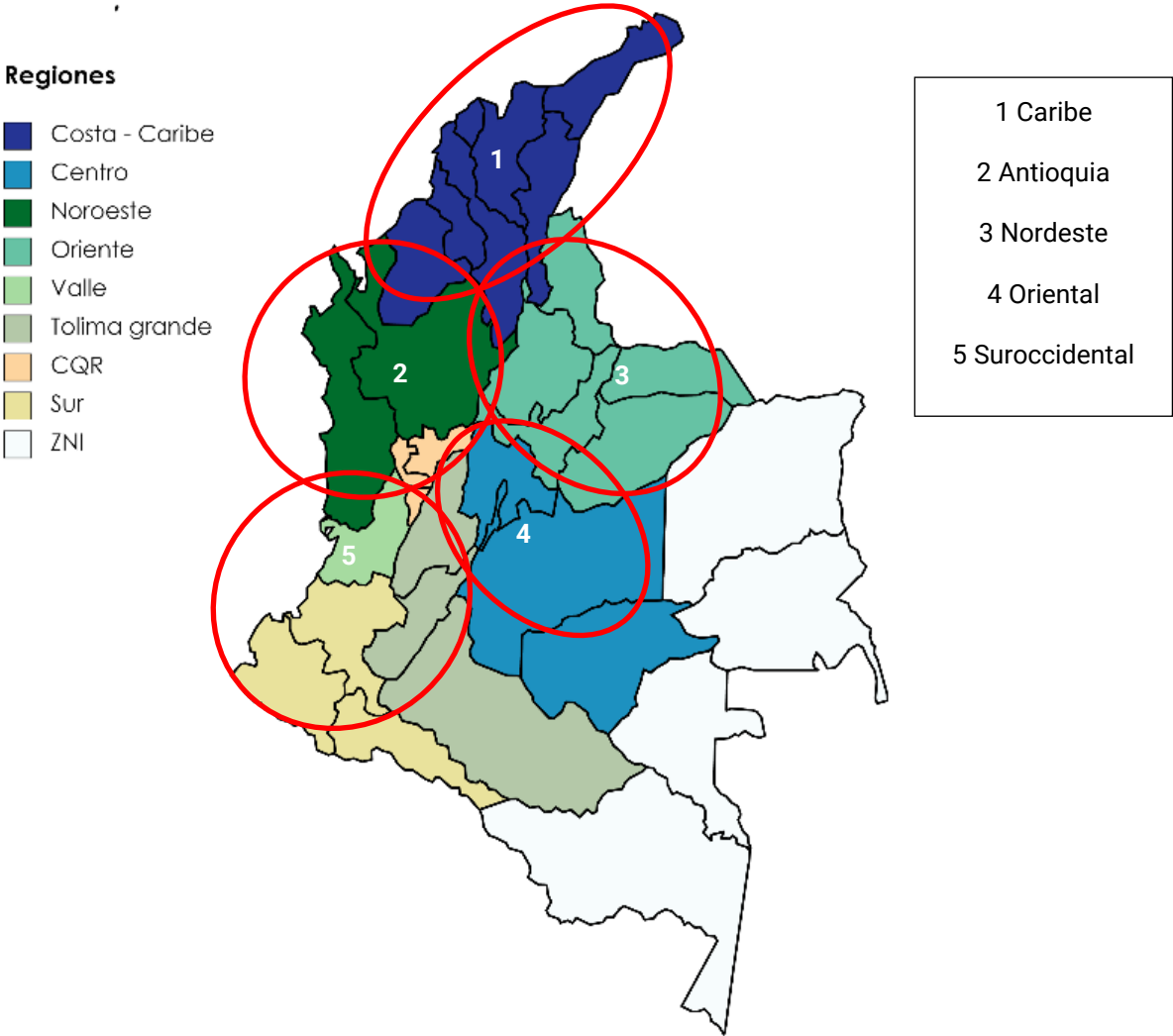
Datos / Sector	Residencial	Comercial	Industrial
Electricidad consumida por sector – GWh, 2018	22,690	16,735	31,272
% de la electricidad del sector consumida por enfriamiento (refrigeración + aire acondicionado)	56%	46%	8%
Electricidad consumida para enfriamiento – GWh, 2018	12,706	7,698	2,502
% del total de consumo de electricidad de Colombia	18%	11%	4%
Emisiones de carbono – tCO₂e, 2018	1,651,817	1,000,768	325,234

Basados en los supuestos previos, nuestro estimado de electricidad consumida para enfriamiento en 2018 suma 22.9 TWh (considerando sector residencial, comercial e industrial).

