

CO-T1501-P006

Estudio para diseñar una estrategia de mediano y largo plazo orientada a promover la gestión y aprovechamiento sostenible de los residuos asociados a instalaciones fotovoltaicas y vehículos eléctricos en Colombia

Producto 4 – Capitulo 3: Estimación de volúmenes



IDOM



TABLA DE CONTENIDO

3.1	INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS.....	5
3.1.1	<i>Contexto a nivel mundial</i>	5
3.1.2	<i>Contexto a nivel nacional</i>	8
3.1.3	<i>Estimación de volúmenes potenciales de residuos de instalaciones fotovoltaicas en el mediano y largo plazo en Colombia</i>	12
3.2	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	15
3.2.1	<i>Contexto a nivel mundial</i>	16
3.2.2	<i>Contexto a nivel nacional</i>	17
3.2.3	<i>Estimación de volúmenes potenciales de residuos de vehículos eléctricos en Colombia</i>	19
3.3	ANÁLISIS DE MERCADO DE RESIDUOS DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS Y VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN COLOMBIA.....	24
3.4	CONCLUSIONES	33
3.4.1	<i>Instalaciones fotovoltaicas</i>	33
3.4.2	<i>Vehículos eléctricos</i>	33
3.4.3	<i>Generales</i>	34

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Proyección acumulada global de capacidad de instalaciones fotovoltaicas	6
Tabla 2. Cantidades y tipo de residuo fotovoltaico	7
Tabla 3 Proyectos de generación de energía fotovoltaica y su capacidad instalada.....	8
Tabla 4 Porcentaje de mercado de paneles fotovoltaicos según la tecnología	12
Tabla 5 Tasa de reciclaje de los vehículos	12
Tabla 6 Tasa de deterioro de los paneles respecto a su edad.	13
Tabla 7 Composición de materiales de un panel solar promedio con peso de 20 kg	14
Tabla 8 Tasa de reciclaje de los vehículos	20
Tabla 9. Tabla relación de residuos generados por HEV-PHEV y VE.....	22
Tabla 10 Oferta de residuos según tipo de residuos	25
Tabla 11 Gestores nacionales e internacionales para el manejo de materiales provenientes de paneles fotovoltaicos 26	
Tabla 12 Costos asociados a materiales con potencial de reciclaje.....	28
Tabla 13 Tabla 13 Costos asociados a materiales con potencial de reciclaje.....	30

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proyección acumulada global de la capacidad de instalaciones fotovoltaicas	6
Figura 2 Estimación del volumen acumulado de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil en los cinco principales países en 2050.....	7
Figura 3 Capacidad Instalada Solar Fotovoltaica en ZNI	10
Figura 4. Nuevos proyectos de generación reportados por XM	11
Figura 5 Cantidad de paneles necesarios para generar 1 MW de energía a través de los años	13
Figura 6. Proyección de paneles fotovoltaicos fuera de servicio en escenario de tasa media (30%).....	14
Figura 7 Cantidad promedio de materiales aprovechados en el 2050	15
Figura 8. Tamaño de la flota global de vehículos eléctricos por tamaño y por mercado	16
Figura 9. Mercado histórico de vehículos eléctricos e híbridos en Colombia	18
Figura 10. Clasificación por tipología de vehículo eléctrico en Colombia.....	19
Figura 11. Número de vehículos eléctricos e híbridos vendidos hasta el 2020	20
Figura 12. Proyección de vehículos eléctricos fuera de servicio en escenario de tasa media (30%).....	21
Figura 13. Toneladas de residuos por material provenientes de vehículos eléctricos (año 2050)	23
Figura 14. Toneladas de residuos por material provenientes de vehículos híbridos (año 2050).....	24
Figura 15. Toneladas de residuos por material provenientes de vehículos híbridos enchufables (año 2050)	24
Figura 16 Tasa de aprovechamiento, y tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos y productos residuales generados	25
Figura 17 Valor potencial de materiales que podrían reciclarse al 2050	29
Figura 18. Mercado de materiales a reciclar provenientes de vehículos eléctricos.....	31
Figura 19. Mercado de materiales a reciclar provenientes de vehículos híbridos	31
Figura 20. Mercado de materiales a reciclar provenientes de vehículos híbridos eléctricos	32
Figura 21. Valores totales de materiales para vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables	32

3 ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES POTENCIALES DE RESIDUOS ASOCIADOS A INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS Y VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.

3.1 Instalaciones fotovoltaicas

La energía solar fotovoltaica ha crecido a un ritmo acelerados desde la década de los 2000, esto implica que a medida que aumente el mercado fotovoltaico mundial, también lo hará el volumen de residuos de paneles fotovoltaicos en desuso, con daños o fuera de servicio. Teniendo en cuenta esto, la vida útil esperada de los paneles fotovoltaicos es de 30 años, es decir, que para el año 2030 se prevén grandes cantidades de residuos a causa de este tipo de instalaciones.

Lo anterior, plantea un reto ambiental pero también oportunidades para crear valor y generar nuevas fuentes económicas. Entre ellas se encuentran la recuperación de materias primas, por ejemplo, el sector del reciclaje será esencial en la transición energética. El reciclaje de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil puede desbloquear una gran reserva de materias primas y otros componentes valiosos, lo que genera que las nuevas industrias puedan generar oportunidades de empleo en los sectores público y privado, incluso en el sector público pueden crearse puestos de trabajo en las administraciones locales responsables de la gestión de residuos (IRENA, 2016). Así que para aprovechar las ventajas de estas industrias, es preciso sentar las bases institucionales a tiempo para hacer frente al previsible aumento de los residuos de paneles. Para ello es necesario adoptar medidas políticas para afrontar los retos que generaran dichos residuos, adaptando los marcos propicios a las necesidades y circunstancias de cada región o país. En línea con esto, no solo es necesario hacer frente como instituciones públicas sino también conocer la línea base y los volúmenes de residuos que se esperan en el tiempo para delimitar y plantear metas, lineamientos y guías que permitan manejar dichos volúmenes y que sean acordes a la situación social y económica del país.

En general, a nivel mundial se prevé que los países con los objetivos fotovoltaicos más ambiciosos concentren la mayor parte de los residuos fotovoltaicos mundiales en el futuro, por lo que en 2030 los tres primeros países en cuanto a residuos fotovoltaicos acumulados serán China, Alemania y Japón y a finales de 2050 se prevé que China siga siendo el país que más residuos acumule, pero Alemania se verá superada por Estados Unidos, seguido de Japón e India. Por esto, la UE ha sido pionera en la normativa sobre residuos electrónicos fotovoltaicos, contemplando objetivos específicos de recogida, recuperación y reciclado, basados en el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) (IRENA, 2016).

3.1.1 Contexto a nivel mundial

Existen dos particularidades importantes para tener en cuenta en la estimación de generación de residuos de paneles fotovoltaicos, una es el crecimiento global en generación energética solar y otra su vida útil. A continuación, se mencionan las generalidades de estas características:

- Crecimiento global en la generación energética: Según la Agencia Internacional de Energía, la capacidad fotovoltaica global va a crecer de 1,4 GW en 2000 a 4,5 TW en 2050. Haga clic o pulse aquí para escribir texto. (Internacional Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program, 2018)
- Vida útil: Teniendo en cuenta que los paneles solares tienen una vida útil de 30 años y que su instalación inicio en el año 2000, se prevé que para el año 2030 se alcance una cifra de alrededor de los 8 millones de toneladas métricas de estos paneles y para el año 2050 de 80 millones de toneladas. (Internacional Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program, 2018)

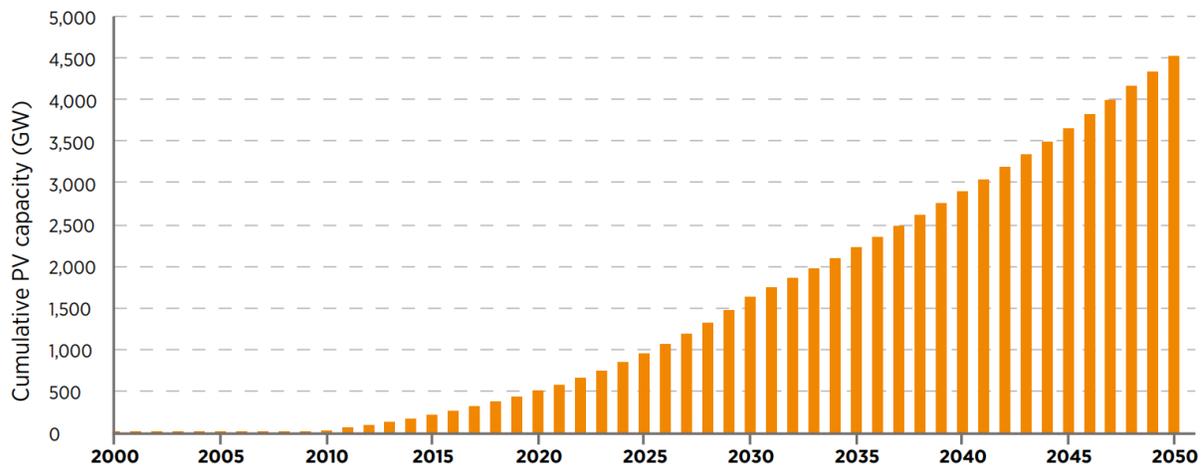
Ahora bien, en 2015 la capacidad para generar energía renovable incrementó en un 8,3%, la tasa de crecimiento anual más alta en los últimos años. Adicionalmente, los mercados tradicionales de los paneles fotovoltaicos como Europa y Norte América crecieron 5,2% y 6,3% en 2015 respectivamente. Por otro lado, América Latina creció a una tasa de 14,5% y Asia de 12,4%. A continuación, se muestran algunas proyecciones anuales y una gráfica de la proyección acumulada (capacidad) global del acelerado crecimiento de Instalaciones Fotovoltaicas:

Tabla 1. Proyección acumulada global de capacidad de instalaciones fotovoltaicas

Year	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cumulative installed PV capacity (GW)	222	511	954	1,632	2,225	2,895	3,654	4,512

Fuente: (IRENA, 2016)

Figura 1. Proyección acumulada global de la capacidad de instalaciones fotovoltaicas

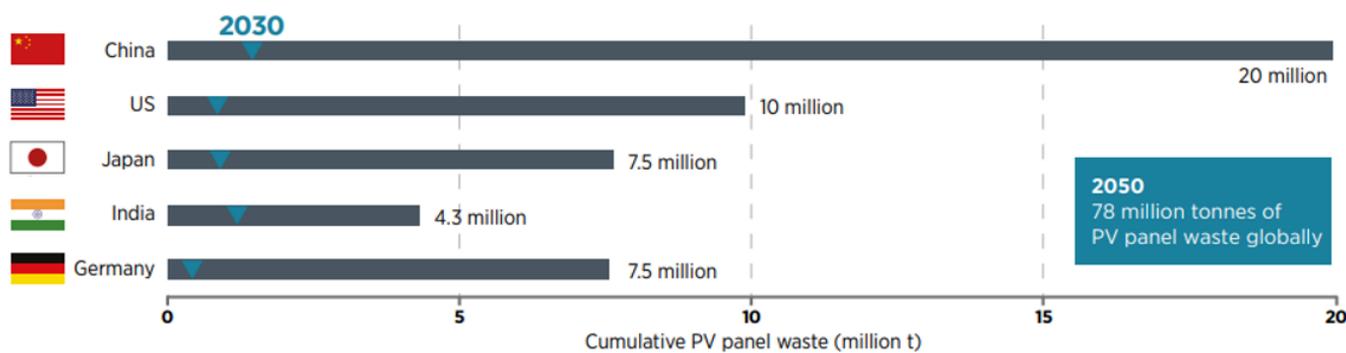


Fuente: (IRENA, 2016)

La característica principal de estos paneles instalados a nivel mundial, se basan en que son de primera generación, es decir tecnologías de silicio cristalino. En la mayoría de los países se han instalado principalmente en sistemas a gran escala (> 1 MW), particularmente desde mediados de la década de 2000. (International Energy agency Photovoltaic power systems program, 2018). Los tres principales países con mayores capacidades instaladas son China (32%), Estados Unidos (13%) y Japón (12%) (Nain & Kumar, 2022a).

Adicionalmente, la publicación del IRENA – “End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels” indica que los mayores flujos de residuos de paneles fotovoltaicos previstos para 2030 se encuentran en Asia, con hasta 3.5 millones de toneladas acumuladas y se prevé que Europa presente el segundo mayor mercado de residuos fotovoltaicos, con unos residuos previstos de hasta 3 millones de toneladas para 2030. De acuerdo con esto, se muestra a continuación la estimación del volumen acumulado de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil en los cinco principales países en 2050:

Figura 2. Estimación del volumen acumulado de residuos de paneles fotovoltaicos al final de su vida útil en los cinco principales países en 2050



Fuente: (IRENA, 2016)

Adicionalmente como se mencionó en el capítulo 1, las instalaciones fotovoltaicas se encuentran compuestas por:

- Generador fotovoltaico o celda solar o panel fotovoltaico.
- Sistema de Balance (Bos): Que está compuesto por, Regulador de carga, acumulador electroquímico (o baterías), inversor de corriente, unidad de control, estructura mecánica de soporte.

No obstante, por revisión bibliográfica, la mayoría de las investigaciones en el mundo, se encuentran enfocadas en el aprovechamiento y tratamiento del componente de los paneles fotovoltaicos debido a su complejidad en su tratamiento y por ser el más representativo en volumen. En cuanto a los demás componentes, no existe más información, más allá de ser clasificados como RAEEs.

Sin embargo, en estudios desarrollados se cuantifica por componente, los futuros residuos fotovoltaicos de los 69.7 GW reportados como principales proyectos fotovoltaicos (1 MW) en los EE. UU, tal y como se observa en la siguiente tabla: (Dominguez & Roland Geyer, 2019)

Tabla 2. Cantidades y tipo de residuo fotovoltaico

Tipo de residuo	Cantidad Millones de toneladas métricas (Mt)
Paneles fotovoltaicos	6.6
BOS	2.7
Inversores	0.3
Transformadores	0.2
Total, Residuos fotovoltaicos	9.8

Fuente: Elaboración propia, a partir de (Dominguez & Roland Geyer, 2019)

Esta información nos da una aproximación en cuanto a las proporciones de generación de residuos por componente, siendo los residuos de módulos fotovoltaicos (6.6 Mt) los más representativos con un 67% respecto al 100% (9.8 Mt) del total de los residuos fotovoltaicos. (Dominguez & Roland Geyer, 2019)

Por lo anterior, dado que los paneles solares representan un volumen mayoritario respecto a los demás componentes, la gran mayoría de las investigaciones en desarrollo y las ya existentes se encuentran más enfocadas en el aprovechamiento y tratamiento de estos. Por lo cual, las estimaciones en este informe estarán enfocadas en los paneles fotovoltaicos.

3.1.2 Contexto a nivel nacional

Es importante resaltar que, debido a su posición geográfica, Colombia cuenta con radiación solar prácticamente en lo ancho y largo del territorio nacional, por lo que el rendimiento de un panel solar puede generar energía hasta 12 horas continuas, y es por esta razón que se ubica en el top de países con mayor abastecimiento a nivel global (IRENA, 2019). A nivel de América Latina y el Caribe, Colombia es el segundo país que aparecen en el ranking del Índice de transición Energética del Foro Económico Mundial 2020, según este, el país subió 9 posiciones, al pasar del puesto 34 al puesto 25, en el último año. Después de Uruguay, Colombia es el segundo país de América Latina y el Caribe que aparece en este ranking, superando a países como Chile y Costa Rica. De esta manera Colombia se convierte en el país con los avances más significativos de América Latina.

