

UN FUTURO CIRCULAR PARA LA MOVILIDAD ELÉCTRICA: ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DE LAS BATERÍAS DE BUSES ELÉCTRICOS

Contexto

Reducir los gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático es crucial. Los vehículos eléctricos, aunque funcionan con energía renovable, **son solo una solución parcial**. Sus beneficios frente a los vehículos de combustión interna dependen de una **gestión adecuada** de sus componentes, especialmente las baterías, al final de su vida útil. De lo contrario, **se podrían perder los beneficios ambientales y sociales**.

La producción de baterías requiere **materiales que tienen un alto costo de extracción**, tanto ambiental como energético. Además, **su demanda y escasez hacen necesario su reciclaje** para evitar el agotamiento prematuro y reducir el impacto ambiental.

LATINOAMÉRICA



En Colombia, el sector del transporte se sitúa en **3er lugar** entre los sectores con mayores emisiones de CO₂eq anuales.



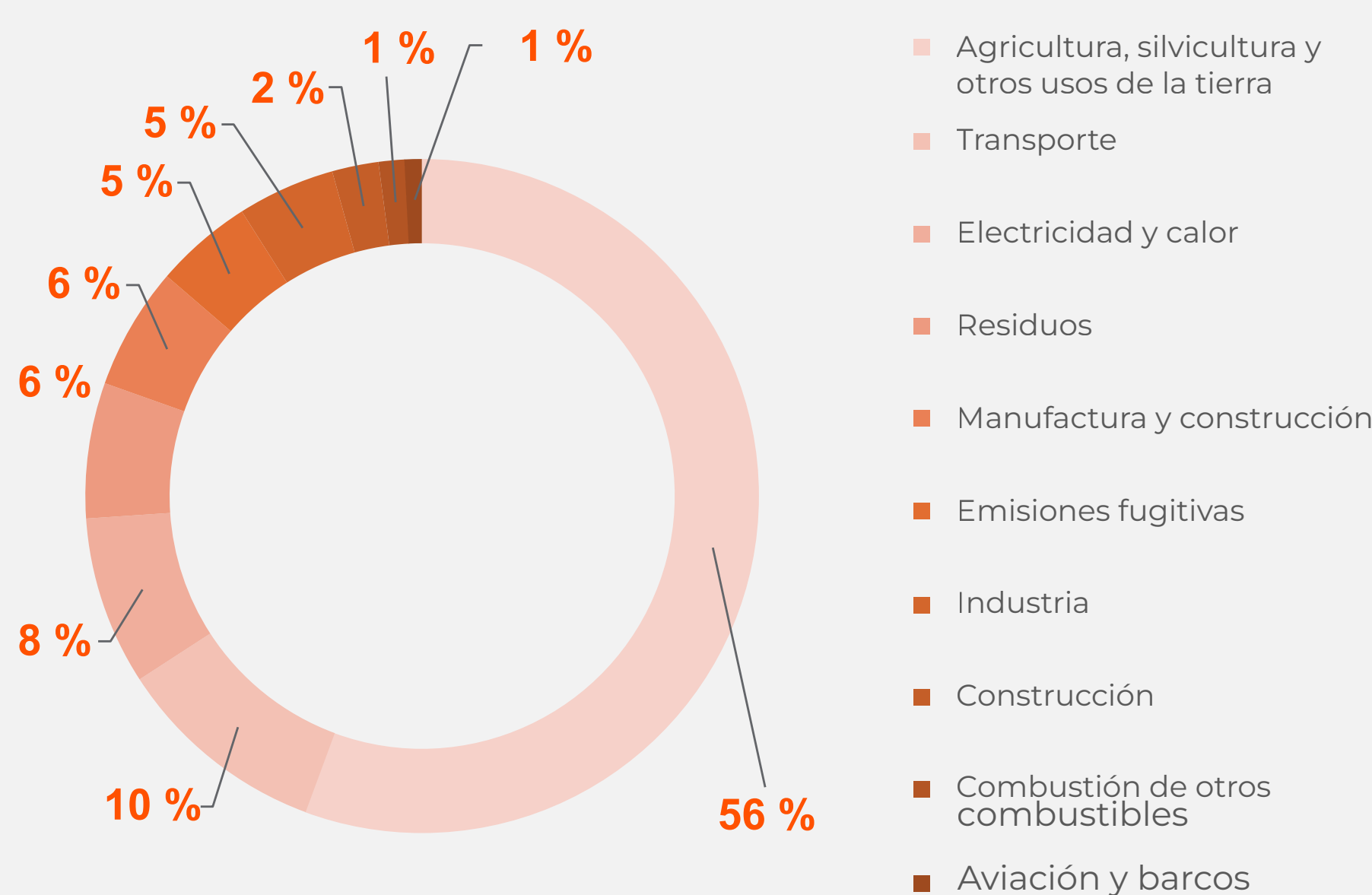
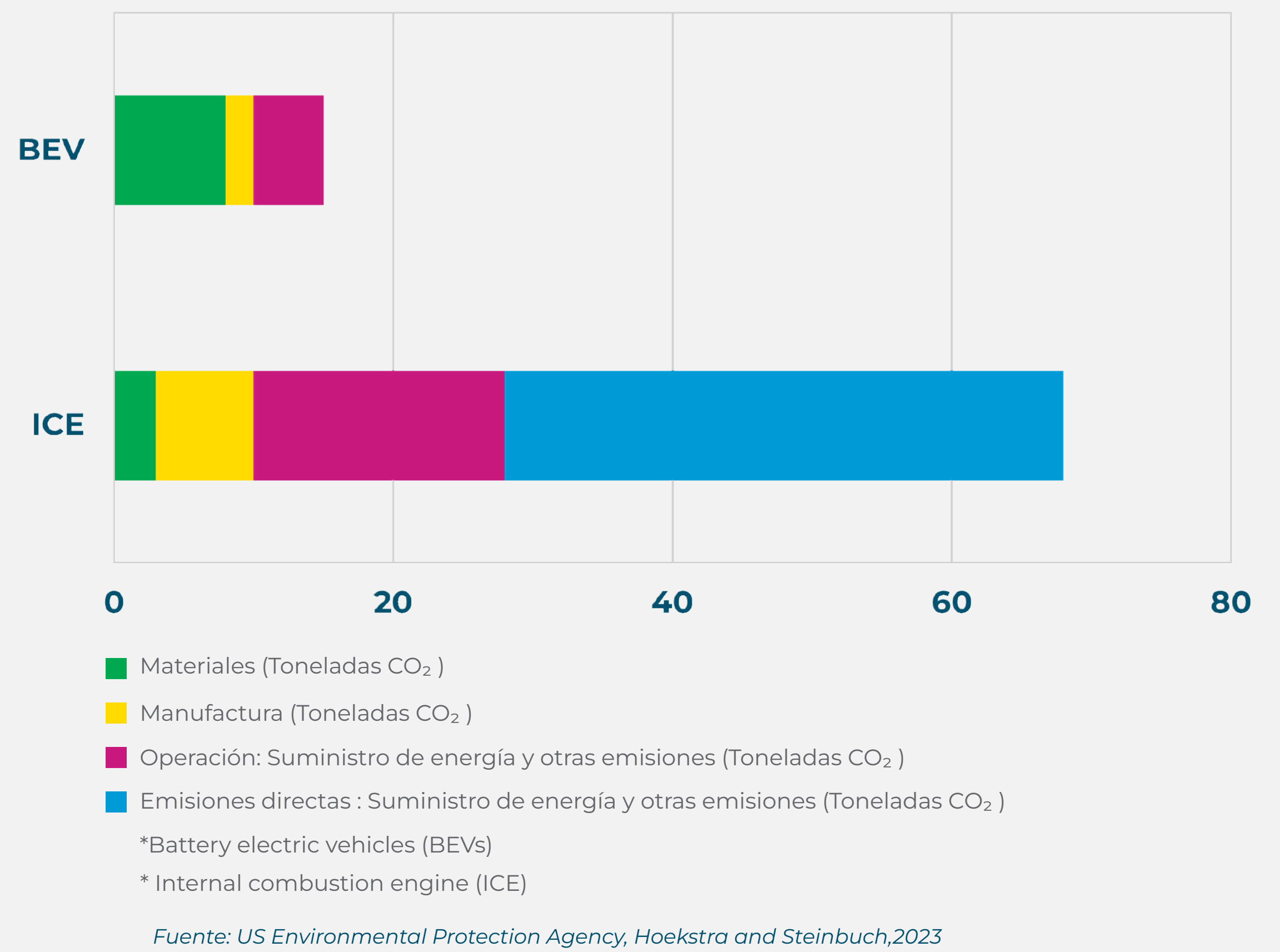
El sector del transporte genera el **10 %** de las emisiones en Colombia. Contribuye con **27,83 CO₂eq** anualmente.



