



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Análisis de los requerimientos materiales de la
transición hacia una movilidad eléctrica**

Autor:

Pulido Sánchez, Daniel

Tutora:

Margarita Mediavilla Pascual

Director:

Iñigo Capellán Pérez

**Dpto. Ingeniería de sistemas y
Automática**

Valladolid, Julio 2020.



Universidad de Valladolid

Análisis de los requerimientos materiales de la transición
hacia una movilidad eléctrica



Daniel Pulido Sánchez
Grado en Ingeniería Mecánica



INDICE

1. Resumen	1
1. Abstract.....	1
2. Introducción.....	3
1. Presentación del problema	3
1.1 Transporte rodado:	7
1.2 Transporte ferroviario:	8
1.3 Reciclaje.....	9
2. Motivación y metodología del análisis, conclusión de la introducción	10
3. Objetivos.....	13
4. Metodología.....	15
1. Dinámica de sistemas	15
1.1 Diagrama causal	16
1.2 Diagrama de flujos o Forrester.....	18
1.3 Fases del modelado.....	19
1.4 Programa empleado, VenSim.....	20
2. MEDEAS-W	22
2.1 Presentación del modelo MEDEAS-W	22
2.1.1 Factores del modelo relacionados con transporte	24
2.1.1.1 Modelización del transporte en el modelo MEDEAS-Mundo	24
2.1.1.2 Modelización de la reestructuración de la producción como resultado del cambio en la demanda	24
2.1.2 Requerimientos minerales de los vehículos eléctricos, integración del modelo de análisis de viabilidad material del cambio de movilidad.....	25
3. Análisis de los requerimientos materiales de la transición hacia una movilidad eléctrica.....	26
3.1 Tipos de transporte y electrificación.....	26
3.2 Clasificación de las tecnologías evaluadas	39
3.2.1 Vehículo rodado electrificado, tecnologías, elementos, infraestructuras y análisis de requerimientos materiales.	39
3.2.1.1 Elementos empleados por los automóviles rodados electrificados	45
Baterías.....	45
Requerimientos minerales y energéticos de las baterías	59



Motor eléctrico y aumento del cableado del vehículo	63
Requerimientos minerales y energéticos del cableado interno y del motor	64
3.2.1.2 Infraestructura del vehículo rodado electrificado	65
Puntos de carga	65
Infraestructura de conexión desde la red al punto de carga	66
Requerimientos materiales y energéticos de los puntos de carga	67
Requerimientos materiales y energéticos de la infraestructura de conexión hasta el punto de carga.....	68
3.2.2 Transporte ferroviario electrificado, tecnologías, infraestructura y análisis de requerimientos materiales.....	70
3.2.2.1 Infraestructura del transporte ferroviario electrificado	72
Tercer carril	72
Catenaria	73
Análisis de los requerimientos materiales y energéticos del ámbito ferroviario ...	74
3.2.3 Futuro en la movilidad eléctrica, la célula de combustible, elementos y análisis de requerimientos minerales	76
3.2.3.1 Elementos e infraestructura de la pila de combustible (hidrógeno)	78
Producción del hidrogeno, electrolizadores	78
Pila de hidrogeno	80
Requerimientos materiales y energéticos de las células de combustible y electrolizadores basados en la tecnología PEM	81
4. Disponibilidad de minerales: Recursos y Reservas.....	83
5. Modelado	84
5.1 Datos introducidos en el modelo y principales hipótesis realizadas	84
5.1.1 Datos e hipótesis referentes a las baterías de los vehículos electrificados	84
5.1.2 Datos e hipótesis referentes al cobre de los coches electrificados	88
5.1.3 Datos e hipótesis referentes a los cargadores y conexión a red de los vehículos electrificados	89
5.1.4 Datos e hipótesis referentes a la electrificación del ferrocarril	93
5.1.5 Datos e hipótesis referentes a los vehículos de hidrógeno	94
5.1.6 Datos e hipótesis referentes al reciclaje	95
5.1.7 Datos e hipótesis referentes al cobalto	95
5.2 Modificaciones empleadas en el modelo MEDEAS-W	96
5.3 Escenarios empleados en la simulación	99
6. Resultados	104



6.1	Número de vehículos por tipo.....	104
6.2	Materiales demandados.....	111
6.3	Requerimientos de extracción de materiales	129
6.4	Demanda de los materiales respecto a las reservas	147
6.5	Demanda de materiales respecto a los recursos	165
6.6	Resultados referentes a los vehículos de hidrogeno	183
6.7	Análisis de sensibilidad.....	187
6.8	Evaluación global de los resultados	192
5.	Conclusiones	201
	Bibliografía	205



Universidad de Valladolid

Análisis de los requerimientos materiales de la transición
hacia una movilidad eléctrica



Daniel Pulido Sánchez
Grado en Ingeniería Mecánica



Índice de Imágenes

Imagen 1: Emisiones de GHG a lo largo del tiempo	3
Imagen 2: Distribución por sectores de la emisión de CO2	5
Imagen 3: Electrificación de las vías férreas a lo largo del tiempo	8
Imagen 4: Planta de reciclado de chatarra	9
Imagen 5: Impresión humana de los sistemas	15
Imagen 6: Realidad de un sistema	15
Imagen 7: Relación positiva	16
Imagen 8: Relación negativa	16
Imagen 9: Ejemplo de sistema con bucles	16
Imagen 10: Comportamiento del bucle positivo respecto del tiempo	17
Imagen 11: Comportamiento del bucle negativo respecto del tiempo	17
Imagen 12: Elementos de los diagramas de flujos	18
Imagen 13: Interfaz de usuario del programa VenSim	20
Imagen 14: Interrelación de los módulos de MEDEAS	23
Imagen 15: Bicicleta eléctrica de la marca Xiaomi	27
Imagen 16: Plataforma de patinetes eléctricos compartidos	28
Imagen 17: Vehículo particular Hyundai Kona Electric	29
Imagen 18: Plataforma de vehículos eléctricos compartidos	30
Imagen 19: Motocicleta eléctrica de la marca Xiaomi	31
Imagen 20: Plataforma de motocicletas eléctricas compartidas	32
Imagen 21: Autobús híbrido de la marca Volvo	32
Imagen 22: Taxi híbrido Toyota Prius	33
Imagen 23: Furgoneta eléctrica Renault Kangoo Z.E.	34
Imagen 24: Prototipo de tráiler eléctrico Tesla Semi	35
Imagen 25: Metro de Madrid de funcionamiento eléctrico	36
Imagen 26: Ferrocarril eléctrico de media o larga distancia español AVlo	37
Imagen 27: Ferrocarril diesel de transporte de mercancías	38
Imagen 28: Vehículo híbrido Toyota Prius	40
Imagen 29: Camión pequeño Canter Fuso Eco Hybrid	40
Imagen 30: Vehículo híbrido enchufable Mitsubishi Outlander PHEV	41
Imagen 31: Bus híbrido enchufable en Valladolid	42
Imagen 32: Vehículo eléctrico Renault ZOE	43
Imagen 33: Patinete eléctrico Xiaomi m365	44
Imagen 34: Taxi eléctrico BYD e6	45
Imagen 35: Funcionamiento básico y elementos de una celda de batería de ion litio ..	46
Imagen 36: Características de la batería NMC	48
Imagen 37: Vehículo eléctrico Nissan Leaf de pasada generación	49
Imagen 38: Características de la batería NMC	50
Imagen 39: Características y composición de la batería NMC	51



Imagen 40: Bus eléctrico Volvo 51

Imagen 41: Vehículo híbrido enchufable VW passat GTE 51

Imagen 42: Características de la batería NCA 52

Imagen 43: Vehículo eléctrico Tesla model S 53

Imagen 44: Características batería LFP..... 53

Imagen 45: Bus eléctrico BYD K9 54

Imagen 46: Triturador de baterías en atmosfera de nitrógeno 56

Imagen 47: Trabajadora observando la masa negra resultante de los procesos físicos57

Imagen 48: Tendencia de los procesos de reciclado 59

Imagen 49: Chasis, batería y motores de un vehículo de la marca Tesla..... 61

Imagen 50: Masa de cobre presente en diferentes tipos de vehículos 64

Imagen 51: Motor eléctrico empleado en la automoción 64

Imagen 52: Punto de carga público 66

Imagen 53: Infraestructura de conexión eléctrica 66

Imagen 54: Ferrocarril híbrido de media o larga distancia español Alvia 71

Imagen 55: Ferrocarril eléctrico de media o larga distancia español AVE 71

Imagen 56: Sistema de electrificación ferroviaria de tercer rail 72

Imagen 57: Elementos del sistema de electrificación ferroviaria mediante catenaria. 73

Imagen 58: Sistema de electrificación ferroviaria mediante catenaria 73

Imagen 59: Elementos de un vehículo de hidrogeno 77

Imagen 60: Vehículo con pila de combustible de hidrogeno Hyundai Nexo 77

Imagen 61: Electrolizador alcalino 79

Imagen 62: Electrolizador PEM..... 79

Imagen 63: Esquema de funcionamiento de una pila de hidrogeno 80

Imagen 64: Tendencia temporal esperada del uso del platino en electrolizadores y
vehículos 82

Imagen 65: Diferencias entre recursos y reservas 83

Imagen 66: Grafica de ventas mundiales de BEV y PHEV..... 86

Imagen 67: Disposición de materiales requeridos para la electrificación en el modelo
..... 96

Imagen 68: Disposición de numero de cargadores, conexiones y baterías para la
electrificación en el modelo 97

Imagen 69: Disposición de numero de cargadores, conexiones y baterías para la
electrificación en el modelo 97

Imagen 70: Disposición del número de vehículos comerciales y de la longitud de vías
férreas y catenarias en el modelo 98

Imagen 71: Disposición del número de vehículos particulares en el modelo..... 99

Imagen 72: Emisiones de CO2 de cada tipo de vehículo en los diferentes escenarios102

Imagen 73: Evolución temporal de los vehículos de 4 ruedas particulares no
electrificados 104



Imagen 74: Evolución temporal de los vehículos de 4 ruedas particulares electrificados 105

Imagen 75: Evolución temporal de los vehículos de 2 ruedas particulares no electrificados 105

Imagen 76: Evolución temporal de los vehículos de 2 ruedas particulares electrificados 106

Imagen 77: Evolución temporal de los vehículos unipersonales particulares 106

Imagen 78: Evolución temporal de los vehículos pesados comerciales no electrificados 107

Imagen 79: Evolución temporal de los vehículos pesados comerciales electrificados 108

Imagen 80: Evolución temporal de los vehículos ligeros comerciales no electrificados 108

Imagen 81: Evolución temporal de los vehículos ligeros comerciales electrificados 109

Imagen 82: Evolución temporal de los autobuses no electrificados 109

Imagen 83: Evolución temporal de los autobuses electrificados 110

Imagen 84: Evolución temporal del ferrocarril 110

Imagen 85: Evolución temporal de la demanda de aluminio con la batería LiMnO₂ 111

Imagen 86: Evolución temporal de la demanda de aluminio con la batería NMC 622 112

Imagen 87: Evolución temporal de la demanda de aluminio con la batería NMC 811 112

Imagen 88: Evolución temporal de la demanda de aluminio con la batería NCA 113

Imagen 89: Evolución temporal de la demanda de aluminio con la batería LFP 113

Imagen 90: Evolución temporal de la demanda de cobre con la batería LiMnO₂ 114

Imagen 91: Evolución temporal de la demanda de cobre con la batería NMC 622 115

Imagen 92: Evolución temporal de la demanda de cobre con la batería NMC 811 115

Imagen 93: Evolución temporal de la demanda de cobre con la batería NCA 116

Imagen 94: Evolución temporal de la demanda de cobre con la batería LFP 116

Imagen 95: Evolución temporal de la demanda de cobalto con la batería LiMnO₂ 117

Imagen 96: Evolución temporal de la demanda de cobalto con la batería NMC 622 118

Imagen 97: Evolución temporal de la demanda de cobalto con la batería NMC 811 118

Imagen 98: Evolución temporal de la demanda de cobalto con la batería NCA 119

Imagen 99: Evolución temporal de la demanda de cobalto con la batería LFP 119

Imagen 100: Evolución temporal de la demanda de litio con la batería LiMnO₂ 120

Imagen 101: Evolución temporal de la demanda de litio con la batería NMC 622 121

Imagen 102: Evolución temporal de la demanda de litio con la batería NMC 811 121

Imagen 103: Evolución temporal de la demanda de litio con la batería NCA 122

Imagen 104: Evolución temporal de la demanda de litio con la batería LFP 122

Imagen 105; Evolución temporal de la demanda de manganeso con la batería LiMnO₂ 123

Imagen 106: Evolución temporal de la demanda de manganeso con la batería NMC 622 124



Imagen 107: Evolución temporal de la demanda de manganeso con la batería NMC 811 124

Imagen 108: Evolución temporal de la demanda de manganeso con la batería NCA 125

Imagen 109: Evolución temporal de la demanda de manganeso con la batería LFP . 125

Imagen 110: Evolución temporal de la demanda de níquel con la batería LiMnO2 ... 126

Imagen 111: Evolución temporal de la demanda de níquel con la batería NMC 622. 127

Imagen 112: Evolución temporal de la demanda de níquel con la batería NMC 811. 127

Imagen 113: Evolución temporal de la demanda de níquel con la batería NCA..... 128

Imagen 114: Evolución temporal de la demanda de níquel con la batería LFP 128

Imagen 115: Evolución temporal de la extracción de aluminio con la batería LiMnO2 129

Imagen 116: Evolución temporal de la extracción de aluminio con la batería NMC 622 130

Imagen 117: Evolución temporal de la extracción de aluminio con la batería NMC 811 130

Imagen 118: Evolución temporal de la extracción de aluminio con la batería NCA ... 131

Imagen 119: Evolución temporal de la extracción de aluminio con la batería LFP 131

Imagen 120: Evolución temporal de la extracción de cobre con la batería LiMnO2 .. 132

Imagen 121: Evolución temporal de la extracción de cobre con la batería NMC 622 133

Imagen 122: Evolución temporal de la extracción de cobre con la batería NMC 811 133

Imagen 123: Evolución temporal de la extracción de cobre con la batería NCA..... 134

Imagen 124: Evolución temporal de la extracción de cobre con la batería LFP 134

Imagen 125: Evolución temporal de la extracción de cobalto con la batería LiMnO2 135

Imagen 126: Evolución temporal de la extracción de cobalto con la batería NMC 622 136

Imagen 127: Evolución temporal de la extracción de cobalto con la batería NMC 811 136

Imagen 128: Evolución temporal de la extracción de cobalto con la batería NCA 137

Imagen 129: Evolución temporal de la extracción de cobalto con la batería LFP 137

Imagen 130: Evolución temporal de la extracción de litio con la batería LiMnO2 138

Imagen 131: Evolución temporal de la extracción de litio con la batería NMC 622 ... 139

Imagen 132: Evolución temporal de la extracción de litio con la batería NMC 811 ... 139

Imagen 133: Evolución temporal de la extracción de litio con la batería NCA 140

Imagen 134: Evolución temporal de la extracción de litio con la batería LFP 140

Imagen 135: Evolución temporal de la extracción de manganeso con la batería LiMnO2 141

Imagen 136: Evolución temporal de la extracción de manganeso con la batería NMC 622 142

Imagen 137: Evolución temporal de la extracción de manganeso con la batería NMC 811 142



Imagen 138: Evolución temporal de la extracción de manganeso con la batería NCA 143

Imagen 139: Evolución temporal de la extracción de manganeso con la batería LFP 143

Imagen 140: Evolución temporal de la extracción de níquel con la batería LiMnO2 . 144

Imagen 141: Evolución temporal de la extracción de níquel con la batería NMC 622 145

Imagen 142: Evolución temporal de la extracción de níquel con la batería NMC 811 145

Imagen 143: Evolución temporal de la extracción de níquel con la batería NCA 146

Imagen 144: Evolución temporal de la extracción de níquel con la batería LFP..... 146

Imagen 145: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de aluminio con la batería LiMnO2 147

Imagen 146: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de aluminio con la batería NMC 622 148

Imagen 147: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de aluminio con la batería NMC 811 148

Imagen 148: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de aluminio con la batería NCA 149

Imagen 149: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de aluminio con la batería LFP..... 149

Imagen 150: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería LiMnO2 150

Imagen 151: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería NMC 622..... 151

Imagen 152: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería NMC 811..... 151

Imagen 153: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería NCA..... 152

Imagen 154: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería LFP 152

Imagen 155: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobalto con la batería LiMnO2 153

Imagen 156: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobalto con la batería NMC 622..... 154

Imagen 157: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobalto con la batería NMC 811..... 154

Imagen 158: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobalto con la batería NCA..... 155

Imagen 159: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobalto con la batería LFP 155

Imagen 160: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de litio con la batería LiMnO2..... 156



Imagen 161: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de litio con la batería NMC 622.....	157
Imagen 162: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de litio con la batería NMC 811.....	157
Imagen 163: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de litio con la batería NCA.....	158
Imagen 164: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de litio con la batería LFP	158
Imagen 165: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería LiMnO2	159
Imagen 166: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería NMC 622	160
Imagen 167: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería NMC 811	160
Imagen 168: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería NCA	161
Imagen 169: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería LFP.....	161
Imagen 170: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de níquel con la batería LiMnO2	162
Imagen 171: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de níquel con la batería NMC 622.....	163
Imagen 172: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de níquel con la batería NMC 811.....	163
Imagen 173: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de níquel con la batería NCA.....	164
Imagen 174: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de níquel con la batería LFP	164
Imagen 175: Evolución temporal de la demanda de aluminio respecto a sus recursos con la batería LiMnO2	165
Imagen 176: Evolución temporal de la demanda de aluminio respecto a sus recursos con la batería NMC 622	166
Imagen 177: Evolución temporal de la demanda de aluminio respecto a sus recursos con la batería NMC 811	166
Imagen 178: Evolución temporal de la demanda de aluminio respecto a sus recursos con la batería NCA	167
Imagen 179: Evolución temporal de la demanda de aluminio respecto a sus recursos con la batería LFP.....	167
Imagen 180: Evolución temporal de la demanda de cobre respecto a sus recursos con la batería LiMnO2	168



Imagen 181: Evolución temporal de la demanda de cobre respecto a sus recursos con la batería NMC 622.....	169
Imagen 182: Evolución temporal de la demanda de cobre respecto a sus recursos con la batería NMC 811.....	169
Imagen 183: Evolución temporal de la demanda de cobre respecto a sus recursos con la batería NCA.....	170
Imagen 184: Evolución temporal de la demanda de cobre respecto a sus recursos con la batería LFP	170
Imagen 185: Evolución temporal de la demanda de cobalto respecto a sus recursos con la batería LiMnO2	171
Imagen 186: Evolución temporal de la demanda de cobalto respecto a sus recursos con la batería NMC 622	172
Imagen 187: Evolución temporal de la demanda de cobalto respecto a sus recursos con la batería NMC 811	172
Imagen 188: Evolución temporal de la demanda de cobalto respecto a sus recursos con la batería NCA	173
Imagen 189: Evolución temporal de la demanda de cobalto respecto a sus recursos con la batería LFP.....	173
Imagen 190: Evolución temporal de la demanda de litio respecto a sus recursos con la batería LiMnO2.....	174
Imagen 191: Evolución temporal de la demanda de litio respecto a sus recursos con la batería NMC 622.....	175
Imagen 192: Evolución temporal de la demanda de litio respecto a sus recursos con la batería NMC 811.....	175
Imagen 193: Evolución temporal de la demanda de litio respecto a sus recursos con la batería NCA.....	176
Imagen 194: Evolución temporal de la demanda de litio respecto a sus recursos con la batería LFP	176
Imagen 195: Evolución temporal de la demanda de manganeso respecto a sus recursos con la batería LiMnO2.....	177
Imagen 196: Evolución temporal de la demanda de manganeso respecto a sus recursos con la batería NMC 622	178
Imagen 197: Evolución temporal de la demanda de manganeso respecto a sus recursos con la batería NMC 811	178
Imagen 198: Evolución temporal de la demanda de manganeso respecto a sus recursos con la batería NCA	179
Imagen 199: Evolución temporal de la demanda de manganeso respecto a sus recursos con la batería LFP	179
Imagen 200: Evolución temporal de la demanda de níquel respecto a sus recursos con la batería LiMnO2	180



Imagen 201: Evolución temporal de la demanda de níquel respecto a sus recursos con la batería NMC 622	181
Imagen 202: Evolución temporal de la demanda de níquel respecto a sus recursos con la batería NMC 811.....	181
Imagen 203: Evolución temporal de la demanda de níquel respecto a sus recursos con la batería NCA.....	182
Imagen 204: Evolución temporal de la demanda de níquel respecto a sus recursos con la batería LFP	182
Imagen 205: Evolución temporal de la demanda y la extracción de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 1	183
Imagen 206: Evolución temporal del gasto de las reservas y recursos de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 1	184
Imagen 207: Evolución temporal de la demanda y la extracción de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 2	184
Imagen 208: Evolución temporal del gasto de las reservas y recursos de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 2	185
Imagen 209: Evolución temporal de la demanda y la extracción de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 3	185
Imagen 210: Evolución temporal del gasto de las reservas y recursos de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 3	186
Imagen 211: Evolución temporal de la demanda y la extracción de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 4	186
Imagen 212: Evolución temporal del gasto de las reservas y recursos de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 3	187
Imagen 213: Sensibilidad del gasto de reservas de litio en escenario 1 y batería LiMnO2 al variar el reciclado	188
Imagen 214: Sensibilidad del gasto de recursos de litio en escenario 1 y batería LiMnO2 al variar el reciclado	188
Imagen 215: Sensibilidad del gasto de reservas de litio en escenario 2 y batería NMC 622 al variar el reciclado.....	188
Imagen 216: Sensibilidad del gasto de recursos de litio en escenario 1 y batería LiMnO2 al variar el reciclado	188
Imagen 217: Sensibilidad del gasto de reservas de litio en escenario 2 y batería NMC 811 al variar el reciclado.....	188
Imagen 218: Sensibilidad del gasto de recursos de litio en escenario 1 y batería LiMnO2 al variar el reciclado	188
Imagen 219: Sensibilidad del gasto de reservas de litio en escenario 3 y batería NCA al variar el reciclado	189
Imagen 220: Sensibilidad del gasto de recursos de litio en escenario 1 y batería LiMnO2 al variar el reciclado	189



Imagen 221: Sensibilidad del gasto de reservas de litio en escenario 4 y batería LFP al variar el reciclado	189
Imagen 222: Sensibilidad del gasto de recursos de litio en escenario 1 y batería LiMnO ₂ al variar el reciclado	189
Imagen 223: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus reservas al variar la longitud de su conexión de baja tensión.....	190
Imagen 224: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus recursos al variar la longitud de su conexión de baja tensión.....	190
Imagen 225: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus reservas al variar la longitud de su conexión de media tensión	190
Imagen 226: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus recursos al variar la longitud de su conexión de media tensión	190
Imagen 227: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus reservas al variar la longitud de su conexión de media-alta y alta tensión	191
Imagen 228: sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus recursos al variar la longitud de su conexión de media-alta y alta tensión	191
Imagen 229: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus reservas al variar el número de cargadores en batería NCA y escenario 2.....	191
Imagen 230: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus recursos al variar el número de cargadores en batería NCA y escenario 2.....	191
Imagen 231: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus reservas al variar el número de cargadores en batería LFP y escenario 2	192
Imagen 232: Sensibilidad del gasto de cobre respecto a sus recursos al variar el número de cargadores en batería LFP y escenario 2	192



Universidad de Valladolid

Análisis de los requerimientos materiales de la transición
hacia una movilidad eléctrica



Daniel Pulido Sánchez
Grado en Ingeniería Mecánica



Índice de tablas

Tabla 1: : km de vías férreas en el mundo y otros factores	8
Tabla 2: Índices de reciclaje a nivel mundial	10
Tabla 3: Matriz de tipos de transporte y tecnologías de movilidad	26
Tabla 4: Características de las baterías	48
Tabla 5: Características de la batería LMO	49
Tabla 6: Características de la batería NMC.....	50
Tabla 7: Características de las baterías NCA	52
Tabla 8: Características de las baterías LFP	54
Tabla 9: Comparación de los diferentes procesos de reciclaje de las baterías.....	58
Tabla 10: Índices de reciclaje de los diferentes minerales según el proceso empleado en el reciclaje de las baterías.....	59
Tabla 11: Elementos de una batería tipo de los diferentes tipos de vehículos electrificados	60
Tabla 12: Masa de elementos presentes en el cátodo de las baterías y en el electrolito	60
Tabla 13: Energía incorporada en los elementos críticos de las baterías	61
Tabla 14: Características de las baterías evaluadas	62
Tabla 15: Elementos de las baterías evaluadas.....	62
Tabla 16: Energía incorporada en la fabricación de las baterías.....	63
Tabla 17: Cantidad de cobre según el tipo de vehículo, sin batería	65
Tabla 18: Intensidad energética del cobre	65
Tabla 19: Energía empleada en la obtención del cobre del vehículo, sin batería.....	65
Tabla 20: Composición y otros factores de los puntos de carga.....	67
Tabla 21: Energía incorporada en la fabricación e instalación de los puntos de carga .	68
Tabla 22: Materiales que componen las redes eléctricas empleadas en alimentar los cargadores	68
Tabla 23: Metros de los diferentes tipos de línea por MW de batería	69
Tabla 24: Masa de los componentes de las líneas por MW de batería	70
Tabla 25: Energía incorporada de los componentes de las líneas por MW de batería .	70
Tabla 26: características del modelo de catenaria CA-220 y CA-160, ambas emplean Cu- ETP	74
Tabla 27: kilómetros de vías sin electrificar	74
Tabla 28: Composición y energía incorporada del cobre ETP	75
Tabla 29: Cantidad de cobre ETP empleado en las catenarias.....	75
Tabla 30: Cantidad de cobre empleado en las subestaciones de tracción	75
Tabla 31: Energía y masa por km necesarios para electrificar el ferrocarril a nivel mundial usando CA-160	75
Tabla 32: Energía y masa por km necesaria para electrificar el ferrocarril a nivel mundial usando CA-220	76



Tabla 33: Energía incorporada de los materiales empleados en las células de combustible	82
Tabla 34: Recursos y Reservas de diversos minerales.....	84
Tabla 35: Composición de los diferentes tipos de baterías	85
Tabla 36: Vehículos que emplean cada tipo de batería en el año 2015	86
Tabla 37: Cobre presente en cada tipo de vehículo a respecto a los ICE(sin contabilizar la batería).....	88
Tabla 38: Composición y vida útil de los cargadores.....	89
Tabla 39: Cargadores existentes por tipo vehículo	90
Tabla 40: Composición y tiempo de vida útil de las redes eléctricas.....	91
Tabla 41: Longitud de la infraestructura de conexión de los cargadores	92
Tabla 42: Inputs del ferrocarril	93
Tabla 43: Índices de reciclaje a nivel mundial	95
Tabla 44: Diferentes valores de variables según el escenario simulado.....	103
Tabla 45: Requerimientos de materiales en relación a las reservas en los 4 escenarios	193
Tabla 46: Requerimientos de materiales en relación a los recursos en los 4 escenarios	195



Glosario de Acrónimos

- GHG**: Gases de efecto invernadero.
- RC**: Contenido reciclado.
- EOL-RR**: Ratio de reciclaje de fin de vida.
- BEV**: Vehículo eléctrico de baterías.
- ICE**: Motor de combustión interna.
- PHEV**: Vehículo híbrido enchufable.
- HEV**: Vehículo híbrido.
- FCV**: Vehículo de pila de combustible.
- NMC**: Níquel-Manganeso-cobalto.
- NCA**: Níquel-Cobalto-Aluminio.
- LFP**: Litio fosfato de hierro.
- EnU**: “Energy of use” Energía total necesaria para fabricar un elemento.
- PEM**: Membrana polimérica que permite el paso de protones.
- E-bike**: Vehículo unipersonal eléctrico.
- 4W**: Vehículos de 4 ruedas particulares sin electrificar.
- 4We**: Vehículos de 4 ruedas particulares electrificados.
- 2W**: Vehículos de 2 ruedas particulares sin electrificar.
- 2We**: Vehículos de 2 ruedas particulares electrificados.
- HV**: Vehículos comerciales pesados sin electrificar.
- HVe**: Vehículos comerciales pesados electrificados.
- LV**: Vehículos comerciales ligeros sin electrificar.
- LVe**: Vehículos comerciales ligeros electrificados.
- eBus**: Bus electrificado.



Universidad de Valladolid

Análisis de los requerimientos materiales de la transición
hacia una movilidad eléctrica



Daniel Pulido Sánchez
Grado en Ingeniería Mecánica



1. Resumen

Actualmente, podemos ver un cambio en la tecnología que usamos para desplazarnos, este cambio de movilidad hacia una tecnología de propulsión eléctrica está sucediendo lenta pero inexorablemente. Unido a esta tecnología, inicialmente concebida como más respetuosa con el medio ambiente y más eficiente energéticamente, surge un problema debido a la dudosa disponibilidad futura de los materiales que requieren. Una demanda exhaustiva de este tipo de movilidad podría contribuir al agotamiento de los mismos, derivando esto en importantes problemas para la fabricación de vehículos y de todas las demás tecnologías que empleen estos materiales si no encontramos alternativas que nos permitan no agotar nuestros recursos naturales a largo plazo. Debido a este problema que se ha descrito, en el presente proyecto, se van a ejecutar varias simulaciones en un modelo de dinámica de sistemas que nos ayude a estimar que materiales relacionados con la transición en el sector transporte podrían ser más críticos en el futuro. Una vez ejecutadas las simulaciones sobre distintos escenarios, observamos como el aluminio, cobalto, cobre, manganeso, platino y níquel poseen una demanda tan alta que provocaría el agotamiento de gran parte o de la totalidad de sus reservas, por ello propondremos medidas alternativas para intentar evitar su agotamiento a causa de la utilización de este tipo de movilidad.