Según estadísticas de la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) se evidencia que, de las iniciativas radicadas, el 88.3% tienen que ver con energía solar, en donde 9 de cada 10 propuestas para generar energía, usarán instalaciones fotovoltaicas. La UPME y el Ministerio de Minas y Energía estiman que para antes de 2030 cerca de 10% del consumo energético en Colombia va a provenir de proyectos fotovoltaicos o solares. (CELSIA, 2022)

Adicionalmente, el Global Solar Council estima que para el año 2023, se espera que el país quintuple su potencia fotovoltaica, para lo cual se han destinado incentivos específicos para emprendimientos y estandarizaciones de contratos por emprendimientos privados ya planificados.

Ahora bien, para realizar la estimación de cantidades de instalaciones fotovoltaicas en Colombia a finales de 2022, se realizó un mapeo general no solo de las grandes generadoras que entregan energía a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN), sino también la energía entregada a diferentes usuarios en las zonas no interconectadas (ZNI) y la generación o autogeneración de empresarios y personas naturales a lo largo del país que es llamada generación distribuida o descentralizada.

De acuerdo con lo anterior, según el Sistema de Información de Parámetros Técnicos de elementos del Sector Eléctrico Colombiano (PARATEC) de XM (Operador del Sistema y del Mercado eléctrico) la capacidad efectiva instalada a finales de 2022 fue de 278.66 MW. Esta capacidad instalada está dividida en dos tipos/fuentes de energía:

- Autogeneración: Proceso de producción de energía eléctrica cuya actividad principal es atender el consumo propio y que puede entregar sus excedentes de energía al Sistema Interconectado Nacional.
- Normal: Proceso de producción de energía eléctrica cuya actividad principal es entregar la energía al Sistema Interconectado Nacional.

Para finales del 2022 se encontraban registrados 5 proyectos de autogeneración y 21 proyectos normales, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 3. Proyectos de generación de energía fotovoltaica y su capacidad instalada

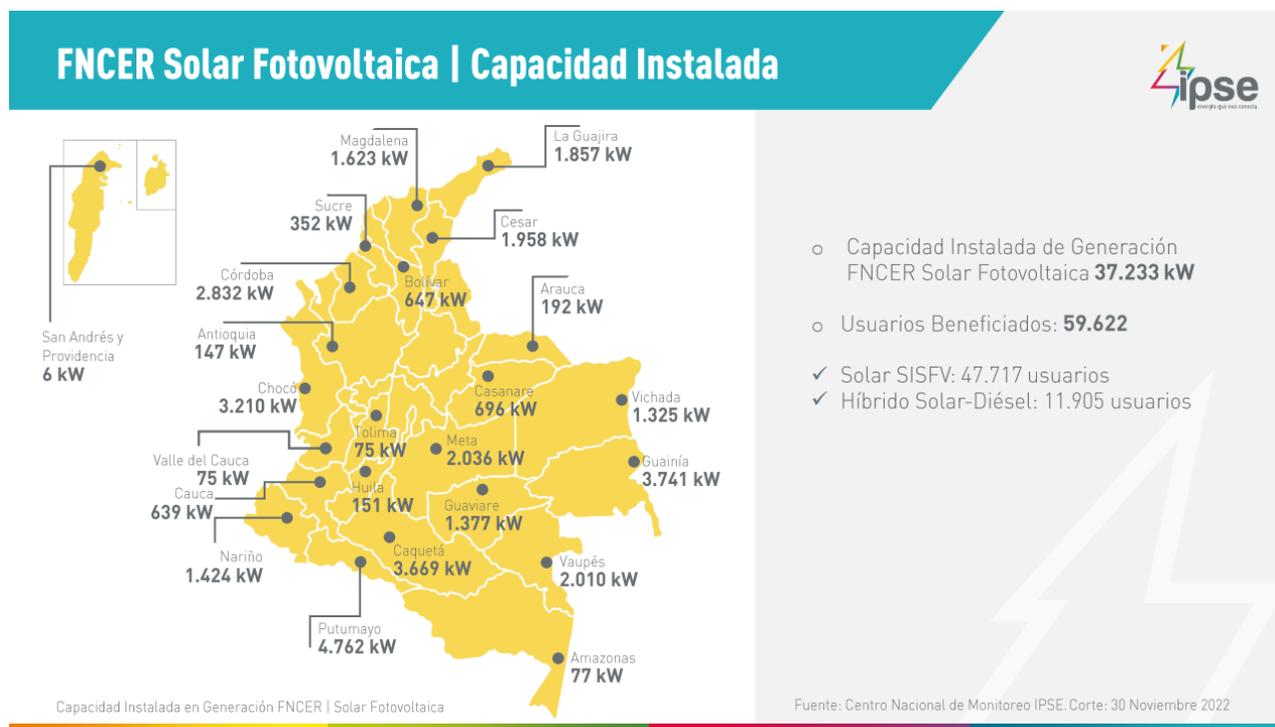
Tipo/Fuente de energía	Capacidad/Efectiva (MW)
AUTOGENERADOR	27.44
AUTOG CELSIA SOLAR HARINAS	2.45
AUTOG CELSIA SOLAR LEVAPAN	4.99
AUTOG CELSIA SOLAR YUMBO	9.80
AUTOG COLOMBINA DEL CAUCA	0.30
CELSIA SOLAR CARMELO	9.90
NORMAL	251.22

BOSQUES SOLARES DE LOS LLANOS 4	19.90
BOSQUES SOLARES DE LOS LLANOS 5	17.90
CELSIA SOLAR BOLIVAR	8.06
CELSIA SOLAR ESPINAL	9.90
CELSIA SOLAR LA PAILA	9.90
CERRITOS	9.90
GR PARQUE SOLAR TUCANES	9.90
GRANJA SOLAR BELMONTE	5.06
HELIOS I	16.00
LA MEDINA	9.90
LA SIERPE	19.90
LOS CABALLEROS	9.90
MONTELIBANO	9.90
PETALO DE CORDOBA I	9.90
PLANTA SOLAR BAYUNCA I	3.00
SINCE	18.50
TERMOTASAJERO DOS SOLAR	4.00
TRINA-VATIA BSLI	19.90
TRINA-VATIA BSLII	19.90
TRINA-VATIA BSLIII	19.90
TOTAL	278.66

Fuente: (XM, Parámetros Técnicos del SIN, 2022)

Adicionalmente, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas no Interconectadas (IPSE) en su último Boletín de Datos (Dic 2022) la capacidad instalada de generación de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), específicamente en el caso de energías solares fotovoltaicas fue de 37,233 kW para beneficiar a 59,622 usuarios en zonas no interconectadas (ZNI). (IPSE, 2022)A continuación, se encuentra un mapa geográfico de Colombia con la distribución de esta capacidad en los diferentes departamentos:

Figura 3. Capacidad Instalada Solar Fotovoltaica en ZNI



Por otra parte, en cuanto a generación distribuida para mayo de 2022 en el Cuarto Reporte Consolidado de Solicitudes de Generación Distribuida se encontraban 16,353 solicitudes, de las cuales 3,732 solicitudes de fuentes solares que actualmente se encuentran operación o aprobadas por la UPME. De estas solicitudes el informe muestra que existe una capacidad instalada de 264,152 kW, esto incluye temas de autogeneración y generación distribuida con excedentes y sin excedentes. (Generación Distribuida UPME, 2022)

Como se mencionó anteriormente para realizar la estimación de cantidades de instalaciones fotovoltaicas en Colombia se tuvo en cuenta la capacidad efectiva instalada a gran escala, la capacidad instalada en zonas no interconectadas (ZNI) y la capacidad instalada en generación distribuida, la sumatoria de estas tres fuentes de generación indican que al 2022 Colombia contaba con una capacidad instalada de instalaciones fotovoltaicas de 580,05 MW.

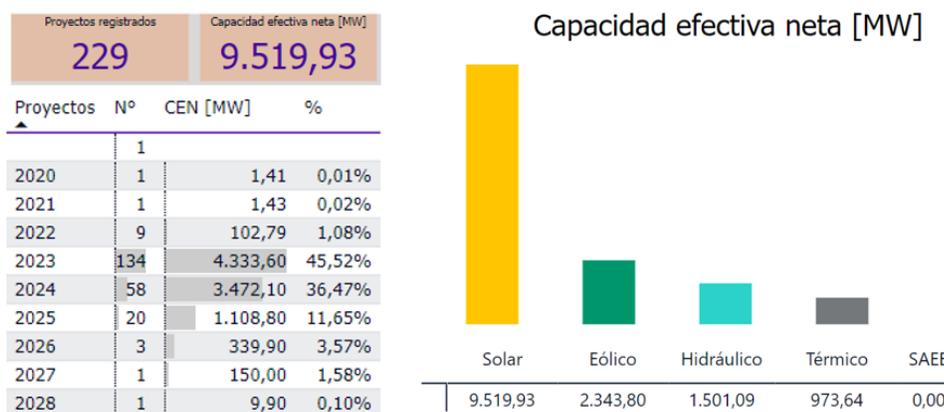
Ahora bien, la anterior información está enfocada en los proyectos y plantas que ya tienen operación comercial, en cuanto a aquellas de gran escala. Por el lado de la generación distribuida y la generación de ZNI se hace referencia a aquellas que ya están en marcha. No obstante, es importante conocer que según XM (Operador del Sistema y del Mercado eléctrico) en su Reporte de Proyectos SIN, actualizado a diciembre de 2022, informa que los proyectos de generación registrados al momento son 229 de los cuales 204 se encuentran con garantía, es decir, que son proyectos que se inscribieron ante la UPME y llevaron a cabo un proceso regulado donde garantizan la puesta en marcha de la capacidad que están solicitando inscribir. (XM, 2022) Lo anterior se encuentra estipulado por la Resolución CREG 075 de 2021 “Por la cual se definen las disposiciones y procedimientos para la asignación de capacidad de transporte en el Sistema Interconectado Nacional” en su artículo 24, que habla de la garantía para la reserva de capacidad donde se indica que el interesado deberá otorgar un instrumento financiero que garantice su cumplimiento, esto con el propósito de garantizar la utilización de la capacidad de transporte asignada para proyectos clase 1.

De acuerdo con lo anterior, del total de proyectos con garantía 134 proyectos entrarían en 2023. (XM, 2022) Sin embargo, se debe tener en cuenta que el ingreso de esos proyectos depende del suministro de equipos, que en su mayoría son proveedores extranjeros. También dependerá del funcionamiento de las plantas durante pruebas que por

diferentes factores pueden no cumplir con lo establecido en la regulación, CREG 060 de 2019 “Por la cual se hacen modificaciones y adiciones transitorias al Reglamento de Operación para permitir la conexión y operación de plantas solares fotovoltaicas y eólicas en el SIN y se dictan otras disposiciones”

En ese reporte también se evidencia información de varios proyectos que se han comprometido con el ingreso de energía solar hasta 2028. En este reporte habrá una capacidad efectiva neta adicional a la que ya hoy en día existe de 9519,93 MW de los cuales 4333,60 MW ingresarán al SIN y al mercado de energía en el 2023. A continuación, se muestra una gráfica de lo mencionado anteriormente:

Figura 4. Nuevos proyectos de generación reportados por XM



Fuente: (Reporte Proyectos SIN - XM, 2022)

Adicionalmente, para apoyar aún más la actividad, mediante el Decreto 829 de 2020, el Poder Ejecutivo hizo más expeditivo el acceso a los incentivos tributarios definidos en la Ley 1715 de 2014, al delegarle únicamente a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) la evaluación y certificación de proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía. Se trata de incentivos que tienen que ver con deducción adicional de renta, aplicable en un plazo de 5 años, de hasta el 50% del valor de las inversiones en esta materia, la exclusión de IVA por la compra de bienes y servicios y la eliminación de aranceles.

Ahora bien, como se mencionó en capítulos anteriores existen varios tipos de paneles fotovoltaicos, existen paneles a base de Silicio, existen de película delgada y otros con múltiples capas como los CIGS. Sin embargo, actualmente la mayoría de los paneles fotovoltaicos están centrados en la categoría de paneles a base de Silicio principalmente Monocristalinos. A continuación, se muestra una tabla con los porcentajes de mercado que ocupan los paneles fotovoltaicos por grupos tecnológicos:

Tabla 4. Porcentaje de mercado de paneles fotovoltaicos según la tecnología

Technology		2014	2020	2030
Silicon-based (c-Si)	Monocrystalline	92%	73.3%	44.8%
	Poly- or multicrystalline			
	Ribbon			
	a-Si (amorph/micromorph)			
Thin-film based	Copper indium gallium (di)selenide (CIGS)	2%	5.2%	6.4%
	Cadmium telluride (CdTe)	5%	5.2%	4.7%
Other	Concentrating solar PV (CPV)	1%	1.2%	0.6%
	Organic PV/dye-sensitised cells (OPV)		5.8%	8.7%
	Crystalline silicon (advanced c-Si)		8.7%	25.6%
	CIGS alternatives, heavy metals (e.g. perovskite), advanced III-V		0.6%	9.3%

Fuente: (IRENA, 2016)

Teniendo en cuenta lo anterior para la estimación de cantidades de instalaciones fotovoltaicas en Colombia se asume que la mayoría de los paneles fotovoltaicos actuales son basados en Silicio y Monocristalinos. Así mismo, según Energy Saving Trust un panel fotovoltaico genera alrededor de 355 W de energía con luz solar intensa. (Energy Saving Trust, 2022) Por lo cual, se estima que el número de paneles fotovoltaicos dada la capacidad instalada en Colombia (580.05 MW) a diciembre de 2022 fue de 1,633,944 paneles fotovoltaicos.

3.1.3 Estimación de volúmenes potenciales de residuos de instalaciones fotovoltaicas en el mediano y largo plazo en Colombia

El presente apartado desarrolla una estimación de los volúmenes por tipos de componentes y materiales potencialmente aprovechables asociados a las instalaciones fotovoltaicas. Como se mencionó anteriormente para realizar las proyecciones en el mediano y largo plazo era necesario conocer la capacidad instalada actual para así conocer el número de paneles fotovoltaicos que generaría residuos a futuro. Ahora bien, contando con la capacidad instalada base (Año 2022) y con base en el Plan de Expansión de Referencia de Generación-Transmisión desarrollado por la UPME en su Escenario Libre (2) se realizó el cálculo de los materiales aprovechables producto de la implementación de sistemas fotovoltaicos.