Las emisiones del transporte terrestre en el país se deben al uso de combustibles fósiles.



Según las proyecciones nacionales el sector emitiría más de **40 millones de toneladas de CO₂eq** en 2030.



Extender la vida útil de las baterías maximiza su valor y reduce la necesidad de extraer nuevos recursos, lo que disminuye el impacto ambiental. Darles una segunda vida y reciclarlas no solo minimiza los residuos, sino que también fomenta la economía circular y protege el medio ambiente. Estas acciones son clave para una gestión de residuos más sostenible y responsable.

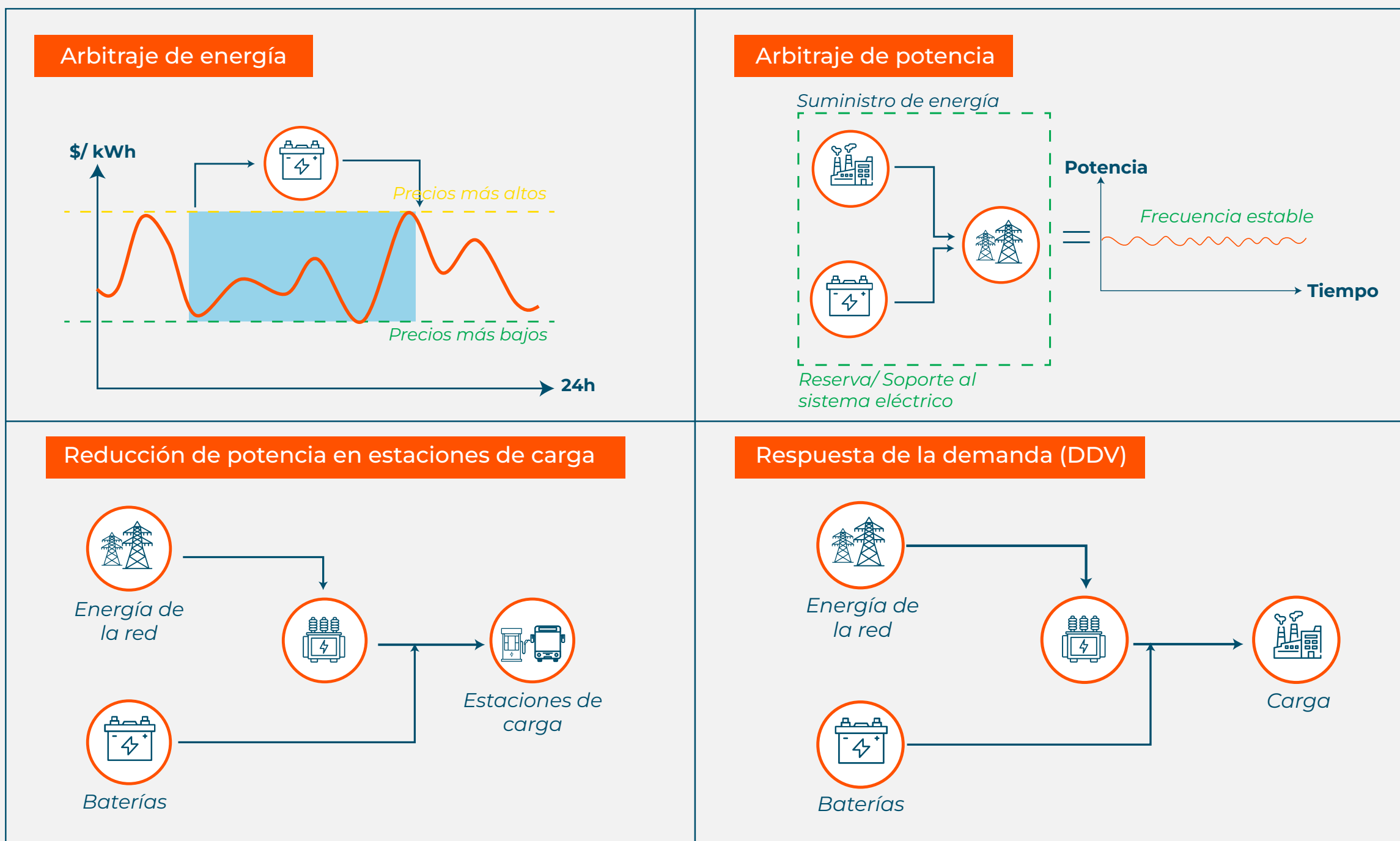


Movilidad sostenible



Segunda vida:	Reciclaje:	Disposición controlada:
<ul style="list-style-type: none"> Pérdida parcial de la capacidad de almacenamiento (80% de la capacidad original). Almacenamiento para aplicaciones estacionarias (ej: regulación de la red eléctrica, almacenamiento de energía renovable y almacenamiento de energía de reserva). 	