Palabras clave: -Movilidad eléctrica -Recursos -Minerales -Viabilidad -Alternativas

1. Abstract

Today, we can see a change in the technology we use to move around, this shift in mobility to electric propulsion technology is happening slowly but inexorably. Coupled with this technology, initially conceived as more environmentally friendly and energy efficient, a problem arises due to the uncertain future availability of the materials required. A comprehensive demand for this type of mobility could contribute to the depletion of these materials, leading to major problems for the manufacture of vehicles and all other technologies that use these materials if we do not find an alternative that will not deplete our natural resources in the long term. Due to all these problems that have been described, in the present project, several simulations are going to be executed in a system dynamics model that will help us estimate which materials related to the transition in the transport sector could be more critical in the future. Once the simulations have been carried out, about different scenarios, we observe how aluminium, cobalt, copper, manganese, platinum and nickel are in such high demand that they would cause the exhaustion of a large part or all of their reserves. Therefore, we will propose alternative measures to try to avoid their exhaustion due to the use of this mobility technology

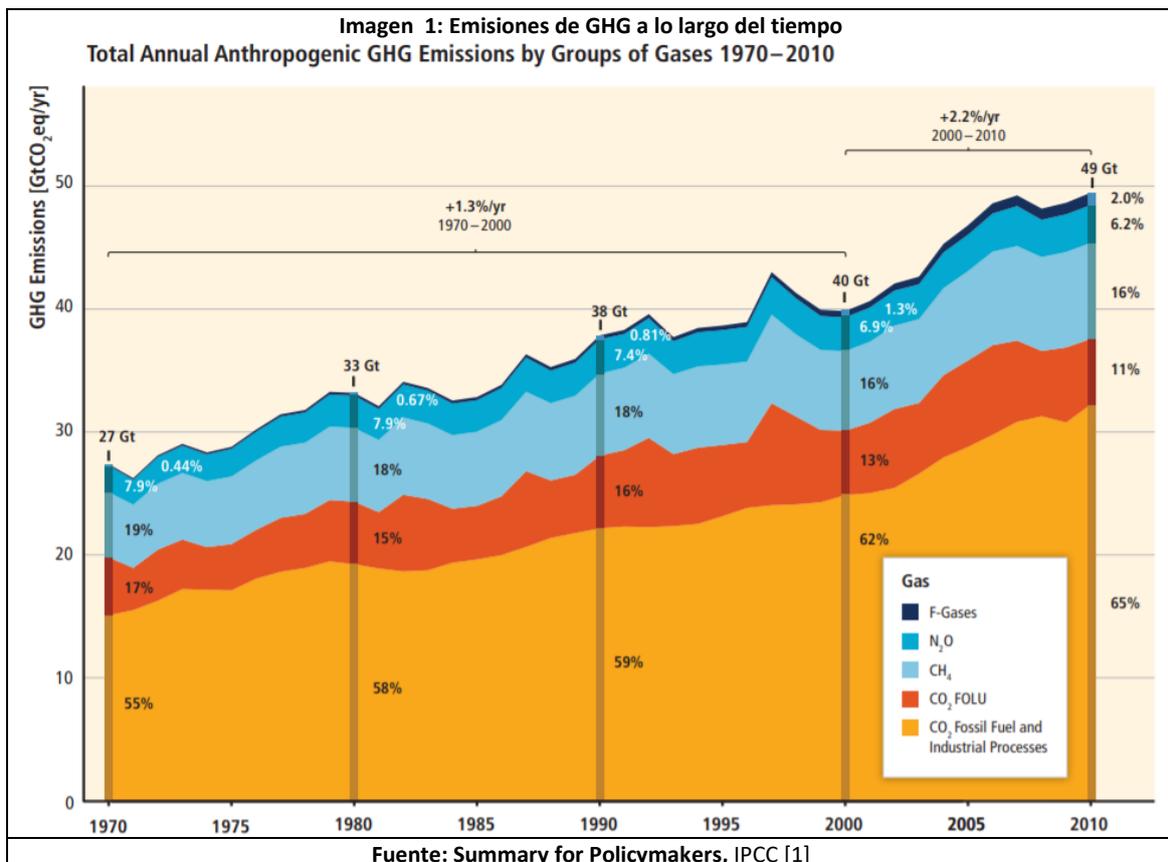
Key words: -Electric mobility -Resources -Minerals -Feasibility -Alternatives



2. Introducción

1. Presentación del problema

Actualmente, tras millones de años de evolución y avances científicos de diversa índole vivimos en un mundo dominado por la tecnología. Esto ha hecho que concibamos y fabriquemos elementos que nos ayuden a tener una vida más fácil, disfrutar más del ocio, realizar un mejor trabajo, poder investigar como curar nuevas enfermedades o simplemente tener más tiempo libre. Estos elementos se han convertido en herramientas vitales en nuestra sociedad, teléfono móvil, automóvil, televisión, ordenador, agua caliente, calefacción, etc. Todo esto no ha sido inocuo para el mundo en el que vivimos, todos los avances tecnológicos que nos permiten tener energía eléctrica en las casas, la fabricación de todo tipo de productos que cubran nuestras necesidades primarias o de ocio, la fabricación de elementos que nos permitan transportarnos a diferentes lugares y el combustible empleado para ello, todos estos comportamientos que a día de hoy concebimos como normales, requieren de una gran cantidad de energía y emiten una gran cantidad de gases contaminantes y de efecto invernadero [1].





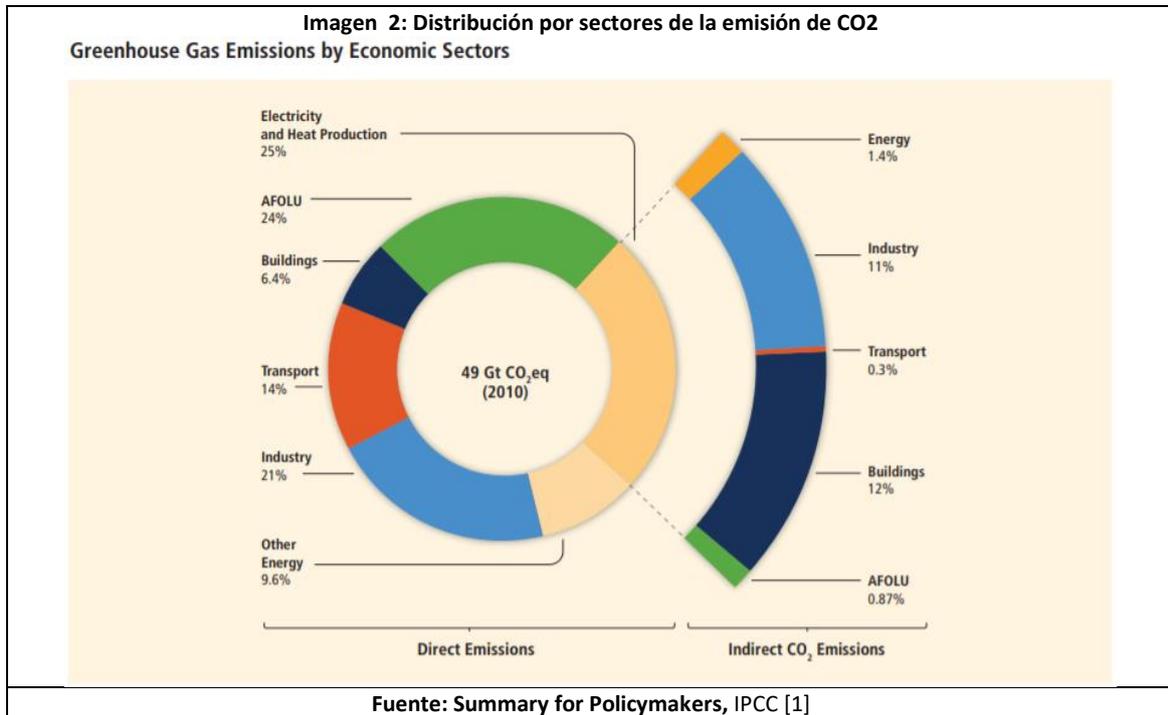
En la gráfica anterior podemos observar (Imagen 1) como la emisión de estos gases no ha hecho más que aumentar a lo largo de los años a pesar del aumento de la eficiencia de los sistemas tecnológicos, como los vehículos o la fabricación de productos. Esto está ocurriendo a causa de varias razones, en primer lugar, países que hace pocos años no empleaban apenas combustibles fósiles debido a cuestiones socioeconómicas a día de hoy empiezan a demandarlos, como en la producción masiva de electricidad, el uso y la fabricación de automóviles...En segundo lugar podemos enunciar la mayor demanda de bienes y servicios actual (crecimiento económico), y que éstos cada vez duran menos (obsolescencia programada) como es el caso de los automóviles o los teléfonos móviles, existe una tendencia a tener la última generación de elementos tecnológicos aunque nuestros elementos antiguos funcionen bien y cumplan su función perfectamente. Como podemos observar, estas dos razones anteriores se basan en el aumento de la demanda de bienes y servicios en el mundo, este suceso, ha sido estudiado mediante diferentes análisis de contribución a las emisiones totales y han demostrado que esta es la mayor causa de incremento de las emisiones a nivel mundial [2]. Por otro lado, la necesidad económica de lograr aumentar el PIB de los diferentes estados, provoca siempre una subida del gasto energético [3]. Resumiendo todo lo anterior podemos decir que cada vez necesitamos extraer más recursos y energía de nuestro planeta produciendo en este camino gran cantidad de gases contaminantes y de efecto invernadero.

Estos problemas han hecho que los diferentes gobiernos y órganos legislativos busquen distintas soluciones con el fin de iniciar una transición hacia una sociedad sostenible [4]. Es decir, una sociedad respetuosa, justa con el medio ambiente y con todos los seres vivos que habitan el planeta y que no comprometa la vida de las futuras generaciones a causa de los daños que se pueden provocar a nuestro planeta en el presente.

Una de las soluciones que se están empezando a impulsar a día de hoy, por ejemplo en la UE, es la economía circular [5]. Podemos definir esta economía como una estrategia que busca reducir la incorporación de materiales vírgenes a los procesos productivos y aumentar el reciclaje o reutilización de los desechos resultantes de estos procesos, consiguiendo con esto, convertir los procesos productivos en diferentes bucles en los que ni entran apenas materiales vírgenes ni salen apenas residuos. Con esta estrategia conseguimos fabricar elementos extrayendo pocos recursos de nuestro planeta, produciendo pocos residuos y todo ello conlleva además, un gran ahorro de energía debido a las sinergias de la reutilización y reciclaje de los bienes.

Otra de las soluciones que se están aplicando es la de promover el aumento de eficiencia energética de diferentes sistemas, se exige que los edificios sean eficientes energéticamente [6] (un ejemplo de ello sería el aulario IndUVa de la universidad de Valladolid), los aparatos electrónicos llevan consigo un certificado de eficiencia donde

indican al consumidor la clasificación del aparato según el gasto energético de este [7], obligando a los vehículos a ser cada vez menos contaminantes [8], promoviendo la integración de las energías renovables en el hogar...



Dentro del ámbito de este problema global, en este trabajo abarcaremos el sector del transporte, así que, a partir de este momento nos centraremos en ver que parte de la responsabilidad posee este sector sobre esta situación. El sector del transporte a lo largo del año 2010 emitió el 14% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial [1] como podemos observar en la Imagen 2. Estas emisiones dependen mucho del país, destacando la OECD y los países ricos, que emiten la gran mayoría de los gases de efecto invernadero del transporte [9].

Fabricar los automóviles es un gasto enorme de energía y recursos, pero el automóvil, solo se fabrica una vez, en cambio, circula durante más de 10 años recorriendo cientos de miles de kilómetros y consumiendo una gran cantidad de combustible. Este razonamiento ha hecho que muchos gobiernos y órganos legislativos intenten promover sistemas de movilidad más limpios que los actuales [10]. Han promovido el transporte público, el evitar en todo lo posible el uso innecesario del vehículo y como última medida, en la actualidad se está promoviendo la movilidad eléctrica.

Los órganos legislativos [11] buscan con ello reducir la dependencia de combustibles fósiles externos al país (y que pueden agotarse) y sobretodo la reducción de la emisión de gases (transición a una sociedad sostenible) del actual sistema de movilidad formado en su mayoría por los medios de transporte de combustión.



Por ello se está llevando a cabo un cambio en el sistema de transporte por carretera y por vías férreas hacia una tecnología que emplea la electricidad para moverse. En los ámbitos del transporte marítimo y aéreo no hay indicios de que se pueda implementar la tecnología de movilidad eléctrica a corto o medio plazo (<~30 años), esto es debido a que el grado de madurez de la tecnología actual o de un futuro próximo no pueden hacer frente los requerimientos de estos transportes para funcionar correctamente de forma económica y medioambientalmente viable.

Además de las fuentes convencionales para obtener energía eléctrica, en un futuro no muy lejano, la electricidad empleada en este tipo de transporte puede provenir del hidrogeno según diversos autores [12] y ser empleado por las células de combustible, por lo que podemos decir que puede ser un elemento muy importante en un futuro próximo. Además, tanto la industria del hidrogeno [13], como algunos autores [14] coinciden en que va a ser un elemento muy importante en la transición a una sociedad sostenible, pudiendo ser usado tanto en vehículos, como en las casas, para obtener energía eléctrica y calorífica emitiendo muy poca cantidad de gases contaminantes y de efecto invernadero. Este gas además, puede ser obtenido mediante electrolisis. Como desventajas podemos decir que es un gas peligroso si no se manipula correctamente [15], difícil de confinar (es el átomo más pequeño de la tabla periódica), posee una baja rentabilidad energética [16] y que habría que hacer toda una nueva infraestructura de transporte para este gas, además de una gran cantidad de plantas de electrolisis y de destilación de agua para la obtención del hidrogeno de forma ecológica, mediante la energía eléctrica obtenida de las fuentes de energía renovables [17].

Las nuevas tecnologías de movilidad eléctrica, a priori más respetuosas con el medio ambiente, tiene asociado un problema, muchos de los materiales que la componen poseen elementos críticos [18]. Diversos autores [19], [20] han encontrado que este tipo de elementos son los que pueden presentar problemas de agotamiento en un futuro próximo, el litio o el cobalto son ejemplos de este tipo de materiales.

Estos materiales están presentes en muchos ámbitos de esta tecnología, los elementos que permiten moverse a este tipo de vehículos de forma directa, como los motores eléctricos, los elementos que permiten almacenar o transmitir la energía eléctrica al motor como las células de combustible o el hidrogeno que emplean, las baterías en la automoción o las catenarias en el transporte ferroviario o los elementos que nos permiten que esa energía llegue a las baterías o a las catenarias como la infraestructura de carga de los vehículos desde la red hasta el punto de carga o la que nos permite llevar la electricidad a las catenarias desde las subestaciones.

Todos los elementos citados anteriormente emplean minerales de forma intensiva, aluminio, cobre, litio, platino, hierro, cobalto, son ejemplos de algunos de los minerales que requieren estas tecnologías y varios son escasos en nuestro planeta, lo

que puede ser crítico para el avance de la tecnología, para nuestra economía y también para nuestro planeta pudiendo todo ello provocar un colapso ambiental y socioeconómico que nos obligue a llevar a cabo un cambio total en la forma en la que vivimos y en la tecnología que empleamos en un futuro no tan lejano. Varios autores han sido pioneros en escribir diversos artículos, tratando de llamar la atención sobre este problema de agotamiento de los recursos minerales [19], [21]–[24].

A continuación se explicara la situación actual de los dos sectores de transporte terrestre que se quieren electrificar en un futuro próximo para poder ver el alcance o magnitud del problema.

1.1 Transporte rodado:

Para poder ver la magnitud del problema debemos ver la cantidad de vehículos que se encuentran circulando por carretera hoy día en el mundo [25], para ello los enumeraremos respecto de su uso y continente:

-Vehículos particulares y de transporte público:

- Se estima en Europa una cantidad de 333.553.000 vehículos.
- Se estima en América una cantidad de 238.260.000 vehículos.
- Se estima en Asia y Oceanía una cantidad de 344.456.000 vehículos.
- Se estima en África una cantidad de 30.810.000 vehículos.

En total se estiman 947.080.000 vehículos de pasajeros a nivel mundial

-Vehículos de mercancías:

- Se estima en Europa una cantidad de 53.996.000 vehículos.
- Se estima en América una cantidad de 175.465.000 vehículos.
- Se estima en Asia y Oceanía una cantidad de 91.766.000 vehículos.
- Se estima en África una cantidad de 13.993.000 vehículos.

En total se estiman 335.190.000 vehículos de mercancías a nivel mundial

-No se han contabilizado, ni los vehículos de movilidad unipersonal, ni los vehículos de 2 ruedas a día de hoy debido a la falta de datos actual en este tipo de vehículos.

Se puede observar la gran cantidad de vehículos de distintos tipos que circulan en la actualidad por las carreteras, lo que se puede traducir en una ingente cantidad de materiales para fabricarlos, si estos materiales además son escasos, se presenta un gran problema.

1.2 Transporte ferroviario:

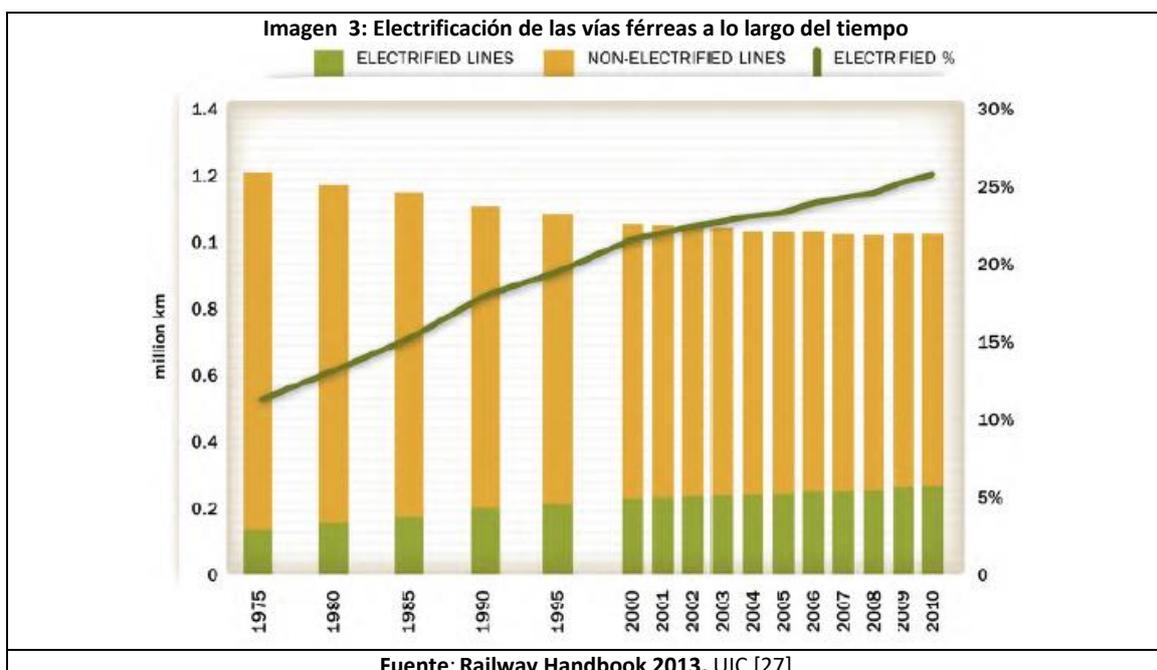
El transporte ferroviario tan necesario en el transporte de personas y mercancías se aprovecha de la electricidad para moverse en menor o mayor medida desde hace décadas, lo que requiere una serie de infraestructuras que emplean una gran cantidad de materiales [26]. A pesar de que ya el transporte ferroviario de cercanías y el metro funcionan casi completamente con electricidad, actualmente se está produciendo una electrificación rápida de los trenes de media, larga distancia [27] y mercancías debido a las razones comentadas anteriormente.

Para conocer con exactitud la magnitud de la electrificación que se puede llevar a cabo en los próximos años debemos saber la cantidad de vías férreas que hay en el mundo y cuantas se encuentran ya electrificadas (Tabla 1 e Imagen 3).

Tabla 1: : km de vías férreas en el mundo y otros factores

	Longitud de las líneas (Km)
Global	1142014
África	77018
América	376556
Asia y Oceanía	332126
Rusia	85545
Europa(incluyendo Turquía)	270770
Otros datos	
Vías dobles, triples... (%)	50
Vías ya electrificadas (%)	27

Fuente: Elaboración propia con datos de la UIC [27], [28]



Una vez obtenidos los datos [27], [28] que nos muestran la gran cantidad de vías que se podrían electrificar, ya podemos ver el alcance y la magnitud de la electrificación del sistema de vías férreas empleadas por el ferrocarril.

1.3 Reciclaje

Para seguir dando forma al problema que se está explicando, se debe comentar un elemento muy importante en la actualidad en el ámbito del consumo de los recursos, el reciclaje.

Como hemos indicado en apartados anteriores los recursos en nuestro planeta son limitados y algunos elementos como el litio o el platino son bastante escasos y difíciles de obtener, por lo que ser capaces de reciclar los diversos productos que llegan al final de su vida útil para emplear sus materiales en la fabricación de nuevos objetos y así no tener que obtener los materiales de las minas y yacimientos naturales es un punto clave en el futuro de nuestro planeta. A todas las razones anteriores para llevar a cabo el reciclaje podemos sumarle que en la mayoría de casos gracias a él podemos producir productos más baratos y con una cantidad menor de energía [29], contaminando menos además de facilitar a los fabricantes otras vías de suministro, lo que les permite aumentar su flexibilidad y asegurarse un suministro determinado respecto a imprevistos en los yacimientos naturales.

Por desgracia a pesar de que la cantidad de elementos reciclados cada año aumenta en porcentaje respecto del año anterior a nivel global esta subida no es todo lo rápida que debería y todas estas razones que nos indican que debemos hacer del reciclaje un elemento fundamental en nuestra sociedad no parecen ser suficientes.

Imagen 4: Planta de reciclado de chatarra



Fuente: <https://www.lavanguardia.com/natural/si-existe/20200124/473032935671/reciclaje-metal-minas-urbanas-brl.html>

Este crecimiento lento se debe en gran medida a la relativa poca investigación sobre nuevos procesos que nos permitan reciclar más materiales sin perder pureza, a que algunas industrias rechazan el reciclaje debido a su complejidad técnica o a la

necesaria inversión inicial, o en el ámbito particular a la falta de concienciación sobre el reciclaje o la falta de medios para llevarlo a cabo [30] como papeleras, puntos limpios o plantas de reciclado como la que podemos ver en la imagen (Imagen 4). Estos son los principales factores que lastran la subida de esta herramienta tan importante a priori en nuestro futuro próximo.

Para ver la situación actual del reciclaje de algunos metales empleados en la movilidad eléctrica, enumeraremos sus índices de reciclaje, pero antes, para entender los datos exactos actuales del reciclaje general a nivel mundial [31], se deben explicar varios conceptos con el fin de entender de qué estamos tratando:

-Contenido reciclado (RC): El contenido reciclado es la fracción de metal reciclado (chatarra) presente en la fabricación actual de ese metal.

-Ratio de reciclaje de fin de vida (EOL-RR): El ratio de reciclaje de fin de vida nos indica que porcentaje de un metal determinado se recicla al final de la vida útil del producto en el que se encuentra, conservando sus propiedades físicas y químicas intactas.

Una vez explicados los términos a utilizar podemos enumerar las cifras en la Tabla 2:

	Li (%)	Ni (%)	Co (%)	Mn (%)	Al (%)	Fe (%)	Cu (%)
RC (UNEP)	0	35	32	37	35	40	28,5
EOL-RR (UNEP)	0,5	60	68	53	56	71	48
EOL-RR (Sverdrup et al)	10	60	40	45	75	60	60

Fuente: Elaboración propia con datos de Recycling Rates of metals, UNEP y An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity, H.U. sverdrup et al.[20], [31]

Como podemos observar en la tabla los datos son bastante similares entre los diversos metales (muy bajos con respecto a su potencial de reciclado) con una excepción, el litio, que casualmente se emplea en gran cantidad en el electrolito de las baterías utilizadas en la movilidad eléctrica y es el metal menos reciclado de los evaluados.

2. Motivación y metodología del análisis, conclusión de la introducción

Todos estos aspectos confluyen, llegando a la conclusión de que será necesario usar una gran cantidad de materiales de origen primario, muchos de ellos escasos, difíciles de obtener y caros, si queremos cambiar la movilidad hacia la electrificación, ya que serían necesarios para producir una gran cantidad de vehículos de este tipo e infraestructuras para poder usarlos y no somos capaces de reciclar tanto como deberíamos.

Debido a este gran problema, explicado en esta introducción, y con el fin de dar alternativas viables para este cambio de movilidad, a lo largo de este trabajo, se



realizará un estudio de viabilidad en lo que confiere a la disponibilidad a lo largo del tiempo de todos los materiales empleados en el ámbito de la movilidad eléctrica. Podemos citar por ejemplo el cobre, o los diferentes materiales presentes en las baterías empleadas así como los empleados en las infraestructuras que acarrea esta tecnología [19], como los puntos de carga o electrificar las vías del tren. Para llevar a cabo este estudio exhaustivo de las nuevas tecnologías de movilidad electrificadas se va a utilizar el modelo MEDEAS [32], un modelo del mundo que nos permitirá conocer si es viable seguir utilizando en el futuro los materiales previamente citados o si por desgracia la utilización de estos materiales acabara con sus reservas mundiales. Para poder simular el modelo debemos responder antes a ciertas preguntas, ¿qué materiales utiliza esta tecnología?, ¿en qué cantidad?, ¿Cuánta energía nos cuesta obtener esos materiales?, ¿cuál será la demanda de la tecnología en cuestión?, ¿cuáles son las reservas de estos materiales a nivel mundial? y ¿cuántos de estos materiales se reciclan y en qué porcentaje?

Tras obtener respuestas para las cuestiones anteriores mediante la indagación y estudio de bibliografía especializada de cada uno de los apartados, podemos convertir estas en diversos inputs, que posteriormente, se introducen en el modelo MEDEAS modificado para que, a su vez, junto a diversas políticas o escenarios que estableceremos con el fin de imitar las distintas regulaciones físicas, políticas, suposiciones...el programa empleado pueda simular un mundo basado en nuestro mundo real, obteniendo una evolución temporal de la situación de la tecnología de movilidad eléctrica y por lo tanto de los materiales empleados en ella, todo ello gracias a VenSim un programa de simulación de sistemas dinámicos.

El modelo de sistemas dinámicos conformado en este TFG y enfocado a los materiales utilizados por las nuevas tecnologías de transporte se situara a su vez dentro del modelo MEDEAS, en el marco del proyecto LOCOMOTION [33] (este proyecto busca identificar los caminos más efectivos hacia una sociedad sostenible con bajas emisiones), completando la parte que corresponde a las nuevas tecnologías del transporte, introduciendo más tipos de baterías y las nuevas infraestructuras necesarias para que este electrificación pueda funcionar. El empleo de esta metodología tiene grandes ventajas, en primer lugar podemos ver las tendencias temporales del ámbito que queremos estudiar, en segundo lugar, podemos introducir políticas buscando cambios en los sistemas y poder así encontrar soluciones a los problemas y por último lugar, podemos obtener gran precisión al estar el modelo conformado en este TFG dentro de un modelo con gran complejidad y exactitud como MEDEAS.





3. Objetivos

A la hora de enumerar los diferentes objetivos del trabajo, para verlos de forma clara y concisa se pueden separar en función de la obtención; Anterior o por medio de la simulación del modelo MEDEAS modificado:

-Anterior a la simulación:

- Evaluar la situación actual del transporte para conocer la magnitud y el alcance de los problemas unidos al proceso de electrificación en un futuro próximo.
- Realizar una investigación exhaustiva para obtener información sobre las tecnologías de movilidad eléctrica obteniendo datos que estimen cuáles son las tecnologías que destacaran en el futuro, cuál será su demanda, que infraestructuras se necesitan para su implementación, cuales son los materiales utilizados por las tecnologías y sus infraestructuras, y para finalizar cuanta energía debemos emplear en la obtención de estos materiales.
- Obtener datos sobre la cantidad de reservas materiales presentes a nivel mundial de los materiales empleados en la movilidad eléctrica, visualizar que materiales se reciclan actualmente, en qué porcentaje y como puede variar esto en el futuro.
- Identificar todas las variables presentes en el sistema para poder posteriormente fabricar un modelo completo y lo más preciso posible.
- Integrar todos los datos en el modelo MEDEAS de la universidad de Valladolid, conformado en el programa VenSim, para simular el cambio de movilidad en un mundo completo.

-Por medio de la simulación:

- Obtener los resultados e interpretarlos observando en la simulación que materiales pueden ser críticos (desabastecimiento) en el futuro y que limitaciones puede tener la tecnología empleada a causa de esto.
- Mostrar posibles alternativas o soluciones en el uso de materiales y del transporte para evitar el desabastecimiento de diversos materiales en un futuro y poder garantizar el uso de esta tecnología en el futuro.



4. Metodología

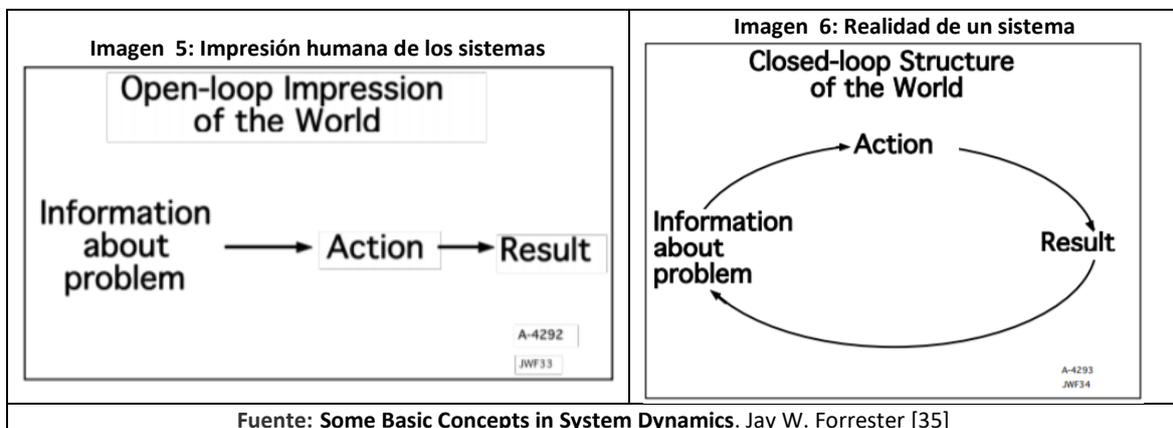
1. Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas [34] es una herramienta utilizada para analizar y diseñar políticas mediante el modelado y simulación de sistemas. Esta herramienta utiliza datos para modelar las relaciones entre las partes de un determinado sistema y ver cómo estas relaciones influyen en el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

La dinámica de sistemas se emplea en problemas dinámicos que surgen en sistemas complejos con múltiples relaciones. Es decir sistemas con relaciones internas, relaciones externas, retroalimentaciones, acumulaciones, retrasos....

Esta herramienta se creó para mejorar la comprensión de los procesos industriales y su objetivo es el de vislumbrar que causas estructurales provocan un determinado comportamiento de un sistema.

La utilidad de esta herramienta destaca a la hora de abordar problemas complejos, ya que los humanos solemos pensar en términos de relaciones causa-efecto (Imagen 5) suprimiendo las retroalimentaciones (Imagen 6), cuando estas, son básicas y muy importantes en el comportamiento de un determinado sistema[35].



Esta herramienta no destaca por su alta precisión en el resultado de un modelo de gestión específico, no se utiliza para hacer modelos de predicción puros propiamente dicho, donde destaca, es en la precisión de la comparación de distintas políticas de gestión de un sistema, por lo que puede ser muy útil para ver qué diferencias provocan en un sistema diferentes políticas aplicadas.

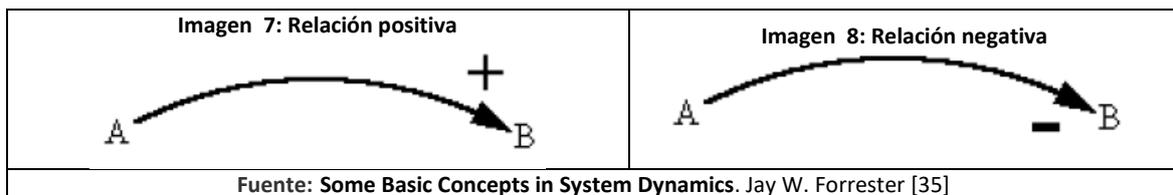
Para seguir explicando los fundamentos de la dinámica de sistemas es necesario explicar en qué consisten los diagramas causales y sus elementos:

1.1 Diagrama causal

“El Diagrama Causal es un diagrama que recoge los elementos clave del Sistema y las relaciones entre ellos”[34].