Con base en esta información, se proponen los supuestos probabilísticos necesarios para simular el deterioro de la infraestructura instalada, como lo es la tasa de reciclaje de los paneles, avances tecnológicos en la eficiencia de los mismos y la composición de los materiales para su construcción. A continuación, otros criterios que se tuvieron en cuenta:

- Se plantean 3 escenarios de simulación con base en la tasa de éxito de reciclaje de los paneles, un escenario optimista, uno medio y uno conservador, los cuales cuentan con los siguientes porcentajes de ejecución:

Tabla 5. Tasa de reciclaje de los vehículos

Escenario	Tasa reciclaje
Optimista	50%
Medio	30%
Conservador	10%

- Es importante tener en cuenta el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten aumentar la eficiencia energética de los paneles solares a través de los años. Por lo cual, con base en la información histórica del

avance tecnológico en los últimos 30 años, se define que en promedio los diferentes tipos de tecnología existentes aumentan su eficiencia en un 1% anual, lo cual es de vital importancia a la hora de realizar un modelo de deterioro puesto que cada vez serán necesarios menos paneles para general la misma cantidad de energía (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

A partir de esta información se puede simular el comportamiento de la cantidad de paneles que serían necesarios para la generación de una misma cantidad de energía (e.g. 1 MW) cómo se muestra en la siguiente figura:

Figura 5. Cantidad de paneles necesarios para generar 1 MW de energía a través de los años



Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, también se tuvieron en cuenta las tasas de deterioro de las instalaciones fotovoltaicas derivadas de la publicación del IRENA – “End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels” en la cual se asocian unos porcentajes de daño con base en la edad y vida útil de los paneles, estos permiten realizar una cuantificación de los elementos que se podrían llegar a deteriorar con base en su edad, tal y como se muestra a continuación:

Tabla 6. Tasa de deterioro de los paneles respecto a su edad.

Periodo (años)	Tasa deterioro
0-4	0,50%
5-11	2%
12-30	4%
>30	99,99%

Fuente: Elaboración propia a partir de (IRENA, 2016)

De acuerdo con informe “Renewable energy auctions in Colombia” de IRENA y USAID (IRENA; USAID, 2021), por cada MW instalado en Plantas Fotovoltaicas, se requieren: 70 toneladas de vidrio, 56 toneladas de acero, 47 toneladas de concreto, 19 toneladas de aluminio, 7 toneladas de silicio, 7 toneladas de cobre y 6 toneladas de plástico. Adicionalmente, se realiza una estimación de la composición porcentual de los materiales según el peso promedio de un panel (i.e. 20kg (Solar Store, 2023)), encontrando la siguiente distribución:

Tabla 7. Composición de materiales de un panel solar promedio con peso de 20 kg

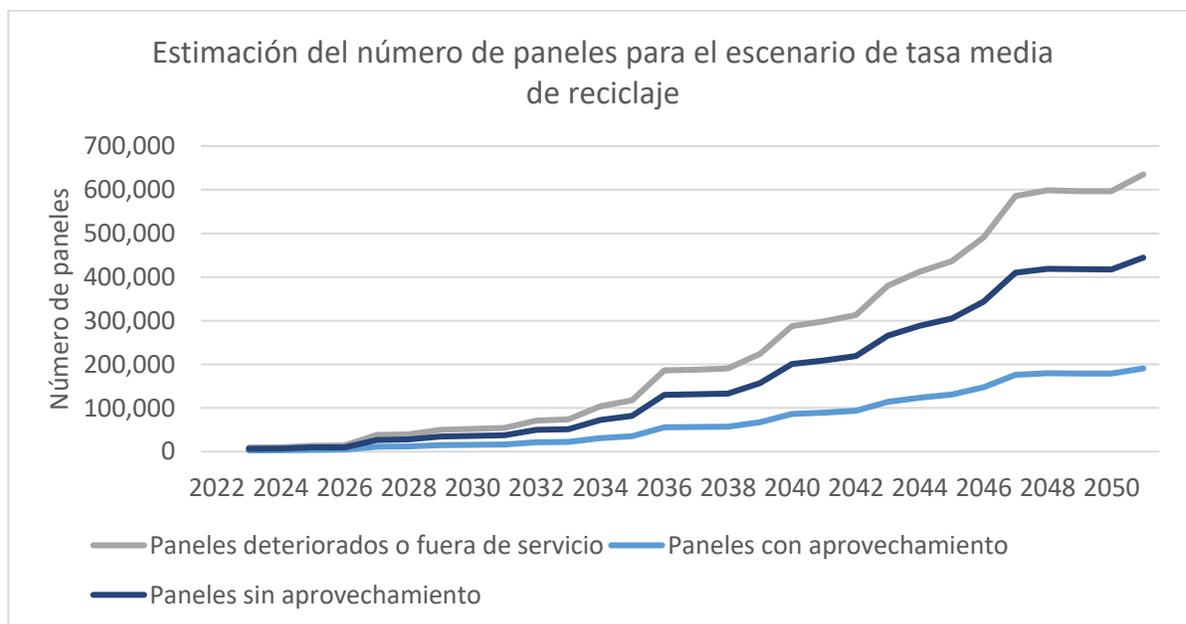
Material	Porcentaje
Vidrio	64.2%
Aluminio	17.4%
Silicio	6.4%
Cobre	6.4%
Plástico	5.5%
Concreto *	N/A
Acero *	N/A

*No se tienen en cuenta debido a que hacen parte del apoyo estructural

Con base en esta información, se realizó un modelo que tiene en cuenta la proyección de MW estimada anualmente y se convierten en número de paneles. Sin embargo, esto no es suficiente para estimar la cantidad de material reciclado año tras año, debido a que no es correcto afirmar que todos los paneles deteriorados tendrán una correcta disposición o aprovechamiento, por lo que se habían propuesto los 3 escenarios de reciclaje inicialmente planteados.

Con estos resultados se calcula la cantidad aproximada de toneladas para la fabricación de todos los paneles con base en la composición de materiales expuesta en la Tabla 7. Y se estima adicionalmente la proporción de los materiales que pasan por un proceso de aprovechamiento. A modo de ejemplo, se presenta la figura a continuación, en donde se refleja el comportamiento del deterioro de los paneles fotovoltaicos bajo el escenario medio de reciclaje. Bajo este escenario en 2050 habrá 7,065,271 paneles fotovoltaicos fuera de servicio, de los cuales 606,971 serán aprovechados y 6,458,301 sin ningún tipo de aprovechamiento.

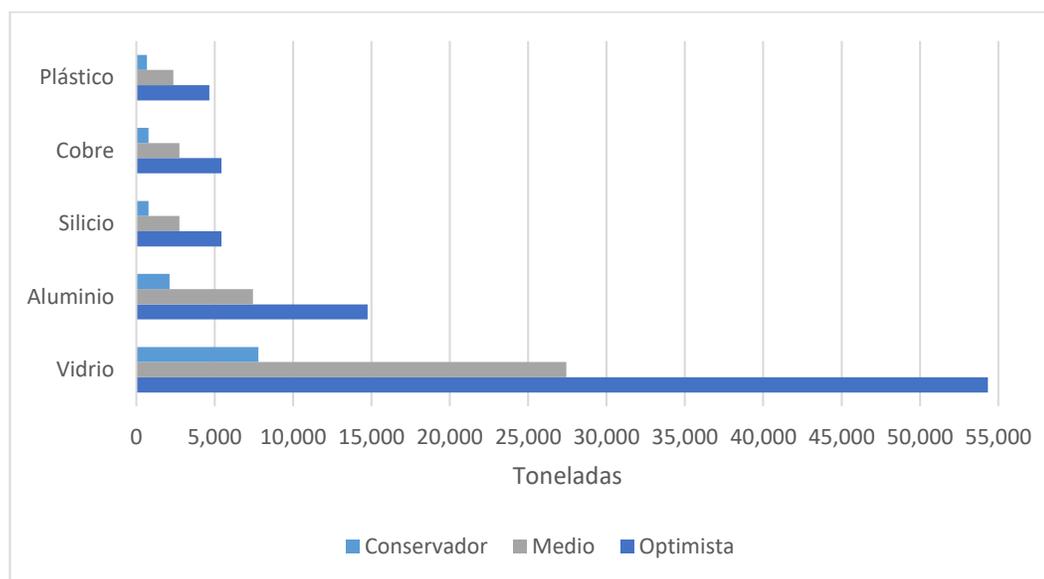
Figura 6. Proyección de paneles fotovoltaicos fuera de servicio en escenario de tasa media (30%)



Fuente: Elaboración propia

Con base en lo anterior se realizan las simulaciones de los 3 escenarios (conservador, medio y optimista). A continuación, se presentan los resultados de la media del modelo que representa la cantidad de materiales que se estarían aprovechando al 2050:

Figura 7. Cantidad promedio de materiales aprovechados en el 2050



Fuente: Elaboración propia

3.2 Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos son ficha clave para poder descarbonizar el transporte terrestre, un sector que representa el 16% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mundiales. En los últimos años se ha producido un crecimiento exponencial en la venta de vehículos eléctricos, junto con una mayor autonomía en las baterías, una mayor disponibilidad de modelos y un aumento de las prestaciones. La popularidad de los vehículos de pasajeros está en aumento, estimaciones hechas por la IEA (Agencia Internacional de Energía, por sus siglas en inglés) indican que cerca del 13% de los vehículos nuevos vendidos en 2022 fueron eléctricos; por lo cual, si se mantiene el crecimiento experimentado en los dos últimos años, las emisiones de CO₂ de los automóviles pueden situarse en una senda acorde con el Escenario de Cero Emisiones Netas para 2050¹. Sin embargo, los vehículos eléctricos aún no son un fenómeno global. Las ventas en los países en desarrollo y emergentes han sido lentas debido a los mayores costos de adquisición y a la falta de disponibilidad de infraestructuras de recarga.

Es preciso aclarar que el éxito de los vehículos eléctricos se debe a múltiples factores. El apoyo político sostenido es el pilar principal. A nivel global, el gasto público en subvenciones e incentivos a los vehículos eléctricos casi se duplicó en 2021, alcanzando los 30,000 millones de dólares. Un número creciente de países se han comprometido a eliminar progresivamente los motores de combustión interna o tienen ambiciosos objetivos de electrificación de vehículos para

¹ El Escenario de Cero Emisiones Netas para 2050 (NZE) es un escenario normativo de la IEA que muestra un camino para que el sector energético mundial alcance las emisiones netas cero de CO₂ para 2050, con las economías avanzadas alcanzando las emisiones cero netas antes que las demás. Este escenario también cumple los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas relacionados con la energía, en particular mediante la consecución del acceso universal a la energía para 2030 y mejoras importantes en la calidad del aire. Es coherente con la limitación del aumento de la temperatura mundial a 1,5 °C con un rebasamiento de la temperatura nulo o limitado (con una probabilidad del 50 %), en consonancia con las reducciones evaluadas por el IPCC en su Sexto Informe de Evaluación.

las próximas décadas. Mientras tanto, muchos fabricantes de automóviles tienen planes para electrificar sus flotas que van más allá de los objetivos políticos. Por último, en 2021 había cinco veces más modelos nuevos de vehículos eléctricos disponibles que en 2015, lo que aumenta su atractivo para los consumidores. El número de modelos de vehículos eléctricos disponibles en el mercado ronda los 450. (IEA, 2022)

Estos planes u objetivos ambiciosos de electrificación de vehículos por parte de gobiernos, sin duda favorecen el crecimiento de este mercado, lo cual a su vez plantea un reto ambiental por la demanda de materiales y recursos que esto implica. Sin embargo, este reto ambiental, debe ser visto como una oportunidad para crear valor y nuevos mercados, el reciclaje de baterías no solo previene la contaminación ambiental que puede causar su disposición, sino que es una oportunidad para producir un flujo secundario sostenible de materiales críticos. (Morse, 2021)

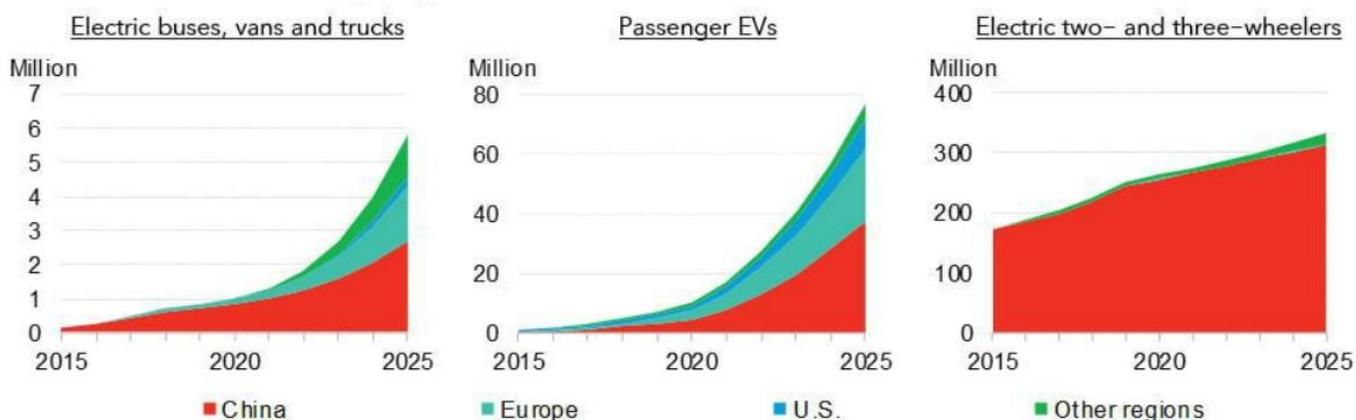
3.2.1 Contexto a nivel mundial

Las ventas de vehículos eléctricos se duplicaron en 2021 respecto al año anterior hasta alcanzar un récord de 6.6 millones. En 2012, solo se vendieron 120,000 en todo el mundo, mientras que, en 2021, se vendió más de esa cantidad cada semana. Casi el 10% de las ventas mundiales de coches eran eléctricos en 2021, cuatro veces la cuota de mercado de 2019. Esto elevó el número total de vehículos eléctricos en las carreteras del mundo a unos 16.5 millones, el triple que en 2018. Las ventas mundiales de coches eléctricos han seguido aumentando con fuerza en 2022, con 2 millones vendidos en el primer trimestre, un 75% más que en el mismo periodo de 2021. (IEA, 2022)

El aumento de las ventas de vehículos eléctricos en 2021 estuvo liderado principalmente por China, que representó la mitad del crecimiento. En 2021 se vendieron más vehículos en China (3.3 millones) que en todo el mundo en 2020. Las ventas en Europa siguieron creciendo con fuerza (un 65 % más, hasta 2.3 millones) tras el auge de 2020, y también aumentaron en Estados Unidos (hasta 630,000) tras dos años de declive. El primer trimestre de 2022 mostró tendencias similares, con un aumento de las ventas en China de más del doble en comparación con el primer trimestre de 2021 (lo que representa la mayor parte del crecimiento mundial), un aumento del 60% en Estados Unidos y un aumento del 25% en Europa. (IEA, 2022)

Estimaciones hechas por BloombergNEF (McKerracher, y otros, 2022) indican que en 2025 habrá 77 millones de vehículos eléctricos de pasajeros en la carretera, lo que representa el 6% del parque automotor. Algunas regiones van más deprisa: en ese año, los vehículos eléctricos representarán el 13% de todos los vehículos en circulación en China y el 8% en Europa.

Figura 8. Tamaño de la flota global de vehículos eléctricos por tamaño y por mercado



Source: BNEF. Note: Two-wheelers includes mopeds, scooters and motorcycles, excludes e-bikes.

Fuente: (McKerracher, y otros, 2022)

En términos de generación de residuos, de acuerdo con bibliografía internacional (Harper, y otros, 2019), se estima que un millón de vehículos eléctricos con un peso medio de 250 kg y un volumen medio de un metro cúbico de las baterías, supondrían cerca de 250,000 toneladas de residuos y medio millón de metros cúbicos de residuos de baterías cuando estos vehículos lleguen al final de su vida útil.