<ul style="list-style-type: none"> Recuperación y reciclaje de componentes como el plástico y los metales (principalmente níquel y cobalto). Se debe considerar cuando las baterías han sufrido un desgaste más avanzado y no se contempla emplearlas en usos de segunda vida. 	<ul style="list-style-type: none"> Cuando no se contempla ninguna de las otras dos vías. El proceso suele estar a cargo de los proveedores o fabricantes de las baterías. Generalmente no se desechan baterías completas, sino solo los componentes que no pueden ser integrados en producciones nuevas de baterías.

UN FUTURO CIRCULAR PARA LA MOVILIDAD ELÉCTRICA: ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DE LAS BATERÍAS DE BUSES ELÉCTRICOS



Arbitraje de energía:

Aprovechar las diferencias de precios o las oportunidades en distintos mercados para obtener beneficios económicos.

Arbitraje de potencia:

Comprar y vender potencia eléctrica según la variabilidad de los precios.

Reducción de potencia en estaciones de carga:

Disminuir temporalmente la demanda de potencia eléctrica de la red durante el proceso de carga de vehículos.

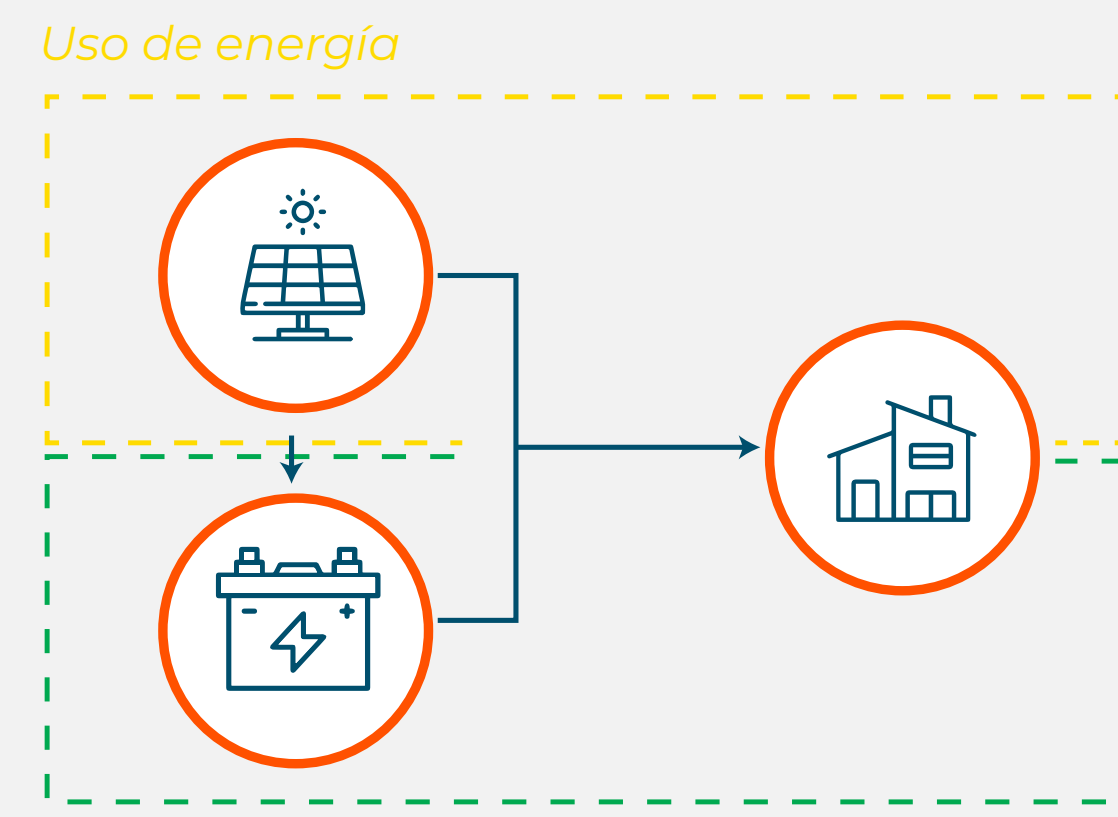
Respuesta de la demanda (DDV):