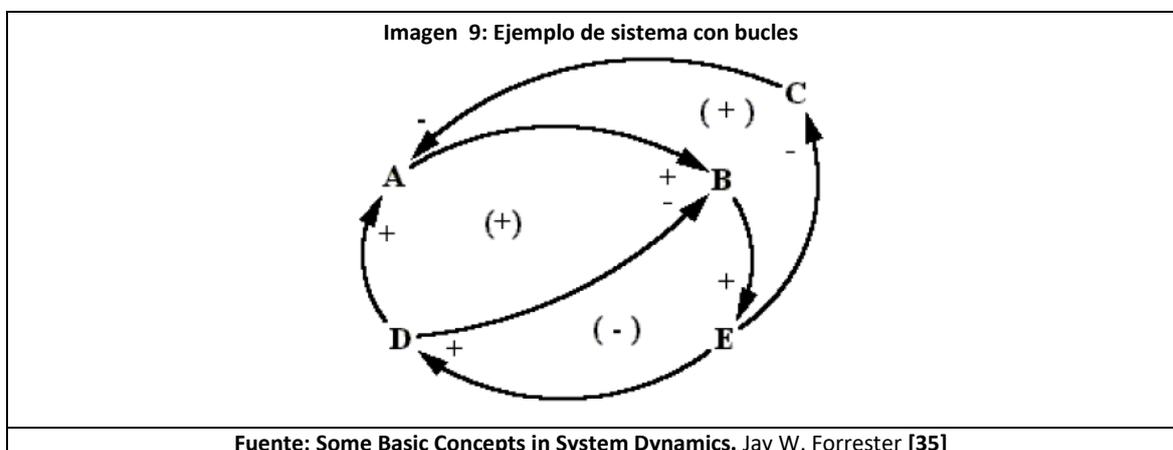
Una vez conocemos las variables del sistema y las relaciones entre ellas podemos representarlo gráficamente. En este diagrama las relaciones son representadas por flechas entre las variables del sistema involucradas en esta relación. Estas flechas se acompañan de un signo (+ o -) que indica la influencia ejercida de una variable sobre otra. Un signo “+” indica que la variable de origen provoca un cambio del mismo sentido en la variable de destino. El signo “-” simboliza un cambio de sentido contrario.

Por lo que cuando **un incremento de A, produce un incremento de B**, tendremos una relación **positiva** (Imagen 7). Y cuando **un incremento de A, produce una disminución de B**, tendremos una relación **negativa** (Imagen 8), lo representamos todo[35]:

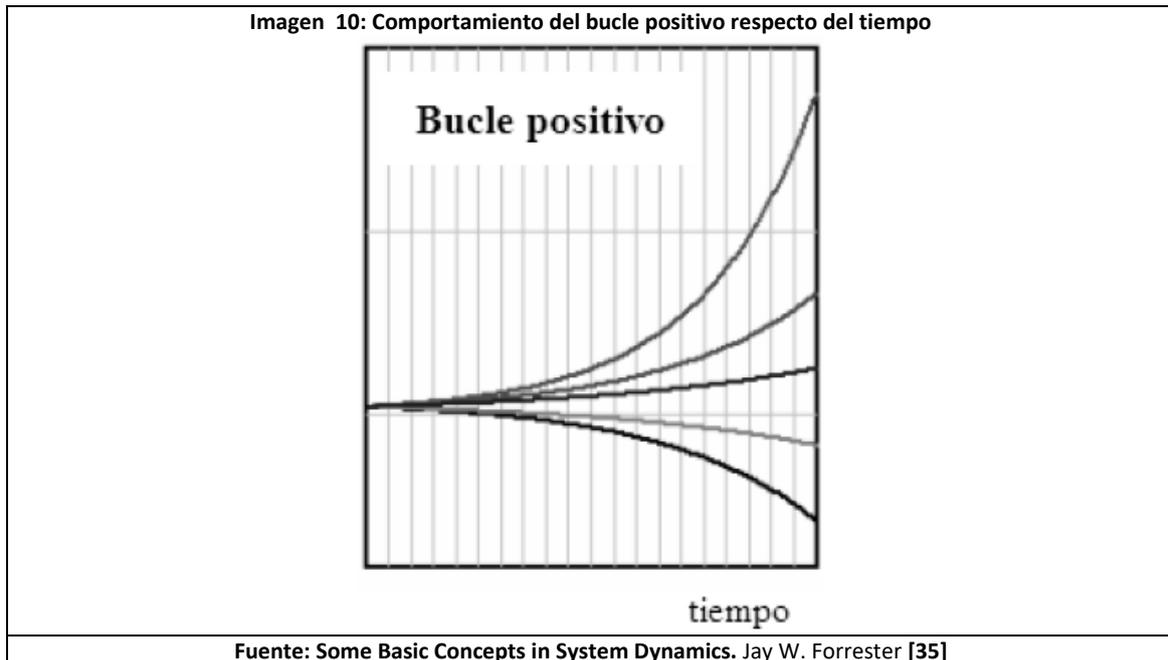


“Una cadena cerrada de relaciones causales recibe el nombre de bucle, retroalimentación o feedback”[34].

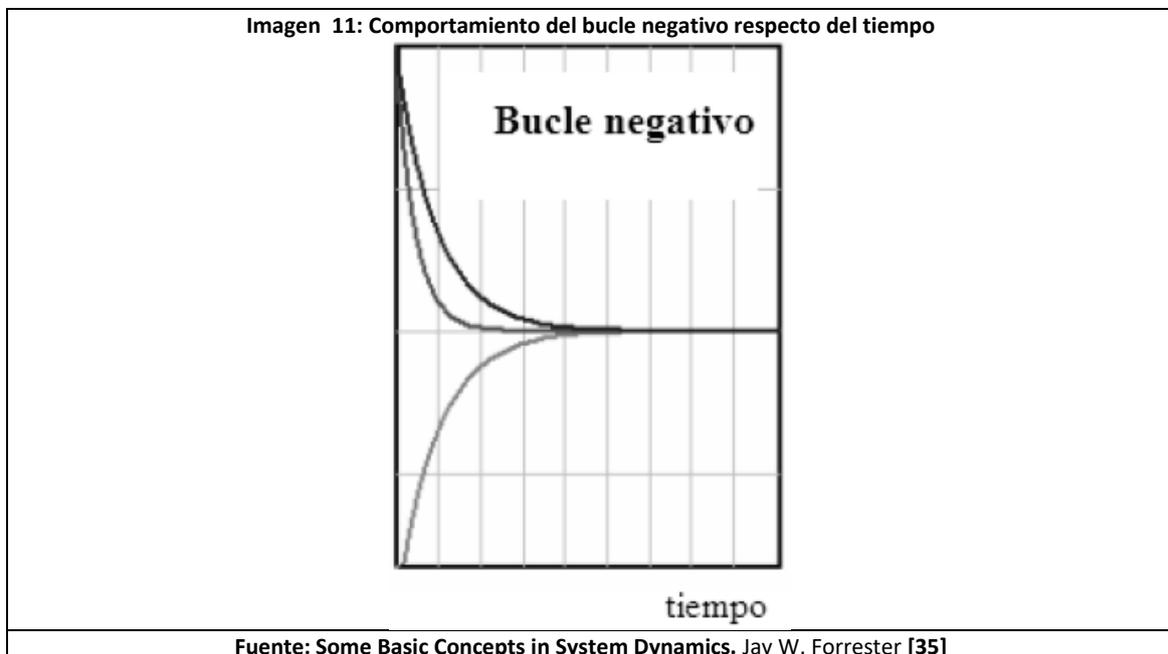
El ejemplo claro de bucle sería el llenado de un vaso de agua, según aumenta el nivel de agua del vaso cuando lo estamos llenando, nosotros, reducimos la cantidad del agua vertida en el vaso con el fin de reducir la velocidad de llenado y no verter el agua al exceder la capacidad del vaso. El sistema estaría formado por nosotros, el vaso de agua y el grifo y todos estos elementos se interrelacionan entre si formando bucles como los presentes en la Imagen 9.



Los bucles son **positivos** (Imagen 10) cuando el número de relaciones negativas que lo componen es par y es negativo cuando es impar.



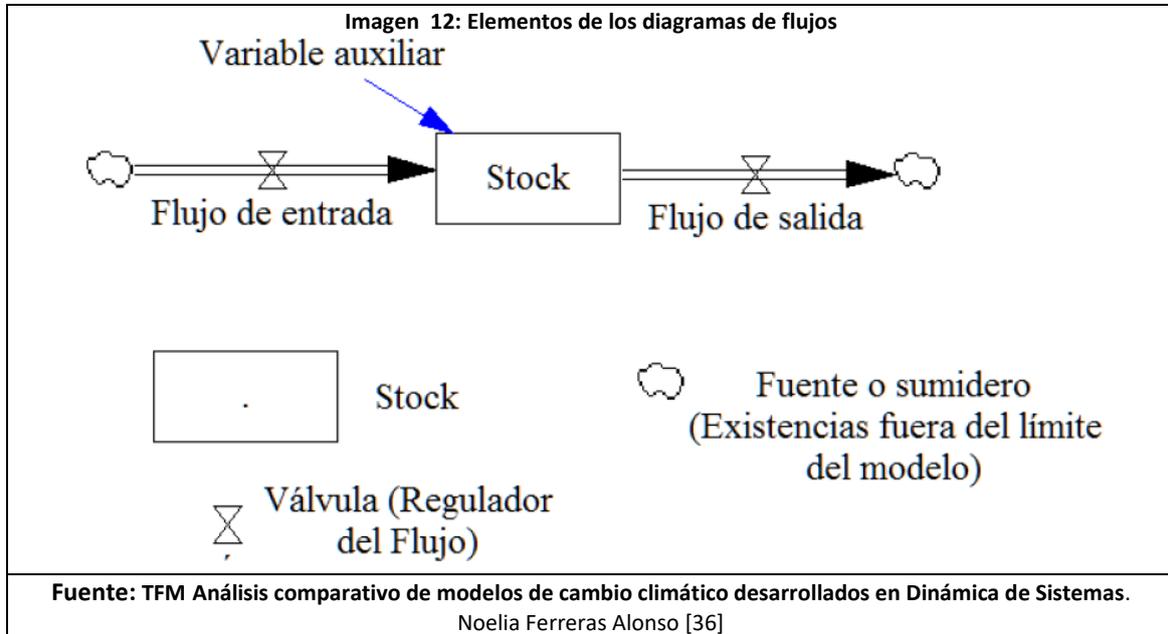
Los bucles **negativos** (Imagen 11) llevan al sistema a una situación estable, como con el vaso de agua del ejemplo, mientras que los positivos hacen el sistema inestable.



En la realidad vemos (Imagen 9) como en el mismo sistema confluyen bucles negativos y positivos, en ese caso el comportamiento final dependerá del bucle dominante en un momento determinado.

1.2 Diagrama de flujos o Forrester

El diagrama de flujos o de Forrester es el diagrama característico de la dinámica de sistemas. Es la transcripción desde el diagrama causal a una terminología que permite la introducción de toda la información en un ordenador, posee varias partes[34], [36]:



Los niveles o stocks: son elementos que nos muestran la situación del modelo a lo largo del tiempo, son variables dinámicas, presentan una acumulación y varían solo debido a otros elementos llamados flujos. Los niveles se representan por rectángulos, salvo si son inagotables, que son representados por nubes. Una fuente representa el stock desde el cual surge un flujo que se origina fuera del límite del modelo; los sumideros representan las existencias que se salen del límite del modelo. Ambos tienen una capacidad infinita y nunca pueden restringir los flujos que soportan.

Los flujos: son elementos que pueden definirse como funciones temporales, recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles. Pueden ser positivos, incrementando el stock o negativos, disminuyéndolo. Se representan con una flecha con un símbolo de válvula.

Las variables auxiliares: comprenden el resto de variables o constantes del modelo. Son parámetros que permiten una visualización mejor de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos y se relacionan entre ellas, con los stocks y los flujos.

Los retardos: Por último queda por definir los retardos, que son funciones que simulan los retrasos que se producen en la transmisión de materiales, informaciones o un tiempo entre la realización de una acción y su efecto. Para simular los retrasos de material se utilizan funciones como DELAY y SMOOTH.

Resumiendo lo anterior podemos decir que la cantidad de material en una variable stock es la acumulación de los flujos de entrada de material menos los flujos de salida de materia, todo ello condicionado por las variables auxiliares (Imagen 12).

Si queremos representar la figura anterior de forma matemática correspondería a la siguiente ecuación integral:

$$Stock(t) = \int [Flujo\ de\ entrada(s) - Flujo\ de\ salida(s)] + Stock(t_0) \quad (Ec.1)$$

Aunque no aparece en la figura podemos enunciar como se representa también matemáticamente un retardo puro:

$$Salida(t) = Entrada(t - T), \text{ siendo "T" el retardo} \quad (Ec.2)$$

1.3 Fases del modelado

Un modelo es una representación de un sistema o de una realidad compleja. Aunque la construcción de un modelo dista de ser un proceso estandarizado, siempre posee distintas etapas [36]:

- 1) Descripción y articulación del problema:** En primer lugar debemos definir el problema que vamos a tratar, las variables claves del sistema y el horizonte temporal a considerar. En último lugar demos tener información sobre las tendencias temporales del comportamiento de las variables.
- 2) Formulación de una hipótesis o teoría sobre el comportamiento del sistema:** En este apartado se realizan hipótesis que explican el comportamiento de las variables como resultado de las relaciones entre estas, consecuencia a su vez, de la estructura de realimentación. Se lleva a cabo el diagrama causal.
- 3) Formulación de un modelo de simulación:** Se realiza con el fin de probar las hipótesis planteadas en el apartado anterior, por lo que también son necesarios los datos que establezcan las condiciones iniciales del modelo.
- 4) Análisis y test del modelo:** Se testea el modelo con el fin de perfeccionarlo: Se le somete a diversas pruebas con condiciones extremas e incertidumbres.
- 5) Diseño y evaluación de las políticas de mejora:** Por último se diseñan los escenarios y políticas aplicables al sistema. A continuación se evalúan los efectos de estas políticas y su interacción.

Para finalizar, se debe aclarar, que el proceso de modelado es un proceso iterativo, está lejos de ser una secuencia lineal de pasos. Los modelos pasan por una iteración constante y cuestionamiento continuo, buscando perfeccionar el modelo lo máximo posible.

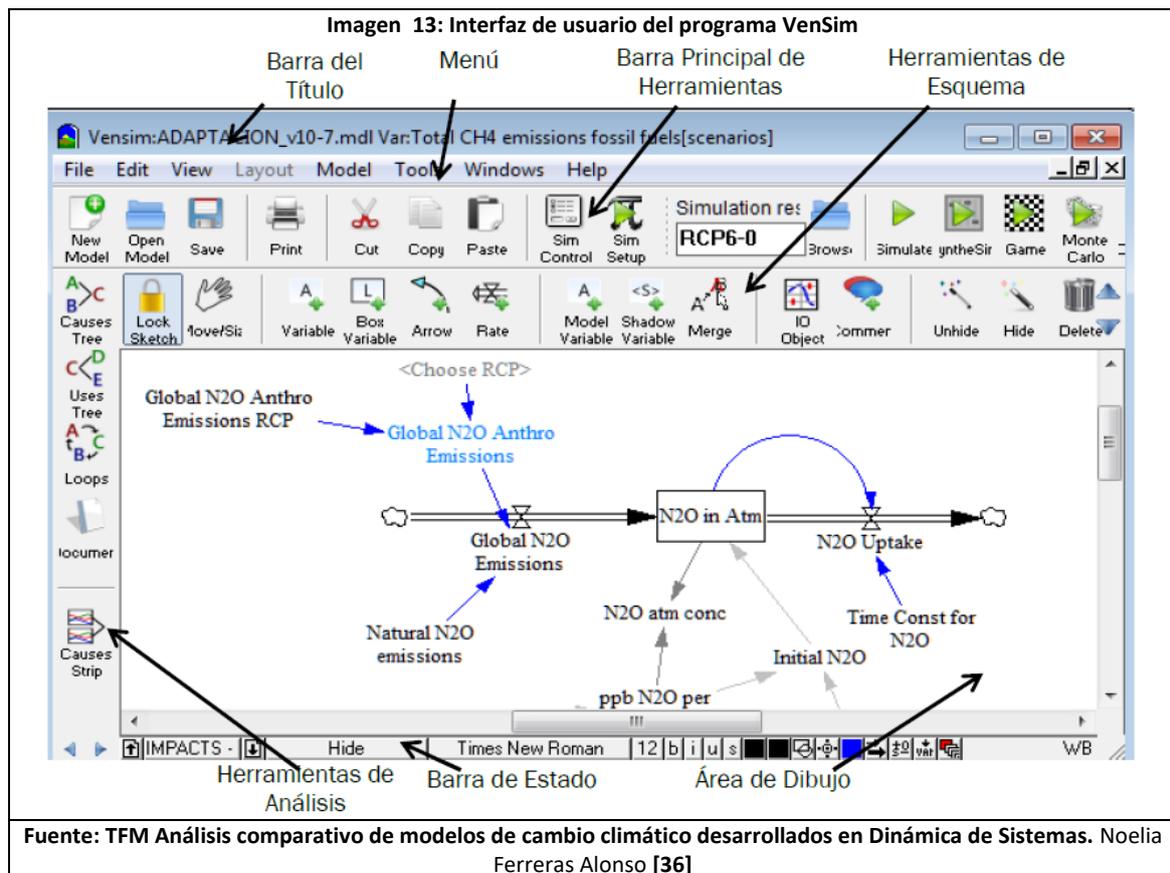
1.4 Programa empleado, VenSim

El programa que usaremos en este trabajo es el software Vensim. Es una herramienta gráfica de modelado que permite programar, simular, analizar y optimizar modelos de sistemas dinámicos [36].

El programa proporciona la posibilidad de construir modelos a partir de diagramas, como los explicados anteriormente, Por lo que las formulas introducidas y las variables representadas son las partes que forman el modelo. Además, es capaz de almacenar los datos que resultan de la simulación fuera del modelo permitiendo hacer un uso posterior de ellos.

En este trabajo se emplea la versión DSS (Decision Support System) de VenSim, que es la más completa de las disponibles. Las principales características del modelado en Vensim se presentan a continuación [5]:

1) Interfaz del Usuario: Vensim posee una interfaz (Imagen 13) donde se encuentran las herramientas para el usuario que se utilizan para construir, ejecutar y analizar modelos. La ventana principal de Vensim es el “Workbench”, formado por los diferentes elementos que vemos en la Imagen 13.



2) Conceptos matemáticos: Vensim utiliza para ello la ecuación integral como las enunciadas anteriormente (Ecuación 1). Para esta cuestión Vensim ofrece varias opciones de integración:

- i. Euler. Lleva a cabo la integración de Euler. Es la solución más simple y rápida. Este es el método que se emplea en el presente trabajo.
- ii. Diff. Realiza la integración de Euler pero almacena los valores de las variables auxiliares en un paso anterior. Se utiliza principalmente para las ecuaciones en diferencia.
- iii. RK4. Realiza la integración Runge-Kutta de cuarto orden. Se utiliza para la obtención de una respuesta precisa.

3) Secuencia computacional: Vensim utiliza la estructura causal para determinar la secuencia apropiada de cálculo. Los pasos que realiza para simular un modelo cambian según el método de integración. Para Euler son los siguientes:

- I. Preparación. Todas las Constantes toman los valores especificados para ellas y se procesan todos los cambios y las referencias de hojas de cálculo externas. El programa lee todos los datos, los valores cargados y las ecuaciones calculadas. Al final de esta etapa todas las Constantes tendrán valores asignados.
- II. Inicialización. Se calculan los valores iniciales de las variables “stock” o “niveles” en el modelo. En el proceso de cálculo de estos valores, puede ser necesario el cálculo del valor inicial de algunas variables auxiliares.
- III. Cálculo de variables auxiliares. Se calcula mirando su ecuación.
- IV. Almacenamiento de los resultados. Se almacenan los valores de las variables “stock” y las auxiliares que resultan de esas variables stock.
- V. Cálculo de la Tasa Neta. Se calcula la tasa neta de cambio para cada variable stock en el modelo.
- VI. Integración. Para la integración con Euler, los resultados del paso 5 se multiplican por el TIME STEP (definido al comienzo de crear el modelo) y se añaden a los valores de los niveles.
- VII. Continuación. Los pasos 3, 4, 5 y 6 se repiten hasta que el tiempo llega a FINAL TIME.

4) Ecuaciones: En Vensim se puede definir el modelo utilizando un conjunto de ecuaciones. En la ecuación se muestra cómo la variable depende de otras variables. Estas ecuaciones se introducen en el modelo mediante el “Editor de ecuaciones”. En

él, se pueden especificar las unidades de medida, el rango de valores mínimos y máximos esperados, un comentario con la descripción de la variable, y el grupo al que se desea asociar la variable.

5) Control de subíndices: Denominado “Subscript Control” en el programa, su utilidad reside en que posibilita tratar una variable como un vector, de tal forma, que se pueda agregar un valor diferente de la variable a cada posición del vector. Así se pueden agregar distintos valores de las variables, según los distintos escenarios o políticas empleados en el mismo modelo.

6) Análisis y Simulación: Una vez construido el modelo se puede analizar su estructura mediante los “Tree Diagrams” (a la izquierda en la Figura 4.7). Posteriormente, se realiza la simulación para ver el comportamiento dinámico del modelo.

Una vez simulado, se puede examinar su comportamiento empleando las herramientas de análisis, que pueden ser gráficas o tablas. Vensim permite almacenar y visualizar todo el comportamiento dinámico de las variables del modelo, incluso representar más de una prueba o experimento a la vez pudiendo así compararlos.

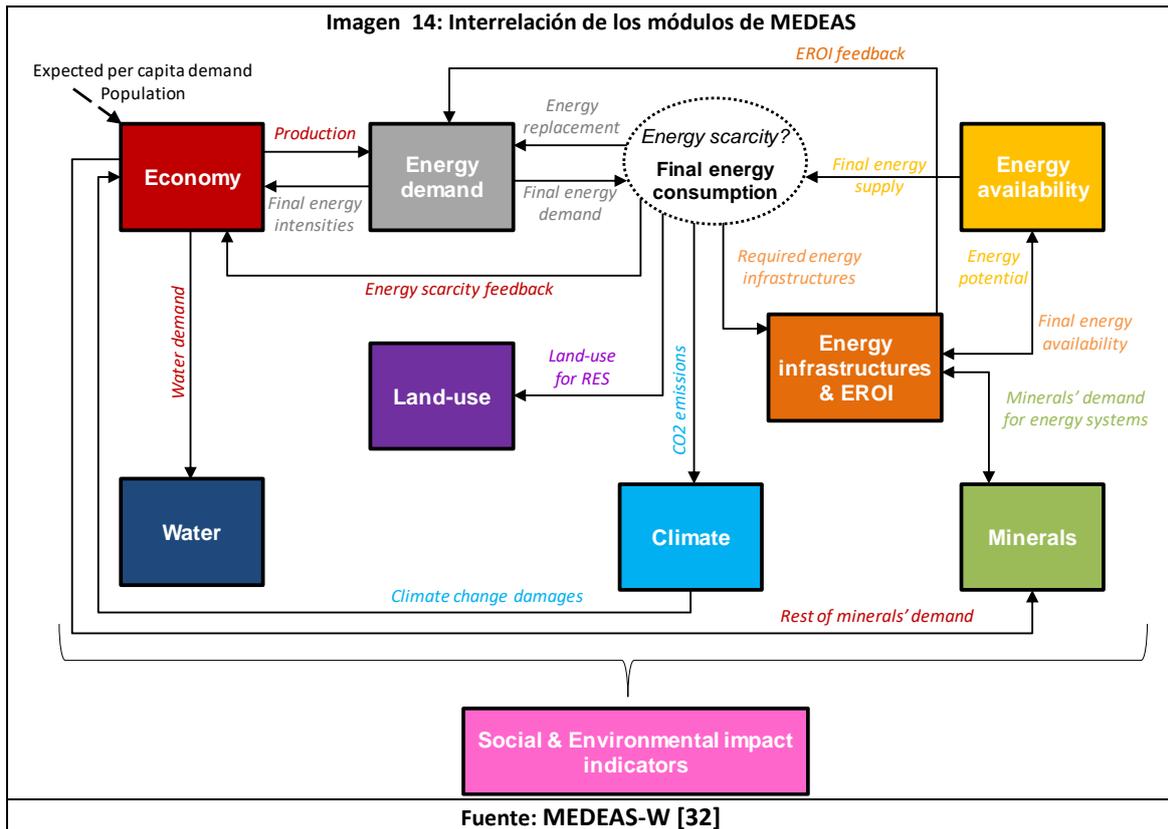
7) Importar datos externos: Vensim también permite importar datos externos, bien desde un archivo de texto o bien de una hoja de cálculo Excel (que será lo empleado en este trabajo). Para ello es necesario indicarlo en el editor de ecuaciones de la variable de interés con la función “GET XLS DATA”.

2. MEDEAS-W

2.1 Presentación del modelo MEDEAS-W

El modelo enfocado al análisis de los requerimientos materiales del transporte hecho en este trabajo se plantea como una aportación a la familia de modelos MEDEAS [32] en la que colabora la universidad de Valladolid a través del grupo de investigación de Energía, Economía y Dinámica de sistemas. La familia de modelos MEDEAS-W es un conjunto de modelos de sistemas dinámicos y recursivos de simulación de políticas desarrollado con el objetivo de ayudar en la toma de decisiones para lograr la transición a sistemas energéticos sostenibles centrándose en las restricciones biofísicas, económicas, sociales y tecnológicas.

Los modelos MEDEAS suelen funcionar desde 1995 hasta 2050, aunque el horizonte de simulación puede ampliarse hasta 2100 cuando se centran en los análisis estratégicos de sostenibilidad a largo plazo. MEDEAS-W es la versión agregada global y está estructurada en nueve módulos principales (Imagen 14), **economía, demanda energética, disponibilidad energética, infraestructura energética y tasa de retorno, minerales, uso del terreno, agua, clima** y por último **impactos sociales y medioambientales**.



MEDEAS-W se basa en los principios de la economía biofísica y ecológica, que asumen que la disponibilidad de energía final actúa como un factor limitante del proceso económico. Las intensidades energéticas (definidas como la relación entre la energía final gastada por cada sector económico dividida por la producción económica de ese sector) evolucionan con el tiempo debido al progreso tecnológico. Además, la escasez de cada tipo de energía final estimula la sustitución de la energía inter-final; sin embargo, si estas sustituciones no son suficientes, el proceso económico se limita a la cantidad de energía final disponible [57]. La economía se adapta a la energía final más limitante sigue la analogía ecosistémica (ley del mínimo de Liebig) de que el crecimiento no está dictado por los recursos totales disponibles, sino por el recurso más escaso.

La disponibilidad de minerales también se contempla en el marco. Se aplica un enfoque estilizado para estimar el consumo de minerales por la economía, dada la estrecha relación entre la actividad económica y el consumo de minerales en el actual sistema socioeconómico industrial. El MEDEAS-W compara la demanda primaria total de minerales que se extraen de las minas (tras contabilizar las tasas de reciclaje) con el nivel estimado de su disponibilidad geológica (reservas y recursos). De esta manera se calcula una estimación de la escasez de minerales, pero no limita las actividades económicas (al contrario de lo que ocurre con la escasez de energía) debido a la mucha menor solidez de la estimación de la demanda, así como de los datos sobre la disponibilidad de minerales.



2.1.1 Factores del modelo relacionados con transporte

Nuestro modelo está enfocado en la electrificación del transporte terrestre por lo que hay distintos sistemas de MEDEAS enfocados al transporte y deben ser explicados para poder situar nuestro modelo dentro de estos sistemas:

2.1.1.1 Modelización del transporte en el modelo MEDEAS-Mundo

El transporte se modela con gran detalle en el MEDEAS-W[32], lo que permite simular políticas de transición basadas en la sustitución de los vehículos de combustible líquido por otros tipos de vehículos y de combustible, así como la posibilidad de un cambio modal hacia los vehículos eléctricos ligeros y las políticas de gestión de la demanda. Estas políticas se aplican a los hogares y al transporte interior.

Los tipos de vehículos y combustibles modelados en el MEDEAS-W para las políticas de transporte doméstico son los siguientes: vehículos de cuatro ruedas de combustibles líquidos, eléctricos, híbridos y de gas natural; y vehículos de dos ruedas eléctricos y de combustibles líquidos.

Los vehículos considerados para el sector del transporte interior son: vehículos ligeros de las mismas categorías que los vehículos domésticos de cuatro ruedas; los vehículos de combustible líquido, de gas e híbridos se consideran para los vehículos pesados; los vehículos de combustible líquido, de gas, eléctricos e híbridos para autobuses; y los trenes propulsados por líquidos y electricidad.

El usuario puede establecer objetivos de política en términos de cuotas de cada tipo de vehículo y combustible en un año objetivo. El modelo traduce estas participaciones en cambios en las correspondientes intensidades de energía final de los hogares y el transporte interior (evolución lineal en el tiempo) utilizando la derivada de las intensidades.

Por defecto, se supone que se mantienen las pautas de movilidad, ya que los cambios modales como el transporte público generalizado o las opciones de gestión de la demanda que reducen la demanda total de transporte requieren profundos cambios culturales y están hoy en día lejos de los escenarios asumidos por los organismos internacionales. Sin embargo, el MEDEAS-W también representa posibles cambios modales como la posibilidad de sustituir los vehículos de cuatro ruedas por bicicletas eléctricas y el transporte no motorizado en las ciudades

2.1.1.2 Modelización de la reestructuración de la producción como resultado del cambio en la demanda

Las políticas orientadas a la demanda implican una reestructuración de la producción de los diversos sectores [32]. Por ejemplo: si se sustituyen los automóviles privados por bicicletas electrónicas, los sectores económicos relacionados con la fabricación y el



mantenimiento de vehículos deben sufrir una contracción, ya que los nuevos vehículos requieren una actividad económica mucho menor para su fabricación y mantenimiento. Si la sustitución de los automóviles privados se hace por medios no motorizados, como el caminar, la producción relacionada con los vehículos sustituidos desaparece por completo. El marco de insumo-producto permite captar las consecuencias de este cambio estructural para el conjunto de la economía. El acoplamiento con el resto del modelo MEDEAS permite calcular el cambio asociado en el uso de la energía y las emisiones.

El usuario puede elegir un porcentaje de los vehículos de cuatro ruedas de los hogares para que sean sustituidos por vehículos eléctricos muy ligeros, como bicicletas eléctricas o ciclomotores, así como por medios no motorizados. Tomando como referencia el porcentaje de vehículos de cuatro ruedas sustituidos, se reduce en consecuencia la actividad económica de los sectores "Equipo de transporte" y "Venta, mantenimiento y reparación de vehículos de motor y motocicletas Venta al por menor de combustible".

Obsérvese también que estos diferentes modos de transporte no son sustitutos perfectos, dado que los vehículos de cuatro ruedas permiten el transporte de personas que pueden no ser autónomas, llevar cargas, son más rápidos, etc. En el mundo real, estas opciones alternativas son complementarias. Sin embargo, asumimos que el efecto de la sustitución entre estos modos dominaría sobre el efecto de la complementariedad.

2.1.2 Requerimientos minerales de los vehículos eléctricos, integración del modelo de análisis de viabilidad material del cambio de movilidad

Una vez el modelo ya existente ha calculado la cantidad de vehículos electrificados que tenemos y de qué tipo, según las políticas que hemos elegido como se ha explicado en los apartados anteriores, el modelo de análisis de viabilidad de requerimientos minerales, creado en este trabajo, se encarga de escoger entre las diferentes tecnologías disponibles para estos vehículos (diferentes tecnologías de baterías o la utilización de la pila de hidrógeno).