Asimismo, se prevé que más de 11 millones de toneladas de baterías de litio (LIB) gastadas se descarten para 2030, lo que representa un número total de 58 millones de unidades. Con una concentración de 8-15 kg de litio por batería, la implementación del reciclaje generaría hasta 58,000 toneladas de litio, lo que podría evitar la extracción de litio virgen y otros metales. (Malinauskaite, Anguilano, & Schmidt Rivera, 2021)

De acuerdo con (Chen, y otros, 2019), las baterías de litio (LIB) representan el mayor crecimiento y parte de las inversiones de la industria. A nivel mundial, las ventas de LIB aumentaron en un promedio del 16% por año desde 1996 hasta 2016. En 2016, el mercado global de LIB superó los \$20 mil millones a nivel de celda. Para 2025, se proyecta que alcance los \$40 mil millones, de los cuales más de \$15 mil millones provendrán del mercado de vehículos híbridos y eléctricos. Los paquetes baterías de litio al final de su vida útil generados entre 2015 y 2040 llegarán a 21 millones. Se espera que las LIB de estos vehículos duren al menos entre 8 y 10 años.

De acuerdo con (Chen, y otros, 2019), las baterías de litio (LIB) representan el mayor crecimiento y parte de las inversiones de la industria. A nivel mundial, las ventas de LIB aumentaron en un promedio del 16 % por año desde 1996 hasta 2016. En 2016, el mercado global de LIB superó los \$20 mil millones a nivel de celda. Para 2025, se proyecta que alcance los \$40 mil millones, de los cuales más de \$15 mil millones provendrán del mercado de vehículos híbridos y eléctricos. Los paquetes baterías de litio al final de su vida útil generados entre 2015 y 2040 llegarán a 21 millones. Se espera que las LIB de estos vehículos duren al menos entre 8 y 10 años.

Como se presentó en el capítulo anterior, las baterías de iones de litio pueden ser recicladas por tres medios: pirometalurgia, hidrometalurgia y reciclaje directo. La pirometalurgia consiste en fundir la batería en un horno a alta temperatura, recuperando sólo una fracción de los metales del cátodo. La hidrometalurgia implica un proceso de lixiviación química para precipitar los metales individuales. En la actualidad, la mayor parte del reciclado de baterías utiliza una combinación de pirometalurgia e hidrometalurgia, ya que se adaptan bien a una materia prima de celdas mal clasificadas. Estos métodos se basan en la recuperación de los metales más caros, en concreto el níquel y el cobalto, y a menudo el cobre y el aluminio. En la actualidad, la capacidad mundial de reciclado de baterías ronda las 200 kt/año, de las que aproximadamente la mitad corresponden a China. (IEA, 2022)

El reciclaje directo es un proceso emergente que ofrece una mayor eficiencia de reciclado, ya que no descompone el cátodo en elementos, sino que conserva la estructura cristalina del material y regenera el material del cátodo. De este modo, se conserva la energía y el valor económico integrados en el procesamiento del cátodo, evitando la necesidad de resintetizarlo a partir de materias primas. Es muy adecuado para cátodos que contienen pocos metales valiosos, como el LFP. Sin embargo, está limitado por su inflexibilidad, ya que debe adaptarse a cada química de cátodo, y los cátodos recuperados sólo pueden introducirse en la producción del mismo tipo de batería. (IEA, 2022)

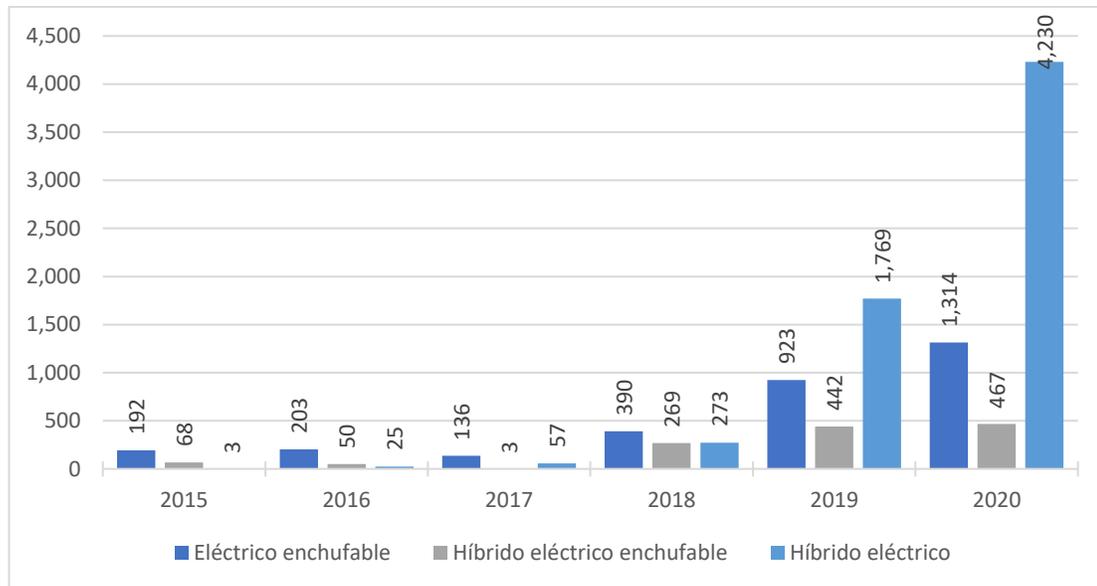
Una alternativa previa al reciclaje es el reuso de las baterías, generalmente en almacenamiento estacionario de energía. Las baterías usadas de los vehículos eléctricos suelen tener todavía alrededor del 80% de su capacidad útil, por lo que su reutilización genera un valor adicional. La reutilización requiere el desmontaje de la batería, la comprobación de los módulos/células y el reempaquetado en nuevas baterías para nuevas aplicaciones. (IEA, 2022)

3.2.2 Contexto a nivel nacional

En 2019 con el fin de orientar al país hacia la carbono-neutralidad, el Gobierno Nacional expidió la Ley 1964 de 2019, cuyo objetivo es generar esquemas de promoción de vehículos eléctricos y de cero emisiones, para contribuir a la movilidad sostenible y a la reducción de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero. Para efectos de su aplicación, se formuló la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, cuyo objetivo es definir las acciones que permitan acelerar la transición hacia la movilidad eléctrica, teniendo como meta la incorporación de 600,000 vehículos eléctricos a 2030 y para ello una de las principales acciones de la estrategia consiste en desarrollar instrumentos técnicos y tecnológicos para la disposición de vehículos eléctricos y sus componentes.

El mercado histórico de vehículos eléctricos e híbridos en el país se re refleja en la gráfica a continuación. Puede apreciarse que los vehículos híbridos eléctricos son los que presentan una tasa de crecimiento más acelerado desde 2018 en comparación con los híbridos enchufables y los eléctricos.

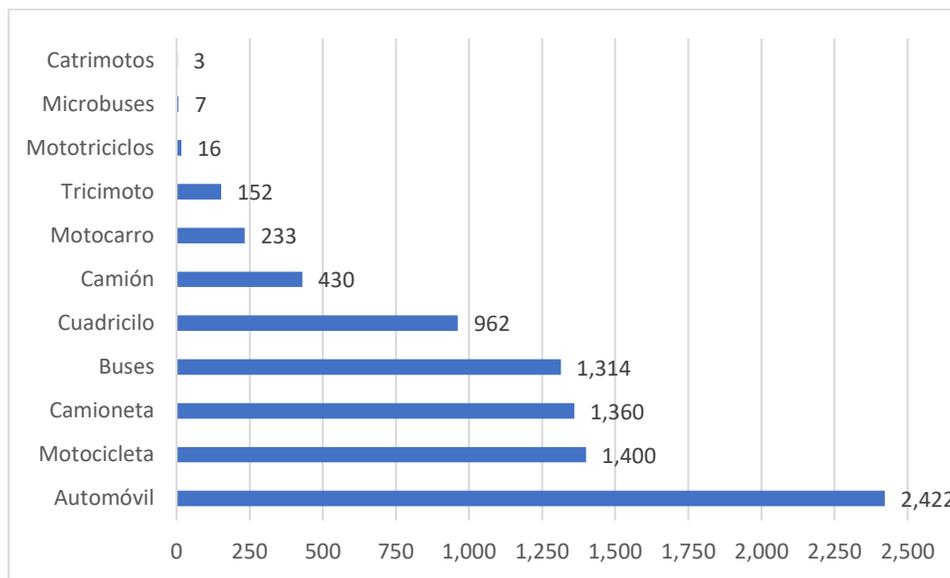
Figura 9. Mercado histórico de vehículos eléctricos e híbridos en Colombia



Fuente: (Cajamarca, 2021)

Según cifras del RUNT (Ministerio de Transporte, 2022), a junio de 2022 en Colombia había 8,299 vehículos eléctricos registrados. Las cinco principales regiones con mayor ingreso de vehículos eléctricos en Colombia son: Bogotá D.C. con 3,915, Antioquia con 2,522, Cundinamarca con 744, Valle del Cauca con 480 y Santander con 213. Durante el primer semestre de 2022 se registraron 1,891 vehículos eléctricos, en promedio 315 registros al mes. La distribución de VE por tipología se muestra en la gráfica a continuación:

Figura 10. Clasificación por tipología de vehículo eléctrico en Colombia



Fuente: (Ministerio de Transporte, 2022)

En cuanto a vehículos híbridos e híbridos enchufables, según el RUNT en Colombia al 30 de junio de 2022 había 36,219 registros para esta tipología de vehículo. Durante el primer semestre de 2022 los registros alcanzaron la cifra de 11,949, en promedio 1,991 registros mensuales.

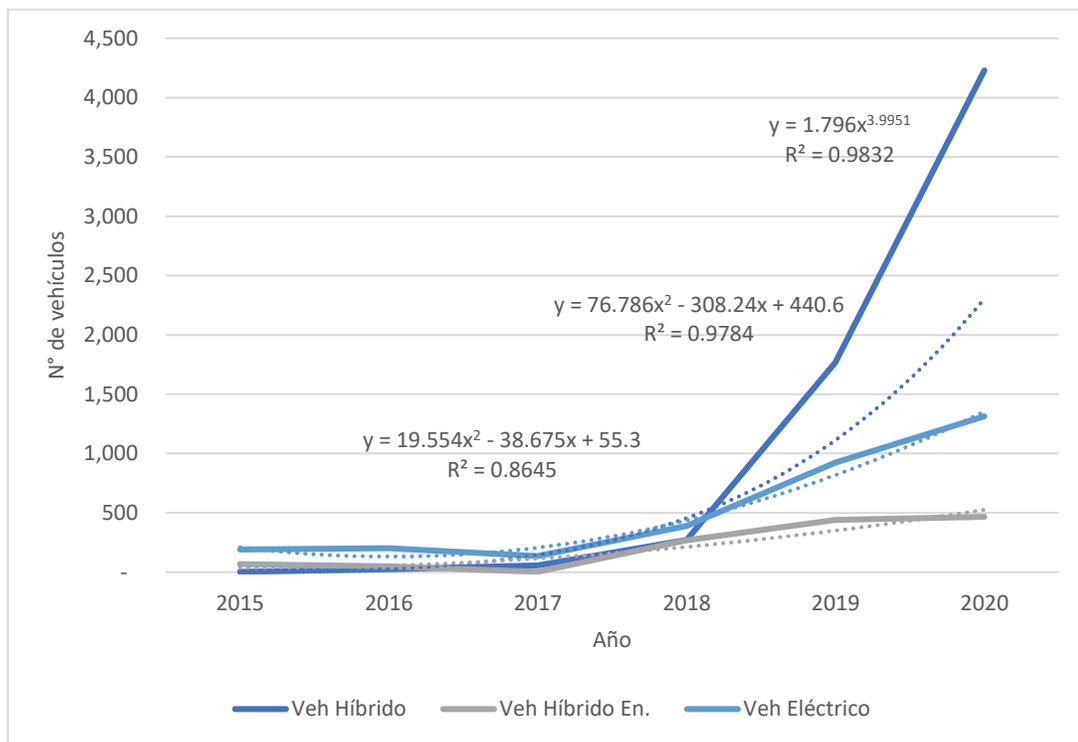
3.2.3 Estimación de volúmenes potenciales de residuos de vehículos eléctricos en Colombia

En primer lugar, para el cálculo de los materiales aprovechables producto de la producción y uso de vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables se debe realizar una proyección de la venta de este tipo de automóviles en el país. Para efecto del presente estudio se tiene en cuenta el comportamiento de las ventas de este tipo de vehículos por categoría desde el año 2015 hasta el año 2020.

Estos datos históricos permiten realizar una extrapolación de las ventas a través de los años de manera muy aproximada por medio de la ecuación de la curva con el R-cuadrado más cercano a uno, que directamente se traduce como la ecuación que mejor describe los datos hasta ese momento (RUNT, 2022) (Statista, 2021).

Con base en lo anterior, se procede a graficar y obtener estas líneas y sus respectivos R-cuadrado para realizar la extrapolación de la cantidad de vehículos que pueden ser vendidos a lo largo de los años, la cual, es más cercana al comportamiento real de las ventas y no de metas u objetivos planteados en la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica. Sin embargo, es necesario aclarar que esta estimación no tiene en cuenta factores demográficos ni macroeconómicos que pueden afectar directamente la adquisición de los vehículos a tan largo plazo.

Figura 11. Número de vehículos eléctricos e híbridos vendidos hasta el 2020



Fuente: Elaboración propia a partir de (Cajamarca, 2021)

Con base en esta proyección se deben establecer los supuestos de inicio para el modelo, como lo es la vida útil, tasas de deterioro, componentes o materiales necesarios para la construcción y escenarios de tasa de reciclaje de los mismos.