Para estimar la capacidad promedio que sería utilizada para atender esta demanda, esta cantidad puede ser dividida entre el número de horas en el año, lo cual resulta en 2.61 GW de media de potencia dedicados a enfriamiento cada hora en Colombia.

Anexo 2: Contexto del sistema eléctrico colombiano

Figura 33. Regiones de Colombia de acuerdo con el consumo eléctrico (UPME) y de acuerdo a la caracterización de medidores inteligentes (UNAL)



Anexo 3: Ciudades y regiones de Colombia

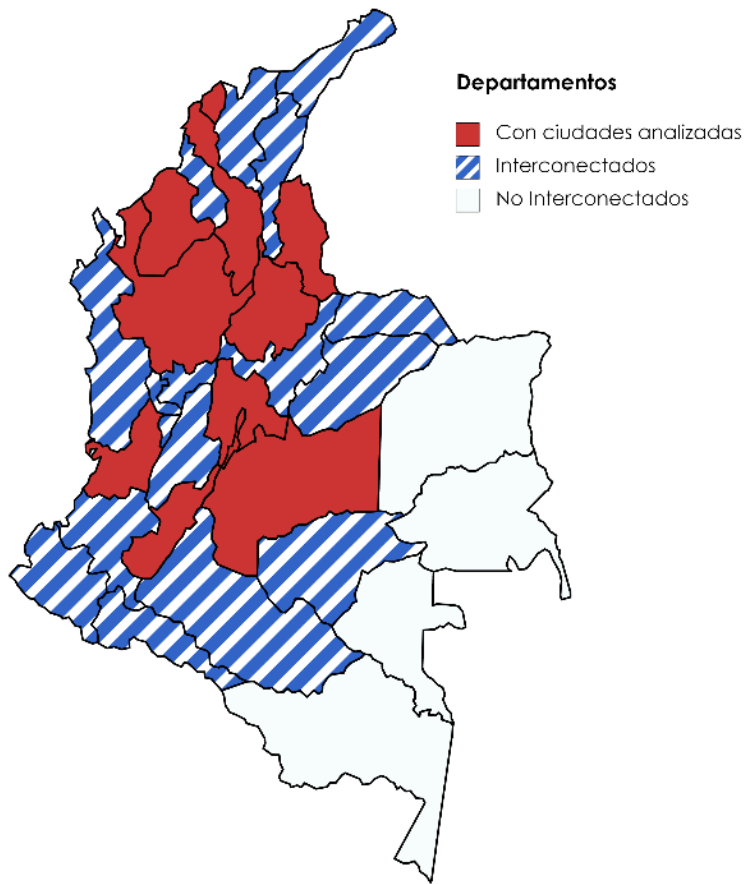
Tabla 20. Datos de las diez ciudades de Colombia incluidas en el Inventario de GEI

Ciudad	Departamento	Región SIN	Altura	Clima	Población
Barranquilla	Atlántico	Costa-Caribe	Bajo	Cálido	1.33 M
Bogotá	Bogotá D.C. / Cundinamarca	Centro	Alto	Frío	7.97 M
Bucaramanga	Santander	Oriente	Bajo	Cálido	623 K
Cali	Valle del Cauca	Valle	Medio	Cálido	2.29 M
Cartagena	Bolívar	Costa-Caribe	Bajo	Cálido	1.06 M
Cúcuta	Norte de Santander	Oriente	Bajo	Cálido	795 K
Medellín	Antioquia	Noroeste	Medio	Templado	2.65 M
Montería	Córdoba	Costa-Caribe	Bajo	Cálido	516 K
Neiva	Huila	Tolima Grande	Bajo	Cálido	373 K
Villavicencio	Meta	Centro	Bajo	Cálido	558 K

La población de estas 10 ciudades representa el 35% del total de habitantes en Colombia.