La tecnología es elegida en función de la demanda comercial, de la disponibilidad de materiales y del estado de desarrollo de las tecnologías (el paso del tiempo puede hacer madurar algunas tecnologías que a día de hoy son minoritarias como la pila de hidrógeno).

El modelo también obtiene toda la infraestructura que conlleva la electrificación del sistema de transporte como puntos de carga o catenarias del ferrocarril. Posteriormente obtiene la cantidad de materias primas necesarias para toda la electrificación en conjunto sumando las materias empleadas en infraestructura y los vehículos a lo largo del tiempo y finalmente, las compara con los recursos y materias

primas disponibles en nuestro planeta, teniendo en cuenta los ratios de reciclaje de los diferentes materiales obtenidos en las diferentes fuentes bibliográficas.

3. Análisis de los requerimientos materiales de la transición hacia una movilidad eléctrica

3.1 Tipos de transporte y electrificación

Se ha compuesto una matriz (Tabla 3) indicando las posibles combinaciones de los tipos de transporte terrestre y las tecnologías disponibles para su utilización, tracción humana, Vehículo eléctrico de baterías (BEV), Vehículo solo con motor de combustión (ICE), Vehículos híbridos e híbridos eléctricos (HEV y PHEV) y vehículos de pila de hidrogeno (FCV) :

Tabla 3: Matriz de tipos de transporte y tecnologías de movilidad

Combustible y tecnología / Medio de transporte	Tracción humana	BEV	ICE	HEV y PHEV	FCV
Vehículo unipersonal	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Incompatible técnicamente	Incompatible técnicamente	Incompatible técnicamente
Vehículo unipersonal compartido	Excluido del análisis	Excluido del análisis	Incompatible técnicamente	Incompatible técnicamente	Incompatible técnicamente
Coche	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio
Coche compartido	Incompatible técnicamente	Excluido del análisis	Excluido del análisis	Excluido del análisis	Excluido del análisis
Motocicleta	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Incompatible técnicamente	Incompatible técnicamente
Motocicleta compartida	Incompatible técnicamente	Excluido del análisis	Incompatible técnicamente	Incompatible técnicamente	Incompatible técnicamente
Autobús	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Excluido del análisis
Taxi	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio
camión pequeño/furgoneta	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Excluido del análisis
Camión(tráiler)	Incompatible técnicamente	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Excluido del análisis
Metro/tren de cercanías	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Excluido del análisis
Tren de media y larga distancia	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Excluido del análisis
Tren mercancías	Incompatible técnicamente	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Objeto de estudio	Excluido del análisis

Fuente: Elaboración propia

	Incompatible técnicamente
	Excluido del análisis
	Objeto de estudio

Como se puede observar en la matriz los tipos de transporte y tecnologías que se van a evaluar no son la totalidad de las posibles combinaciones, esto es debido en algunos casos a la falta de datos, en otros a la incompatibilidad técnica entre el tipo de transporte y la tecnología, y por último, debido a la excesiva carga de trabajo de

evaluar todos los sistemas posibles. Se pueden enumerar las diferentes razones para no haber evaluado algunos modos de transporte:

1ª- En algunos casos, como en el ámbito del vehículo compartido, han sido excluidos del análisis porque MEDEAS no los modela y su modelado sería muy complejo sobrepasando los objetivos de este TFG.

2ª- En algunos ámbitos, como el de los vehículos de mercancías de largo recorrido o las motocicletas híbridas, no parece que la tecnología empleada vaya a tener demanda en el futuro, debido a su alto precio a causa de sus dificultades técnicas de aplicación y por lo tanto éxito.

3ª- Hay combinaciones de transporte en la tabla que no tienen sentido práctico, como un autobús de tracción humana, por lo tanto como es lógico estos transportes no se modelaran.

Se puede enunciar por tanto que las combinaciones que se van a estudiar y analizar han sido elegidas por varias razones, se encuentran modeladas en el modelo MEDEAS, hay una gran cantidad de datos disponibles para ejecutar el análisis, las tendencias de mercado indican que estas combinaciones tendrán éxito comercial en el futuro y por último la gran magnitud de su posible electrificación en un futuro próximo.

Debido a todas estas razones, en el análisis nos centraremos en **los automóviles, los vehículos unipersonales, los vehículos de transporte terrestre de mercancías, los vehículos de transporte público y en el transporte ferroviario en todos sus ámbitos.**

A continuación se enunciará de forma desarrollada el contenido completo de esta matriz, explicando las distintas combinaciones de tecnologías usadas por los diferentes tipos de vehículos, sean evaluadas posteriormente o no:

-Vehículos de movilidad unipersonal [37]:

Imagen 15: Bicicleta eléctrica de la marca Xiaomi



Fuente: <https://bikebitants.com/xiaomi-qicycle-bicicleta-electrica-plegab>

Sin motor: Los vehículos unipersonales sin motor (bicicletas, patinetes...) están decayendo en favor de este mismo tipo de vehículos, pero con tecnología eléctrica, ya que son más cómodos de utilizar acabando siendo los vehículos sin motor destinados para un uso más ocasional o para una clase de persona amante del deporte, concienciada con el medio ambiente o que no dispone de la capacidad adquisitiva para usar la variante con motor eléctrico.

Eléctricos: Es un vehículo, como el que vemos en la Imagen 15, con un uso exclusivo en el ámbito urbano y que se puede cargar con facilidad en cualquier casa u oficina e incluso en centros comerciales, todo ello unido a sus ventajas de utilización frente a los vehículos urbanos sin motor (no tenemos que hacer esfuerzos, sudar...) hacen que mucha gente los haya elegido para desplazarse, aprovechando además, que su tecnología eléctrica los permite seguir siendo más eficientes, no contaminando el ámbito urbano y teniendo una autonomía suficiente.

-Vehículos de movilidad unipersonal compartidos [37]:

Imagen 16: Plataforma de patinetes eléctricos compartidos



Fuente: <https://www.elindependiente.com/economia/2019/07/22/ave-madrid-barcelona-doblara-oferta-trenes-la-entrada-rivaldes-renfe/>

Sin motor: Los vehículos unipersonales sin motor están decayendo en favor de este mismo tipo de vehículos, pero con tecnología eléctrica, ya que son más cómodos de utilizar acabando siendo los vehículos sin motor destinados para un uso más ocasional o para una clase de persona amante del deporte, concienciada con el medio ambiente o que no dispone de la capacidad adquisitiva para usar la variante con motor eléctrico.

Eléctrico: Siendo un vehículo con un uso exclusivo en el ámbito urbano y que se debe aparcar en puntos fijos establecidos por la empresa dueña del vehículo (Imagen 16) es normal que posean tecnología eléctrica siendo más eficientes, no contaminando el ámbito urbano y teniendo una autonomía suficiente para recorridos urbanos recargando sus baterías en los puntos destinados para su aparcamiento.

-Automóvil particular [38], [39]:

Imagen 17: Vehículo particular Hyundai Kona Electric

Fuente: <https://motor.elpais.com/electricos/hyundai-kona-electrico-600-kilometros/>.

Eléctricos: Son una minoría actualmente debido a la necesidad de hacer una gran inversión inicial debido a su valor de venta aunque con el tiempo se consigue rentabilizar ahorrando dinero en combustibles fósiles y reduciendo el CO₂ y gases contaminantes de las ciudades. Para personas que realicen desplazamientos cortos a diario es muy apropiado y eficiente sin la necesidad de poner unas grandes baterías pero necesitando un punto de carga en el trabajo o en la vivienda. Todavía la infraestructura no está preparada para utilizarlos para hacer viajes largos con ellos usualmente. Poseen ventaja para entrar al centro de las ciudades en periodos de alta contaminación. En la Imagen 17 podemos ver un ejemplo de este tipo de vehículo.

Motor de combustión: son la amplia mayoría utilizada actualmente en el mundo. Estos vehículos suelen utilizar combustible diésel, gasolina o GLP con la ventaja de ser mucho más baratos y no tener que perder tiempo en cargar unas baterías además de tener la ventaja de una mayor autonomía que sus rivales eléctricos. Estos automóviles tienen la desventaja de utilizar combustibles fósiles emitiendo gases contaminantes y de efecto invernadero.

Híbridos e híbridos enchufables: En este apartado podemos decir que sería una mezcla entre los dos anteriores. En este tipo de movilidad vemos unos vehículos que ahorran combustible y emisiones respecto a los puros de combustión pero que no son tan caros como los eléctricos y que no tenemos necesariamente que perder tiempo cargándolos además de gozar de una mayor autonomía.

Eléctrico mediante pila de hidrógeno: Se puede decir que es la tecnología del futuro si su tecnología sigue la tendencia actual de desarrollo, aunando las ventajas de eficiencia de un motor eléctrico junto a la versatilidad de llevar un combustible de alta densidad energética (mucho más limpio y abundante que los tradicionales) para poder

cargar las baterías, pudiéndolo repostar en 5 minutos y teniendo autonomía similar a un coche de combustión pero sin emitir gases contaminantes como estos últimos. Estos vehículos poseen unas baterías muy pequeñas por lo que también se reduce el peso respecto a los vehículos eléctricos y usan un combustible muy barato sobre 1 euro cada 100 kilómetros recorridos. En contrapartida solo hay un puñado de vehículos con esta tecnología a la venta a nivel mundial, es una tecnología que está todavía en un estado prematuro.

-Automóvil compartido [40]:



Eléctrico: En el ámbito de la empresa privada se suele ofertar un vehículo con un uso exclusivo en el ámbito urbano y que se debe aparcar en puntos fijos establecidos por la empresa dueña del vehículo (Imagen 18), por ello es normal que posean tecnología eléctrica siendo más eficientes, no contaminando el ámbito urbano y teniendo una autonomía suficiente para recorridos urbanos recargando sus baterías en los puntos destinados para su aparcamiento. En el ámbito privado sigue siendo una ínfima minoría ya que el uso de coche compartido acaba de empezar su expansión unido a la poca cantidad de coches eléctricos que poseen los consumidores.

Motor de combustión: Este caso es una minoría, ya que el uso de coche compartido en el ámbito privado acaba de empezar su expansión, unido a que en un futuro próximo se limitara el uso de este tipo de vehículos en el ámbito de las ciudades, donde más destaca el uso del coche compartido.

Híbrido o híbrido enchufable: Este caso sigue siendo una minoría. Ya que el uso de coche compartido en el ámbito privado acaba de empezar su expansión, pero como la gente que suele usar estos servicios suele estar más concienciada sobre el medio ambiente, dentro de este nicho de mercado suele haber bastantes vehículos híbridos, dando incluso las marcas que los venden como Toyota herramientas para que el

propietario del coche puedan cederlo a otra persona con más facilidad y seguridad con apps para el móvil...

Eléctrico mediante pila de hidrogeno: Se puede enunciar lo mismo que en el apartado anterior sobre este sistema de propulsión.

-Motocicleta particular [41]:

Imagen 19: Motocicleta eléctrica de la marca Xiaomi



Fuente: <https://www.xataka.com/vehiculos/super-soco-es-la-nueva-moto-electrica-de-xiaomi-120-kilometros-de-autonomia-por-menos-de-1000-euros>

Eléctrica: En el mercado existen algunos modelos eléctricos que comprar pero en casi su totalidad enfocadas a un entorno urbano (Imagen 19) rivalizando con la motocicleta compartida. En china y Asia se ha producido un boom de este tipo de vehículos llenándose las ciudades de ellos, ya que son pequeños, eficientes y no contaminan en su zona de uso. En otros sitios como Europa se ven limitados debido a su más elevado precio de adquisición que hace más rentable acudir al vehículo compartido.

Motor de combustión: Son la amplia mayoría de este tipo de vehículos siendo la única opción para media y larga distancia si queremos utilizar una motocicleta, ya que se necesitarían unas baterías demasiado grandes que elevarían mucho porcentualmente el peso de este tipo de vehículo haciéndolo además más caro y te obligarían a aparcarlo en lugares con puntos de carga reduciendo mucho la libertad que demandan casi todos los usuarios de estos vehículos.

-Motocicleta compartida [42]:

Imagen 20: Plataforma de motocicletas eléctricas compartidas



Fuente: https://www.metropoliabierta.com/urbanismo/barcelona-nuevo-servicio-motos-electricas-compartidas_17345_102.html

Eléctrica: Es un vehículo con un uso exclusivo en el ámbito urbano y que se debe aparcar en puntos fijos establecidos por la empresa dueña del vehículo (Imagen 20), por ello es normal que posean tecnología eléctrica siendo más eficientes, no contaminando el ámbito urbano, y teniendo una autonomía suficiente para recorridos urbanos recargando sus baterías en los puntos destinados para su aparcamiento.

-vehículos de transporte público, autobuses, taxis [11]:

Imagen 21: Autobús híbrido de la marca Volvo



Fuente: <http://atedibus.org/el-autobus-hibrido-una-realidad/>

Autobús eléctrico: Son una minoría debido a las pocas estaciones de carga disponibles en el mundo y al tiempo que se puede perder cargando el autobús, lo que obliga a invertir en más número de autobuses, esto unido al gran peso de las baterías que

pueden alcanzar los 2000 kg (lo que resta peso de pasajeros que se pueden transportar) hacen que pocas ciudades se atrevan a la imposición mayoritaria de este tipo de autobuses. La ciudad pionera en este ámbito ha sido shenzeng en china donde hay más de 12000 autobuses eléctricos (el 99% de autobuses eléctricos se encuentran en china) ya que el gobierno ha promovido esta tecnología y ha conseguido rentabilizarla ahorrando dinero en diésel y reduciendo el co2 de las ciudades.

Autobús de combustión: En las ciudades se han reducido notablemente siendo sustituidos por híbridos o eléctricos, pero en medias y largas distancias siguen siendo una amplia mayoría los autobuses diésel, debido a su menor tiempo de repostaje haciendo que los viajeros lleguen antes a su destino y la mayor abundancia de puntos de repostaje de diésel en comparación con otras tecnologías.

Autobús híbrido o híbrido enchufable: Están aumentando exponencialmente en las ciudades y alrededores siendo enchufables cuando los tiempos de carga y la infraestructura lo permiten. Estos autobuses reducen el combustible fósil empleado y los gases contaminantes que emiten, además de ser más silenciosos, algo importante en vehículos tan abundantes en las ciudades y tan ruidosos en sus variantes de combustión pura. En la Imagen 21 podemos observar un autobús híbrido circulando por el País Vasco.

Autobús eléctrico mediante pila de hidrogeno: Podemos decir lo mismo que en el caso del automóvil particular.

Imagen 22: Taxi híbrido Toyota Prius



Fuente: <https://forococheelectricos.com/2012/01/el-prius-el-rey-de-los-taxis-en-espana.html>

Taxi eléctrico: Son una minoría debido a las pocas estaciones de carga disponibles en el mundo. El tiempo que se puede perder cargando el coche los hace mucho menos rentable que otros tipos de tecnologías por ahora. La ciudad pionera en este ámbito ha

sido shenzeng en china donde hay más de 5000 taxis eléctricas, ya que el gobierno ha dado buenas subvenciones y la gente ha entendido que es una nueva forma de movilidad más respetuosa con el medio ambiente y más saludable para las personas.

Taxi de combustión: Siguen siendo muy importantes en este sector sobre todo en los VTC, en los que predomina el diésel, en cambio en los taxis cada vez se van reduciendo más siendo el diésel y el glp los combustibles más destacados. Tanto en VTC como en el taxi se están reduciendo en favor de los vehículos híbridos y eléctricos

Taxi híbrido o híbridos enchufables: En pocos años se han convertido en una gran parte del sector sobre todo del taxi, destacando los modelos de Toyota (Imagen 22). Permite utilizar coches más eficientes y con menos emisiones de gases contaminantes, siendo bueno para las personas y el medio ambiente, a la vez que hace ahorrar dinero en gasolina a los taxistas siendo también rentable para ellos

Taxi eléctrico mediante pila de hidrogeno: Podemos decir lo mismo que en el caso del automóvil particular

-vehículos de transporte de mercancías de pequeño tamaño, furgonetas [38], [39]:

Imagen 23: Furgoneta eléctrica Renault Kangoo Z.E.



Fuente: <https://www.evwind.com/2012/10/31/el-vehiculo-electrico-renault-kangoo-cumple-un-ano>

Eléctrico: Son una minoría debido a la necesidad de hacer una gran inversión inicial debido a su valor de venta, aunque con el tiempo se consigue rentabilizar ahorrando dinero en diésel y reduciendo el co2 de las ciudades. Su uso para camiones de reparto y furgonetas con desplazamientos no muy extensos es muy apropiado (Imagen 23) y eficiente sin la necesidad de poner unas grandes baterías y pudiéndolo cargar en los lugares donde se deja la mercancía.

Motor de combustión: son la amplia mayoría utilizada actualmente en el mundo. Estos camiones y furgonetas suelen utilizar combustible diésel con la ventaja de ser baratas y

no tener que perder tiempo en cargar unas baterías además de tener la ventaja de una mayor autonomía que sus rivales eléctricas.

Híbridos e híbridos enchufables: En este apartado podemos decir que sería una mezcla entre los dos anteriores. Además, los vehículos de mercancías pequeños que salen al mercado suelen ofertar ahora mismo las 3 variantes, siendo el cliente el que elige cual le conviene o en cual puede invertir. En este tipo vemos unos vehículos que ahorran combustible y emisiones respecto a los puros de combustión pero que no son tan caros como los eléctricos y que no tenemos necesariamente que perder tiempo cargándolos además de gozar de una mayor autonomía.

Eléctrico por pila de hidrogeno: Podemos decir lo mismo que en el caso del automóvil particular.

-Vehículos de transporte de mercancías de larga distancia [43]:

Imagen 24: Prototipo de tráiler eléctrico Tesla Semi



Fuente: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/tesla-entregara-primeros-camiones-electricos-semi-antes-proximo-julio/20200131164901032885.html>

Eléctrico: Todavía se está estudiando su implantación en el mercado en un futuro, se están haciendo pruebas de prototipos de la marca DAF o TESLA (Imagen 24) con un resultado cuanto menos decepcionante. El elevado tiempo de carga, la dificultad de encontrar cargadores unido al elevado peso de las baterías hacen difícil la implantación de este tipo de camiones en el mercado a corto o medio plazo.

Motor de combustión: Casi la totalidad de los camiones de media y larga distancia utilizan el diésel para moverse. Poder repostar en cualquier sitio, además de hacerlo en un tiempo reducido y sin tener que llevar más de 10 toneladas de baterías hace que aún no se reduzca la importancia de este tipo de tecnología.

Eléctrico por pila de hidrogeno: Podemos decir lo mismo que en el caso del automóvil particular.

-Ferrocarril de corta distancia/metro [27]:

Imagen 25: Metro de Madrid de funcionamiento eléctrico



Fuente: <http://www.telemadrid.es/noticias/madrid/Interrumpido-L10-Metro-Vientos-Batan-0-2054194564--20181001090943.html>

Ferrocarriles eléctricos: El metro (Imagen 25) y trenes de cercanías con vías electrificadas usan tecnología eléctrica para moverse por su eficiencia y su ventaja de no tener que cargar baterías y a pesar de que el electrificado de las vías no es barato, permite no expulsar gases de combustión en el ámbito urbano y acabar ahorrando energía y dinero a largo plazo. Siendo los trenes eléctricos, en la mayoría de los casos más ventajosos, siendo más rápidos y más limpios medioambientalmente hablando, en ocasiones no serían la mejor opción [44]. En vías muy poco transitadas instalar una infraestructura para que estos circulen y mantenerla puede tener un costo monetario y material que no se amortizara en ningún momento.

Ferrocarriles Híbridos: Estos trenes están sustituyendo a los de combustión pura para que puedan recorrer las vías no electrificadas, pero que cuando estas se electrifiquen o entren en una zona ya electrificada puedan usar la alimentación de la catenaria, aumentando notablemente su eficiencia reduciendo las emisiones de gases contaminantes.

Motor de combustión: El tren de cercanías todavía sigue usando motor de combustión en zonas donde no se ha podido electrificar las vías, en España un 32% de los trayectos son hechos con locomotoras diésel. Para el año 2030 quiere ser sustituido por motores de combustión de GLP o por híbridos en España. En ocasiones una pequeña parte de la vía no electrificada provoca el tener que utilizar ferrocarriles diesel a pesar de que la mayoría del trayecto que realice sea por vías electrificadas.

Eléctricos por pila de hidrogeno: Estos trenes podrían sustituir a los híbridos, mejorando las características de eficiencia y emisiones contaminantes del motor de combustión para que puedan recorrer las vías no electrificadas, pero que cuando estas se electrifiquen o entren en una zona ya electrificada puedan usar la alimentación

directa de la catenaria, aumentando notablemente su eficiencia reduciendo las emisiones de gases contaminantes.

-Ferrocarril de media/larga distancia [27]:

Imagen 26: Ferrocarril eléctrico de media o larga distancia español AVlo



Fuente: https://elpais.com/economia/2020/01/27/actualidad/1580110260_008323.html

Eléctrico: Todos los trenes de media y alta velocidad, como el presente en la Imagen 26, son ya eléctricos aprovechando que sus vías al ser más modernas están electrificadas por completo siendo más eficientes y no emitiendo gases contaminantes en la zona donde están transitando.

Motor de combustión: El tren de media y larga distancia todavía sigue usando motor de combustión en zonas donde no se ha podido electrificar las vías. En este caso se están reduciendo notablemente estas locomotoras siendo sustituidas por híbridas.

Híbrido: Estos trenes están sustituyendo a los de combustión pura para que puedan recorrer las vías no electrificadas, pero que cuando estas se electrifiquen o entren en una zona ya electrificada puedan usar el motor eléctrico, aumentando notablemente su eficiencia reduciendo las emisiones de gases contaminantes

Eléctricos por pila de hidrogeno: Podemos decir lo mismo que en el caso del ferrocarril de corta distancia.

-Ferrocarril de mercancías [27]:

Imagen 27: Ferrocarril diesel de transporte de mercancías

Fuente: http://www.aficionadosalamecanica.com/coche-electrico_control.htm

Eléctrico: Algunos trenes de mercancías son ya eléctricos aprovechando las vías electrificadas siendo más eficientes energéticamente y no emitiendo gases contaminantes en la zona donde están transitando. Siendo los trenes eléctricos, como el presente en la Imagen 27, en la mayoría de los casos más ventajosos, siendo más rápidos y más limpios medioambientalmente hablando, en ocasiones no serían la mejor opción [44]. En vías muy poco transitadas instalar una infraestructura para que estos circulen y mantenerla puede tener un costo monetario y material que no se amortizara en ningún momento.

Motor de combustión: El tren de mercancías sigue usando motor de combustión en zonas donde no se ha podido electrificar las vías o donde no sale rentable como hemos enunciado anteriormente. También pueden ser más interesantes los ferrocarriles diesel en el transporte lento de mercancías en países con una gran extensión despoblada donde habría que llevar las líneas de alta tensión hasta el tren aparte de instalar la infraestructura específica llevando todo ello a unas pérdidas eléctricas y materiales muy grandes y si además no necesitamos velocidad en este transporte (los motores diesel cuentan con una alta eficiencia a baja velocidad) no tiene sentido recurrir a la electrificación. En ocasiones como en la imagen 2.13 un pequeño tramo sin electrificar provoca que se empleen este tipo de trenes, a pesar de que la mayoría del trayecto este electrificado.

Híbrido: Podemos decir lo mismo que en el caso del ferrocarril de corta distancia.

Eléctrico por pila de hidrógeno: Podemos decir lo mismo que en el caso del ferrocarril de corta distancia.

3.2 Clasificación de las tecnologías evaluadas

Una vez enunciados los sistemas de movilidad que vamos a evaluar podemos ver como todos poseen las mismas variantes de electrificación: **Eléctrico, híbrido y eléctrico mediante célula de combustible.**

Para explicar en profundidad en qué consisten las distintas tecnologías de electrificación de los sistemas de movilidad evaluados, vamos a clasificar estos sistemas según los elementos que suelen emplear en la electrificación, para posteriormente, poder enunciar sus requerimientos minerales de forma más clara:

1º-Vehículos rodados electrificados (vehículo particular, de mercancías y de transporte público) [45]–[47]:

- Baterías
- Infraestructura de carga, desde la red hasta el vehículo
- Motor eléctrico y aumento de cantidad de cableado del vehículo

2º-El ámbito ferroviario electrificado (transporte ferroviario) [26]:

- Infraestructura de transmisión de electricidad al tren, desde la red hasta la catenaria

3º-Elementos de futuro en la movilidad eléctrica (todos los transportes evaluados) [48]:

- Célula de combustible

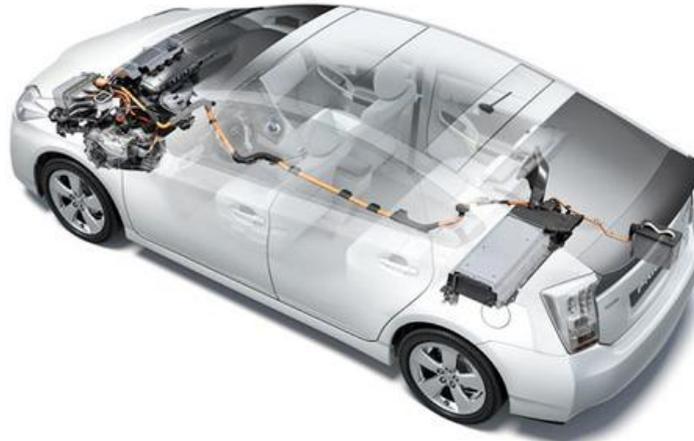
3.2.1 Vehículo rodado electrificado, tecnologías, elementos, infraestructuras y análisis de requerimientos materiales.

Empezaremos indicando que hay diversas tecnologías de electrificación para los vehículos rodados que responden a distintas necesidades de utilización con diferentes grados de complejidad tecnológica y por ello diferentes grados de inversión monetaria, material y energética. Estas tecnologías fundamentales son:

-Híbrido tradicional o híbrido ligero (HEV) [46], [49], [50]:

Estas tecnologías aunque no son totalmente similares si utilizan la energía eléctrica de la misma forma y solo se diferencian en el tamaño de la batería (más reducida en los híbridos ligeros) por lo que los trataremos como iguales para explicar su tecnología, funcionamiento y el sector que puede demandar esta tecnología ahora y en el futuro.

Imagen 28: Vehículo híbrido Toyota Prius

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos-prius.htm>

Estos vehículos, como el Toyota Prius de la imagen anterior (Imagen 28) se alimentan de gasolina, pero aprovechan las frenadas y deceleraciones (energía cinética sobrante de las ruedas) para generar y almacenar energía eléctrica en una pequeña batería (2KWh) mediante un generador que posteriormente se usa como motor eléctrico (en determinados modelos pueden existir un generador y un motor eléctrico de forma separada) y que permite al coche moverse a pequeñas velocidades solo con la impulsión eléctrica por ejemplo al aparcar o al salir de un semáforo, evitando que el motor de combustión entre en funcionamiento cuando menos eficiente es, o puede ayudar al motor de combustión cuando se necesiten grandes aceleraciones, reduciendo la carga sobre este y así el consumo de carburante y emisiones. Finalmente podemos decir que este tipo de electrificación lo que hace en definitiva es mejorar notablemente la eficiencia [51] de los vehículos de combustión tradicionales que emplean combustibles fósiles.

Imagen 29: Camión pequeño Canter Fuso Eco Hybrid

Fuente: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/el-fuso-canter-eco-hybrid-se-hace-con-el-premio-al-vehiculo-mas-innovativo-de-japon>

Esta tecnología es demandada por todo tipo de público, que emplee el vehículo en la ciudad o que lo emplee de forma minoritaria en vías de alta velocidad, donde el motor eléctrico no puede actuar y el motor de gasolina tiene que mover el peso extra de baterías y motor eléctrico respecto a un coche de gasolina convencional. Aunque estos vehículos tienen un coste de adquisición más elevado que los vehículos de combustión tradicionales si se usan en un ámbito urbano su mayor eficiencia y menor gasto de combustible permiten amortizarlos con relativa facilidad.

Estos vehículos han tenido una gran aceptación por la gente particular que circula por las ciudades de forma habitual, por los estados que están renovando sus autobuses y se aprovechan de una reducción de consumo [39] y de emisiones en el transporte público, por los taxistas que reducen sus consumos haciendo más rentable su trabajo [52] y se está introduciendo finalmente en los camiones pequeños de reparto, furgonetas y en definitiva pequeños vehículos comerciales, como el que observamos en la imagen anterior (Imagen 29), que se mueven normalmente desde los polígonos industriales de las ciudades al interior de estas.

-Híbridos enchufables (PHEV) [46], [49], [53]:

Esta tecnología se podría resumir como una mezcla entre la tecnología de un vehículo eléctrico puro y de un vehículo híbrido tradicional. En esencia es un vehículo híbrido tradicional que puede ser alimentado de gasolina pero que cuenta con una batería de mucha mayor capacidad (12KWh) y con un generador y un motor eléctrico más potentes que le permite moverse a cualquier velocidad impulsado solo por el motor eléctrico y regenerar más energía que un híbrido normal.

Imagen 30: Vehículo híbrido enchufable Mitsubishi Outlander PHEV



Fuente: <https://www.mitsubishi-motors.es/modelos/outlander-phev/carga>

Estos vehículos también nos permiten enchufarlos en un enchufe tradicional o un punto de carga específico para vehículos eléctricos, como podemos ver en la Imagen

30. Si sumamos que nos permiten movernos en torno a 50 km solo con la energía de la batería (muchos menos Km que los que hace el español medio al día) tenemos vehículos que podemos usar como eléctricos puros a diario aprovechando su gran eficiencia y su nula emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero en su zona de funcionamiento, ahorrando combustible y dinero pero sin perder la polivalencia que nos da un vehículo de combustión [51] que nos permite hacer un viaje de largo recorrido sin preocuparnos de su autonomía. También nos permite tener imprevistos en el día a día puesto que si se agota la energía de la batería, este seguiría funcionando como un híbrido tradicional.

En lo concerniente a la demanda de este tipo de vehículos [39], [54] se está viendo lastrada en el sector particular y comercial por su elevado precio de adquisición, pero como sucede con los híbridos tradicionales si se usan aprovechando las virtudes del motor eléctrico y sobre todo si se tiene la posibilidad de recargarlos en el lugar de trabajo o en casa estos vehículos permiten circular casi todo el tiempo en modo eléctrico ahorrando una gran cantidad de dinero, combustible y emisiones, lo cual permite amortizarlos a medio plazo.

Imagen 31: Bus híbrido enchufable en Valladolid



Fuente: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/primera-linea-electrificada-autobuses-espana-valladolid/20171115091548015664.html>

En el sector del transporte público los estados [55] se han empezado a decantar por este tipo de autobuses, como el que vemos recargando en una calle de Valladolid en la imagen anterior (Imagen 31), ya que permiten hacer casi todo su recorrido en modo eléctrico sin perder la polivalencia de un vehículo de combustión teniendo la capacidad de moverse con el motor tradicional en caso de necesitarlo. En el sector del taxi se está viendo penalizado su crecimiento por la ínfima cantidad de puntos de carga existentes ahora mismo en las ciudades a nivel mundial.

Finalmente para un público que necesite hacer grandes distancias a altas velocidades usualmente como los tráileres de mercancías, esta tecnología al igual que sucede en los híbridos tradicionales hace que una vez gastada la energía de la batería debas mover el peso de todos los elementos eléctricos con el motor de combustión siendo ello mucho menos eficiente la tecnología de movilidad tradicional.