A continuación, se presenta un resumen de la línea base de supuestos para la construcción de las proyecciones de los tres tipos de vehículos:

- En primer lugar, se plantean 3 escenarios de simulación con base en la tasa de éxito de reciclaje de los vehículos deteriorados, los cuales cuentan con los siguientes porcentajes de ejecución:

Tabla 8. Tasa de reciclaje de los vehículos

Escenario	Tasa reciclaje
Optimista	50%
Medio	30%
Conservador	10%

Fuente: Elaboración propia

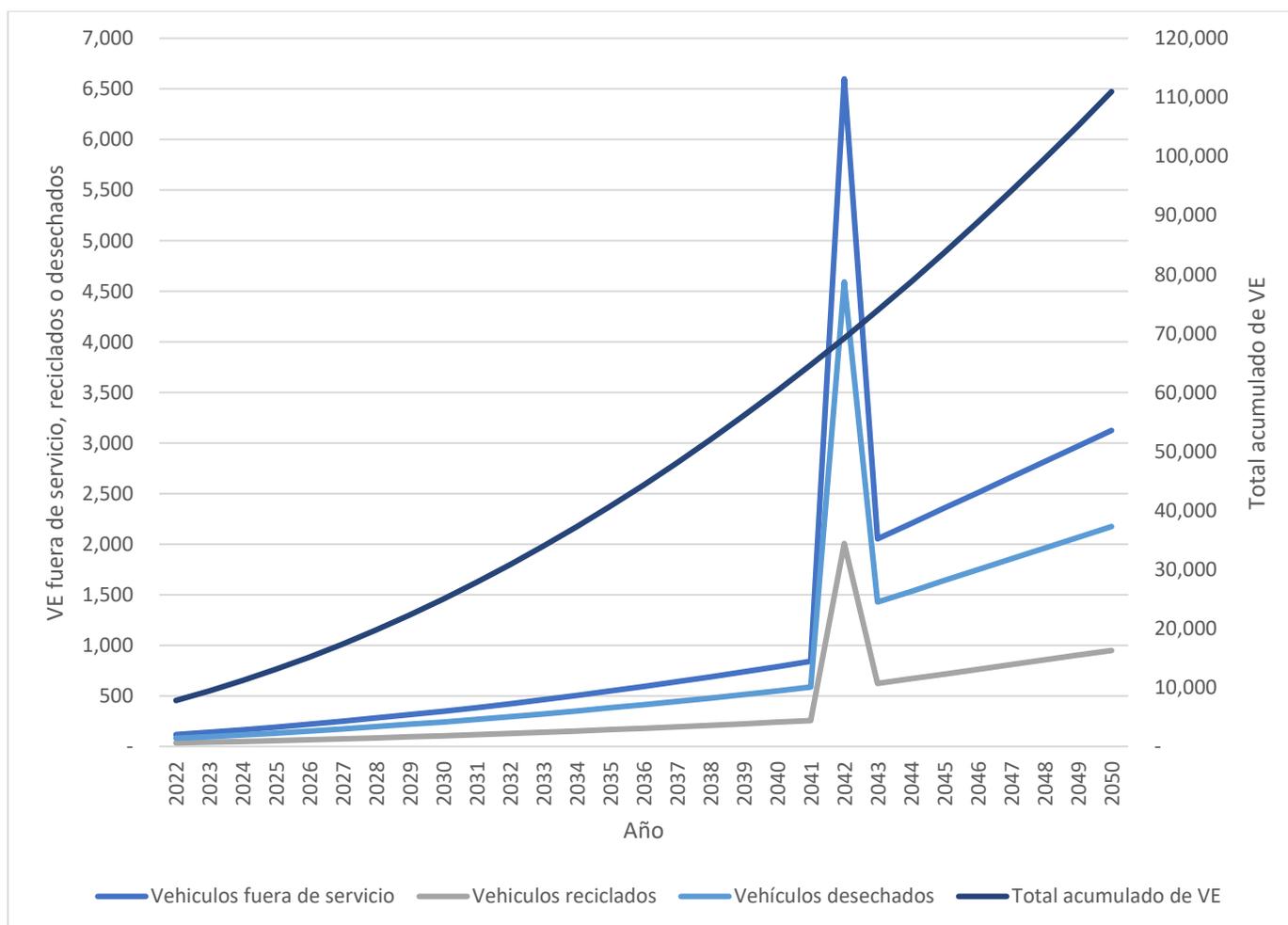
- Luego, se estima una tasa de deterioro con base en los incidentes que se puedan presentar por accidentes y/o defectos de fábrica, comenzando con base en los datos del Anuario de Siniestralidad Vial, que permite identificar una tasa de accidentes anual respecto a la cantidad de vehículos registrados, el número de accidentes y los automóviles involucrados en cada uno.
- Adicionalmente se tiene en cuenta que los vehículos pueden tener defectos de fábrica, por lo cual, con base en la revisión bibliográfica se ha encontrado que el consolidado del comportamiento de esta industria descrito en el documento Automotive Defect & Recall Report de la firma americana de inversión Stout (Stout, 2020), presenta 17 características de los vehículos y sus porcentajes de falla respecto a la salida de fábrica, el

promedio de estos inconvenientes se toma como un porcentaje de falla de fabricación (1,12%) y se procede a realizar una estimación de la probabilidad de falla de los vehículos anualmente con base en la posibilidad que existan daños irreparables por fabricación, por accidentes o por fabricación y accidentes.

- Con base en lo anterior, se toma como tasa de deterioro del modelo la probabilidad de que tenga accidentes y/o defectos de fabrica que da como resultado una tasa de 1.61% anual.

A modo de ejemplo, se presenta la figura a continuación, en donde se refleja el comportamiento del deterioro de los vehículos eléctricos bajo el escenario medio de reciclaje. Bajo este escenario en 2050 habrá 35,944 vehículos fuera de servicio, de los cuales 10,928 serán reciclados y 25,016 serán desechados sin ningún tipo de aprovechamiento.

Figura 12. Proyección de vehículos eléctricos fuera de servicio en escenario de tasa media (30%)



Fuente: Elaboración propia

Cómo se puede observar en la anterior figura, la tasa de vehículos fuera de servicio aumenta linealmente hasta el momento en que estos cumplen su vida útil final (20 años) en donde se asume un deterioro total de la flota restante y por ello se evidencia un pico entre el año 2040 y 2043.

Por otra parte, en términos de residuos y materiales, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada en el Capítulo 2, se presenta un estimativo de residuos generados por vehículos híbridos (HEV), vehículos híbridos enchufables (HEV) y

vehículos eléctricos (VE), entre los componentes de batería, infraestructura de batería, motor, BMS y electrónica de potencia.

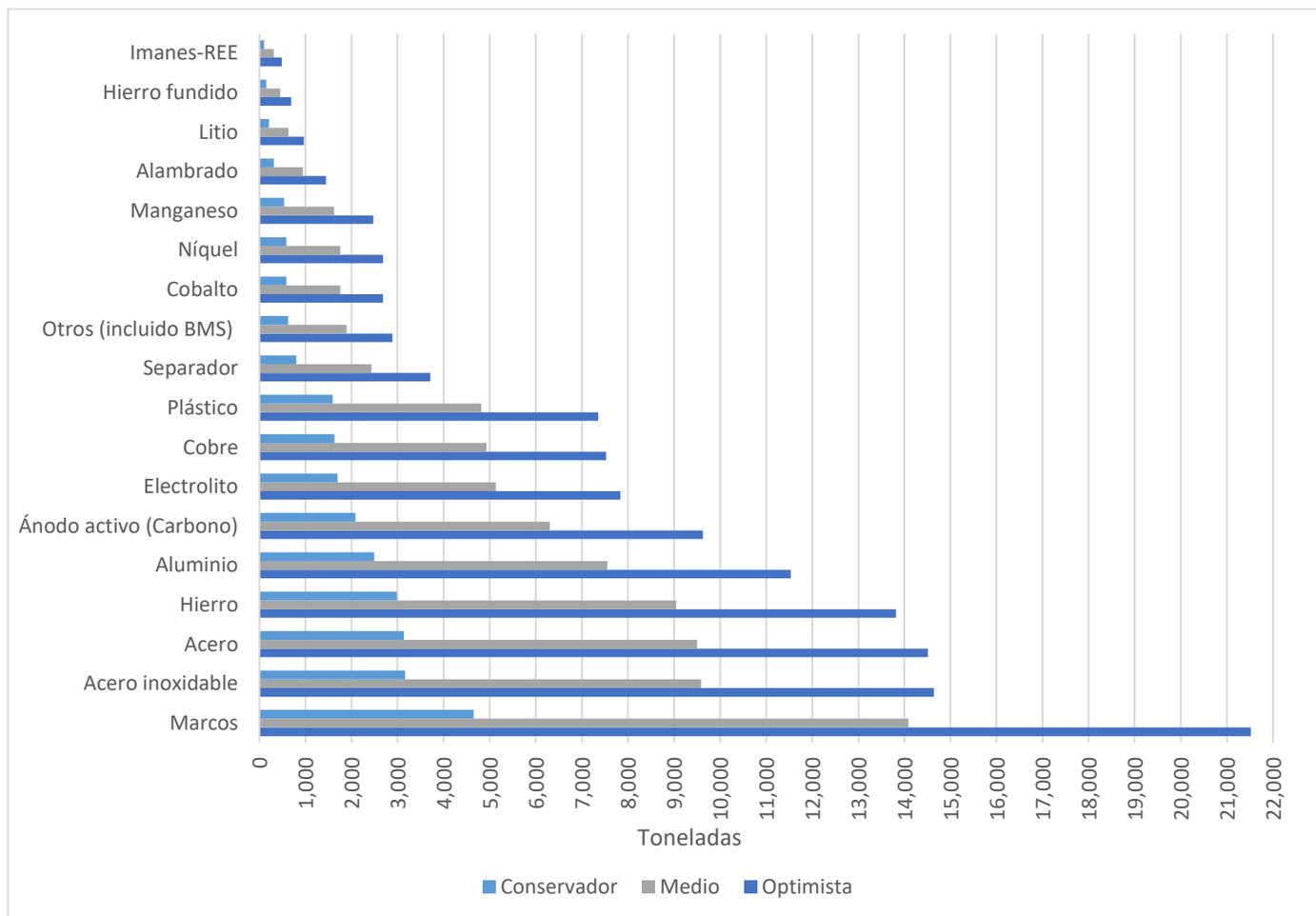
Tabla 9. Tabla relación de residuos generados por HEV-PHEV y VE

RESIDUOS	HEV Y PHEV		VE	
	Cantidad x Und (kg)	Porcentaje	Cantidad x Und (kg)	Porcentaje
Aleación absorbente de hidrógeno	6	2.1		0.0
Mezcla Níquel-Cobalto-Óxido de zinc	7.5	2.6	0.5	0.1
Níquel	4.5	1.6	11.7	2.3
Hierro	6	2.1	57.3	11.5
Acero	23.1	8.1	34.8	7.0
Acero inoxidable	61.8	21.7	63.9	12.8
Aluminio	10.4	3.6	33.72	6.8
Hierro fundido	0	0.0	3	0.6
Cobre	8.55	3.0	34.35	6.9
Cobalto		0,0	11.7	2.3
Cobre, oro, plata, plomo, talio, antimonio, estaño	0.5	0.2		0.0
Manganeso		0.0	10.8	2.2
REE (Tierras raras: neodimio, diprosio, praseodimio, terbio)	1.4	0.5	2.1	0.4
Hidróxido de potasio	0.75	0.3		0.0
Hidróxido de sodio	0.75	0.3		0.0
hidróxido de litio	4.5	1.6		0.0
Litio	4.2	1.5	4.2	0.8
Polímeros	0.6	0.2		0.0
Elastómeros	0.1	0.0		0.0
Líquidos	7.7	2.7		0,0
Marco y carcasa	93.9	32.9	93.9	18.8
Plástico	32.1	11.3	32.1	6.4
Separador (cerámica)		0.0	16.2	3.2
Electrolito (solvente)		0.0	34.2	6.9
Material del ánodo activo (carbono)		0.0	42	8.4
Alambrado		0.0		0.0
Otros incluido BMS (cables)	10.8	3.8	12.6	2.5
Total	285.15		499.07	

Fuente: Elaboración propia a partir de: (Elwert, y otros, 2016)

Una vez definidos las proyecciones de vehículos y los porcentajes de materiales, es posible entonces hacer la estimación de los volúmenes potenciales de residuos (por material) que se generarían y probablemente se reciclarían en el largo plazo (2050) en Colombia. A continuación, se presentan los resultados para cada uno de los tipos de vehículos analizados (eléctricos, híbridos, e híbridos enchufables):

Figura 13. Toneladas de residuos por material provenientes de vehículos eléctricos (año 2050)



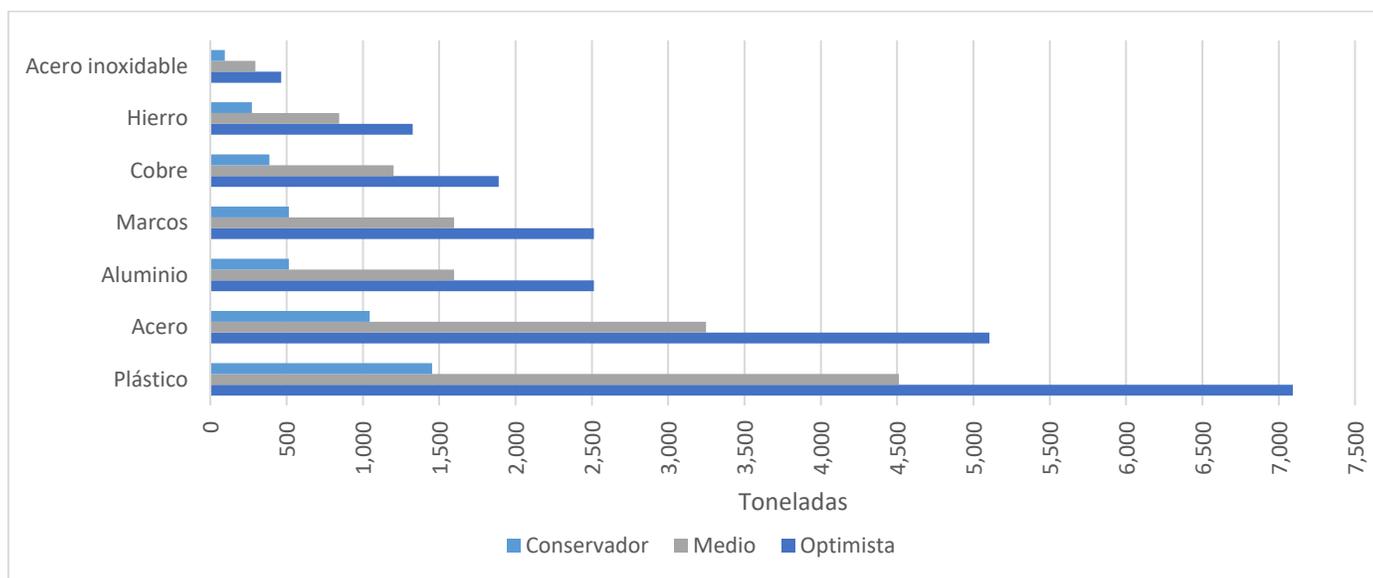
Fuente: Elaboración propia

Como puede apreciarse en la figura anterior para el caso de los vehículos eléctricos los materiales que representan una mayor cantidad de residuos generados y reciclados al 2050 son los contenidos en los marcos², el acero inoxidable y el acero. Así mismo, se evidencia que para el año 2050 en un escenario conservador se reciclarán 9,502 ton de acero, 9,588 ton de acero inoxidable y 14,090 ton de marcos.

Los anteriores valores son representativos para los vehículos eléctricos, sin embargo, esto mismo sucede para vehículos híbridos e híbridos enchufables, como se observa en la siguiente figura para vehículos híbridos al año 2050 se espera tener una mayor cantidad de residuos a reciclar de plástico, acero y aluminio. Mientras que, para los vehículos híbridos enchufables será el hierro, el acero inoxidable y el cobre. De igual forma, se estima que para el año 2050 en un escenario conservador se reciclarán 4,500 toneladas de plástico, 3,246 toneladas de acero y 1.598 toneladas de aluminio provenientes de vehículos híbridos y 58 ton de hierro, 42 de acero inoxidable y 20 de cobre de vehículos híbridos enchufables.