Estrategia para ajustar el consumo de electricidad en función de las señales del mercado.

Servicios para sistemas off-grid:
Diseñados para operar de manera independiente, sin conexión a la red eléctrica.

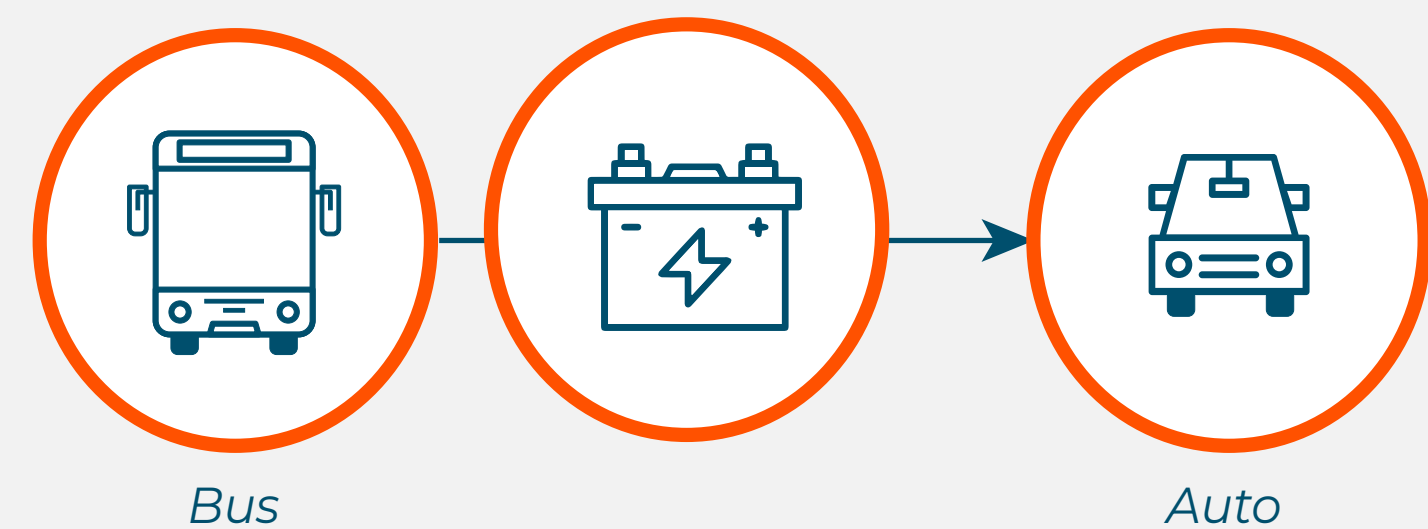
Segundos usos en vehículos livianos:
Reutilización de componentes en la economía circular, promoviendo la sostenibilidad.