-Eléctricos puros (BEV) [46], [49], [53]:

Esta tecnología prescinde del motor de combustión por lo que no consume ningún combustible fósil de forma directa y no emite ningún gas en el lugar donde está transitando. Toda su energía proviene de la red eléctrica a través de un punto de carga o de un enchufe tradicional y se almacena en sus baterías de gran capacidad.

La gran eficiencia de estos vehículos reside en un motor eléctrico con una gran eficiencia, la capacidad de regenerar energía en frenadas y deceleraciones, una notable menor cantidad de piezas de transmisión desde el motor hasta las ruedas y una generación de energía más eficiente que en un vehículo de combustión y que además puede ser renovable [51].

Imagen 32: Vehículo eléctrico Renault ZOE



Fuente: <https://www.marca.com/motor/modelos-coches/2019/09/28/5d8e0fc446163f4daa8b45aa.html>

Estos automóviles, como el ZOE de la imagen anterior (Imagen 32), poseen una gran batería con un peso muy elevado, un motor eléctrico de gran potencia y un generador que permite obtener energía de la energía cinética sobrante del vehículo. La demanda de este tipo de tecnología de movilidad a excepción de china y noruega, se está viendo muy lastrada por los pocos puntos de carga existentes para alimentar de energía estos vehículos unido a su mala autonomía (<300Km) y su muy elevado precio de adquisición. Es esperable que esto ira cambiando en el futuro, la continua subida de demanda de vehículos eléctricos hará que se instalen más puntos de carga que harán a su vez que este tipo de movilidad sea más atractiva y se produzcan más vehículos

reduciendo el precio elevado de sus baterías y haciendo finalmente que se instalen aún más puntos de carga [56] entrando en un continuo bucle.

Imagen 33: Patinete eléctrico Xiaomi m365



Fuente: <https://www.elcorteingles.es/electronica/A26567370-patinete-electrico-xiaomi-mi-electric-scooter-m365-blanco/>

Ahora mismo estos vehículos están siendo demandados [39], [54], [57] a nivel mundial en el sector privado por personas que disponen de un punto de carga en sus casas y/o en su trabajo, que poseen un segundo coche para hacer viajes largos y que finalmente tienen el dinero para hacer la gran inversión que es adquirir este tipo de vehículos, aunque como se ha explicado antes, estos vehículos nos permiten ahorrar una gran cantidad de dinero al utilizar energía eléctrica además de tener un mantenimiento mucho más barato y una gran fiabilidad que puede permitir que se vean como una inversión a largo plazo.

En el sector comercial su baja autonomía ha hecho que solo se hayan demandado vehículos para pequeños repartos que son recargados en el lugar de trabajo y que permiten hacer unos pocos kilómetros diarios, [58] pero que sumados a lo largo del año permite a algunos negocios ahorrar gran cantidad de dinero (panaderías, pizzerías...)

En el sector de la movilidad unipersonal sí que ha habido una subida espectacular [59] de esta tecnología llenando las ciudades de todo el mundo de patinetes, como el presente en la Imagen 33, y bicicletas eléctricas que las personas recargan en el lugar de trabajo o en su vivienda y que les permite hacer desplazamientos más rápidos incluso más que un automóvil tradicional dentro de la ciudad, mucho más económico y todo ello con solo un leve esfuerzo físico.

Imagen 34: Taxi eléctrico BYD e6



Fuente: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2019-05-05/vehiculos-electricos-shenzen-china-autobuses-taxis_1979546/

En el sector del transporte público la demanda ha subido pero a un ritmo lento a pesar de que diversas fuentes dicen que es el futuro de este tipo de transporte [60]. Este crecimiento tan ralentizado se debe a la necesidad de la construcción de diversas infraestructuras de carga de estos vehículos, unido a la necesidad de más número de vehículos para usar mientras otros son recargados.

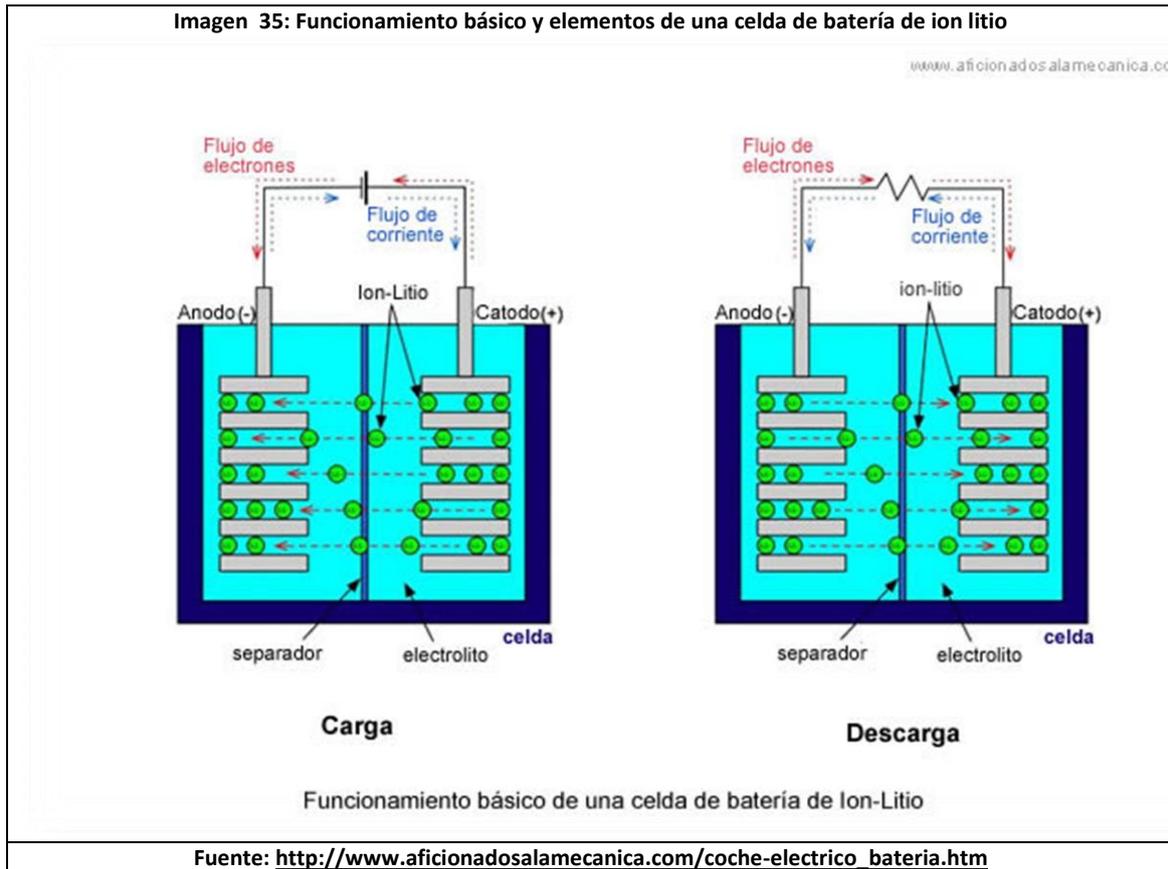
Para finalizar se debe enunciar el caso de Noruega y China [57] donde debido a políticas gubernamentales la movilidad eléctrica es la dominante en el país. En china se está convirtiendo todo el transporte público en eléctrico, prueba de ello es la imagen anterior donde se pueden apreciar 3 taxis eléctricas circulando (Imagen 34). Además se estima que en 2016 había ya cerca de 220 millones de motocicletas eléctricas en el país. En noruega el país ha promovido con importantes ayudas económicas la compra de vehículos eléctricos siendo estos bastante más baratos que sus homólogos de combustión.

3.2.1.1 Elementos empleados por los automóviles rodados electrificados

Baterías

Las baterías [46], [61] son elementos capaces de almacenar una gran cantidad de energía en un espacio reducido, cargándose y descargándose de energía eléctrica de una forma controlada mediante una reacción química. Las baterías, como podemos observar en la imagen siguiente (Imagen 35), poseen distintos elementos:

Imagen 35: Funcionamiento básico y elementos de una celda de batería de ion litio



-**Ánodo:** Compuesto de óxido de litio junto con otros elementos (batería Li-ion). Estos elementos se encuentran dispuestos en forma de lámina.

-**Cátodo:** Compuesto usualmente de grafito.

-**Separador:** Lámina que separa ánodo y cátodo para evitar un cortocircuito. Generalmente hecha de plástico perforado.

-**Electrolito:** Solvente orgánico en el que se introducen ánodo, cátodo y separador que actúa favoreciendo el intercambio de iones. Es un líquido altamente inflamable en el que se diluyen las sales de litio (batería Li-ion).

-**Sensores, conversores y reguladores:** Las baterías poseen diferentes dispositivos para monitorizar el estado de los componentes y así asegurar su seguridad y fiabilidad en la carga y la descarga.

Los materiales empleados en la composición exacta de estos elementos dependen del tipo de batería que se quiera construir, en función de las necesidades que se quieran cubrir con ella, en el siguiente apartado se explicara las diferencias entre los tipos de baterías.

Tipos de baterías

Comenzamos enumerando y explicando brevemente los tipos de baterías que son empleadas actualmente [46], [61], [62] en el almacenamiento de energía, independientemente del sector al que van destinadas:

- **Pb-ácido** – Tiene como desventajas la presencia de ácidos en su composición y un ratio bajo energía almacenada/peso o volumen. Pero su barata fabricación y su alto ratio potencia eléctrica/peso las pueden hacer atractivas para la movilidad eléctrica.
- **Níquel-cadmio (NiCd)** – Son las baterías que poseen la vida útil más alta expresada en número de ciclos de carga y descarga (alrededor de 1400 ciclos). Su mayor desventaja es el uso de Cadmio en su fabricación, que alberga efectos nocivos sobre el medio ambiente y la salud humana y animal. Las directivas de la UE han limitado el uso de este tipo de baterías
- **Níquel metal hidruro (NiMH)** – La batería NiMH se asemeja a la de NiCd en fabricación y funcionamiento. Su principal ventaja es que carece de Cadmio y de efecto memoria, lo que le otorga una mayor capacidad a largo plazo. Comparada con la batería de Ion-litio la batería de NiMH tienen menor capacidad y mayor coeficiente de auto descarga.
- **Litio-ion (Li-ion)** – Este tipo de batería se caracteriza por una gran capacidad de almacenamiento de energía y una muy buena relación densidad de energía /peso. Sin embargo, tiene limitaciones debidas a su alto coste, a su sobrecalentamiento y a un ciclo de vida limitado.
- **Polímero Ion-litio** – Proporciona un ciclo de vida mayor que las baterías clásicas de iones de litio, pero presenta inestabilidades en su funcionamiento tanto en el caso de una sobrecarga como en el caso de descargas de batería por debajo de un cierto valor.
- **Sodio níquel cloro (NaNiCl)**- Esta batería utiliza un electrolito de sal fundida con una temperatura de funcionamiento de 270–350 °C. Ofrece la ventaja de tener una alta densidad de energía almacenada. Las principales desventajas están relacionadas con la seguridad de su funcionamiento y su almacenamiento de energía durante períodos largos de tiempo.

Tras esta explicación general podemos enumerar ciertos datos numéricos orientativos en la Tabla 4 para poder observar la diferencia entre baterías más claramente:

Tabla 4: Características de las baterías

Tecnología de batería	Densidad energética (Wh/kg)	Energía/Volumen (Wh/L)	Potencia/Peso (W/kg)	Coefficiente de autodescarga (%/24h)	Numero de ciclos de recarga
Pb-acido	40	70	180	1	500
Ni-Cd	60	100	150	5	1350
NiMH	70	250	1000	2	1350
Li-ion	90-260	195-560	128-570	1	500-2000
LiPO (LiCoO2)	200	300	3500	1	1000
Na-NiCl	125	300	1500	0	1000

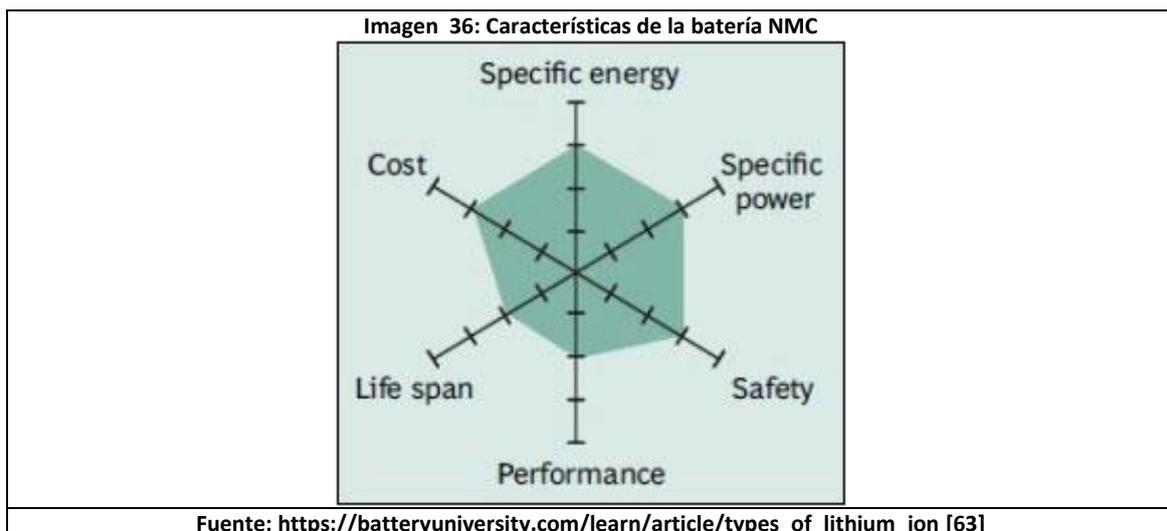
Fuente: **ELECTRIC VEHICLE BATTERY TECHNOLOGIES: FROM PRESENT STATE TO FUTURE SYSTEMS**. Sergio Manzetta, Florin Mariasiuc [62] **con modificaciones propias**.

Baterías empleadas en la movilidad eléctrica actualmente y en un futuro a corto y medio plazo y ejemplos de utilización

De todas las baterías explicadas anteriormente solo una minoría se emplean en la movilidad eléctrica a día de hoy y tienen cabida en el futuro de esta tecnología debido a sus buenas características técnicas respecto a las demás, a continuación se explicara más en profundidad el funcionamiento, la composición de estas baterías así como ejemplos de automóviles que la emplean:

Batería (Li-ion) LMO:

Es la batería que se usó en los inicios de la electrificación del automóvil, pero que actualmente, se ha visto superada por las demás baterías Li-ion que comentaremos a continuación debido a las mejores características técnicas de estas últimas. Esto ha hecho que su uso sea residual a día de hoy.



Es una batería con una buena energía específica, una buena seguridad y densidad energética, pero con baja vida útil y rendimiento (Imagen 36). Los datos exactos de sus características los podemos observar en la Tabla 5:

Tabla 5: Características de la batería LMO

Litio, óxido de Manganeso: LiMn2O4 cátodo, ánodo de grafito; Abreviatura: LMO	
Voltajes	3,70V, 3,80V nominal; rango operativo típico 3,0-4,2V/célula, o superior
Energía específica (capacidad)	100-150 Wh/kg
Cargo (C-rate)	0,7-1C de forma normal, carga máxima a 3C y 4.2V
Descarga (C-rate)	1C; 10C posible en algunas celdas, 30C de pulso (5s); 2.50V de corte
Ciclo de vida	300-700 (relacionado con la velocidad de la descarga, la temperatura...)
Fuga térmica	250°C (482°F) típico. La alta carga promueve la fuga térmica
Aplicaciones	Herramientas electricas, dispositivos médicos, vehículos eléctricos, industriales...
Comentarios	Menos relevante; Crecimiento potencial limitado
Fuente: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion [63]	

Un ejemplo de vehículo que emplea esta batería puede ser el del Nissan Leaf de pasada generación (Imagen 37), que posee unas baterías con una capacidad de 24 KWh y con una potencia de 80 KW.

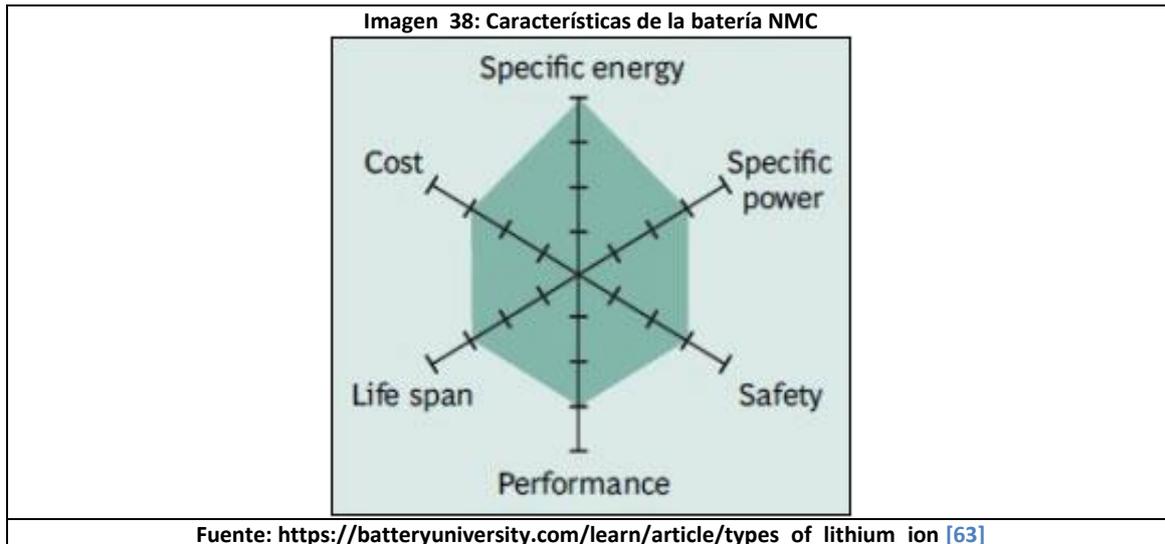
Imagen 37: Vehículo eléctrico Nissan Leaf de pasada generación



Fuente: <https://movilidadelectrica.com/estudio-comparativo-la-degradacion-la-bateria-del-nissan-leaf-primer-generacion/>

Batería (Li-ion) NMC [63]:

Es el tipo de batería más usada en vehículos eléctricos e híbridos actualmente en el mundo a excepción de China donde predomina el tipo de batería LFP que luego se explicara. En esta batería proveniente del grupo Li-ion el cátodo está compuesto por níquel, manganeso y cobalto, de ahí su nombre, NMC.



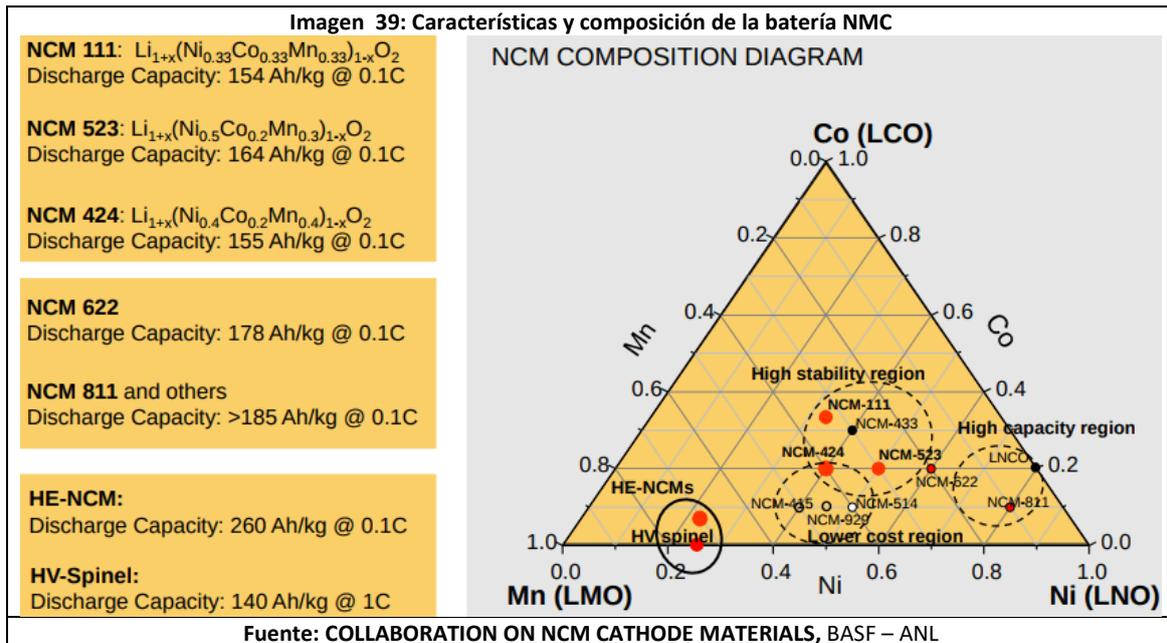
Es una batería con una gran energía específica, una buena seguridad, densidad energética, vida útil y rendimiento (Imagen 38). Los datos exactos de sus características los podemos observar en la Tabla 6:

Tabla 6: Características de la batería NMC

Litio, níquel, manganeso, óxido de cobalto: LiNiMnCoO₂ cátodo, ánodo de grafito; Abreviatura: NMC (NCM, CMN, CNM, MNC, MCN...)	
Voltajes	3,60V, 3,70V nominal; rango operativo típico 3,0-4,2V/célula, o superior
Energía específica (capacidad)	150-220 Wh/kg
Carga (C-rate)	0,7-1C, cargas a 4,20V, algunas van a 4,30V; carga de 3h típica. Una corriente de carga superior a 1C acorta la vida de la batería.
Descarga (C-rate)	1C; 2C posible en algunas celdas; 2.50V de corte
Ciclo de vida	1000-2000 (relacionado con la velocidad de la descarga, la temperatura...)
Fuga térmica	210°C (410°F) típico. La alta carga promueve la fuga térmica
Costo	~\$420 por kWh (Fuente: RWTH, Aachen)
Aplicaciones	Bicicletas eléctricas, dispositivos médicos, vehículos eléctricos, industriales...
Comentarios	Proporciona una gran capacidad y una gran potencia. La cuota de mercado está aumentando.

Fuente: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion [63]

En las baterías NCM se ha conseguido progresivamente reducir el contenido de cobalto aumentando la densidad energética, a costa eso si de una mayor inestabilidad en las temperaturas de funcionamiento siendo las NCM 811 las ultimas baterías de este tipo que han salido al mercado.



El número posterior a NMC indica en este caso la proporción entre el níquel el cobalto y el manganeso como podemos observar en la figura (Imagen 39), siendo las más usuales actualmente las 622 y recién salidas al mercado las 811 (8 partes de níquel, 1 parte de manganeso y 1 de cobalto). También en la Imagen 39 podemos observar donde en función de la composición podemos obtener más densidad energética, más estabilidad térmica o un bajo costo. En la Imagen 40 e Imagen 41 podemos observar vehículos que emplean este tipo de baterías.



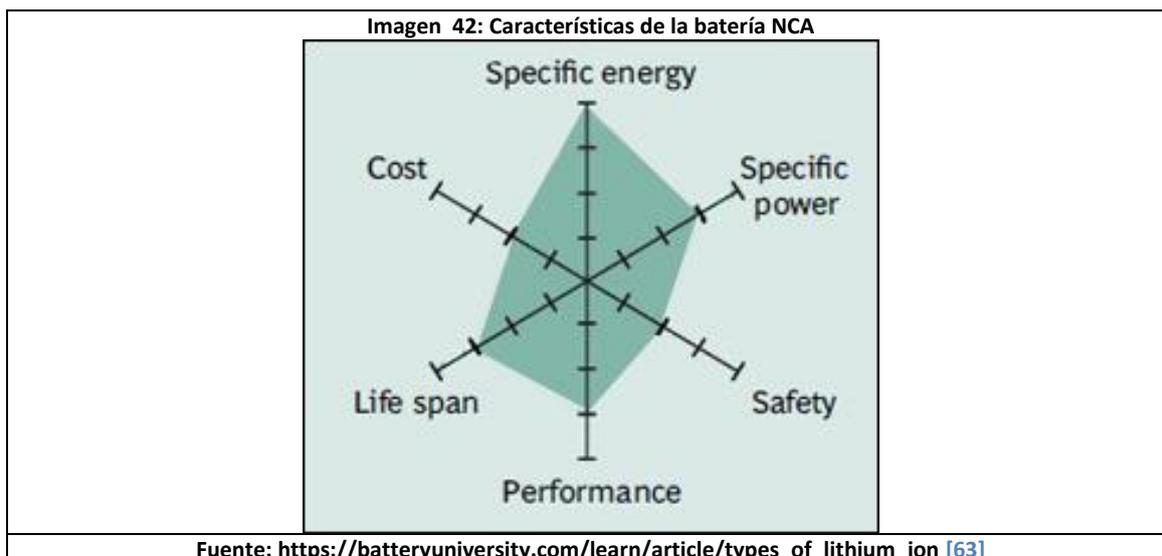
Fuente: <https://www.revistacolectibondi.com.ar/2018/08/15/volvo-buses-vendio-cuatro-unidades-electricas-en-suecia/>



Fuente: <https://www.sae.org/news/2019/10/what-were-driving---volkswagen-passat-gte>

Baterías (Li-ion) NCA [63]:

Esta batería Li-ion está formada por un cátodo de níquel, cobalto y aluminio (NCA) y un ánodo de grafito. Sus características son similares a las NMC pero con una densidad energética un poco mayor y un coste un poco menor, como se puede observar en la Imagen 42.



El problema de esta batería es que muchas de las patentes empleadas en su fabricación son propiedad de Tesla y Panasonic, provocando eso que estas dos sean las únicas empresas que fabrican estas baterías que son solo utilizadas en vehículos de Tesla. En la Tabla 7 vemos las características técnicas exactas de estas baterías:

Tabla 7: Características de las baterías NCA

Litio, níquel, cobalto, óxido de aluminio: Cátodo LiNiCoAlO₂ (~9% Co), ánodo de grafito. Abreviatura: NCA o Li-aluminio.	
Voltajes	3,60V nominal; rango operativo típico 3,0-4,2V/célula
Energía específica (capacidad)	200-260Wh/kg; 300Wh/kg predecible
Carga (C-rate)	0,7C, carga a 4,20V, 3h de carga típica, carga rápida posible con algunas células
Descarga (C-rate)	1C típico; 3.00V de corte; la alta tasa de descarga acorta la vida de la batería
Ciclo de vida	500 (relacionado con la velocidad de la descarga, la temperatura)
Fuga térmica	150°C (302°F) típico, la alta carga promueve la fuga térmica
Costo	~\$350 por kWh (Fuente: RWTH, Aachen)
Aplicaciones	Dispositivos médicos, industriales, tren de potencia eléctrica (Tesla)
Comentarios	Comparte similitudes con el Li-cobalto. Utilizado principalmente por Panasonic y Tesla; Gran potencial de crecimiento.

Fuente: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion [63]

Un ejemplo de vehículo que emplea esta batería puede ser el del Tesla Model S (Imagen 43), que posee baterías con una capacidad entre los 75 y los 100 kWh y con grandes potencias por encima de los 250 kW.

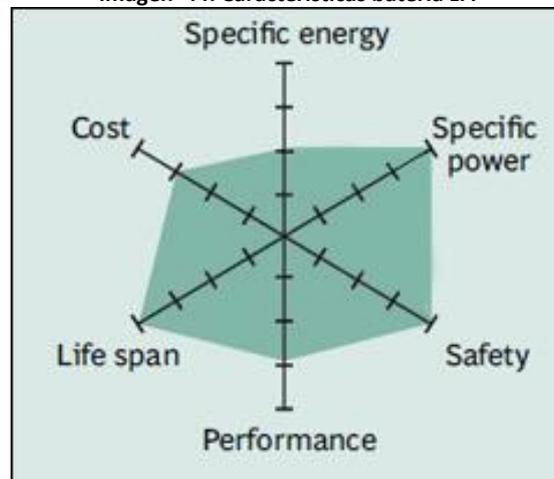
Imagen 43: Vehículo eléctrico Tesla model S

Fuente: https://www.tesla.com/es_ES/inventory/new/ms

Batería Li-ion (LFP) [63]:

Esta batería también del tipo Li-ion está compuesta por un cátodo de fosfato de hierro y un ánodo de grafito. Esta tiene como grandes ventajas un largo ciclo de vida útil, una gran seguridad, un precio más bajo que las baterías anteriormente mencionadas, pero con un gran inconveniente, una densidad energética muy pobre como se puede observar en la Imagen 44, lo que provoca que su peso y su tamaño sea muy superior a igualdad de capacidad energética respecto a las baterías NMC y NCA.

Imagen 44: Características batería LFP

Fuente: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion [63]

A pesar de ello son las baterías más usadas en china, el país con más vehículos eléctricos del mundo. En la Tabla 8 podemos ver sus características técnicas exactas:

Tabla 8: Características de las baterías LFP

Fosfato de hierro y litio: Cátodo LiFePO ₄ , ánodo de grafito Forma corta: LFP o Li-fosfato	
Voltajes	3,20, 3,30V nominal; rango operativo típico 2,5-3,65V/célula
Energía específica (capacidad)	90-120 Wh/kg
Cargo (C-rate)	1C típico, carga a 3.65V; 3h de tiempo de carga típico
Descarga (C-rate)	1C, 25C en algunas células; 40A de pulso (2s); 2.50V de corte (más bajo que 2V causa daño)
Ciclo de vida	2000 y más (en relación con la velocidad de descarga, la temperatura)
Fuga térmica	270°C (518°F) Batería muy segura incluso si está completamente cargada
Costo	~\$580 por kWh (Fuente: RWTH, Aachen)
Aplicaciones	Portátiles y estacionarios que necesitan corrientes de alta carga y resistencia
Comentarios	Curva de descarga de voltaje muy plana pero de baja capacidad. Una de las más seguras

Fuente: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion [63]

Estas baterías se están implementando en vehículos de transporte público en china como podemos ver en la Imagen 45, un autobús BYD K9 que lleva en su interior cerca de 2 toneladas de baterías que le permiten hacer unos 250 kilómetros por carga.

Imagen 45: Bus eléctrico BYD K9



Fuente: <http://chinaautoweb.com/2011/03/byd-k9-electric-bus-to-be-tested-in-denmark/>

¿Porque estas? y no otros tipos de baterías

Las baterías NMC, NCA y LFP (todas ellas Li-ion) son las elegidas por los fabricantes debido a que poseen unas buenas características técnicas y lo más importante, no



poseen problemas graves. Por ejemplo, las baterías NiMH [61] usadas por Toyota hasta el año pasado; aunque poseen una gran estabilidad y fiabilidad tienen un grave problema de efecto memoria además de una deficiente densidad energética, esto ha hecho que sean sustituidas por las baterías de Li-ion.

Si nos fijamos en las baterías de LiPo (LiCoO₂) [61], aunque a priori sus características nos dicen que son mejores en todos los aspectos que las de Li-ion, estas primeras poseen un grave problema de inestabilidad térmica que no permitiría las cargas rápidas de los vehículos eléctricos e incluso podría llegar a ser peligrosa si se la somete a un uso intensivo o si se deforma en un accidente.

Finalmente centrándonos en las baterías de Pb-ácido y las de NiCd [61] son baterías con una muy pobre densidad energética, elevado peso, efecto memoria y lo más destacable, emplean materiales difíciles de reciclar y perjudiciales para la salud de los seres vivos como ácidos o cadmio.