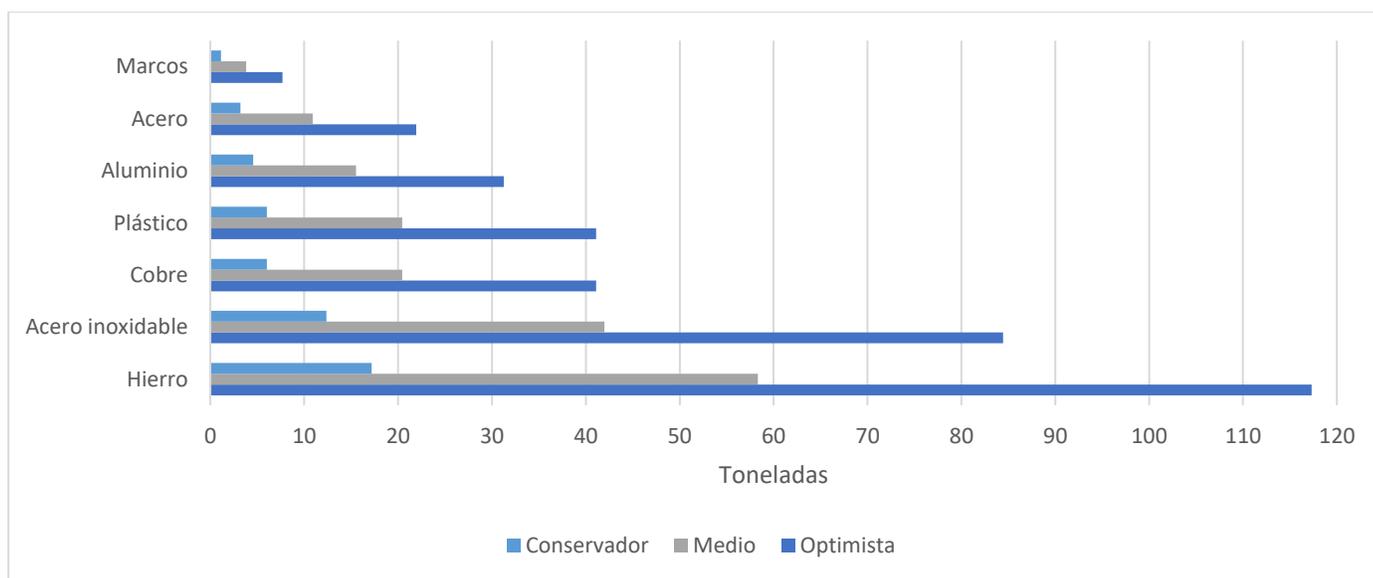
² Pueden ser de acero o de aluminio, dependiendo del fabricante y el modelo.

Figura 14. Toneladas de residuos por material provenientes de vehículos híbridos (año 2050)



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Toneladas de residuos por material provenientes de vehículos híbridos enchufables (año 2050)



Fuente: Elaboración propia

3.3 Análisis de mercado de residuos de instalaciones fotovoltaicas y vehículos eléctricos en Colombia

Según la Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales – residuos sólidos (CAEFM-RS) 2019-2020 la oferta de residuos sólidos y productos residuales derivados de los procesos de producción, consumo y acumulación ascendió a 26.25 millones de toneladas en 2020. Así mismo, la utilización de residuos sólidos y productos residuales en los procesos de producción de las actividades económicas y exportaciones representó el 55.8%, y en los procesos de acumulación en vertederos controlados representó el 43.5% de la utilización total. De igual manera, los flujos de residuos hacia el ambiente representaron el 0.7% del total de la utilización.

A continuación, se muestran algunos datos estadísticos de la gestión de residuos general en Colombia para el año 2020:

Tabla. 10 Oferta de residuos según tipo de residuos

Tipos de residuos	Toneladas	Variación anual	Contribución a
	2020 ^P	2020 ^P / 2019 (%)	variación anual (pp)
Químicos y sanitarios	479.612	-21,7	-0,6
Radiactivos			
Metálicos	396.461	-18,2	-0,4
No metálicos reciclables	1.844.920	41,7	2,4
Vehículos y equipos descartados	11.679	-21,4	0,0
Animales y vegetales	7.190.182	-4,6	-1,5
Mixtos y comerciales	11.600.849	-0,2	-0,1
Minerales y tierra	7.387	-33,1	0,0
De la combustión	139	21,7	0,0
Otros residuos	1.117.469	-10,8	-0,6
Oferta total de residuos	22.648.697	-0,8	-0,8

Fuente: (DANE, 2002)

Adicionalmente, se evidencia una tasa de crecimiento al pasar los años lo que indica que el reciclaje está mejorando al pasar de los años como se muestra en la siguiente figura:

Figura 16. Tasa de aprovechamiento, y tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos y productos residuales generados



Fuente: (DANE, 2002)

Teniendo en cuenta lo anterior y las estimaciones de volúmenes de residuos generados por paneles fotovoltaicos se realizó un mapeo de gestores y transformadores de diferentes materiales que componen los residuos de paneles fotovoltaicos, el cual se muestra a continuación:

Tabla 11. Gestores nacionales e internacionales para el manejo de materiales provenientes de paneles fotovoltaicos

	Acero	Cobre	Bronce	Aluminio	Metales no Ferrosos	Metales Ferrosos	Oro	Plata	Rodio	Platino	Paladio	Vidrio	Zinc	Chatarra	RAEE	RESPEL	Paneles Solares	Baterías
Gestores de materiales en Colombia																		
Revivemetal		X		X										X	X			
Fundimetal					X													
Sitekol							X	X	X	X	X							
Scrap Col															X	X		
Metales Chabur												X		X				
Metales Gilsa	X	X	X	X														
Excedentes y metales					X	X												
Ingerecuperar	X	X		X									X					
Santa Marta Sostenible	X	X	X															
Greenmetal	X	X	X	X														
Orinoco Escrap S.A.S															X			
Belmont Trading Colombia															X			
OCADE S.A.S															X			
Ecometal JR						X									X			
Chatarrerías Bogotá	X	X	X															
Lito S.A.S				X											X	X		
Innova S.A.S ESP				X											X		X	
Resiter Colombia															X	X		
Altero																		X
Gestores de materiales Internacionales																		
PV Cycle Global Membership																	X	
Fortech																		X
Ganfeng Lithium México																		X

Desde IDOM se realizó un acercamiento con algunos de estos gestores, principalmente aquellos que tenían interés en incorporar a sus procesos materiales contenidos en paneles fotovoltaicos, a continuación, se muestra un poco de sus avances y en aprovechamiento de residuos de instalaciones fotovoltaicas y baterías de vehículos eléctricos:

Innova S.A.S:

Son gestores de residuos, tienen su planta principal en Yumbo, una bodega de almacenamiento en Pasto y otra en Bogotá. Fue la primera empresa (2012) en hacer gestión de residuos con mercurio, así mismo, desmercurizan los bombillos y aprovechan el bronce de los mismos. Años después se enfocaron en RAAES y en el año 2020 obtuvieron la certificación para aprovechar baterías de litio entre otras, esto les permite hacer la recepción de baterías vehiculares de diferentes marcas incluido el Sistema de Gestión de Baterías (BMS).

Actualmente, desarrollan investigación para el aprovechamiento de baterías de petroleras.

Su proceso general para el aprovechamiento de estos materiales es en principio una segregación de los materiales y la posterior verificación de la viabilidad de su aprovechamiento. Así mismo son desarrolladores de nuevas tecnologías y están en constante búsqueda de formas de aprovechamiento de materiales que actualmente no lo tienen.

Normalmente Innova S.A.S entrega las baterías de plomo a otros gestores y ellos se encargan principalmente del transporte, en este caso con contenido peligroso. Para los componentes de las instalaciones fotovoltaicas comúnmente recolectan convertidores y paneles fotovoltaicos. Los convertidores los están manejando como RAEE y principalmente los incluyen dentro de programas posconsumo. En cuanto a los paneles fotovoltaicos, aprovechan solo el cuerpo del panel que es aluminio y actualmente están buscando nuevas formas de aprovechar otros tipos de materiales encontrados dentro de los mismos ya que se ha evaluado temas de incineración y por el contenido de metales pesados se pueden generar emisiones contaminantes al ambiente. Sin embargo, al momento los materiales que no utilizan van a celda de seguridad de externos e Innova S.A.S no paga por los materiales del panel fotovoltaico, por el contrario, cobra una tarifa para su disposición segura.

LITO SAS:

Lito cuenta con sedes en Cali, Medellín, Bucaramanga, Bogotá y Barranquilla, principalmente en la sede de Bogotá han manejado residuos de instalaciones fotovoltaicas y baterías de vehículos eléctricos. El “core” de su negocio se centra en residuos o excedentes industriales, cables, cobre, aluminio, metales ferrosos y no ferrosos, encauchetado y residuos de alumbrado público. En su sede de Bucaramanga, cuentan con una planta de clasificación de material terminado, donde realizan desensamble de RAEE, lo cual al momento es un proyecto piloto y que busca expandirse a Bogotá, con esto por ejemplo aumentaría la probabilidad de aprovechamiento de más materiales contenidos en los paneles fotovoltaicos.

Sin embargo, se han encontrado con componentes que a pesar de ser desensamblados cuentan con dificultades para su aprovechamiento como la separación del vidrio y el film de plástico, que así logró separarse queda con restos de pegante lo que contamina el material a la hora de un proceso de reciclaje. La solución a la que han llegado con los componentes de vidrio ha sido un envío a co-procesamiento para generación energética de hornos en escombreras o destrucción para uso como agregado de RCD. Además de estar buscando formas de aprovechamiento de los materiales contenidos en los paneles fotovoltaicos, han realizado avances con modelos de reacondicionamiento mediante componentes que permiten alargar vida útil de los mismos.

Finalmente, en cuanto a los residuos de vehículos eléctricos principalmente las baterías, manejan el aprovechamiento de baterías de plomo, litio, litio-ión, litio-cadmio, litio-polímero, entre otros. Estos residuos normalmente los manejan con procesos nacionales y otras van a exportación. Sin embargo, la mayoría son procesos tercerizado, donde Lito S.A.S realiza la recolección y almacenamiento de los mismos.

RESITER COLOMBIA:

Principalmente son gestores de residuos aprovechables y peligrosos, tienen operación en Cali, Barranquilla, Medellín y Bogotá. Actualmente en Colombia no han tenido avances en el tema, pero lo han manejado en otras de sus sedes a nivel LATAM. Resiter ha desarrollado el aprovechamiento de residuos fotovoltaicos en Chile y cuenta con un contrato

marco con Acciona en Colombia para gestionar los residuos de 3 parques solares incluidas baterías y paneles fotovoltaicos.

Adicionalmente, se realizó un estudio de mercado de reciclaje de los diferentes materiales y componentes tanto de paneles fotovoltaicos como de baterías de vehículos eléctricos donde se encontró lo siguiente:

Paneles fotovoltaicos

- En Colombia internamente no se cuenta con un mercado para las rejillas de plata, el relleno de silicona, el estaño, el silicio, el plomo, el selenio, el galio, el indio, el cadmio ni el telurio.
- El material de paneles fotovoltaicos que mejor valor tiene en el mercado del reciclaje interno en Colombia es el cobre con un valor de \$34.314/Kg y el material con menor valor comercial es el vidrio con un valor de \$169/Kg
- De los materiales que internamente no tienen manejo y a nivel internacional sí son la rejilla de plata, el plomo, el selenio y el cadmio, por lo cual podría pensarse que existe una exportación de dichos materiales en cuanto la normativa lo permita

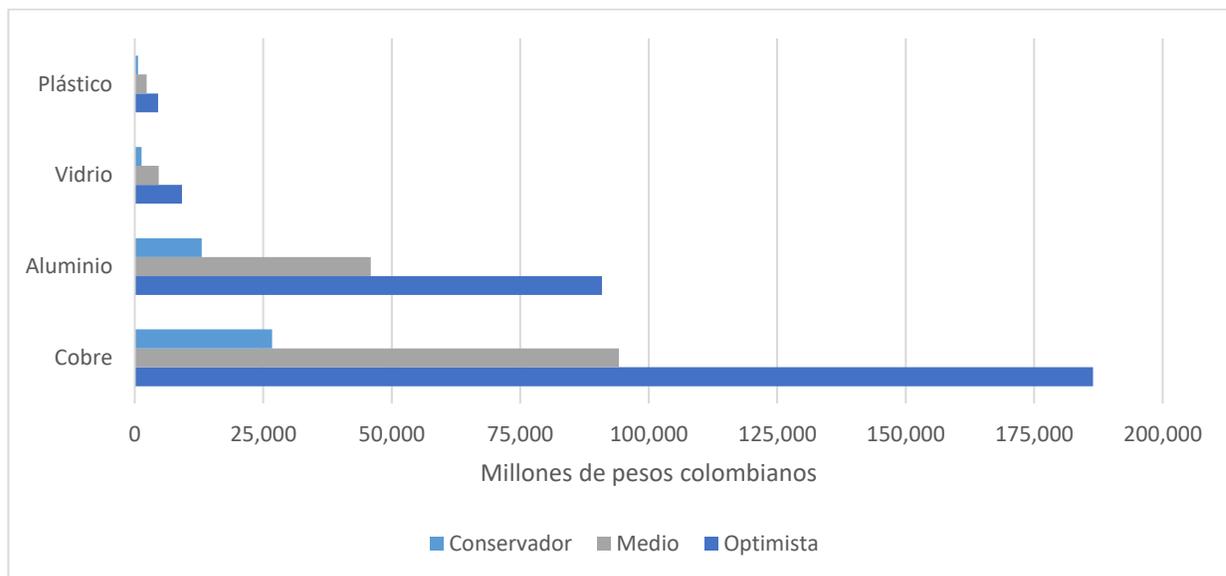
A continuación, se muestra una tabla con los precios a diciembre de 2022 de los materiales que pueden comercializarse en el mercado del reciclaje a nivel nacional e internacional:

Tabla 12. Costos asociados a materiales con potencial de reciclaje

Producto	Componente	Material	Precio Nacional (COP/Kg)	Precio Internacional (USD/Kg)	Precio Internacional (COP/Kg)	
Panel Fotovoltaico	Marco de Aluminio	Aluminio	\$ 6,165	\$ 1.02	\$ 4,923	
	Vidrio	Vidrio	\$ 169	\$ -	\$ 96	
	Film Plástico	EVA	\$ 971	\$ -	\$ 1,351	
	Celda solar general	Rejilla de plata		\$ -	\$ 331.07	\$ 1,605,682
		Relleno de silicona		\$ -	\$ -	\$ -
		Aluminio		\$ 6,165	\$ 1.02	\$ 4,923
	Interfase eléctrica	Cobre	\$ 34,314	\$ 6.61	\$ 32,077	
	Cableado	Cobre		\$ 34,314	\$ 6.61	\$ 32,077
		Estaño		\$ -	\$ -	\$ 267
	Celda solar policristalina	Silicio	\$ -	\$ -	\$ -	
	Celda solar CIGs	Plomo		\$ -	\$ 1.50	\$ 7,271
		Selenio		\$ -	\$ 3.00	\$ 14,550
		Cobre		\$ 34,314	\$ 6.41	\$ 31,083
		Galio		\$ -	\$ -	\$ -
		Indio		\$ -	\$ -	\$ -
	Celdas solares de película delgada CdTe	Cadmio		\$ -	\$ 2.65	\$ 12,861
Telurio			\$ -	\$ -	\$ -	

Así que, teniendo en cuenta los valores del mercado de reciclaje y las estimaciones de volúmenes realizadas a 2050 puede verse que el mercado de reciclaje de paneles fotovoltaicos tiene gran potencial en la medida en que se apoye y se fortalezca la industria del reciclaje. En la siguiente figura se muestra el valor potencial (a la fecha 2022) de los costos totales por las cantidades estimadas a dicha fecha:

Figura 17. Valor potencial de materiales provenientes de paneles solares que podrían aprovecharse al 2050



Fuente: Elaboración propia

Vehículos eléctricos

- En Colombia internamente no se cuenta con un mercado para la mayoría de los cátodos activos de las baterías como lo son el cobalto, níquel, manganeso y fosforo. Así mismo el acero inoxidable de los marcos, las tierras raras de los imanes y metales como el paladio, talio, antimonio y estaño de las placas de circuitos y componentes electrónicos tampoco cuentan con un mercado interno.
- El material de las baterías que mejor valor tiene en el mercado del reciclaje interno en Colombia es el cobre con un valor de \$32,370/Kg y el material con menor valor comercial es el hierro fundido con un valor de \$1,044/Kg
- De los materiales que internamente no tienen manejo y a nivel internacional sí son el litio, el cobalto, el níquel, el manganeso, el acero inoxidable, el paladio y el estaño, por lo cual podría pensarse que existe una exportación de dichos materiales en cuanto la normativa lo permita.