Regiones SIN	No.	Ciudades
Costa-Caribe	3	Barranquilla, Cartagena, Montería
Centro	2	Bogotá, Villavicencio
Noroeste	1	Medellín
Oriente	2	Bucaramanga, Cúcuta
Valle	1	Cali
Tolima Grande	1	Neiva
CQR	0	NA
Sur	0	NA

Figura 34. Departamentos de Colombia con ciudades analizadas



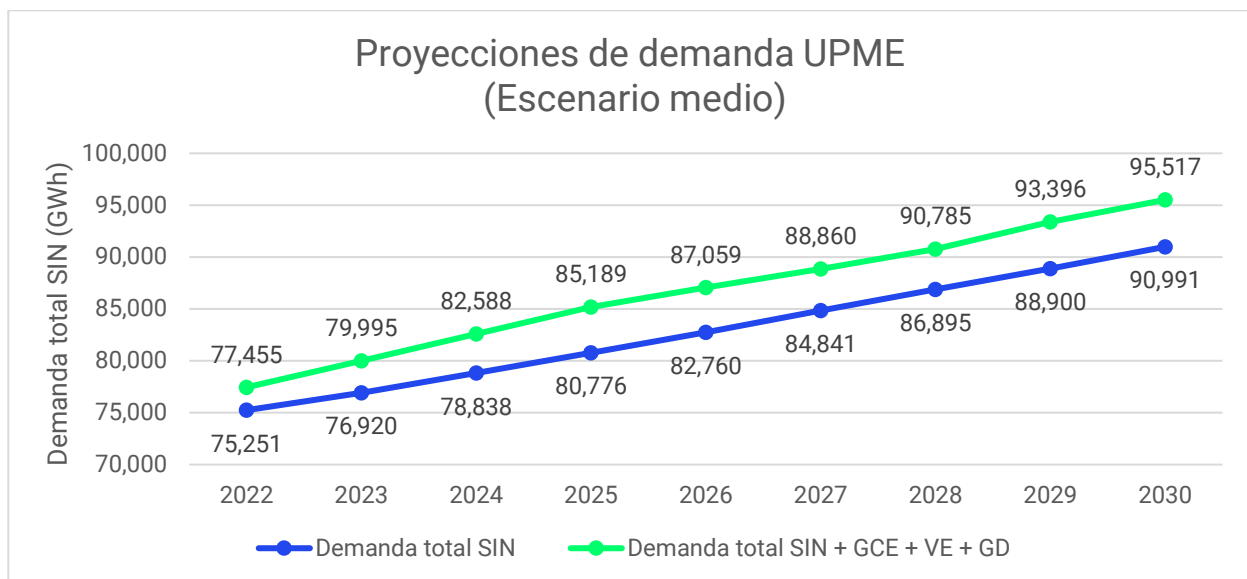
Anexo 4: Estimando la demanda de enfriamiento de Colombia en 2030

La demanda futura total de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional se obtuvo a partir de las proyecciones de demanda elaboradas por la UPME. Para este estudio se utilizó el escenario medio de demanda eléctrica. La proyección seleccionada no considera a los grandes consumidores eléctricos (GCE), a los vehículos eléctricos (VE) ni a la generación distribuida (GD).

Esto se justifica considerando que:

- Los grandes consumidores eléctricos no entran en los subsectores industriales relevantes para el tema de enfriamiento; por lo tanto, el aporte al consumo eléctrico de refrigeración y/o aire acondicionado no es significativo.
- No se cuenta con información suficiente para determinar la cantidad de electricidad que los vehículos eléctricos utilizan para mantener el espacio interior a una temperatura confortable.
- El incremento de la generación solar no disminuye la demanda de enfriamiento por parte de los usuarios finales.

Figura 35. Proyección de demanda en Colombia al 2030 (UPME, 2022)



Las proyecciones del crecimiento de la demanda de enfriamiento están basadas en el Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para fuentes estacionarias en ciudades de Colombia, elaborado para UNIDO y Distritos Térmicos Colombia. De este inventario se tomaron únicamente los datos de alcance 2 (emisiones indirectas asociadas al uso de la energía) relacionados con refrigeración y aire acondicionado del año 2018 al 2030 para las 10 ciudades disponibles. Las emisiones de carbono se transformaron a consumo eléctrico por medio de los factores de emisión utilizados por año (MGM Innova Energy Services & Ecologic, 2022).