Reciclaje de las baterías, procesos empleados y tasas de reciclado

En el reciclado concerniente a la movilidad eléctrica hay que poner especial énfasis en el reciclado de las baterías ya que estas son objetos que poseen una gran concentración y variedad de metales críticos y que están presentes en todos y cada uno de los automóviles electrificados en mayor o menor medida. Una vez se han separado las baterías del vehículo, se han descargado y se han eliminado sus carcasas externas todo ello ejecutado de forma manual se emplean procesos de reciclado únicos que han sido especialmente diseñados para poder aprovechar los minerales que las componen cuando han llegado al fin de su ciclo de vida para fabricar nuevas baterías.

Estos procedimientos deben ser entendidos como herramientas que se utilizan para reciclar las baterías no como una sucesión estándar de acciones que solo pueden ser ejecutadas de una determinada forma, un ejemplo, en este mismo ámbito es que se suelen dar los procesos pirometalúrgico e hidrometalúrgico sucesivamente en el reciclado, además, cada empresa introduce ciertas variaciones buscando diferentes resultados. Haciendo uso de otro ejemplo podríamos plantear un símil con la acción de quitar un clavo, primero podemos emplear el sacaclavos del martillo y cuando ha salido una parte de este podemos tirar con un alicate. Las herramientas citadas podrían ser nuestros procesos y la acción de sacar el clavo podría ser el reciclado de la batería. Habiendo dejado claro esto podemos explicar en más profundidad los procesos que se utilizan en el reciclado de las baterías:

Pirometalurgia

El proceso pirometalúrgico [64]–[66] consiste en la introducción de las baterías en hornos con el fin de poder fundirlas. Previamente se puede o no haber producido tratamientos mecánicos como la trituración (Imagen 46) o la separación de algunos

componentes mediante imanes. Este proceso no requiere un aporte demasiado excesivo de energía, ya que las baterías poseen una gran cantidad de energía química que puede ser transformada en energía térmica al entrar en contacto con el calor del horno, además, si no se realizan pre tratamientos mecánicos no es necesario pasivar la batería y puede introducirse directamente en el horno.

Imagen 46: Triturador de baterías en atmosfera de nitrógeno



Fuente: <https://www.duesenfeld.com/>

Los productos resultantes del proceso son aleaciones metálicas, gases y escoria. Los gases contienen orgánicos volátiles provenientes del electrolito y las sales. Los polímeros y elementos orgánicos que forman los plásticos y el separador y las sales se descomponen y queman debido a las altas temperaturas. La escoria contiene el aluminio, manganeso y litio y todos estos metales se pierden. La pirometalurgia tiene grandes inconvenientes ambientales, utiliza una gran cantidad de energía a pesar de que las baterías aportan energía calorífica, emisiones de gases tóxicos, contaminantes y de efecto invernadero. En el lado positivo podemos decir que es el proceso con menor complejidad técnica además de tener unos costes de producción reducidos. Empresas como *Umicore* (<https://www.umicore.com/>) o *Accurec recycling* (<https://accurec.de/>) emplean este método.

Procesos físicos (Direct Recycling)

La batería se tritura en trituradores con una atmosfera controlada (empleando diferentes gases como el nitrógeno) para evitar igniciones, tras esto se inicia la recuperación de los minerales. En este proceso [64]–[66] las baterías se someten a procedimientos que permiten aprovechar las diferencias fisicoquímicas de las partículas de los distintos componentes como la densidad, el ferromagnetismo... empleando tamices, filtros, imanes, mesas agitadoras... Los productos resultantes de todo el proceso se puede dividir en tres grupos, la fracción fina o masa negra, la

fracción gruesa y el litio. El litio se puede recuperar evaporándolo al triturar la batería en una atmósfera controlada, usualmente de nitrógeno gaseoso (evitando igniciones), para su posterior condensación. La fracción gruesa presenta los plásticos, los materiales que recubren las celdas y las láminas metálicas del exterior de la batería. Esta fracción se puede separar empleando imanes o procedimientos de separación por densidad.

Imagen 47: Trabajadora observando la masa negra resultante de los procesos físicos



Fuente: <https://www.duesenfeld.com/>

La fracción fina o masa negra (Imagen 47) se compone de los revestimientos de los electrodos, óxidos metálicos y grafito. El grafito se puede separar de los óxidos (de cobre, aluminio, manganeso...) mediante la flotación en distintas espumas y estos últimos pueden separarse entre sí mediante electroimanes y distintos filtros y tamices. Empresas como *Duesenfeld* (<https://www.duesenfeld.com/>) o *AkkuSer OY* (<https://www.akkuser.fi/en/home/>) emplean este método.

Este proceso es el más respetuoso con el medio ambiente de los 3 reportados aquí y a priori junto con la hidrometalurgia el que más minerales puede recuperar, pero en contraposición, es el menos rentable económicamente siendo un procedimiento lento y difícil de implementar de forma continua o en serie.

Hidrometalurgia

El método hidrometalúrgico [64]–[66] siempre incluye un pretratamiento mecánico como la trituración, posteriormente la recuperación de los metales presentes en la masa negra se consigue mediante el empleo de la lixiviación, la precipitación, la extracción con disolventes o con resinas de intercambio iónico. El procedimiento suele ir precedido de un pequeño tratamiento térmico para eliminar el grafito y compuestos orgánicos que afectan negativamente a las etapas de lixiviación. La hidrometalurgia nos permite obtener el cobalto, el níquel, el cobre, el hierro y el litio con gran pureza. Como inconvenientes este proceso utiliza abundantes disolventes y baños ácidos muy

perjudiciales para el medio ambiente y también presenta dificultades para poder ejecutarse de forma continua. Como ventajas este método no emite casi ningún tipo de gas nocivo para el medioambiente y es capaz de recuperar una gran cantidad de minerales con gran pureza. Empresas como *Recupyl* (<http://www.recupyl.es/>) o *AEA Technology* (<http://www.aeatechnology.com/>) emplean este método.

Comparación de las características de los diferentes procesos de reciclaje

Estos procesos de reciclaje pueden ser comparados con el fin de entender mejor sus ventajas e inconvenientes y en qué casos puede ser más viable emplear unos u otros en un futuro próximo.

Tabla 9: Comparación de los diferentes procesos de reciclaje de las baterías

Comparison of different LiB recycling methods Best Worst

	Technology readiness	Complexity	Quality of recovered material	Quantity of recovered material	Waste generation	Energy usage	Capital cost	Production cost
Pyrometallurgy	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
Hydrometallurgy	****	****	****	****	****	****	****	****
Direct recycling	***	***	***	****	****	****	****	****

Fuente: *Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles*, G. Harper *et al* [65]

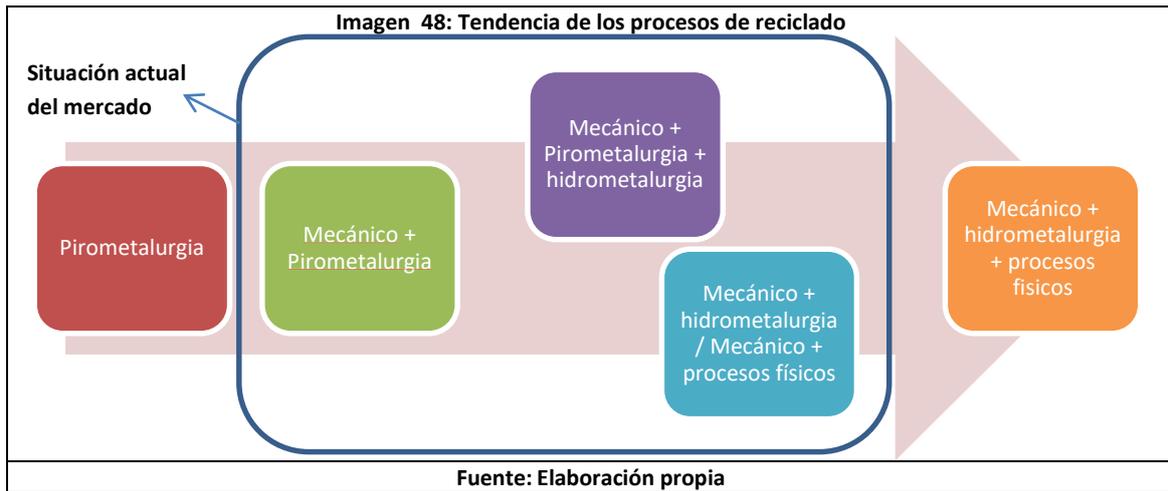
Según los autores [65] en la Tabla 9 estos procesos son clasificados según sus gastos de energía, complejidad, coste de inversión, etc. Esta tabla nos ayuda a entender mejor las bondades e inconvenientes de cada método, aunque en muchas ocasiones en la práctica, estos métodos se combinen con el fin de aumentar la eficacia y eficiencia de los procesos.

Estas combinaciones de los métodos de reciclaje buscan aumentar las ventajas de los procesos minimizando sus inconvenientes, por ejemplo, la hidrometalurgia se puede usar tras el empleo de la pirometalurgia, consiguiendo elevar la cantidad de minerales recuperados sin aumentar excesivamente el coste de producción.

Tendencias del reciclado de las baterías y tasas de reciclado

A lo largo del tiempo la utilización de estos procesos ha ido variando [64], [67], escogiendo combinaciones de procesos de reciclaje cada vez más eficientes y menos contaminantes que además, permiten obtener más minerales de las baterías recicladas.

Podemos observar en la Imagen 48 la tendencia que se espera que vayan adoptando las empresas de cara al reciclaje a lo largo del tiempo según diferentes autores [65] y las propias empresas [67], situándose actualmente el mercado en las 3 combinaciones centrales.



Finalmente tras explicar los diferentes procesos de reciclado, sus posibles combinaciones y su tendencia de futuro podemos enunciar las cifras exactas de recuperación de los diferentes minerales [64], [66], [67] según el proceso de reciclaje empleado en la Tabla 10:

Tabla 10: Índices de reciclaje de los diferentes minerales según el proceso empleado en el reciclaje de las baterías

Elementos	Pirometalurgia (%)	Mecánico + Pirometalurgia (%)	Mecánico + Pirometalurgia + hidrometalurgia (%)	Mecánico + procesos físicos (%)	Mecánico + hidrometalurgia (%)	Mecánico + procesos físicos + hidrometalurgia (%)
Litio	0	0	57	94	94	94
Níquel	94	94	94	97	97	97
Cobalto	95	95	95	~99	~99	~99
Manganeso	0	0	0	~99	~99	~99
Grafito	0	0	0	0	0	~99
Aluminio	0	0	~99	~99	~99	~99
Cobre	~99	~99	~99	~99	~99	~99

Fuente: Elaboración propia con datos de **Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries**. M. Chen et al [64]. Duesenfeld [67]. **Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe**. Natalia Lebedeva, Franco Di Persio, Lois Boon-Brett. [66]

Requerimientos minerales y energéticos de las baterías

Las baterías requieren de minerales para su fabricación, alguno de ellos escaso en nuestro planeta, por eso es necesario tener en cuenta los materiales que las componen.

Tabla 11: Elementos de una batería tipo de los diferentes tipos de vehículos electrificados

Componente	Porcentaje de masa		
	HEV(%)	PHEV(%)	EV(%)
Cátodo y Li	27	28	28
Grafito	12	12	17,9
Pegamento	2,1	2,1	2,5
Cobre	13	15	13
Aluminio	24	23	21
EC	4,4	4,9	5,3
DMC	4,4	4,9	5,3
PP	2	2,2	1,7
PE	0,3	0,4	0,29
PET	2,2	1,7	1,2
Acero	2,8	1,9	1,4
Aislamiento térmico	0,4	0,3	0,3
Partes electrónicas	1,5	0,9	1,1
Glicol	2,3	1,3	1

Fuente: **Material and energy flows in the material production, assembly, and end-of life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle.** Jennifer B. Dunn, Matthew Barnes, Linda Gaines, John Sullivan, and Michael Wang, [68] **Con modificaciones propias**

En la Tabla 11 podemos ver la cantidad porcentual aproximada [68] de masa de los diversos elementos de una batería tipo de un vehículo híbrido (HEV), híbrido enchufable (PHEV) y eléctrico puro (BEV). Los datos obtenidos de la fuente bibliográfica principal han sido modificados con el fin de que sean más fieles a las tecnologías actuales de baterías y a otros autores [69], [70].

En el Cátodo y el electrolito [69], [70] es donde se encuentran los elementos más críticos normalmente presentes en la batería, estos son los que poseen riesgo de agotamiento debido a su escasez o al uso intensivo por las personas. En la Tabla 12 podemos ver las cantidades de elementos por kWh de capacidad energética.

Tabla 12: Masa de elementos presentes en el cátodo de las baterías y en el electrolito

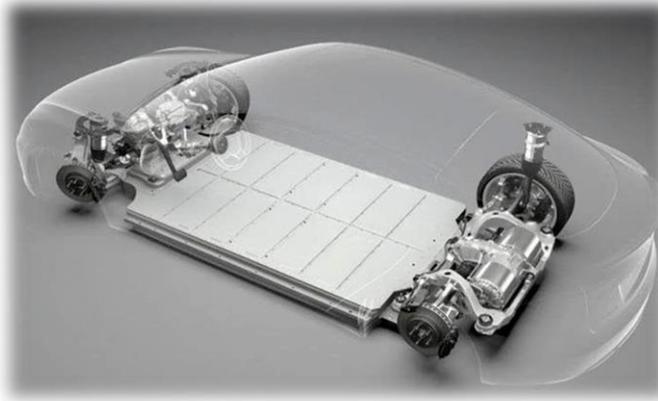
Intensidad de los metales críticos en distintas baterías kg/kWh	Li	Ni	Co	Mn	Al	Fe	P
NCA	0,1	0,67	0,13	0	0,02	0	0
NCM 622	0,13	0,61	0,19	0,2	0	0	0
NCM 811	0,11	0,75	0,09	0,09	0	0	0
LFP	0,1	0	0	0	0	0,8	0,45

Fuente: **Protagonismo de las materias primas minerales en el desarrollo del vehículo eléctrico.** Luis De La Torre Palacios, Eloy Álvarez Pelegrý, José Antonio Espí Rodríguez [69]. **Lithium-Ion Batteries: Possible Materials Issues.** Linda Gaines and Paul Nelson [70].

Como se puede observar son cantidades nada despreciables teniendo en cuenta que un coche eléctrico medio actual puede disponer de una batería de 50KWh y en

determinados modelos alcanzar los 100Kwh. En La Imagen 49 podemos ver cómo está dispuesta la batería y los motores eléctricos en un vehículo de la marca Tesla.

Imagen 49: Chasis, batería y motores de un vehículo de la marca Tesla



Fuente: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/tesla-cambia-condiciones-garantia-baterias-mete-nuevo-charco/20200204184709032928.html>

Además de conocer la composición en masa de las baterías debemos conocer que energía se emplea en obtener los materiales que componen la baterías [71], [72] junto a la energía que se emplea en montarlas, para poder hallar finalmente la energía total que debemos emplear para fabricar una batería media por unidad de masa, de un determinado tipo, con el fin de poder introducir estos datos en la simulación. Esta característica que nos enuncia la cantidad energía que nos cuesta obtener un determinado elemento por unidad de masa se denomina energía incorporada, proveniente del inglés “energy embodied”.

Estos datos de energía incorporada de cada material los podemos encontrar en la Tabla 13:

Tabla 13: Energía incorporada en los elementos críticos de las baterías

	Li (MJ/kg)	Ni (MJ/kg)	Co (MJ/kg)	Mn (MJ/kg)	Al (MJ/kg)	Fe (MJ/kg)	P (MJ/kg)	Cu (MJ/kg)
Energía incorporada del elemento virgen	853	164	285	57,6	218	25	13	57
Energía incorporada del elemento reciclado	284,34	54,67	95	19,2	29	9,4	4,33	16,5
Energía incorporada combinada	853	125,7	224,2	43,4	152,9	18,8	X	45,5

Fuente: INVENTORY OF CARBON & ENERGY. Geoff Hammond & Craig Jones [71] Sustainable use of Phosphorus. J.J. Schröder & D. Cordell [73]

Como se puede observar en la tabla anterior (Tabla 13) no se han introducido los datos del fosforo completos pues no se han podido hallar, pero la cantidad empleada de este

es pequeña al igual que su energía incorporada, unido a que solo se emplea en la batería LFP, hace que el error resultante sea mínimo.

Tabla 14: Características de las baterías evaluadas

	Batería LiMnO ₂	Batería Li NMC 622	Batería Li NMC 811	Batería Li NCA	Batería LFP
masa de la batería (kg)	~220	~330	~330	~460	~700
potencia de la batería (kW)	80	100	100	262	90
Capacidad de la batería (kWh)	~24	~55	~55	~80,5	~85
Numero de baterías por MW de potencia	12,5	10	10	3,82	11,11
kg baterías por MW	2750	3300	3300	1757,2	7777,78
Modelos de automóvil que las usan	Nissan Leaf	Renault ZOE...	Tesla Model 3	Tesla Model 3	BYD e6

Fuente: Elaboración propia

Enunciando distintos ejemplos de baterías usados en el mercado podemos ver cuál es la masa de total de cada batería y su potencia máxima, para posteriormente, poder obtener la cantidad de baterías por MW de potencia y por lo tanto la masa total de batería por MW de potencia (Tabla 14).

Teniendo la masa total de las baterías por MW, los porcentajes de masa de los elementos que componen estas, la capacidad de las baterías y el peso de los elementos del cátodo por capacidad de batería, podemos obtener el peso de cada uno los elementos que componen las baterías por MW de potencia (Tabla 15):

Tabla 15: Elementos de las baterías evaluadas

	Batería LiMnO ₂ (kg/MW)	Batería Li NMC 622 (kg/MW)	Batería Li NMC 811 (kg/MW)	Batería Li NCA (kg/MW)	Batería LFP (kg/MW)
Aluminio (Al)	500	693	693	375,16	1477,63
Cobre (Cu)	289	429	429	227,24	855,47
Hierro (Fe)	0	0	0	0	765,25
Litio (Li)	34,4	71,5	60,5	30,725	95,6
Manganeso(Mn)	509,36	110	55	0	0
Níquel (Ni)	0	335,5	412,5	191,75	0
Cobalto (Co)	0	110	55	40	0
Fósforo (P)	0	0	0	0	425
Otros	780	1050	1050	580	2500

Fuente: **Material and energy flows in the material production, assembly, and end-of life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle**, Jennifer B. Dunn, Matthew Barnes, Linda Gaines, John Sullivan, and Michael Wang [68]. **Protagonismo de las materias primas minerales en el desarrollo del vehículo eléctrico**, Luis De La Torre Palacios, Eloy Álvarez Pelegrý, José Antonio Espí Rodríguez [69]. **Lithium-Ion Batteries: Possible Materials Issues**, Linda Gaines and Paul Nelson [70]. **The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction**, J. B. Dunn, L. Gaines, J. C. Kelly, C. James, y K. G. Gallagher [74]. <https://www.geotab.com/>, GEOTAB [75]

Ya obtenido el peso de los distintos elementos, multiplicando estos valores por su energía incorporada combinada de cada elemento, obtenemos los MJ de energía que nos cuestan obtener los materiales por MW de potencia de baterías. También utilizando la potencia de la batería y su peso podemos obtener los MJ por batería y los MJ por cada kilogramo de batería.

Tabla 16: Energía incorporada en la fabricación de las baterías

	EnU Batería LiMnO2	EnU Batería Li NMC 622	EnU Batería Li NMC 811	EnU Batería Li NCA	EnU Batería LFP
MJ/MW	203297,567	341866,471	327447,378	173273,6	560418,533
MJ/kW	203,297567	341,866471	327,447378	173,2736	560,418533
MJ/batería	16263,8053	34186,6471	32744,7378	45397,6832	50437,668
MJ/kg	77,446692	103,5959	99,226478	98,6906156	72,0538114
MJ/kg + 5% fabricación	81,3190266	108,775695	104,187802	103,625146	75,656502

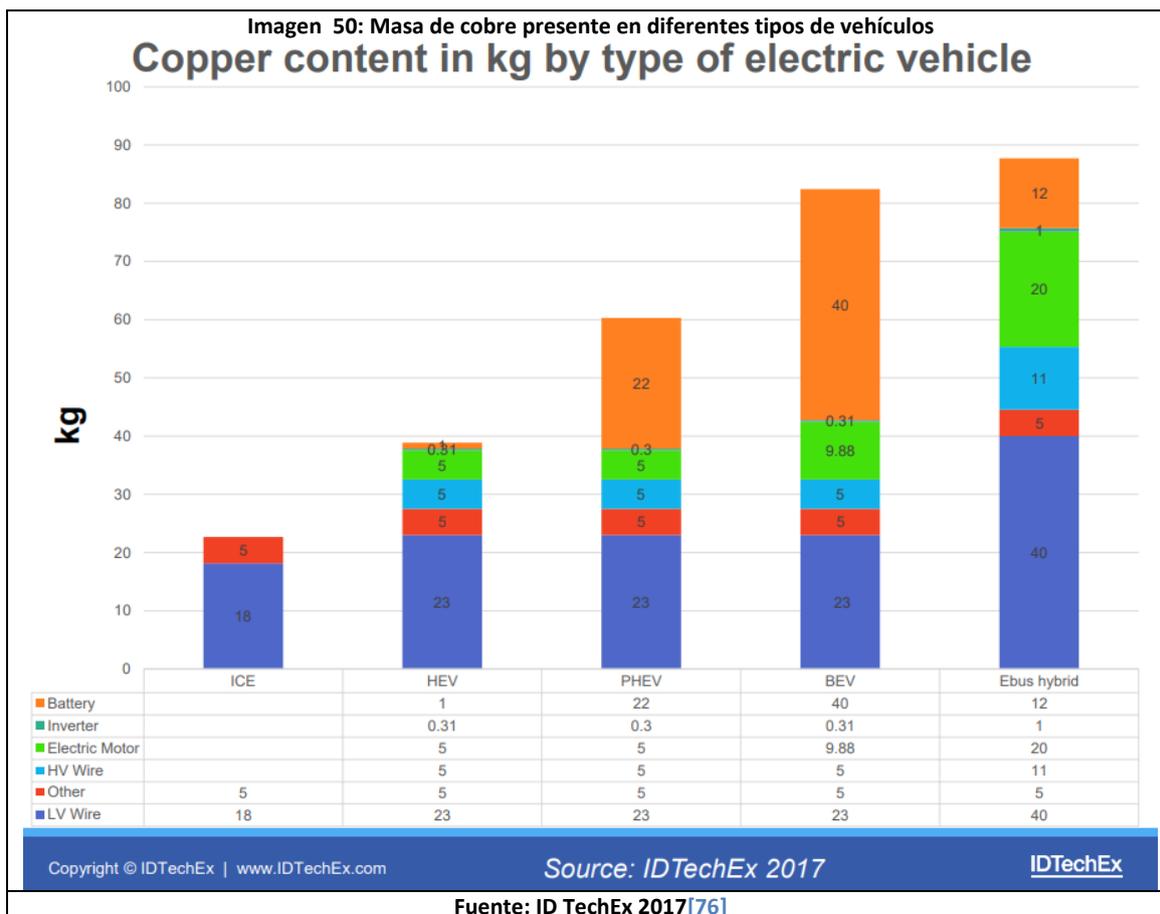
Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido todo lo que nos cuesta energéticamente conseguir los materiales que componen las baterías, aumentando un 5% este valor [74] obtenemos finalmente la energía de fabricación total de estas (Tabla 16).

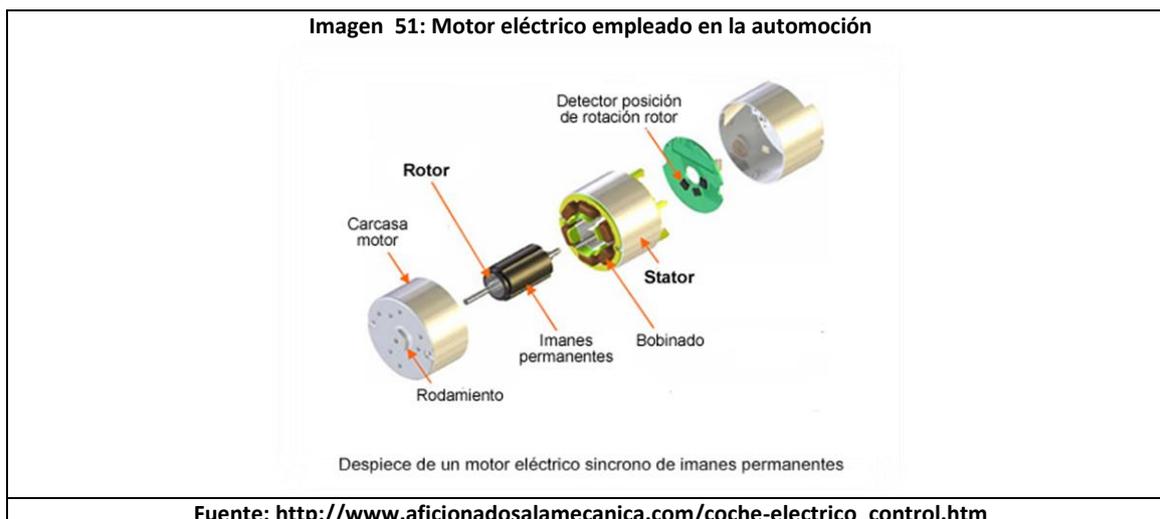
Motor eléctrico y aumento del cableado del vehículo

En los vehículos electrificados nos encontramos con una cantidad de cableado para conducir la electricidad del punto de carga a la batería y de esta al motor, además del propio cobre que poseen la batería y el motor en su interior, lo que se traduce en definitiva en una cantidad de cobre más elevada que en un vehículo convencional.

En un estudio de *IDTechEX* [76] sobre la cantidad de cobre de los vehículos de la marca de automóviles china *BYD*, se obtuvo que la cantidad de cobre total de un vehículo eléctrico casi cuadruplica a la cantidad de este mineral presente en un vehículo convencional. En el gráfico de la siguiente (Imagen 50) se puede observar la distribución del cobre en las diferentes partes del vehículo y la cantidad que está presente en los diferentes tipos de vehículos.



Como podemos ver en el gráfico el motor eléctrico es de los elementos que más peso en cobre posee, esto es debido a que los motores eléctricos tienen en su interior un bobinado de cobre de gran longitud como se puede observar en la Imagen 51.



Requerimientos minerales y energéticos del cableado interno y del motor

Los requerimientos de las baterías no son los únicos que posee el vehículo rodado electrificado, como hemos indicado antes, este posee también una gran cantidad de

cobre fuera de la batería [76], por lo que también debemos estudiar en profundidad la cantidad que se emplea de este material de forma externa a la batería (Tabla 17).

Tabla 17: Cantidad de cobre según el tipo de vehículo, sin batería

Partes del vehículo (sin batería)	Cu (kg)/Vehículo			
	HEV	PHEV	BEV	Bus Híbrido
Inversor	0,31	0,3	0,31	1
Motor eléctrico	5	5	9,88	20
Conexión de alto voltaje	5	5	5	11
Conexión de bajo voltaje	23	23	23	40
Otros	5	5	5	5
TOTAL	38,3	38,3	43,2	77

Fuente: Elaboración propia con datos de IDTechEX [76]

Una vez obtenida la cantidad de cobre presente en el vehículo, con la intensidad energética del material (Tabla 18) podemos terminar el análisis energético. En la Tabla 19 se enuncia la energía total empleada en la obtención del cobre por vehículo.

Tabla 18: Intensidad energética del cobre

	Cu (MJ/kg)
Energía incorporada del elemento obtenido de forma tradicional	57
Energía incorporada del elemento obtenido del reciclado	16,5

Fuente: INVENTORY OF CARBON & ENERGY. Geoff Hammond & Craig Jones [71]

Tabla 19: Energía empleada en la obtención del cobre del vehículo, sin batería

Cu (MJ/Vehículo)			
HEV	PHEV	BEV	Bus Híbrido
1741,19	1740,74	1962,99	3499,65

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2 Infraestructura del vehículo rodado electrificado

La movilidad eléctrica en el vehículo rodado para poder funcionar necesita de una importante infraestructura [47], [77], esta emplea diversos materiales y una gran cantidad de energía para poder fabricarse y mantenerse. Esta infraestructura puede ser dividida en 2 partes diferenciadas:

Puntos de carga

Es el elemento que gestiona la energía eléctrica proveniente de la vivienda o el aparcamiento hacia nuestro vehículo [78]. Este elemento posee protecciones de sobretensión, de sobreintensidades, contra los cortocircuitos y sobre los contactos directos en indirectos, protegiéndonos a nosotros y a nuestro vehículo de problemas en el suministro eléctrico y en la instalación, además, permiten cargar los vehículos de forma mucho más veloz que una toma de corriente convencional controlando y contando la cantidad energía que se suministra al vehículo.

Imagen 52: Punto de carga público



Fuente: <https://www.motorpasion.com/tesla/tesla-limita-al-80-carga-sus-supercargadores-concurridos-ee-uu-para-reducir-tiempos-espera>

Estos cargadores se puede clasificar según su potencia (a mayor potencia más velocidad de carga) y uso, empleando distintos materiales en su composición en función si son cargadores caseros ($\sim 3,7\text{kW}$), cargadores públicos convencionales ($\sim 45\text{kW}$) o rápidos ($\sim 200\text{kW}$), como el que podemos ver en la imagen anterior (Imagen 52).

Infraestructura de conexión desde la red al punto de carga

Para que la energía eléctrica pueda llegar desde la red general al punto de carga y posteriormente a nuestro vehículo debemos construir una infraestructura capaz de conducir la electricidad hacia estos puntos [77], con excepción de los puntos de carga caseros que usan la infraestructura de las viviendas o de los puntos de carga normales que se encuentren en zonas de núcleos urbanos o industriales ya abastecidas de una fuente lo suficientemente potente de energía eléctrica.

Imagen 53: Infraestructura de conexión eléctrica



Fuente: <https://www.eleconomista.net/actualidad/Sequia-y-mas-jugadores-impulsan-record-en-mercado-electrico-de-Centroamerica-20200224-0024.html>

Los puntos de carga necesitan una alimentación de electricidad de alta potencia y capaz de suministrar una gran cantidad de energía de forma segura, para ello se emplea una gran infraestructura tanto aérea (Imagen 53) como subterránea de redes eléctricas.

Requerimientos materiales y energéticos de los puntos de carga

Una vez explicado en que consiste la tecnología de los puntos de carga nos adentraremos en su composición y en la energía necesaria para obtener sus componentes [71]. En la Tabla 20 podemos ver la composición aproximada de los distintos tipos de puntos de carga [47]. En el caso del cargador rápido se incluye, tanto el cobre empleado en la construcción de un transformador de entre 1 y 2 MW de potencia necesario para su funcionamiento, como el cobre empleado en el bobinado del filtro del propio cargador (20 kg). Este transformador emplea alrededor de 500 kg de cobre que hay que dividir entre los 5 cargadores rápidos que puede alimentar.

Tabla 20: Composición y otros factores de los puntos de carga

Material	Cargador casero (kg/unidad) (3,7 kW)	Cargador convencional (kg/unidad) (45 kW)	Cargador rápido (kg/unidad) (200 kW)
Cobre (Cu)	0	0	120
Hierro(Fe)	0	0	180
Cemento	0	1200	2400
Acero inoxidable	3,5	2,14	90
PVC	7,5	0	0
ABS, fibra de vidrio...	0	52,5	380
Otros factores			
Años de vida útil	15	10	12
Cargadores por batería	1	0,25	0,15

Fuente: Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles, *Energy Policy*, A. Lucas, C. Alexandra Silva, y R. Costa Neto [47], con **modificaciones propias**.