A continuación, se muestra una tabla con los precios a diciembre de 2022 de los materiales que pueden comercializarse en el mercado del reciclaje a nivel nacional e internacional:

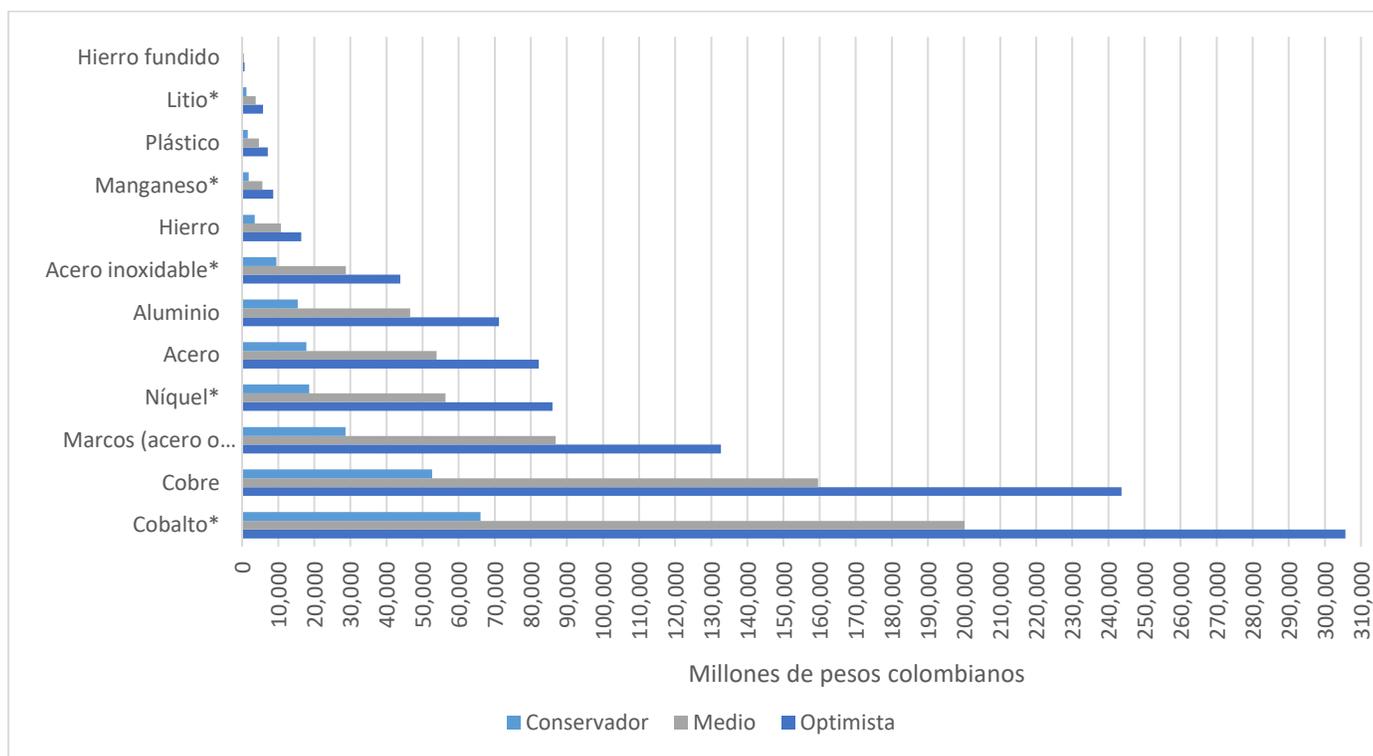
Tabla 13. Costos asociados a materiales con potencial de reciclaje

Producto	Componente	Material	Precio Nacional (COP/Kg)	Precio Internacional (USD/Kg)	Precio Internacional (COP/Kg)
Baterías de tracción	Cátodo activo	Litio	\$ -	\$ 1.23	\$ 5,988
		Cobalto	\$ -	\$ 23.51	\$ 114,023
		Níquel	\$ -	\$ 6.61	\$ 32,077
		Manganeso	\$ -	\$ 0.72	\$ 3,492
		Aluminio	\$ 6,165	\$ 1.40	\$ 6,797
		Hierro	\$ 1,188	\$ 0.09	\$ 422
		Fósforo	\$ -	\$ -	\$ -
		Oxígeno	\$ -	\$ -	\$ -
	Lamina de cátodo	Aluminio	\$ 6,165	\$ 1.40	\$ 6,797
	Ánodo activo	Carbono	\$ -	\$ -	\$ -
Lamina de ánodo	Cobre	\$ 32,370	\$ 7.72	\$ 37,423	
Infraestructura de batería	Carcasa de la celda	Aluminio	\$ 6,165	\$ 1.40	\$ 6,797
	Marco	Acero inoxidable	\$ -	\$ 0.62	\$ 2,994
Motores sincrónicos	Acero	Acero	\$ 5,667	\$ 0.20	\$ 958
	Aluminio	Aluminio	\$ 6,165	\$ 1.40	\$ 6,797
	Imanes (REE-Tierras raras)	Neodimio	\$ -	\$ -	\$ -
		Disproso	\$ -	\$ -	\$ -
		Praseodimio	\$ -	\$ -	\$ -
		Terbio	\$ -	\$ -	\$ -
	Hierro fundido	Hierro fundido	\$ 1,044	\$ 0.19	\$ 897
Cobre	Cobre	\$ 32,370	\$ 7.72	\$ 37,423	
Electrónica de Potencia	Carcasa y refrigeración	Aluminio	\$ 6,165	\$ 1.40	\$ 6,797
	Placa del modulo	Semiconductores de potencia	\$ -	\$ -	\$ -
		Plata	\$ -	\$ 0.08	\$ 375.63
	Placas de circuito impreso con componentes electrónicos pequeños	Cobre	\$ 32,370	\$ 7.72	\$ 37,423
		Oro	\$ -	\$ 4.41	\$ 21,370.00
		Paladio	\$ -	\$ 6.65	\$ 32,268.98
		Talio	\$ -	\$ -	\$ -
		Antimonio	\$ 5,861	\$ -	\$ -
	Estaño	\$ -	\$ 12.66	\$ 61,413	
	Condensadores grandes	NA	\$ 1,188	\$ -	\$ -
Inductores (bobina)	Cobre	\$ 32,370	\$ 7.72	\$ 37,423	
Material de montaje y cableado	NA	\$ 1,131	\$ -	\$ -	

Fuente: Elaboración propia a partir de referencias bibliográficas

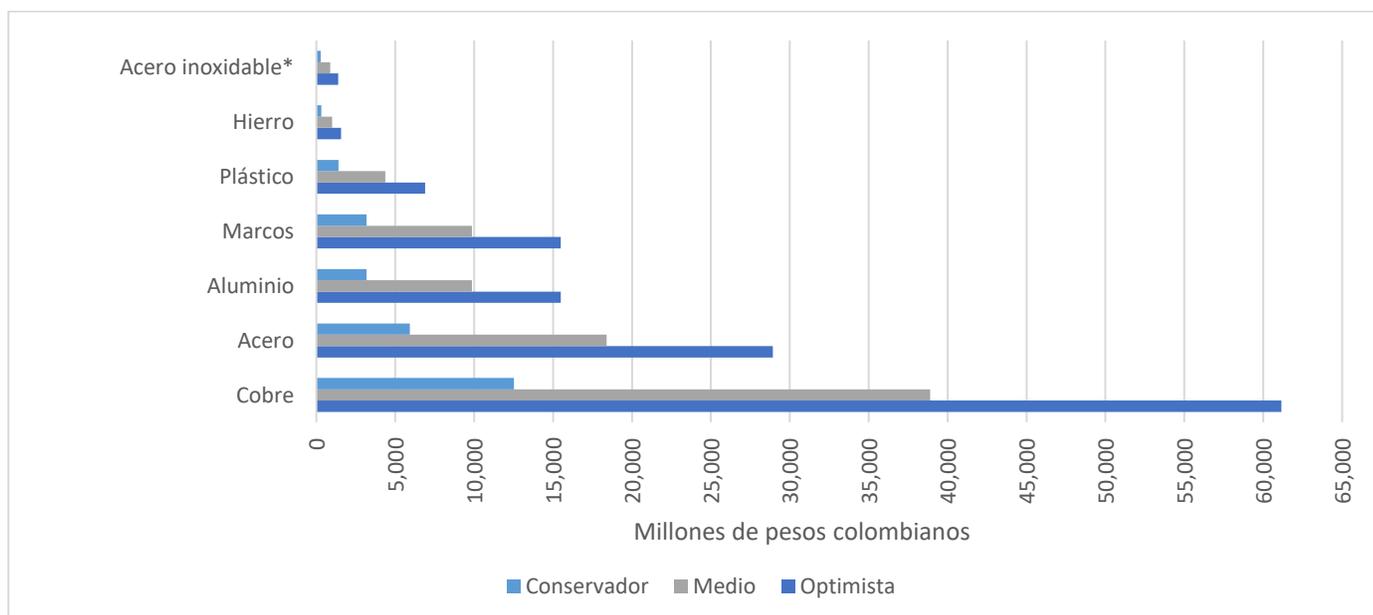
Así que, teniendo en cuenta los valores del mercado de reciclaje y las estimaciones de volúmenes realizadas a 2050 puede verse que el mercado de reciclaje de vehículos eléctricos tiene gran potencial en la medida en que se apoye y se fortalezca la industria del reciclaje. En la siguiente figura se muestra el valor potencial (a la fecha 2022) de los costos totales por las cantidades estimadas a dicha fecha:

Figura 18. Mercado de materiales a reciclar provenientes de vehículos eléctricos



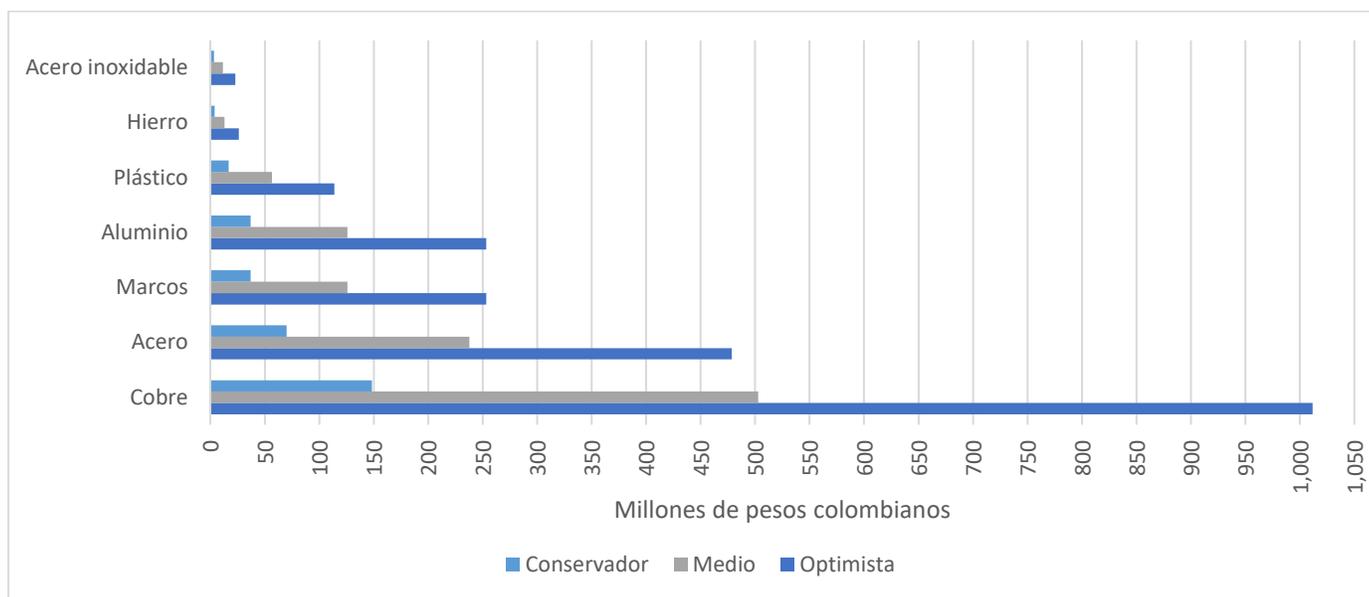
Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Mercado de materiales a reciclar provenientes de vehículos híbridos



Fuente: Elaboración propia

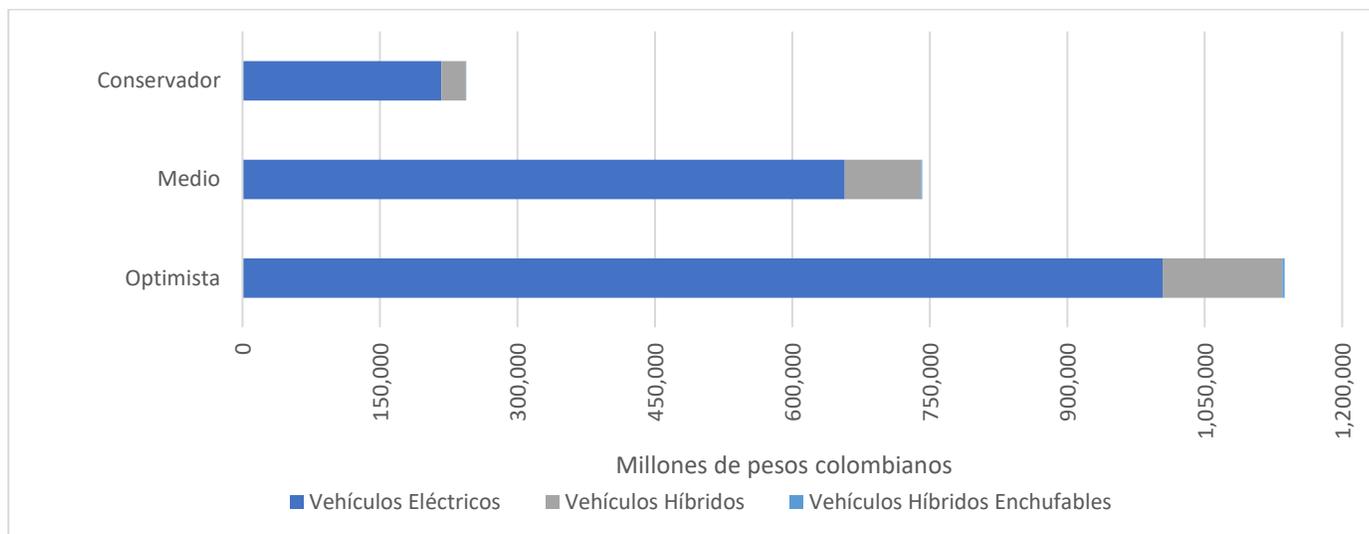
Figura 20. Mercado de materiales a reciclar provenientes de vehículos híbridos eléctricos³



Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, es válido resaltar que hoy en día los investigadores ya se encuentran indagando por materiales sustitutos, lo que puede cambiar totalmente los escenarios actuales de generación de residuos y valor de los materiales.