A partir de los datos anuales de consumo para enfriamiento y consumo total de electricidad de las 10 ciudades, se determinaron tasas de crecimiento anual por sector y por tipo de uso de enfriamiento. Estas tasas de crecimiento se extrapolaron a las proyecciones anuales de demanda total.

Tabla 21. Tasa de crecimiento de la demanda de aire acondicionado y refrigeración, promedio anual 2022-2030

Sector	Aire acondicionado	Refrigeración
Residencial	2.76%	2.39%
Comercial	2.52%	2.38%
Industrial	2.17%	2.05%

Anexo 5: Caracterización de la demanda

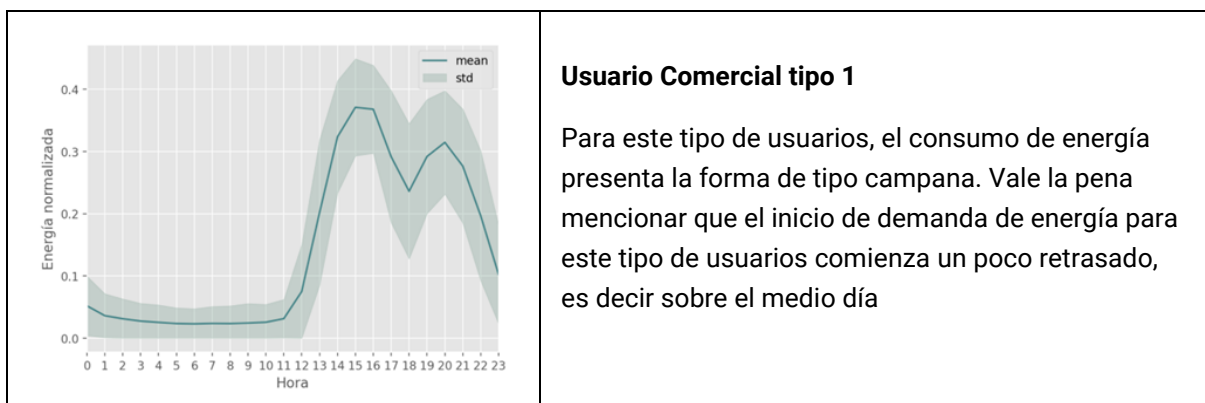
En 2022, la Universidad Nacional de Colombia desarrolló un proceso de caracterización de la demanda eléctrica de los usuarios, en el contexto del Proyecto Apoyo al Despliegue de Redes Inteligentes diligenciado junto a Carbon Trust para la UPME. La caracterización se realizó a partir de las mediciones de medidores inteligentes (AMI, en inglés) facilitada por parte de los operadores de red (OR) que cuenten con el despliegue de medición inteligente en su sistema. La muestra de medición correspondió a registros variables de 1 a 3 años de más de 100.000 medidores repartidos en todas las regiones del país según lo indicado en la Tabla 22. Este ejercicio se realizó a nivel nacional, regional y por operador de red.

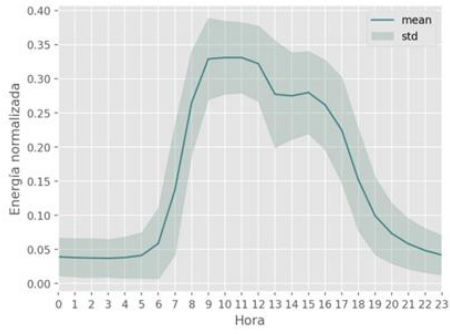
Tabla 22. Número de medidores y sectores incluidos por región

Región	Número de medidores	Residencial	Comercial	Industrial
Caribe	706	No	Si	Si
Antioquia	968	No	Si	Si
Noreste	622	Si	Si	Si
Suroccidental	54,380	Si	Si	Si
Oriental	64,805	Si	Si	No

Las curvas se agruparon y normalizaron con base en la región y el sector. Para los casos donde no hubo información disponible a nivel regional, se utilizó la curva nacional correspondiente. A continuación, se presentan un par de ejemplos de las curvas representativas de demanda concluidas mediante un proceso de 'machine learning' para completar datos faltantes en registros y clusterización avanzada para identificar los perfiles diarios tipo que representan el conjunto de perfiles analizados.