Servicios para sistemas off-grid



Uso de energía cuando no hay sol
Sistemas de Pv y Zonas no interconectadas (ZNI)

Otras aplicaciones en movilidad



Segundos usos vehículos livianos.

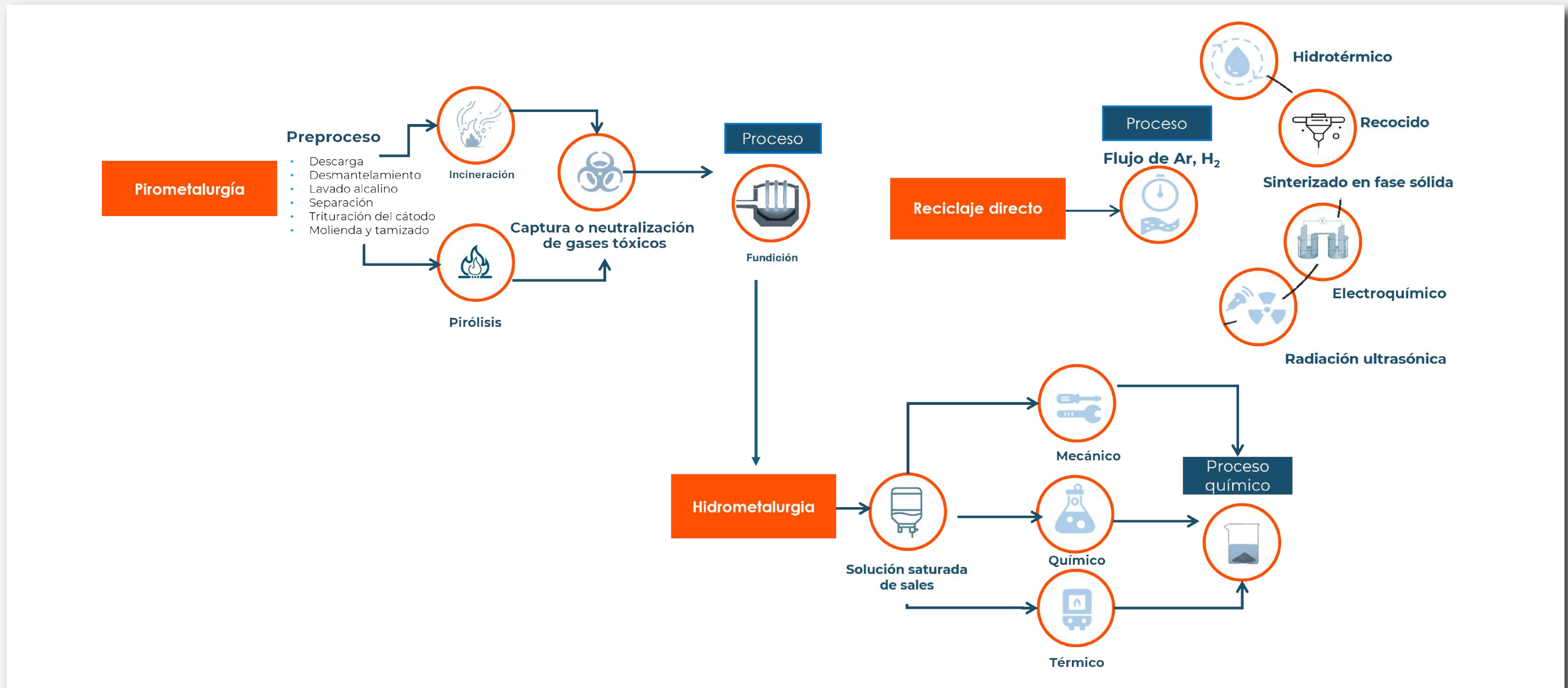
Estos enfoques son clave para Colombia, ya que al extender la vida de las baterías, promueven la sostenibilidad ambiental y reducen costos energéticos. Benefician tanto a comunidades off-grid como a la industria de vehículos livianos, apoyando la transición hacia tecnologías más limpias y fortaleciendo la competitividad en el sector energético.