Figura 21. Valores totales de materiales para vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables



Fuente: Elaboración propia

Como puede verse en la figura anterior, el aprovechamiento de los materiales provenientes de residuos de vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables puede representar en 2050 un monto así: 1.14 miles de millones de pesos colombianos en el escenario optimista, 742 mil millones de pesos colombianos en el escenario medio y 244 mil millones

³ Los valores con asterisco (*) indican que son materiales que no cuentan con mercado en Colombia, sin embargo, si tienen un valor a nivel internacional

de pesos colombianos en el escenario conservador. Es importante precisar que para este ejercicio los precios presentados, corresponden a pesos colombianos de 2023.

3.4 Conclusiones

3.4.1 Instalaciones fotovoltaicas

Es evidente que nivel mundial y nacional se está dando un crecimiento de generación energía a partir de instalaciones fotovoltaicas, esto implica un reto ambiental debido a los residuos que pueden generar de acuerdo con su vida útil, la cual, es de 30 años aproximadamente.

En Colombia existían más de 20 proyectos solares a gran escala a finales del 2022 y existen también iniciativas de incorporar esta tecnología en cuanto autogeneración. Así mismo, se evidencia un esfuerzo por llevar tecnologías limpias a lugares de difícil acceso o incluso sin acceso a energía. Adicionalmente, el crecimiento en Colombia de estas tecnologías se encuentra en crecimiento, esto se evidencia con las proyecciones tanto de la UPME como de XM, las cuales demuestran que se espera un crecimiento acelerado de instalaciones fotovoltaicas en los próximos años. Sin embargo, es de resaltar que según cifras del IRENA también se observa que la capacidad de los paneles mejora en el tiempo y así mismo las tecnologías con las que son elaborados, este es uno de los puntos clave que se tuvieron en cuenta en la modelación de las estimaciones de residuos generados a partir de instalaciones fotovoltaicas.

Ahora bien, el modelo desarrollado tuvo en cuenta la vida útil de los paneles fotovoltaicos e incluso la mejora tecnológica que iban a tener en el tiempo. De igual forma, el modelo simuló diferentes escenarios donde se modelaron diferentes escenarios con diferentes tasas de reciclaje. También se tuvo en cuenta el deterioro o daños que podían tener de forma temprana o durante los primeros años de uso, en un tiempo medio y al final de su vida útil. Con base en lo anterior, se estimó la cantidad de residuos que iban a ser reciclados al 2030 y al 2050.

El reciclaje fotovoltaico se encuentra todavía en sus inicios, pero se considera un elemento esencial de la transición energética. Es evidente que la demanda de componentes reciclados de paneles solares aumentará en la medida que aumenten las instalaciones y los suministros de materiales disminuyan o sean más escasos. En este contexto, los materiales reciclables de los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil alcanzarán un valor de más de 2,700 millones de dólares en 2030 a nivel global, frente a los 170 millones de este año (quince veces más). El incremento de los costes de la energía, la mejora de la tecnología de reciclaje y la normativa de los gobiernos pueden facilitar el camino hacia el aprovechamiento de este tipo de residuos, contribuyendo a los productores a ahorrar costos, superar los problemas de la cadena de suministro y aumentar la probabilidad de que los países cumplan sus objetivos de capacidad solar.

3.4.2 Vehículos eléctricos

Al igual que en el caso anterior, la venta de vehículos eléctricos ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años, siendo China uno de los países donde más se vendieron vehículos eléctricos en el 2022 y para el 2025 se presume que el 6% del total de vehículos sean vehículos eléctricos y que alrededor de 11 millones de toneladas de baterías de litio sean descartadas al 2030, evitando la extracción de litio como materia prima virgen.

Ahora bien, en Colombia el mayor movimiento de vehículos de esta categoría se enfoca en vehículos híbridos, así mismo, donde se ha evidenciado mayor incremento en el uso de este tipo de vehículos es en la ciudad de Bogotá y otras ciudades principales del país.

De igual manera, según las estimaciones probabilísticas desarrolladas bajo un escenario de tasa de reciclaje medio para 2050 habrá 35,944 vehículos eléctricos fuera de servicio y 10,928 tendrán materiales que pueden tener la capacidad de reciclarse. Adicionalmente, los materiales que más se obtendrán de vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables serán materiales provenientes de marcos, el plástico y el hierro respectivamente.

El reciclaje de baterías lleva un tiempo instaurado en Colombia, sin embargo, aún existe complejidad en el manejo de ellas especialmente las contenidas en los vehículos eléctricos que además de sus características al final de la vida útil de un vehículo pueden aún contar con el 80% de su capacidad y eficiencia energética, por esto, es clave buscar mecanismos donde se promueva la reutilización como alternativa previa al reciclaje de las baterías de estos vehículos.

Además, existe una complejidad adicional en el reciclaje enfocada en el tipo de materiales y cantidades que dependen de la marca del vehículo y sus necesidades, por ejemplo, puede haber variaciones en el número de celdas, las cuales pueden ser desde 93 hasta 7004 como es el caso de vehículos como los Tesla. Es decir, al ser tener una amplia gama de baterías y especificaciones, el reciclaje de baterías puede llegar a ser costoso y requiere de procesos específicos para cada tipo de batería, por esto se debería promover la estandarización en la producción de baterías y así mismo lograr estandarizar el reciclaje.

3.4.3 Generales

Los sistemas de reciclaje al final de la vida útil de residuos de instalaciones fotovoltaicas y vehículos eléctricos son de reciente aparición. Es por esto, que el momento es ahora, se debe actuar lo antes posible y generar políticas de gestión del final de la vida útil, acompañado de otros instrumentos transversales que apoyen la transición energética con políticas sostenibles. Es importante tener en cuenta para el desarrollo de estas políticas los avances previos de otros de países, sin embargo, también es importante resaltar las condiciones nacionales y la madurez tanto del sector energético como del mercado del reciclaje actual. Es por esto que la política a desarrollar en el caso de Colombia debe tener en cuenta todo un enfoque sistémico, en el que intervienen diferentes actores de la cadena y se fortalece la capacidad institucional y tecnológica con elementos útiles y a la vez sostenibles, donde los productores tomen decisiones informadas y busquen soluciones de aprovechamiento efectivas. Sin duda crear un marco financiero, no puede quedar atrás, se debe buscar el fortalecimiento de la industria del reciclaje de residuos de instalaciones fotovoltaicas y vehículos eléctricos.

Otro aspecto importante es la innovación y desarrollo, la educación y la formación, las cuales son necesarias para la gestión del final de la vida útil de la energía fotovoltaica y las baterías de los vehículos eléctricos. Otras innovaciones pueden crear procesos de reciclado de alto valor de materiales raros, valiosos y potencialmente peligrosos que superen los requisitos legales y proporcionen beneficios medioambientales y socioeconómicos adicionales que no existen en la actualidad. Esto permitiría reforzar las capacidades nacionales e impulsar el desarrollo de industrias locales de reciclaje fotovoltaico y ayudar a maximizar la creación de valor.

4 BIBLIOGRAFÍA

- Avendaño, G. (2022). Listado de los híbridos y eléctricos más vendidos en 2022. *Motor*. Obtenido de <https://www.motor.com.co/industria/Listado-de-los-hibridos-y-electricos-mas-vendidos-en-noviembre-y-en-2022-20221226-0006.html>
- Cajamarca, I. (29 de Marzo de 2021). Las tasas de créditos para adquirir vehículos eléctricos oscilan entre 7% y 10,32%. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/finanzas/las-tasas-de-creditos-para-adquirir-vehiculos-electricos-oscilan-entre-el-7-y-10-32-3145469>
- CELSIA. (2022). *Eficiencia Energética Celsia*. Obtenido de eficienciaenergetica.celsia.com: <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>
- Chen, M., Ma, X., Chen, B., Arsenault, R., Karlson, P., Simon, N., & Wang, Y. (2019). Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries. *Joule*, 3(11), 2622-2646. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.014>
- DANE. (2002). *Boletín Técnico: Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales - residuos sólidos (CAEFM-RS)*. Bogotá: DANE. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuentas-residuos/Bt-Cuenta-residuos-2020p.pdf
- Dominguez, A., & Roland Geyer. (2019). *Photovoltaic Waste Assesment of Major Photovoltaic Installations in the United States of America*.
- Elwert, T., Goldmann, D., Romer, F., Buchert, M., Merz, C., Schueler, D., & Sutter, J. (2016). Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. *Recycling*, 25-60. doi:<https://doi.org/10.3390/recycling1010025>
- Energía Solar . (2020). Obtenido de <https://energiasolardecolombia.com/>
- Energy Saving Trust. (2022). *Energy Saving Trust*. Obtenido de Energy Saving Trust: <https://energysavingtrust.org.uk/advice/solar-panels/>
- Generación Distribuida UPME. (Diciembre de 2022). *Tableau UPME*. Obtenido de public.tableau.com/app/profile/upme: <https://public.tableau.com/app/profile/upme/viz/AutogeneracinYGeneracinDistribuida2022/Historia1>
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., . . . Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575, 75-86. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
- IEA. (2022). *Global EV Outlook 2022*. Paris: EIA. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- Internacional Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program. (2018). *End of Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies*.
- IPSE. (Diciembre de 2022). *Boletín de Datos IPSE*. Obtenido de IPSE: <https://ipse.gov.co/blog/2022/12/29/boletin-de-datos-ipse-diciembre-2022/>

- IRENA. (2016). *End of Life Management Solar Photovoltaic Panels*. IRENA (International Renewable Energy Agency).
- IRENA. (2019). *Future of Solar Photovoltaic*.
- IRENA; USAID. (2021). *Renewable energy auctions in Colombia: Context, desing and results*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Obtenido de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/IRENA_auctions_in_Colombia_2021.pdf?rev=e435cdecaf c740c8a1bf2ce3bfec84c
- Malinauskaite, J., Anguilano, L., & Schmidt Rivera, X. (2021). Circular waste management of electric vehicle batteries: Legal and technical perspectives from the EU and the UK post Brexit. *International Journal of Thermofluids*, 10(100078). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100078>
- Material electrico. (2023). Obtenido de <https://material-electrico.cdecomunicacion.es/noticias/sectoriales/53564/reciclaje-de-paneles-fotovoltaicos-valor-de-2-700-millones-dolares-en-2030>
- McKerracher, C., O'Donovan, A., Soulopoulos, D., Grant, A., Mi, S., Doherty, D., . . . Kawahara, T. (2022). *Electric Vehicle Outlook 2022 - Executive Summary*. BloombergNEF. Obtenido de <https://bnf.turtl.co/story/evo-2022/page/1?teaser=yes>
- Ministerio de minas y energia Colombia. (s.f.). Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/>
- Ministerio de Transporte. (06 de Julio de 2022). *Mintransporte.gov.co*. Obtenido de Colombia tiene 8.299 vehículos eléctricos en el Runt, 1.699 más de la meta del Plan Nacional de Desarrollo: <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/11015/colombia-tiene-8299-vehiculos-electricos-en-el-runt-1699-mas-de-la-meta-del-plan-nacional-de-desarrollo/>
- Morse, I. (20 de Mayo de 2021). A dead battery dilemma. *Science*. Obtenido de <https://www.science.org/content/article/millions-electric-cars-are-coming-what-happens-all-dead-batteries>
- Movilidad Electrica. (s.f.). *Movilidad Electrica*. Obtenido de <https://movilidadelectrica.com/coches-electricos-chinos/>
- National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- PARATEC. (11 de Noviembre de 2022). *Sistema de Información de Parámetros Técnicos de elementos del Sector Eléctricos Colombiano*. Obtenido de Capacidad Efectiva por Tipo de Generación: <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- Pinto Duitama, K. (4 de Septiembre de 2022). Colombia ya superó el estimado de vehículos eléctricos que se comprarían en 2022. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/consumo/colombia-ya-supero-el-estimado-de-vehiculos-electricos-que-se-comprarian-en-2022-3439644>
- REN 21. (2022). *Renewables Global Status Report*. Obtenido de Renewables 2022 - Global Status Report: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf

- Reporte Proyectos SIN - XM. (12 de Diciembre de 2022). XM. Obtenido de XM Operación: <https://www.xm.com.co/operaci%C3%B3n/proyectos-sin/formatos-instructivos-y-procedimientos-proyectos-sin>
- Revista Motor. (s.f.). Obtenido de <https://www.motor.com.co/>
- Revista Motor. (2022). Carros eléctricos: La oferta cero emisiones en Colombia. *Revista Motor*. Obtenido de <https://www.motor.com.co/revista/Carros-electricos-la-oferta-cero-emisiones-en-Colombia-20220906-0008.html>
- Revista Semana. (2020). Obtenido de <https://www.semana.com/economia/articulo/colombia-aumentara-50-veces-su-capacidad-instalada-de-energia-renovable-a-2022/294394/#:~:text=Con%20la%20incorporaci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADas,de%202.500%20megavatios%20en%202022.>
- RUNT. (2022). *Parque automotor*. Obtenido de https://www.runt.com.co/runt-en-cifras/parque-automotor?field_fecha_de_la_norma_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2022
- SIEL. (s.f.). Obtenido de <http://www.siel.gov.co/>
- Solar Store. (2023). *355W Solar Panel 120 Cell*. Obtenido de <https://a1solarstore.com/rec-355w-solar-panel-120-cell-rec355tp4.html>
- Statista. (2021). *Número de vehículos eléctricos e híbridos vendidos en Colombia desde 2011 a 2021*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/1134824/volumen-ventas-vehiculos-electricos-hibridos-colombia/#:~:text=El%20n%C3%BAmero%20de%20veh%C3%ADculos%20el%C3%A9ctricos,de%20autom%C3%B3viles%20registrado%20en%202020.>
- Statista. (2022). *Statista*. Obtenido de Electric Vehicles - Worldwide: <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/worldwide>
- Statista. (2022). *Statista*. Obtenido de Battery Electric Vehicles - Worldwide: <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/battery-electric-vehicles/worldwide>
- Statista. (2022). *Statista*. Obtenido de Plug in hybrid electric vehicles - worldwide: <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/plug-in-hybrid-electric-vehicles/worldwide>
- Statista. (2022). *Statista*. Obtenido de Electric Vehicles - Colombia: <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/colombia>
- Statista. (2022). *Statista*. Obtenido de Battery Electric Vehicles - Colombia: <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/battery-electric-vehicles/colombia>
- Statista. (2022). *Statista*. Obtenido de Plug in hybrid electric vehicles -Colombia: <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/plug-in-hybrid-electric-vehicles/colombia>
- Stout. (2020). *Automotive Defect & Recall Report*. Obtenido de <https://www.consumerreports.org/car-reliability-owner-satisfaction/car-reliability-histories-a1200719842/>

- UPME. (2020). *Análisis de infraestructura de electrolineras en ciudades*. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Infografia2_Proyecciones_EVSE.pdf
- UPME. (2021). *Plan Energético Nacional 2020-2050*.
- UPME. (2022). *Informe de Avance de Proyectos de Generación - Marzo 2022*. Obtenido de http://www.siel.gov.co/Portals/0/Avances_de_Generacion/2022/Informe_Avance_proyectos_Generacion_Marzo2022.pdf
- XM. (11 de Noviembre de 2022). *XM*. Obtenido de Reporte Proyectos SIN: <https://www.xm.com.co/operaci%C3%B3n/proyectos-sin/formatos-instructivos-y-procedimientos-proyectos-sin>
- XM, Parámetros Técnicos del SIN. (Diciembre de 2022). *Parámetros Técnicos del SIN*. Obtenido de PARATEC: <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>