Tabla 23. Ejemplos de curvas de demanda representativas





Usuario Comercial tipo 2

Este tipo de usuario se caracteriza por presentar una demanda de energía en forma de campana obteniendo su máximo de demanda alrededor del mediodía.

Anexo 6: Perfiles de demanda de enfriamiento

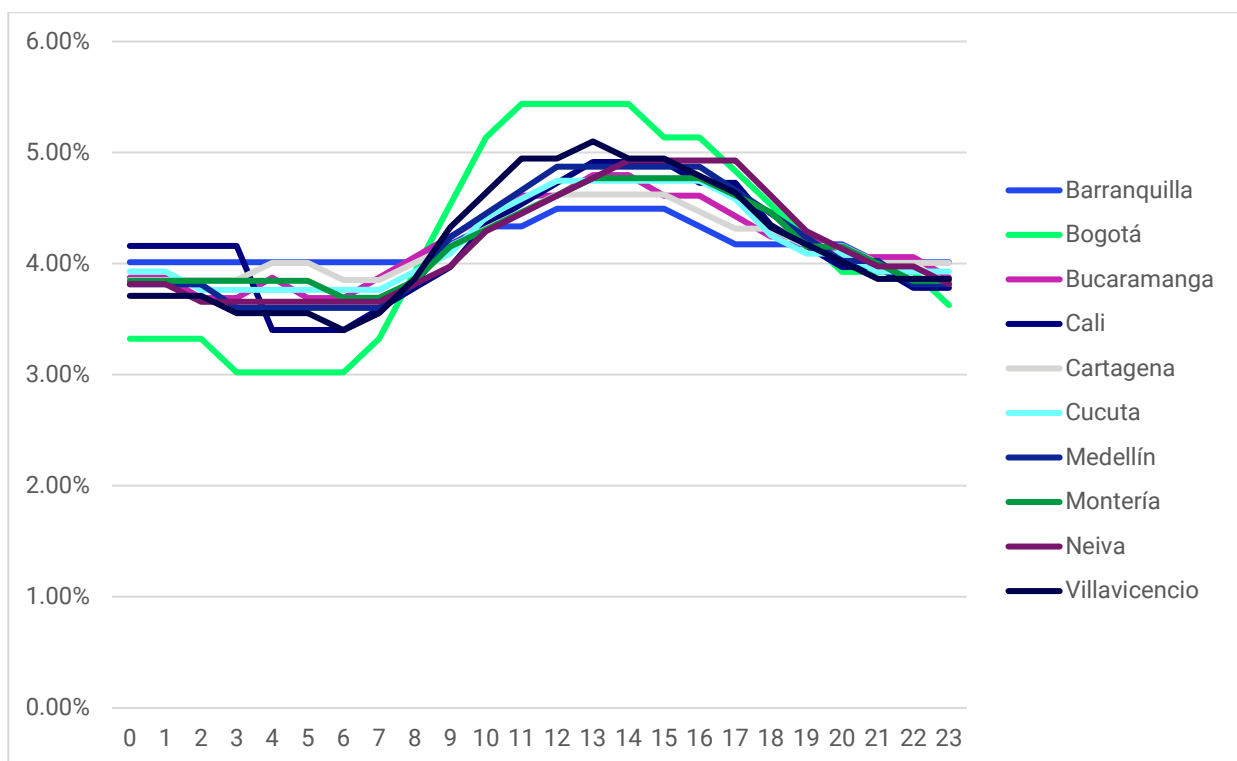
A partir de la estimación de la demanda media diaria de enfriamiento presente y futuro, se dedujeron los perfiles horarios de demanda para poder caracterizar de una mejor forma el impacto dinámico de la demanda de enfriamiento en el sistema eléctrico.

En cada uno de los sectores se consideró demanda de refrigeración y de aire acondicionado para deducir los perfiles horarios, lo cual se hizo con supuestos diferentes en cuanto a los momentos en que se utiliza electricidad por parte de los usuarios para satisfacer su demanda de enfriamiento.