Como podemos observar en los datos de la tabla, los cargadores poseen variedad de materiales, algunos en gran cantidad. También se han podido enunciar datos estimados de vida útil de los cargadores y el número de estos por batería [47], lo que nos servirá para poder hacer su análisis energético como se hizo con las baterías y poder obtener la cantidad de energía que nos cuesta fabricar los cargadores. En la Tabla 21 se ejecutara este análisis utilizando la composición de los cargadores, su vida útil, la cantidad de cargadores por batería y la vida útil de las baterías para obtener la cantidad de materiales total (Eq.1):

$$Material \left[\frac{kg}{MW} \right] = 10 \left[\frac{baterías}{MW} \right] \cdot \sum Material[kg] \cdot Numero \ de \ cargadores \cdot \frac{Lifetime \ batería[yr]}{Lifetime \ cargador[yr]} \quad Eq.1$$

Tabla 21: Energía incorporada en la fabricación e instalación de los puntos de carga

Tomando como referencia una batería de 100KW de potencia de 10 años de vida útil			
Material	kg/MW de batería	Energía incorporada (MJ/kg)	Energía incorporada (MJ/MW)
Cobre (Cu)	150	45,45	6817,5
Hierro(Fe)	225	25,3	5692,5
Cemento	6000	0,75	4500
Acero inoxidable	141,1833	56,7	8005,095
PVC	50	77,2	3860
ABS, fibra de vidrio...	606,25	95,3	57775,625
	TOTAL		84946,63
	TOTAL Sumando mantenimiento (28%)		110912,92

Fuente: Elaboración propia con datos de *Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles*. Alexandre Lucas, Carla Alexandra Silva, Rui Costa Neto [47].

Tras el análisis tomando como referencia una batería de 100 KW de potencia y sumando un 28% de gasto de energía en el mantenimiento y futuras reparaciones podemos establecer una cantidad de energía de 128343 MJ por MW de batería circulando.

Requerimientos materiales y energéticos de la infraestructura de conexión hasta el punto de carga

Los componentes presentes en los diferentes tipos de infraestructura y su cantidad [77] se enumeran en la Tabla 22. Las redes de baja tensión son usadas por los cargadores caseros, las de media-baja tensión por los cargadores semirápidos o convencionales y las redes de media-alta o alta tensión son empleadas por los cargadores más rápidos.

Tabla 22: Materiales que componen las redes eléctricas empleadas en alimentar los cargadores

Materiales	Redes de baja tensión (kg/m)	Redes de media-baja tensión (kg/m)	Redes de media-alta tensión (kg/m)	Redes de alta tensión (kg/m)
Cobre	0,044	0	0	0
Al	0	0,173	1,215	1,215
Acero	0	0	0,50	0,50
Barra de acero	0	0	2,9	2,9
Cemento	0	0	198	198
PVC	0	0	12	12
Lifetime (años)	40			

Fuente: (Media-alta y alta tensión) *Life Cycle Assessment of Overhead and Underground Primary Power Distribution*. S. Bumby, E. Druzhinina, R. Feraldi, D. Werthmann, R. Geyer, y J. Sahl, [77], y *Especificación técnica de las canalizaciones subterráneas de baja y media tensión*. HidroCantábrico distribución eléctrica S.A.U. [79] con modificaciones propias. (Media-baja y baja tensión) *Elaboración propia* con datos de *La guía técnica de aplicación de caída de tensión*, Gobierno de España [80]. (Lifetime) *ATS Energía* [81].

Una vez enunciados los materiales empleados en las redes eléctricas y su cantidad comenzamos con el análisis energético como hicimos con los puntos de carga, para ello en primer lugar debemos conocer cuántos metros de red por MW de batería son necesarios para cada tipo de cargador.

En la tabla siguiente (Tabla 23) se ejecuta el cálculo con la ayuda, por una parte, de los comentarios obtenidos de la fuente bibliográfica [47] y por otra, utilizando suposiciones fundadas por la experiencia (observando instalaciones existentes) para estimar cuántos metros se suelen utilizar de cable de conexión por cargador (aunque este es un valor sujeto a mucha variabilidad, por eso se emplean suposiciones):

Tabla 23: Metros de los diferentes tipos de línea por MW de batería

	m/MW	Comentarios
Líneas de baja tensión para el cargador casero	400	Asumiendo 40 m por cargador, y dado eso: 1 cargador/batería x 10 baterías/MW=10 cargadores caseros/MW
Líneas de media-baja tensión para un cargador convencional	150	Asumiendo 50 m por cargador, y dado eso: 0,25 cargadores/batería x 10 baterías/MW=2,5 cargadores rápidos/MW
Líneas de media-alta tensión para un cargador rápido (unen el CT con el cargador)	7,5	Asumiendo 5 m por cargador (suelen encontrarse 5 juntos por lo que la distancia real de los cargadores al CT sería de 25 metros), y dado eso: 0,15 cargadores/batería x 10 baterías/MW=1,5 cargadores rápidos/MW
Líneas de alta tensión para un cargador rápido (unen el centro de reparto con el CT)	60	Asumiendo 40 m por cargador (suelen encontrarse 5 juntos por lo que la distancia real de los cargadores al Centro de reparto sería de 200 metros), y dado eso: 0,15 cargadores/batería x 10 baterías/MW=1,5 cargadores rápidos/MW

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente con los datos ya obtenidos podemos hallar la masa por KW de batería de los diferentes materiales (Tabla 24):

Tabla 24: Masa de los componentes de las líneas por MW de batería

Redes para la infraestructura de los vehículos eléctricos	Redes de baja tensión (kg/MW)	Redes de media-baja tensión (kg/MW)	Redes de media-alta tensión (kg/MW)	Redes de alta tensión (kg/MW)	Masa Total (kg/MW)
Cobre	17,6	0	0	0	17,6
Al	0	25,95	9,11	72,9	107,96
Acero galvanizado	0	0	3,75	30	33,75
Barra de acero...	0	0	21,75	174	195,75
Cemento	0	0	1485	11880	13365
PVC	0	0	90	720	810
				TOTAL	14530,1

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, también obtenida la masa por MW de batería usaremos la energía incorporada de los materiales [71] para poder hallar la energía incorporada total de la red eléctrica empleada en alimentar de energía los puntos de carga (Tabla 25).

Tabla 25: Energía incorporada de los componentes de las líneas por MW de batería

Redes para la infraestructura de los vehículos eléctricos	Energía (MJ/kg)	Masa (kg/MW)	Energía incorporada (MJ/MW)
Cobre	45,45	17,6	799,92
Al	155	107,96	16733,8
Acero galvanizado	40	33,75	1350
Barra de acero...	25,3	195,75	4952,475
Cemento	0,75	13365	10023,75
PVC	77,2	810	62532
		TOTAL	96391,95

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Transporte ferroviario electrificado, tecnologías, infraestructura y análisis de requerimientos materiales

Como en el vehículo rodado electrificado en este ámbito también tenemos varias tecnologías de electrificación:

-Híbrido: Son ferrocarriles que pueden utilizar tanto combustible como electricidad para moverse. Estos trenes (Imagen 54) poseen motores eléctricos que toman la energía eléctrica del motor diesel que funciona como un generador o directamente de la catenaria. Esta posibilidad de circular sin catenaria otorga a este tipo de ferrocarril una gran polivalencia. Como desventaja, podemos decir que son trenes caros ya que poseen de dos sistemas de propulsión, y que si se van a utilizar para moverse solo en líneas electrificadas el tren siempre lleva a costas el peso del gran motor diesel, lo que lo hace menos eficiente para circular bajo una catenaria que un ferrocarril

eléctrico puro. En cambio, como ventajas, podemos decir que estos trenes permiten moverse una gran cantidad del tiempo con la energía de la catenaria, siendo más eficientes y cuando se encuentran con un tramo sin electrificar, estos pueden atravesarlo encendiendo el motor diesel, cosa imposible de ejecutar para ningún otro tipo de tren.

Imagen 54: Ferrocarril híbrido de media o larga distancia español Alvia



Fuente: <https://murciaeconomia.com/art/62137/renfe-programa-un-segundo-alvia-hibrido-entre-la-region-y-madrid>

-Eléctrico: Este tipo de ferrocarril (Imagen 55) es capaz de moverse de forma eficiente y con gran rapidez tomando la energía de la catenaria o del tercer carril. Como desventajas podemos enunciar la necesidad de una red de vías férreas totalmente electrificadas para poder utilizar este tipo de tren. Como ventajas, este tren posee una gran eficiencia, una nula emisión de gases donde está circulando, una buena velocidad de circulación y una gran aceleración.

Imagen 55: Ferrocarril eléctrico de media o larga distancia español AVE



Fuente: <https://www.elindependiente.com/economia/2019/07/22/ave-madrid-barcelona-doblar-oferta-trenes-la-entrada-rivales-renfe/>

A pesar de que muchos trenes funcionen con motores diesel, no nos debe llevar a engaño, este motor no tiene como objetivo mover el tren, este motor solo se encarga

de producir electricidad para alimentar los motores eléctricos que mueven casi la totalidad de los trenes del mundo. Este hecho hace que las diferencias en lo respectivo a la variedad y cantidad de materiales utilizados en la fabricación de un tren que funciona de forma totalmente eléctrica, un híbrido y uno que funciona con motor diesel sean mínimas.

Estas diferencias se encuentran en la **infraestructura** que utilizan los trenes eléctricos [5], pues esta electricidad debe llegar al tren de alguna forma, en cambio en el tren diesel el combustible aporta la energía para conseguir electricidad.

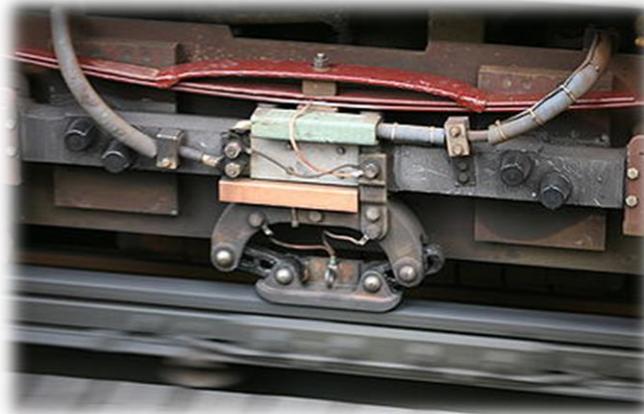
3.2.2.1 Infraestructura del transporte ferroviario electrificado

La infraestructura del transporte ferroviario electrificado permite a los trenes sin motor diesel obtener la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento, esto se puede conseguir de dos formas:

Tercer carril

Es un sistema [82] capaz de transmitir una de las polaridades de la energía eléctrica mediante un carril adicional que suele tener éste como fin exclusivo y que es frotado por el tren mediante un patín (Imagen 56). Al igual que en la electrificación por catenaria, el circuito se cierra con las propias vías, lo que genera uno de las mayores desventajas del tercer carril, ya que en caso de que alguien se caiga a la vía es muy fácil que haga contacto entre los conductores y sufra una electrocución.

Imagen 56: Sistema de electrificación ferroviaria de tercer rail

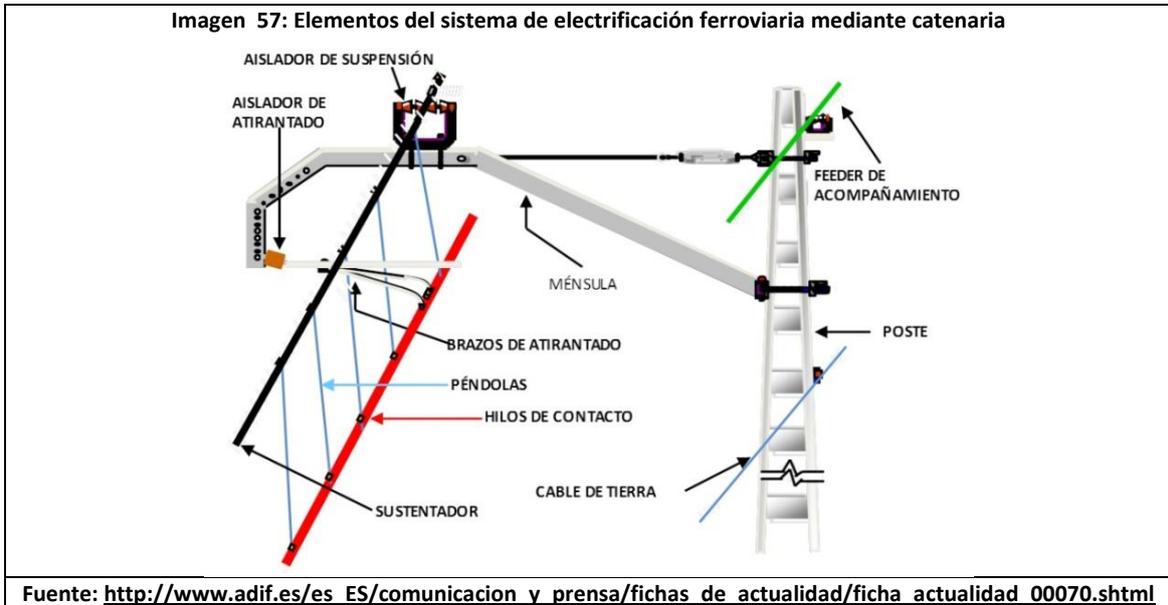


Fuente: http://ferropedia.es/mediawiki/index.php/Carril_conductor_terrestre

Principalmente es empleado en redes de metro, ya que debido al rozamiento entre el patín y el carril no permite grandes velocidades. Sin embargo, su instalación y mantenimiento es más barato que la catenaria.

Catenaria

En este sistema [82], [83] el hilo de contacto como en el tercer carril transmite una de las polaridades y el circuito se cierra mediante las vías. En este sistema, como podemos observar en la Imagen 57, el hilo conductor pende de una catenaria o sustentador que está sujeta por las ménsulas mediante dos sujeciones, de tal manera que el sistema tenga una mayor rigidez y por lo tanto permita mayores velocidades.



Aunque la catenaria o sustentador está curvada debido a su propio peso como se puede observar en la Imagen 58, el hilo se mantiene paralelo en altura a los raíles ya que los elementos que los unen (péndolas) tienen la longitud correcta en cada punto de la curva.



Además, este sistema permite la instalación de contrapesos en el poste que dotan a la estructura de una mayor rigidez o posibilita que se usen varios hilos en lugar de uno lo que mejora la conductividad y la velocidad a la que pueden circular los trenes, por esa razón sumado a la alta seguridad del sistema es el método de electrificación más extendido en el ferrocarril.

Análisis de los requerimientos materiales y energéticos del ámbito ferroviario

Debido a los datos de los que disponemos para ejecutar el análisis de los requerimientos materiales y energéticos de la infraestructura del ferrocarril electrificado, tenemos que hacer ciertas suposiciones:

- 1º: Supondremos que todas las vías no individuales son dobles.
- 2º: supondremos que todas las vías no electrificadas se electrificarán.
- 3º: supondremos que el sistema de electrificación será la catenaria.

Una vez establecidas las suposiciones y teniendo conocimiento de los kilómetros de vías que se deben electrificar debemos conocer los requerimientos de las catenarias, para ello hemos establecido 2 escenarios utilizando en uno de ellos como catenaria predeterminada la CA-220 de ADIF y en el otro la CA-160 [83]–[85] y así poder conseguir un rango que comprenda el rango de velocidades más utilizado a nivel mundial.

Elementos	CA-220 (mm^2)	CA-160 (mm^2)
Sustentador	180	150
hilo de contacto	2x150	2x107
Feeder de acompañamiento	240	0
Feeder de alimentación	2x240	2x240

Fuente: http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml
[83]–[85]

Ya conociendo los datos de las catenarias presentes en la Tabla 26 y la cantidad de kilómetros de vías férreas que tenemos que electrificar (Tabla 27 e Imagen 3) podemos establecer los requerimientos de cobre-ETP (Tabla 28) [86] para introducir las catenarias en todas las vías férreas a nivel mundial en los dos diferentes escenarios:

Km de vías totales (sin contar vías paralelas)	Km de vías por electrificar	Km de vías dobles por electrificar (50%)
1142014	845080	422540

Fuente: **Elaboración propia** con datos de la UIC [27], [28]

Tabla 28: Composición y energía incorporada del cobre ETP

Composición del cobre-ETP (porcentaje de masa)	Cobre (Cu) 99,9%	Plata (Ag) 0,015%	Plomo (Pb) 0,005%
Energía incorporada (MJ/kg)	45,45	1306,13	28,53

Fuente: INVENTORY OF CARBON & ENERGY. Geoff Hammond & Craig Jones [71] y Cobre-ETP, BRONMETAL [86]

Tabla 29: Cantidad de cobre ETP empleado en las catenarias

CA-220			CA-160		
vía doble (m ³ /km)	vía simple (m ³ /km)	Total Cu-ETP (Mt)	vía doble (m ³ /km)	vía simple (m ³ /km)	Total Cu-ETP (Mt)
2,41	1,205	13,7	1,688	0,844	9,6

Fuente: Elaboración propia

A las cantidades de cobre obtenidas anteriormente les debemos sumar el cobre presente en las subestaciones de tracción que alimentan de energía el sistema de catenarias [87]. Estas subestaciones se encuentran usualmente cada 20 kilómetros (vía doble) de vía férrea y poseen 2 transformadores de 3300 kVa de potencia (con alrededor de 1000 kg de cobre cada uno) que reducen el voltaje de energía eléctrica desde los 25 kv hasta los 3 kv. En la Tabla 30 obtenemos esta cantidad de cobre utilizando también la cantidad de vías por electrificar [27].

Tabla 30: Cantidad de cobre empleado en las subestaciones de tracción

Transformador 3300Kva 3Kv/25Kv	vía doble (kg/Km)	vía simple (kg/Km)	Total Cu (Tn)
Cobre (Kg)	100	50	6,3 · 10 ⁴

Fuente: Elaboración propia

Una vez establecida la cantidad de Cobre-ETP que se tendría que emplear en cada uno de los escenarios (Tabla 29), junto a la cantidad de cobre tradicional que se emplea en los centros de transformación (Tabla 30), podemos hallar la cantidad de energía total utilizada mediante la energía incorporada de cada material (Tabla 28). Los datos obtenidos empleando la catenaria CA-160 se han enunciado en la Tabla 31 y los obtenidos empleando la catenaria CA-220 en la Tabla 32:

Tabla 31: Energía y masa por km necesarios para electrificar el ferrocarril a nivel mundial usando CA-160

Componentes	Energía(MJ/Kg)	Vía simple		Vía doble	
		Cantidad (kg/km)	Energía (MJ/km)	Cantidad (Kg/km)	Energía (MJ/km)
Cobre (Cu)	45,45	7604,68	345632,60	15209,36	691265,21
Plata (Ag)	1306,13	1,13	1481,59	2,27	2963,18
Plomo (Pb)	28,525	0,38	10,79	0,76	21,57

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: Energía y masa por km necesaria para electrificar el ferrocarril a nivel mundial usando CA-220

Componentes	Energía (MJ/kg)	Vía simple		Vía doble	
		Cantidad (kg/Km)	Energía (MJ/km)	Cantidad (Kg/km)	Energía (MJ/km)
Cobre (Cu)	45,45	10836	492496,35	21672	984992,69
Plata (Ag)	1306,13	1,62	2115,30	3,24	4230,61
Plomo (Pb)	28,525	0,54	15,40	1,08	30,80

Fuente: Elaboración propia

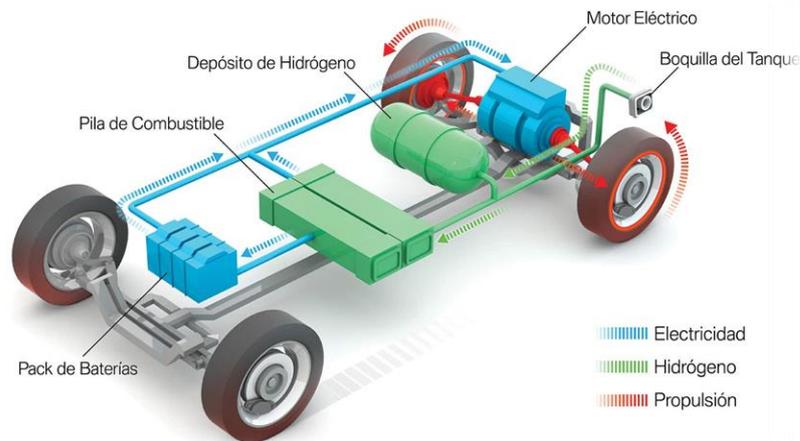
Ya obtenidos los datos que nos dictan la masa de cobre-ETP y la energía necesaria para obtener los materiales que componen la infraestructura de la electrificación tenemos toda la información inicial necesaria para la simulación del ámbito ferroviario en el modelo.

3.2.3 Futuro en la movilidad eléctrica, la célula de combustible, elementos y análisis de requerimientos minerales

El empleo de la célula de combustible en la movilidad (FCV) puede ser de gran importancia en el futuro [48], hace unos 15 años hubo una gran inversión monetaria en i+D+i en esta tecnología cuyo resultado fue infructuoso y el sector del vehículo eléctrico se acabó decantando por las baterías, pero el avance en la electrónica y la tecnología han hecho que esta tecnología vuelva al mercado con una gran proyección de futuro, como hemos citado anteriormente. Estas células nos permiten utilizar el hidrogeno para producir electricidad y así alimentar un motor eléctrico [46], aprovechando la gran eficiencia del motor eléctrico y de la célula de combustible pero sin las desventajas de un coche eléctrico convencional, pues este automóvil puede recargarse de hidrogeno en 5 minutos y tener una autonomía de 660 km.

Como podemos ver en la Imagen 59, que nos indica las partes que componen este tipo de vehículos, este sistema de movilidad también utiliza baterías pero en este caso son de muy pequeña capacidad (2KWh), para poder suplir los picos de potencia requeridos por el motor, ya que las células de combustible trabajan de forma estacionaria y también para poder regenerar energía proveniente de las frenadas y deceleraciones por lo que también son más ligeros que un coche eléctrico. Estos vehículos solo emiten vapor de agua y son capaces de limpiar el aire que toman mediante sus filtros por lo que son a priori una muy buena opción de cara al futuro próximo.

Imagen 59: Elementos de un vehículo de hidrógeno



Fuente: <https://www.bmw.com/es/innovation/coches-de-hidrogeno-asi-funcionan.html>

En lo respectivo a la demanda de estos vehículos se ha de indicar que es una tecnología muy joven y que existen muy pocas estaciones donde se pueda repostar hidrógeno (hidrogeneras) en el mundo [88], esto unido a que solo hay unos pocos modelos de este tipo de vehículos y todos enfocados al mercado particular, como el Hyundai nexo de la imagen siguiente (Imagen 60), hace que la demanda de estos vehículos a día de hoy sea anecdótica con unas ventas ínfimas al año. En un futuro próximo esta tecnología podría alcanzar una mayor madurez, y cuando los vehículos comerciales y trenes que la empleen hayan salido de la etapa de prototipo y se encuentren a la venta la cantidad de hidrogeneras aumentaría exponencialmente, lo que podría provocar a su vez un aumento de la demanda de estos vehículos.

Imagen 60: Vehículo con pila de combustible de hidrógeno Hyundai Nexo



Fuente: <https://www.hyundai.es/nexo>

Para finalizar agruparemos las ventajas [48] y desventajas [89] de este tipo de movilidad eléctrica. Como ventajas podemos decir que es una tecnología polivalente que podemos emplear en cualquier tipo de vehículo, que emplea un combustible que

se puede obtener de fuentes de energía renovable. Estos vehículos tampoco presentan emisiones de gases contaminantes ni de efecto invernadero, tienen una gran autonomía y se recargan en un tiempo reducido. En cuanto a las desventajas, podemos enunciar que emplean un gas muy ligero como combustible, lo que conlleva que su almacenamiento con densidades energéticas altas sea costoso y su logística peligrosa, todo ello obliga además a fabricar sus depósitos de forma muy precisa y con materiales de gran calidad lo que puede elevar el precio de adquisición ya de por sí muy elevado, la célula de combustible emplea materiales muy caros y escasos lo que unido a las pocas unidades que se fabrican hacen que el precio sea muy elevado, el hidrogeno se obtiene de un agua destilada previamente lo que origina muchos residuos en forma de salmueras que en gran cantidad no se deben devolver al mar.

3.2.3.1 Elementos e infraestructura de la pila de combustible (hidrógeno)

Producción del hidrogeno, electrolizadores

El combustible empleado en las células de combustible es el hidrogeno, por lo que es necesario un sistema para obtenerlo. En la actualidad es producido a partir de los siguientes recursos [90]:

-**Gas natural**, el 48% del hidrogeno producido en la actualidad se obtiene del gas natural.

-**Combustibles líquidos**, el 30% del hidrogeno producido en la actualidad se obtiene de los combustibles fósiles líquidos.

-**Carbón**, el 18% del hidrogeno producido en la actualidad se obtiene del carbón.

-**Electrolisis del agua**, el 4% del hidrogeno producido en la actualidad se obtiene de la electrolisis del agua.

En este caso a pesar de su poca incidencia actual nos centraremos en la electrolisis del agua ya que es un proceso más limpio que los demás, y que al no emplear combustibles fósiles y contaminantes puede tener un carácter predominante en el futuro en la producción de hidrogeno y oxígeno.

En la actualidad se emplean dos métodos de electrolisis del agua, estos son:

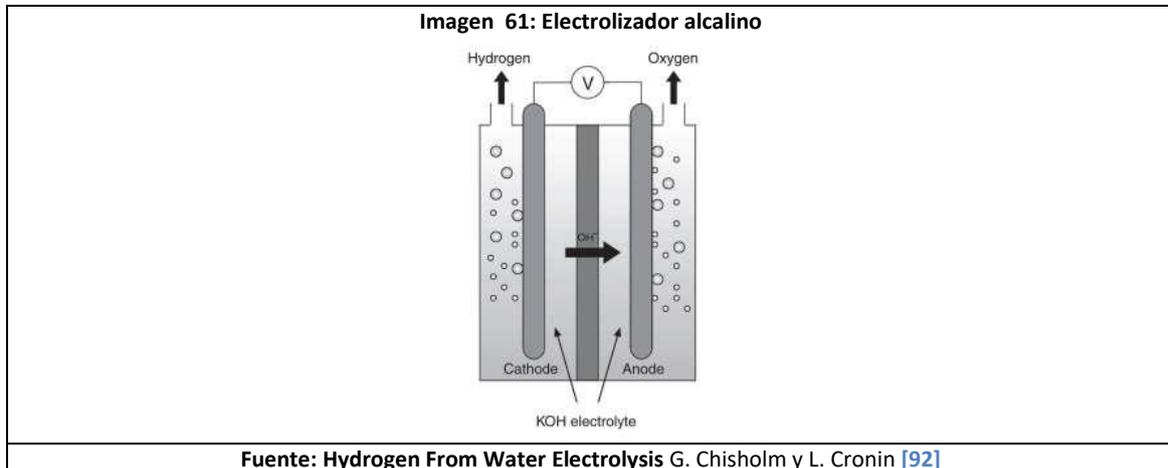
Electrolizadores de alcalino líquido

Es el método [91] empleado para la producción de hidrógeno a gran escala. En estos electrolizadores se utiliza un electrolito líquido (hidróxido de potasio) y han alcanzado una gran eficiencia cercana al 80% siendo el sistema más rentable de producción de hidrogeno mediante electrolisis.

La Imagen 61 muestra un electrolizador alcalino convencional, compuesto por ánodo y cátodo (hechos de metales inertes níquel, acero inoxidable, platino...) y un separador

entre las cámaras de ambos electrodos que permite el paso de los iones de hidróxido y de las moléculas de agua de la disolución del electrolito.

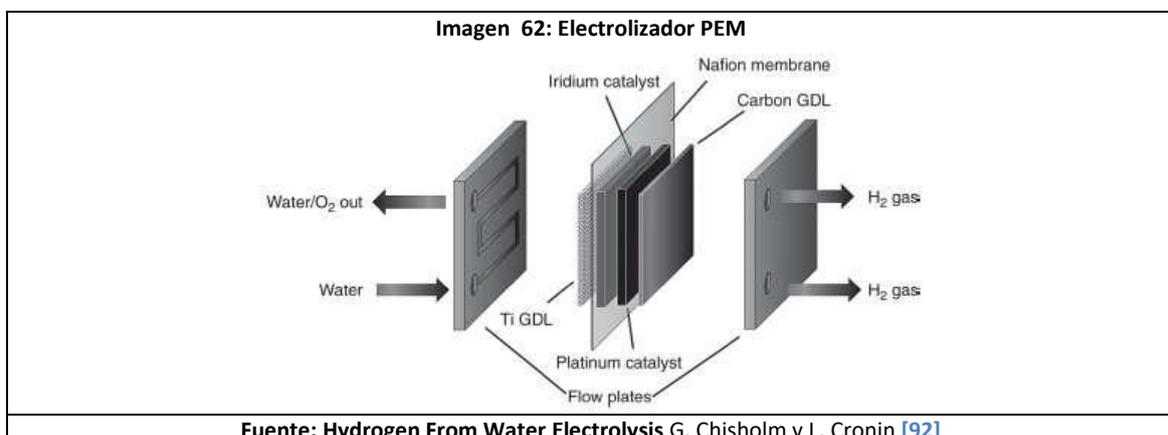
La finalidad es desplazar la reacción del ánodo hacia la formación de oxígeno y en el cátodo producir burbujas de hidrógeno, ambos gases son recogidos de forma separada en cada una de las cámaras.



Electrolizadores de membrana polimérica (PEM)

Son considerados la opción de futuro de la electrolisis, actualmente se utilizan para la producción de hidrógeno en media y baja escala aprovechando en ocasiones fuentes de energía renovable. Es una tecnología bastante novedosa en comparación con los electrolizadores alcalinos y se estima que puedan alcanzar una eficiencia del 94% en un futuro cercano pero por ahora es algo teórico. Los electrolizadores PEM responden muy bien a fuentes de energía variable a diferencia de los alcalinos por eso son indicados para aprovechar sistemas de energía renovable.

El electrolizador [91], como podemos observar en la Imagen 62, se compone de electrodos (platino e iridio), de una membrana polimérica y de las GDL, que tienen funciones como proporcionar un camino a los gases entre los electrodos, proporcionar resistencia mecánica o transmitir calor en la celda.



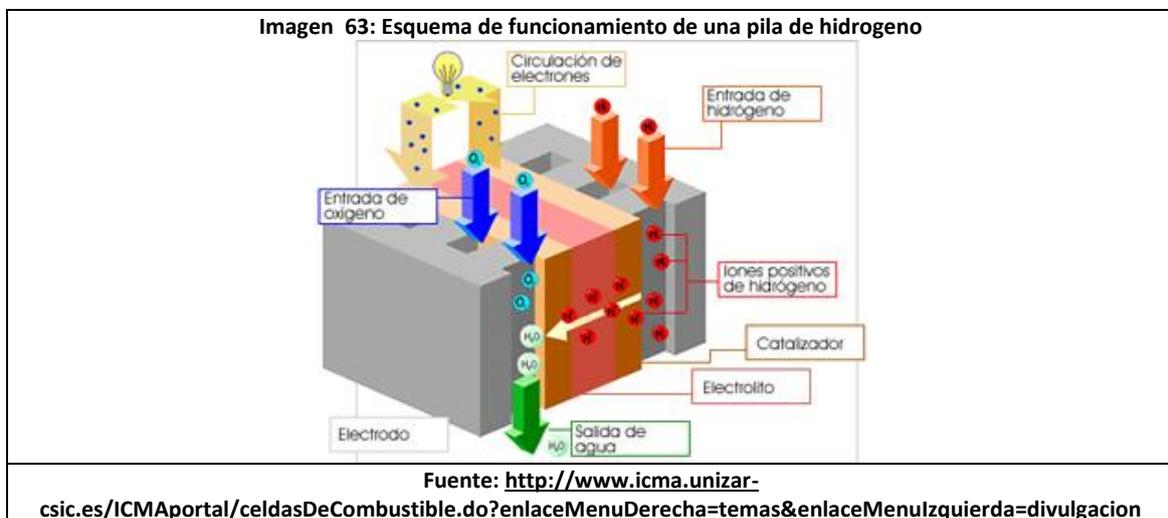
La membrana posee una doble finalidad, transportar cargas eléctricas entre los electrodos y separar los productos formados en cada uno de ellos. El funcionamiento básico de este sistema consiste en que el ánodo consume agua líquida formando oxígeno y protones que son conducidos al cátodo donde se produce el hidrogeno a partir de los protones y electrones provenientes de una corriente eléctrica.