- Exceder el 80 % del SoH** no solo reduce su valor residual, sino que también limita las posibilidades de
- Si las baterías caen por debajo del **65 % del SoH en su primer uso**, una segunda vida ya no es viable en términos de rendimiento y seguridad.
- Monitorear el SoH** y promover su cuidado es clave para habilitar el segundo uso de las baterías.

Priorización de proyectos piloto

Según su VNP (kUSD/MWh)		Según su resiliencia ante variaciones del SoH (USD/MWh/Δ10% SoH)		Según la vida útil en su segundo uso (años)	
Sistemas off-grid	140-160	Arbitraje de energía	1-3	Respuesta de la demanda	20-30
Vehículos livianos	130-150	Respuesta de la demanda	15-25	Sistemas off-grid	15-35
Arbitraje de potencia	70-90	Sistemas off-grid	20-40	Arbitraje de potencia	5-15
Respuesta de la demanda	30-50	Arbitraje de potencia	20-40	Arbitraje de energía	5-15
Arbitraje de energía	2-5	Vehículos livianos	N/A	Vehículos livianos	1-5
Estaciones de carga	Negativo	Estaciones de carga	N/A	Estaciones de carga	0

UN FUTURO CIRCULAR PARA LA MOVILIDAD ELÉCTRICA: ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DE LAS BATERÍAS DE BUSES ELÉCTRICOS



Opción 1:

- Representa todo el proceso necesario para realizar el reciclaje de baterías en Colombia.

Opción 2:

- Representa todo el proceso necesario para realizar el reciclaje de baterías en China.

Opción 3:

- Realizar la producción de masa negra (pretratamiento) en Colombia y el reciclaje en China.



Rangos de balances económicos:

PIROMETALURGICO	Balance neto de reciclaje [USD/kWh]	China	-10
		Corea del Sur	-12
		US	-16
		Bélgica	-22
		UK	-18

Rangos de balances económicos:

HIDROMETALURGICO	Balance neto de reciclaje [USD/kWh]	China	-5
		Corea del Sur	-8
		US	-11
		Bélgica	-13
		UK	-12

Rangos de balances económicos:

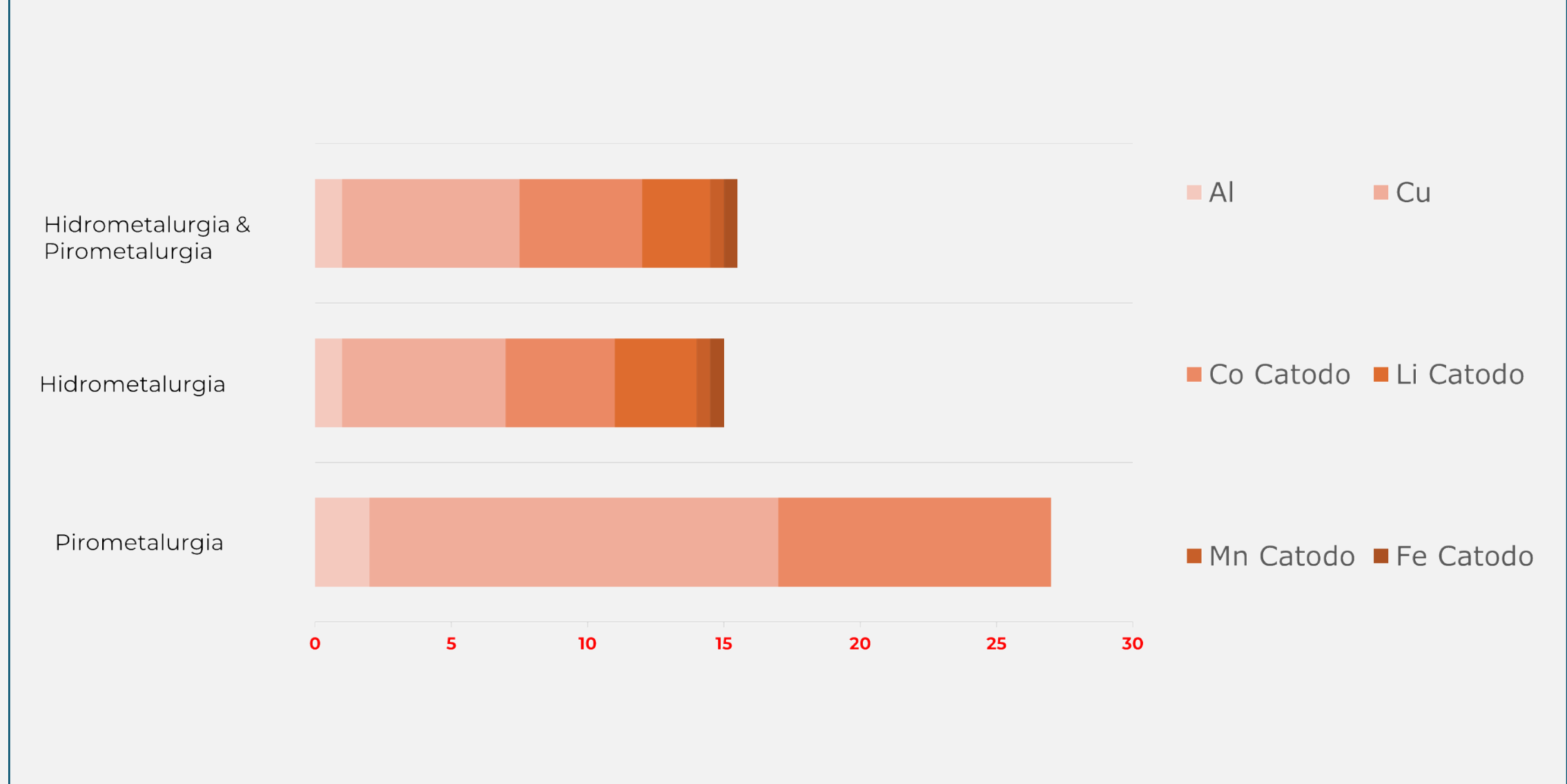
RECICLAJE DIRECTO	Balance neto de reciclaje [USD/kWh]	China	11
		Corea del Sur	7
		US	2
		Bélgica	-2
		UK	2

• El reciclaje directo es el único proceso que ofrece un balance neto positivo.

• China tiene los costos más competitivos en el reciclaje directo de baterías LFP.

• Bélgica presenta los balances menos favorables, independientemente del proceso de reciclaje que se analice.

• Las empresas y los responsables de políticas deben tener en cuenta estos factores para optimizar el retorno de la inversión y minimizar los costos operativos en el manejo de baterías usadas.



UN FUTURO CIRCULAR PARA LA MOVILIDAD ELÉCTRICA: ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DE LAS BATERÍAS DE BUSES ELÉCTRICOS

	Segunda Vida	+	Reciclaje
Mejor modelo	<p>Energía de la red Baterías DDV Carga</p>		<p>Colombia - China</p>
VPN	41,476 USD/MWh		4,791 USD/MWh
Máximo valor total	46,26 USD /MWh		

Segunda vida:

Hallazgos:

- Importancia del entorno regulatorio.
- Especial atención al SoH al final de la primera vida.
- Experiencia previa en Colombia integrando baterías.

Conclusiones:

- En Colombia, el modelo más aplicable es el de Respuesta de la Demanda (DDV).
- La falta de incentivos hace inviable el modelo de reducción de potencia.

Reciclaje

Hallazgos:

- El entorno regulatorio sobre la masa negra es apto para modelos de negocio mixtos.
- El mercado de movilidad es un factor determinante en la viabilidad de plantas de reciclaje.

Conclusiones:

- El pretratamiento en Colombia y el reciclaje en China presentan el mejor Valor Presente Neto (VPN).



Después de su primer uso, el valor de las baterías puede extenderse mediante su reutilización y posterior reciclaje.

• Si al final de la primera vida el **SoH es $\geq 80\%$** , las baterías pueden utilizarse en **aplicaciones con mayor demanda energética**.

• Con un **SoH entre 80% y 70%** , pueden ser aprovechadas en **modelos de respuesta a la demanda (DDV)**.

• La vida útil de las baterías puede **extenderse hasta más de 20 años** bajo condiciones ideales de operación.