Perfil de demanda de Refrigeración (dependiente de la temperatura)

Para el caso de los refrigeradores (neveras) y congeladores, se consideró un perfil de consumo basado en la temperatura exterior. Los perfiles de temperatura se construyeron a partir de la temperatura horaria de un día en particular en cada ciudad. La suma de los grados del día por ciudad se utilizó para normalizar el porcentaje de consumo horario. Finalmente, esta curva normalizada se utilizó para modular la demanda de refrigeración diaria de cada sector (residencial, comercial e industrial).

Figura 36. Curvas de demanda normalizadas, todos los sectores - refrigeración



Además, se consideraron los siguientes indicadores y supuestos, aplicados al inventario de gases de efecto invernadero de fuentes estacionarias de ciudades de Colombia:

- Número de hogares con nevera o refrigerador por ciudad.
- Potencia promedio de refrigerador/nevera: 0.071 KW
- Tiempo de operación: 24 horas por día
- Días de operación: 365 días al año

Perfil de demanda de Aire acondicionado (dependiente de las curvas eléctricas representativas de usuarios)

Dado la existencia de diversas curvas cluster representativas por tipo de usuario y región concluidas del proceso de caracterización (ver Anexo 5), se construyó primero una curva ponderada por región y sector según los pesos representativos de cada uno de los cluster, la que luego se utilizó para deducir los perfiles horarios de la demanda de aire acondicionado por región y sector. A continuación, se muestran las curvas resultantes por sector:

Figura 37. Curvas de demanda normalizadas, residencial - aire acondicionado

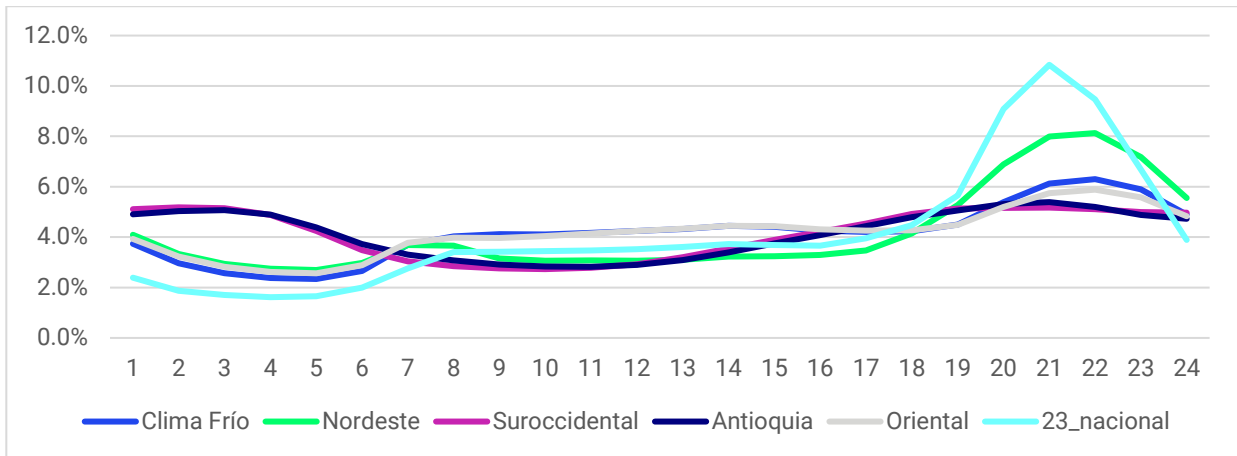


Figura 38. Curvas de demanda normalizadas, comercial - aire acondicionado

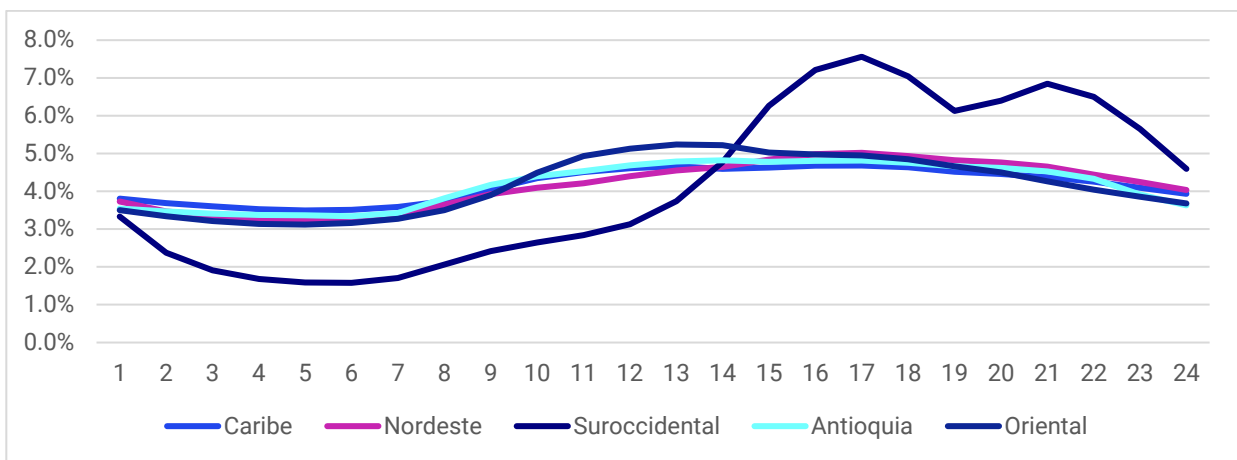
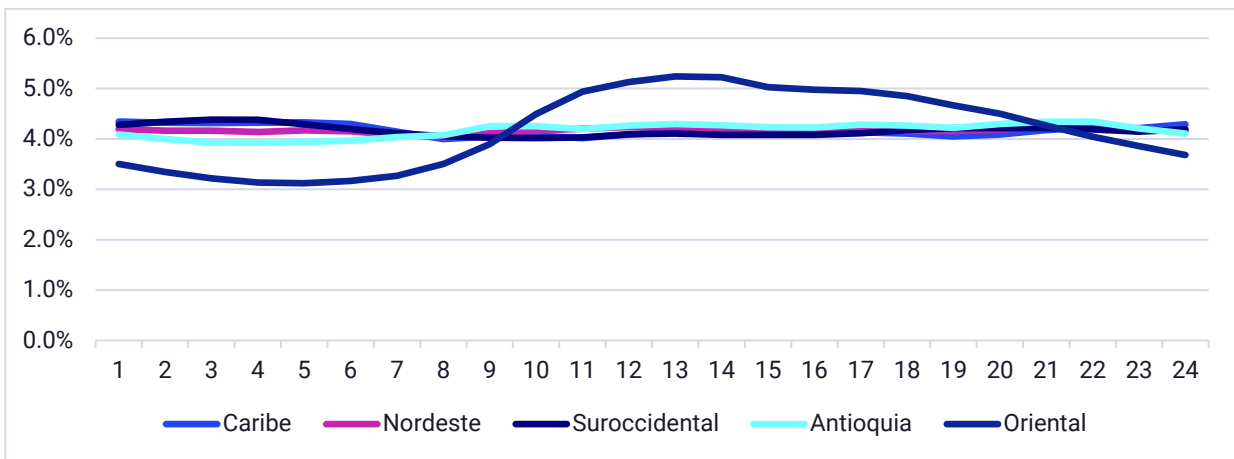


Figura 39. Curvas de demanda normalizadas, industrial - aire acondicionado



Anexo 7: Evaluación de tecnologías

Tabla 24. Evaluación de tecnologías de enfriamiento

Tecnología	Disponibilidad tecnológica	Potencial de reducción de la demanda	Provee flexibilidad a la red eléctrica	Barreras para la implementación ⁵	Total
A. Unidades de aire acondicionado/sistemas de refrigeración energéticamente eficientes	Alto (5)	Alto (5)	1/7 – Bajo (1)	Bajo (5)	16
B. Unidades de aire acondicionado con energía solar	Medio (3)	Alto (5)	1/7 – Bajo (1)	Medio (3)	12
C. Torres de refrigeración evaporativa	Alto (5)	Medio (3)	1/7 – Bajo (1)	Medio (3)	12
D. Bombas de calor	Alto (5)	Medio (3)	0/7 - Bajo (1)	Medio (3)	12
E. Distritos térmicos	Alto (5)	Medio (3)	6/7 – Alto (5)	Medio (3)	16
F. Sistemas de almacenamiento de hielo	Alto (5)	Medio (3)	6/7 – Alto (5)	Alto (1)	14
G. Tanques de almacenamiento de agua fría	Alto (5)	Medio (3)	6/7 – Alto (5)	Medio (3)	16
H. Materiales de cambio de fase (PCM) integrados con unidades de aire acondicionado	Medio (3)	Medio (3)	1/7 – Bajo (1)	Alto (1)	8
I. Sistemas de almacenamiento termoquímico (Refrigeración por adsorción)	Bajo (1)	Medio (3)	2/7 – Bajo (1)	Alto (1)	6
J. Controles inteligentes	Alto (5)	Medio (3)	4/7 – Medio (3)	Bajo (5)	16

⁵ A menor impacto de las barreras, mayor puntaje.

8. Referencias

- Climate Action Tracker. (2021). *CAT Climate Target Update Tracker Colombia*. Obtenido de <https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker/colombia/>
- DANE & UPME. (2019). *Uso de energéticos en el hogar*. Obtenido de Encuesta Nacional de Calidad de Vida.: https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/678/data-dictionary/F146?file_name=Uso%20de%20energ%C3%A9ticos%20del%20hogar
- Distritos Térmicos Colombia. (2023). *¿Quiénes somos?* Obtenido de Distrito Energético: <https://www.distritoenergetico.com/prueba/quienes-somos/>
- Distritos Térmicos Colombia. (2023). *Quiénes somos*. Obtenido de Distrito energético: <https://www.distritoenergetico.com/prueba/quienes-somos/>
- DNP, Enersinc. (2017). *Energy Demand Situation in Colombia*. Obtenido de Departamento Nacional de Planeación: <https://dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Demand%20Situation%20VF.pdf>
- European Commission. (2017). *G. Technology readiness levels (TRL)*. Obtenido de Horizon 2020, Work Programme 2016– 2017, 20. General Annexes: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/2016-2017/annexes/h2020-wp1617-annex-ga_en.pdf
- GIZ. (s.f.). *Country Data Sheet: Overview - Colombia*. Obtenido de Green Cooling Initiative: <https://www.green-cooling-initiative.org/country-data#!country-data-sheet/170/>
- GIZ. (s.f.). *Methodology*. Recuperado el 2022, de Green Cooling Initiative: <https://www.green-cooling-initiative.org/methodology>
- Gobierno de Colombia. (10 de Diciembre de 2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/informe-actualizacion-contribucion-determinada-Colombia-ndc-2020.pdf>
- Harris, J., & Diamond, R. (2011). *Practical Guide to Measuring and Verifying Energy Savings from Building Controls System*. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- IRENA. (2020). *Innovation Outlook: Thermal Energy Storage*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- King, J. (2018). *Energy Impacts of Smart Home Technologies*. Washington DC: American Council for an Energy-Efficient Economy.
- MGM Innova Energy Services & Ecologic. (Marzo de 2022). *Caracterización de fuentes de emisiones directas e indirectas de GEI de los sistemas de aire acondicionado y sistemas térmicos en el sector industrial y terciario, en diez (10) ciudades colombianas*.
- The Carbon Trust. (2022). *Decarbonising Singapore's Energy System in the context of cooling*. Singapore: WWF-Singapore.
- UNAL & Carbon Trust. (2022). *Caracterización de la demanda*. Bogotá: UPME.

- UPME. (09 de Enero de 2020). *Plan Energético Nacional - PEN*. Obtenido de Unidad de Planeación Minero-Energética.
- UPME. (2022). *Proyección Demanda Energía Eléctrica, Gas Natural y Combustibles Líquidos 2022-2036*. Obtenido de Unidad de Planeación Minero Energética:
https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe_proyeccion_demanda_energeticos.pdf
- UPME, IREES, TEP, Corpoema. (3 de Abril de 2019). *Balance de Energía Útil 2015. Primer balance de Energía Útil para Colombia y cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética*. Obtenido de
https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Presentacion.pdf
- XM. (2022). *Capacidad Efectiva Neta*. Obtenido de Reporte integral de sostenibilidad, operación y mercado 2021: <https://informeanual.xm.com.co/informe/pages/xm/21-capacidad-efectiva-neta.html>
- XM. (2022). *Demanda de potencia nacional*. Obtenido de Reporte integral de sostenibilidad, operación y mercado 2021: <https://informeanual.xm.com.co/informe/pages/xm/20-demanda-de-potencia-nacional.html>