Podemos finalizar enunciando que este electrolizador tiene un funcionamiento inverso a la pila de combustible PEM, empleando un similar sistema y componentes pero en el electrolizador como es obvio se busca la obtención de hidrogeno a partir de electricidad y agua y en la pila justo al contrario, se busca la obtención de electricidad a partir de hidrogeno y oxigeno expulsando agua de forma residual en el proceso.

Pila de hidrogeno

La pila de combustible [93] es un elemento convertidor de energía que transforma la energía química presente en los reactantes en energía eléctrica que puede ser utilizada para alimentar distintos dispositivos. Es conveniente no confundir este sistema en primer lugar con una batería, ya que este sistema no almacena energía de por sí, la energía la poseen los reactantes como el hidrogeno por ejemplo, ni tampoco con un motor de combustión interna, ya que este sistema es capaz de obtener energía eléctrica directamente desde la energía química de los reactantes sin tener que producir energía térmica o mecánica por eso presenta una mayor eficiencia que estos.

El proceso consiste en aprovechar las reacciones electroquímicas recogiendo los electrones transferidos durante la reconfiguración electrónica que da lugar a los productos y hacerlos pasar por un conductor para generar una corriente eléctrica. La clave está en separar las reacciones de oxidación y de reducción, así la transferencia de electrones se produce a través de un largo recorrido, por esto, se separa el suministro del combustible y del oxidante, provocando que los electrones sean liberados al oxidarse el combustible y estos sean conducidos hasta alcanzar el lugar en el que el oxidante se reduce.





Como observamos en la Imagen 63, el combustible (hidrógeno) se suministra en el ánodo sobre el que hay depositado un catalizador que permite acelerar la reacción de oxidación del combustible. Por otro lado, el oxidante (oxígeno) se suministra al cátodo sobre el que también se encuentra un catalizador que permite aumentar la velocidad de la reacción de reducción. Entre ambos electrodos hay una membrana PEM la cual tiene una doble función. Por un lado separar el flujo de reactantes y en segundo lugar hace las veces de electrolito, lo que quiere decir que tiene iones libres que pueden desplazarse.

Formula: Reacción en la pila de hidrogeno
$0.5 O_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2O$

El flujo continuo de electrones proveniente de la reacción nos proporciona energía eléctrica emitiendo solo vapor de agua y empleando un combustible muy abundante en nuestro planeta, lo que en el ámbito que nos ocupa podemos aprovechar empleando este sistema en la alimentación de un motor eléctrico en el interior de un vehículo.

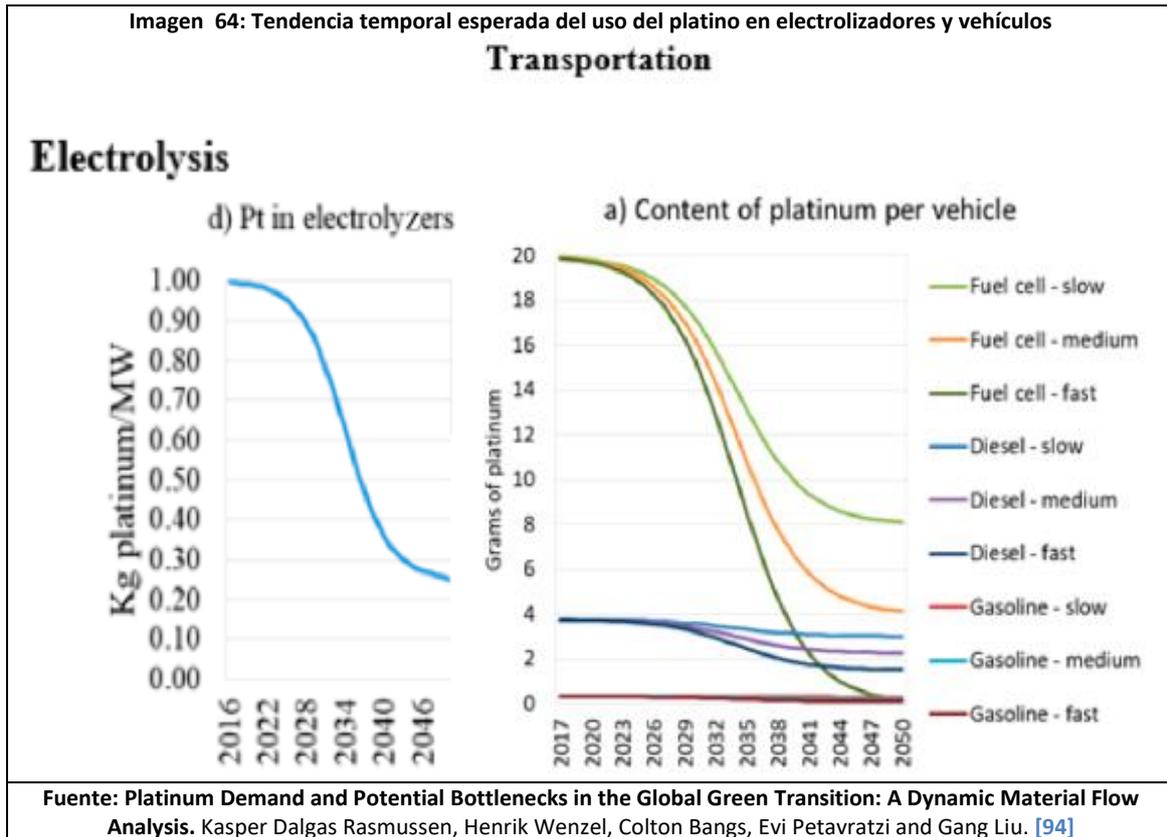
Requerimientos materiales y energéticos de las células de combustible y electrolizadores basados en la tecnología PEM

Estas pilas de combustible y electrolizadores tienen en su composición un grupo de metales críticos llamado EGP (elementos del grupo del platino), tales como el propio platino, el paladio o el iridio. Estos sistemas aunque no usan una gran cantidad de estos metales en valor absoluto, emplean estos elementos que son muy escasos en nuestro planeta [20], [94] y además, muy difíciles y costosos de obtener.

Para este análisis consideraremos como si todos estos metales fueran solo platino, ya que es el material ampliamente mayoritario en masa y es el único material del que disponemos de los datos exhaustivos necesarios para este análisis.

En la parte inferior podemos ver diferentes graficas que nos indican un análisis temporal de cuanto platino es y está previsto por diferentes autores [94] que sea empleado en pilas de combustible, catalizadores de automóviles con motores de combustión interna y electrolizadores (Imagen 64).

Imagen 64: Tendencia temporal esperada del uso del platino en electrolizadores y vehículos



En la actualidad los electrolizadores usan 1 kg/MW de platino en sus electrodos, pero diversos autores [94] han indicado que esta cantidad ira en descenso a lo largo del tiempo como muestra la gráfica llegando en 2050 a los 0,25Kg/MW.

Refutando lo expuesto en las gráficas y poniendo un ejemplo, otras fuentes bibliográficas [95] indican que la pila de combustible de un Toyota Mirai FCV (80KW) posee 0.25 g/KW de platino, lo que es significativamente mayor que la cantidad encontrada en un vehículo con motor de combustión interna euro IV, cuyos convertidores catalíticos cuentan con 0,05g/kW de platino. En la gráfica podemos observar también el descenso que los autores [94] esperan que adopte esta tecnología en el uso del platino.

En cuanto a su análisis energético podemos enunciar en la Tabla 33 los MJ de energía que consume obtener un kilogramo de platino o de paladio [96].

Tabla 33: Energía incorporada de los materiales empleados en las células de combustible

Elemento	energía incorporada(MJ/kg)
Platino (Pt)	100000
Paladio(Pd)	50000

Fuente: Elaboración propia con datos de The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand, T. G. Gutowski, S. Sahní, J. M. Allwood, M. F. Ashby, y E. Worrell [96]

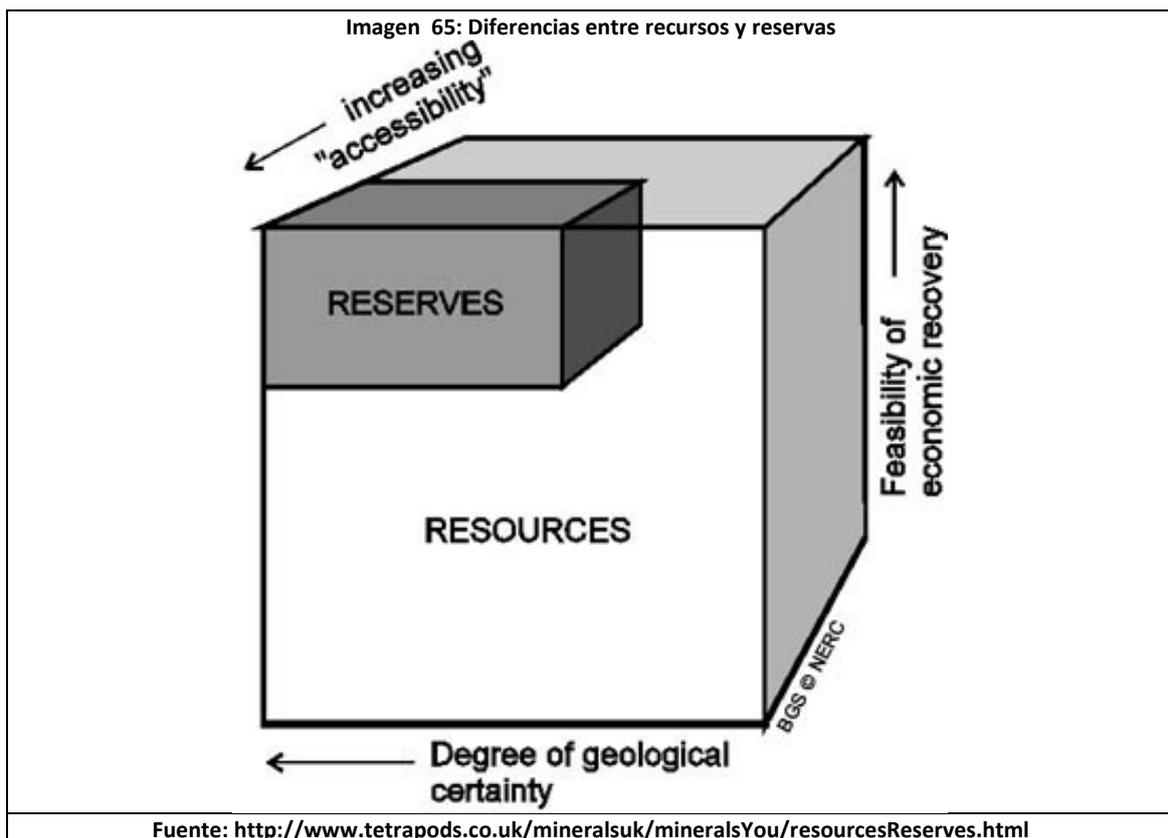
4. Disponibilidad de minerales: Recursos y Reservas

Como hemos indicado en los apartados anteriores la obtención de las baterías, motores, cableado, infraestructuras...empleados en la movilidad eléctrica requieren de la utilización de una gran variedad de minerales, algunos de ellos escasos en nuestro planeta, otros muy costosos de conseguir hablando en términos energéticos y económicos, incluso alguno de ellos son obtenidos con violaciones de los derechos humanos de por medio y con grandes conflictos sociales.

En este apartado indicaremos las reservas y recursos actuales de estos minerales [97], [98]. Entendiendo por recursos y reservas lo siguiente (Imagen 65):

-Recursos: Es la cantidad total de un elemento determinado disponible en nuestro planeta en este caso.

-Reservas: Es la cantidad de un elemento determinado disponible en nuestro planeta que podemos obtener de forma factible tecnológica, legal y económicamente.



Una vez explicados estos términos podemos indicar los recursos y reservas de los diferentes minerales en la siguiente tabla (Tabla 34):

	Li	Ni	Co	Mn	Al	Fe	Cu	P	Pt
Recursos (Mt)	40	130	145	1030	$7,5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^5$	2100	$3 \cdot 10^5$	0,1
Reservas (Mt)	14	81	7,2	570	$2,8 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	720	$6,7 \cdot 10^4$	0,066

Fuente: Elaboración propia con datos de MEDEAS Annex4:Task2.2.c.2.Exergy extraction curves considering non renewable resources and raw materials. Abel Ortego, Alicia Valero, Guiomar Calvo [98]

Aunque vemos en la tabla que todavía disponemos de una gran cantidad de reservas minerales disponibles en nuestro planeta, el uso de diversas tecnologías que emplean estos minerales de forma intensiva nos pueden conducir hacia el agotamiento de estos en un corto periodo de tiempo, llevando todo ello hacia un punto de no retorno para diversas tecnologías como, la movilidad eléctrica, las pantallas táctiles, la iluminación LED...pudiendo provocar a su vez graves problemas socioeconómicos y de muy diversa índole en todo el mundo.

5. Modelado

En este apartado trataremos todos los aspectos del modelado que podemos dividir a su vez en 3 subapartados fundamentales:

1. Presentación de los datos introducidos en el modelo y las principales hipótesis realizadas.
2. Modificaciones efectuadas en el modelo MEDEAS-W original.
3. Descripción de los escenarios empleados en la simulación.

5.1 Datos introducidos en el modelo y principales hipótesis realizadas

En este apartado enumeraremos los Inputs del modelo, es decir, los datos que se introducirán en el modelo para que este pueda iniciar la simulación de un sistema complejo a lo largo de un determinado periodo de tiempo.

A su vez también dividiremos este apartado en otros subapartados, comenzando con los inputs referentes a las baterías de los automóviles electrificados.

5.1.1 Datos e hipótesis referentes a las baterías de los vehículos electrificados

Empezaremos con los datos utilizados para representar la situación de las baterías de los automóviles electrificados. En este caso iniciaremos en la Tabla 35 con la cantidad de minerales empleados en las baterías y su tiempo de vida útil.

Tabla 35: Composición de los diferentes tipos de baterías

	Baterías LiMnO2 (kg/MW)	Baterías NMC 622 (kg/MW)	Baterías NMC 811 (kg/MW)	Baterías NCA (kg/MW)	Baterías LFP (kg/MW)
Aluminio (Al)	500	693	693	375,16	1477,63
Cobalto (Co)	0	110	55	40	0
Cobre (Cu)	289	429	429	227,24	855,47
Hierro (Fe)	0	0	0	0	765,25
Litio (Li)	34,4	71,5	60,5	30,725	95,6
Manganeso (Mn)	509,4	110	55	0	0
Níquel (Ni)	0	335,5	412,5	191,75	0
Plásticos	780	1050	1050	580	2500
Roca de fosforo (P)	0	0	0	0	425
Lifetime (años)	10				

Fuente: **Material and energy flows in the material production, assembly, and end-of life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle**, Jennifer B. Dunn, Matthew Barnes, Linda Gaines, John Sullivan, and Michael Wang [68]. **Protagonismo de las materias primas minerales en el desarrollo del vehículo eléctrico**, Luis De La Torre Palacios, Eloy Álvarez Pelegrý, José Antonio Espí Rodríguez [69]. **Lithium-Ion Batteries: Possible Materials Issues**, Linda Gaines and Paul Nelson [70]. **The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction**, J. B. Dunn, L. Gaines, J. C. Kelly, C. James, y K. G. Gallagher [74]. <https://www.geotab.com/>, GEOTAB [75]

La cantidad de cada elemento presente en las baterías ha sido obtenida gracias a los diferentes autores [68]–[70], [74], uniendo sus datos y buscando un equilibrio entre ellos haciendo algunas pequeñas modificaciones. El lifetime de las baterías será estimado en 10 años, ya que, gracias a un estudio de la empresa *Geotab* [75] podemos saber que en esos diez años la batería habrá perdido casi un 25% de capacidad de energía, lo que hace que el uso del vehículo no sea demasiado satisfactorio, además, los fabricantes no suelen estimar la vida de las baterías más allá de los 8 o 10 años en la actualidad.

Hemos de enunciar también que el fosforo no se ha podido introducir en el modelo debido a la falta de diversos datos, aun así, al ser un elemento tan abundante, como en el caso del hierro (no son elementos críticos), no es de gran interés la evaluación de ninguno de los dos desde el punto de vista del gasto de sus reservas y recursos. Por estas razones no se evaluara la cantidad demandada de estos materiales frente a sus recursos o reservas.

En el caso del elemento plásticos se ha de enunciar que no es solo plástico como tal, ante la gran complejidad y numerosos elementos presentes en las baterías en pequeñas cantidades se ha optado por establecer esta simplificación y tratar esos elementos muy poco abundantes en masa como plásticos. Esta simplificación nos permite trabajar con los datos de estas baterías de forma mucho más fácil y rápida, ya que estos materiales varían mucho según la marca que fabrique estas baterías y se tendría que analizar cada batería del mercado de forma aislada, además al hacerse

esta simplificación sobre materiales poco abundantes en las baterías apenas se pierde precisión en el análisis.

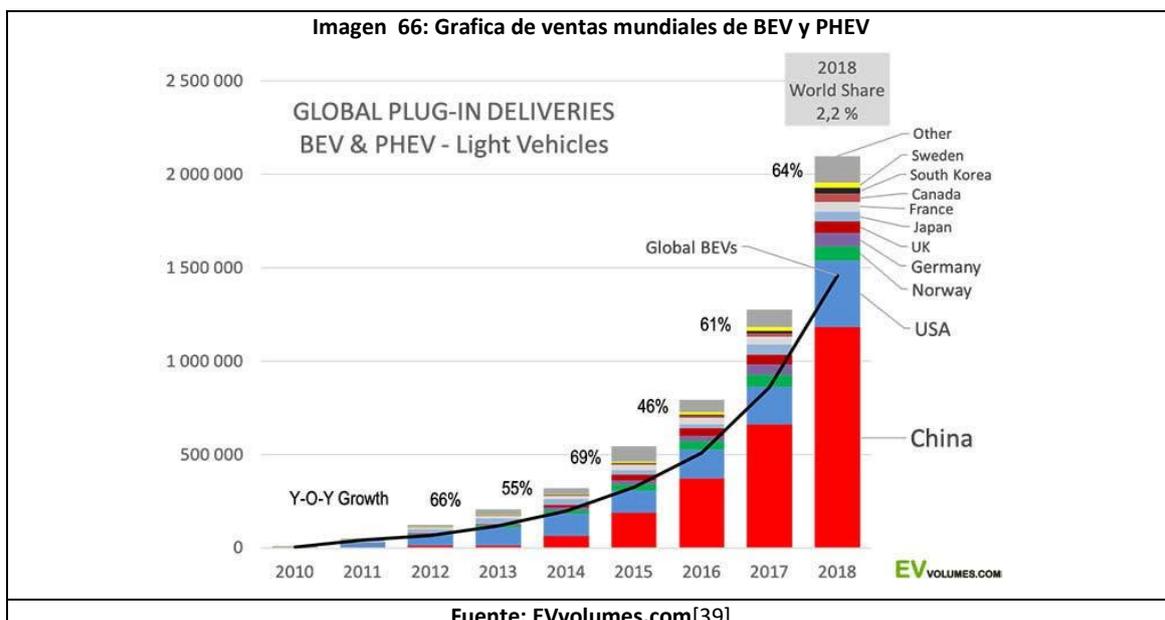
Seguiremos, esta vez, enunciando la cantidad de estas baterías presentes en el mundo en el año 2015, buscando un punto de partida para empezar la simulación. Así podremos establecer que cantidad de baterías y de qué tipo son en el punto inicial de la simulación del modelo. Estos datos los vemos expresados en la Tabla 36.

Tabla 36: Vehículos que emplean cada tipo de batería en el año 2015

		Baterías LiMnO2	Baterías NMC 622	Baterías NMC 811	Baterías NCA	Baterías LFP	Total vehículos
Vehículos particulares	H4w BEV	0	4279702,99	0	1836782	3058242,7	9183912
	H4w HEV	0	1836776,38	0	0	0	1836776,38
	H2w BEV	0	174493888	0	0	0	174493888
	ebike	0	0	0	0	0	0
Vehículos comerciales	HV HEV	0	17587,87	0	0	8793,93	26408,209
	LV BEV	0	51650,56	0	0	25825,28	77553,39
	LV HEV	0	43020,15	0	0	0	43020,15
	Bus HEV	0	0	0	0	0	0
	bus BEV	0	0	0	0	0	0

Fuente: MEDEAS, I. De Blas, M. Mediavilla, I. Capellán, y C. Duce [32]. EVvolumes.com [39]

Estos datos no han podido obtenerse de ninguna base de datos y se han tenido que emplear diferentes suposiciones. Los porcentajes de cada tipo de batería se han obtenido de la Imagen 66 (estableciendo las suposiciones explicadas a continuación), y la cantidad total de vehículos de cada tipo nos la otorga MEDEAS. Con estos datos y estableciendo las diferentes hipótesis podemos obtener la cantidad y tipo de baterías empleadas en cada tipo de vehículo.





Hipótesis planteadas

Hipótesis general

Todos los vehículos de china emplean baterías LFP (BYD, el fabricante de estas baterías es el mayor vendedor de coches eléctricos en china), los europeos y los otros NMC (casi todas las marcas del mundo emplean este tipo de baterías y en Europa no se comercializan coches de BYD y se venden pocas unidades de Tesla) y los americanos NCA (Tesla emplea estas baterías y estos vehículos son los eléctricos más vendidos en el continente americano).

Vehículos particulares

- Vehículos eléctricos de 4 ruedas: se plantea la hipótesis general.
- Vehículos híbridos de 4 ruedas: Todos los vehículos se suponen con baterías NMC, pues no se fabrican híbridos con baterías NCA y apenas se fabrica algún modelo con baterías LFP.
- Vehículos eléctricos de 2 ruedas: Todos los vehículos se suponen con baterías NMC, pues no se fabrican vehículos eléctricos de 2 ruedas con baterías NCA y apenas se fabrica algún modelo con baterías LFP.
- Vehículos eléctricos unipersonales: El modelo considera que en 2015 no había ningún vehículo de este tipo

Vehículos comerciales

- Vehículos híbridos pesados: Estos vehículos no se fabrican con baterías NCA por lo que se supone que los vehículos de este tipo del continente americano poseen baterías NCM como los europeos y los del continente asiático permanecen con baterías LFP.
- Vehículos eléctricos ligeros: Estos vehículos no se fabrican con baterías NCA por lo que se supone que los vehículos de este tipo del continente americano poseen baterías NCM como los europeos y los del continente asiático permanecen con baterías LFP.
- Vehículos híbridos ligeros: Todos los vehículos se suponen con baterías NMC, pues no se fabrican híbridos con baterías NCA y apenas se fabrica algún modelo con baterías LFP.
- Autobús híbrido: El modelo considera que en 2015 no había ningún vehículo de este tipo

-Autobús eléctrico: El modelo considera que en 2015 no había ningún vehículo de este tipo

Además de los datos del 2015 necesitamos datos anteriores para establecer una serie histórica para iniciar el modelo. Ante la falta de estos datos estableceremos que los años anteriores a 2015 solo se emplearon baterías LiMNO₂, el tipo de batería más antigua empleada en los automóviles eléctricos de las citadas en este trabajo.

5.1.2 Datos e hipótesis referentes al cobre de los coches electrificados

Ahora enunciaremos los datos que muestran la cantidad de cobre presente en los diferentes tipos de vehículos electrificados respecto a los vehículos de combustión interna tradicionales. Estos datos están presentes en la Tabla 37.

		Cobre (kg/vehículo)
Vehículos particulares	H4w BEV	20,19
	H4w HEV	15,31
	H2w BEV	1,57482
	ebike	0,6057
Vehículos comerciales	HV HEV	54
	LV BEV	20,19
	LV HEV	15,31
	bus HEV	54
	bus BEV	71,21227956

Fuente: ID TechEx 2017 [76]

Como en el caso de las baterías aquí tampoco poseemos todos los datos y hay que establecer ciertas hipótesis a partir de los datos que tenemos.

Hipótesis planteadas

Vehículos particulares

-Vehículos eléctricos de 4 ruedas: datos obtenidos en la Imagen 50 de la referencia bibliográfica [76].

-Vehículos híbridos de 4 ruedas: datos obtenidos en la Imagen 50 de la referencia bibliográfica [76].

-Vehículos eléctricos de 2 ruedas: Se establece la cantidad de cobre haciéndola proporcional al peso respecto del vehículo eléctrico de 4 ruedas.

-Vehículos eléctricos unipersonales: Se establece la cantidad de cobre haciéndola proporcional al peso respecto del vehículo híbrido de 4 ruedas.

Vehículos comerciales

-Vehículos híbridos pesados: Debido a sus semejanzas con el bus híbrido se establece la misma cantidad de cobre.

-Vehículos eléctricos ligeros: Debido a sus semejanzas con el vehículo particular eléctrico de 4 ruedas se establece la misma cantidad de cobre.

-Vehículos híbridos ligeros: Debido a sus semejanzas con el vehículo particular híbrido de 4 ruedas se establece la misma cantidad de cobre.

-Autobús híbrido: datos obtenidos en la Imagen 50 de la referencia bibliográfica [76].

-Autobús eléctrico: Se emplea la misma relación en la cantidad de cobre entre este bus y el bus híbrido que entre el vehículo particular eléctrico de 4 ruedas y el vehículo particular híbrido de 4 ruedas.

5.1.3 Datos e hipótesis referentes a los cargadores y conexión a red de los vehículos electrificados

Para simular la situación de los cargadores debemos introducir diferentes datos, como su composición en lo que respecta a materiales, su vida útil y el número que hay de estos en relación a la cantidad de vehículos eléctricos de distintos tipos. Empezaremos indicando los materiales de los diferentes tipos de cargadores en la Tabla 38:

Tabla 38: Composición y vida útil de los cargadores

Material	Cargador casero (kg/unidad) (3,7 kW)	Cargador convencional (kg/unidad) (45 kW)	Cargador rápido (kg/unidad) (200 kW)
Cobre (Cu)	0	0	120
Hierro(Fe)	0	0	180
Cemento	0	1200	2400
Acero inoxidable	3,5	2,14	90
PVC	7,5	0	0
ABS, fibra de vidrio...	0	52,5	380
Otros factores			
Años de vida útil	15	10	12

Fuente: Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles, *Energy Policy*, A. Lucas, C. Alexandra Silva, y R. Costa Neto [47], con modificaciones propias.

Esta información, obtenida de los diferentes autores [47] se ha modificado mínimamente buscando una mayor exactitud. El cobre del cargador rápido ha sido modificado, ya que aunque el autor no lo ha tenido en cuenta, nosotros si vamos a contabilizar el cobre necesario para instalar un centro de transformación que alimente los cargadores rápidos (un centro de transformación de 1MW posee 500 kg de cobre y

puede alimentar 5 cargadores), además del filtro que estos cargadores poseen (bobinado de cobre de unos 20 kg).

A continuación nos centraremos en representar el número de cargadores en función del tipo de vehículo (Tabla 39):

Tabla 39: Cargadores existentes por tipo vehículo

		Cargador casero (unidad/vehículo)	Cargador convencional (unidad/vehículo)	Cargador rápido (unidad/vehículo)
		(3,7 kW)	(45 kW)	(200 kW)
Vehículos particulares	H4w BEV	1	0,25	0,15
	H4w HEV	0	0	0
	H2w BEV	1	0,25	0
	ebike	0,5	0	0
Vehículos comerciales	HV HEV	0	0	0
	LV BEV	1	0,25	0
	LV HEV	0	0	0
	bus HEV	0	0	0
	bus BEV	0	1	0

Fuente: Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles, *Energy Policy*, A. Lucas, C. Alexandra Silva, y R. Costa Neto [47], con **modificaciones propias**.

Como en otros apartados aquí no hemos obtenido una información completa de la fuente bibliográfica y hemos tenido que adoptar ciertas hipótesis con el fin de completar la información.

Hipótesis planteadas

Vehículos particulares

-Vehículos eléctricos de 4 ruedas: datos obtenidos en la fuente bibliográfica [47].

-Vehículos híbridos de 4 ruedas: Estos vehículos no son enchufables, por lo tanto no se pueden cargar.

-Vehículos eléctricos de 2 ruedas: Como este tipo de vehículos tiene un uso similar a los vehículos eléctricos de 4 ruedas en el entorno urbano, se establece el mismo número de cargadores caseros y convencionales, pero como estos vehículos no están hechos con el fin de viajar se han dispuesto 0 cargadores rápidos.

-Vehículos eléctricos unipersonales: Estos vehículos se cargaran en una toma de corriente convencional en algunos casos y en otros en pequeños cargadores caseros por eso se han establecido 0,5 cargadores por vehículo.

Vehículos comerciales

-Vehículos híbridos pesados: Estos vehículos no son enchufables, por lo tanto no se pueden cargar.

-Vehículos eléctricos ligeros: Como este tipo de vehículos tiene un uso similar a los vehículos eléctricos de 4 ruedas particulares en el entorno urbano, se establece el mismo número de cargadores caseros y convencionales, pero como estos vehículos no están hechos con el fin de viajar se han dispuesto 0 cargadores rápidos.

-Vehículos híbridos ligeros: Estos vehículos no son enchufables, por lo tanto no se pueden cargar.

-Autobús híbrido: Estos vehículos no son enchufables, por lo tanto no se pueden cargar.

-Autobús eléctrico: Estos vehículos no se cargaran en cargadores caseros debido a la poca potencia de estos últimos, ni tampoco en cargadores rápidos, ya que acortarían la vida de la batería, estos vehículos se cargaran en cargadores convencionales en sus dársenas.

Estos cargadores necesitan conectarse a la red para alimentar los diferentes vehículos y estas conexiones también requieren materiales que el modelo debe tener en cuenta. Empezaremos indicando la cantidad de materiales que se emplea en este tipo de conexiones en función de su longitud (Tabla 40) y su tiempo de vida útil[81].

Tabla 40: Composición y tiempo de vida útil de las redes eléctricas

Materiales	Redes de baja tensión (kg/m)	Redes de media-baja tensión (kg/m)	Redes de media-alta tensión (kg/m)	Redes de alta tensión (kg/m)
Cobre	0,044	0	0	0
Al	0	0,173	1,215	1,215
Acero galvanizado	0	0	0,45	0,45
Barra de acero	0	0	2,48	2,48
Cemento	0	0	180	180
PVC	0	0	11	11
Lifetime (años)	40			

Fuente: (Media-alta y alta tensión) **Life Cycle Assessment of Overhead and Underground Primary Power Distribution**. S. Bumby, E. Druzhinina, R. Feraldi, D. Werthmann, R. Geyer, y J. Sahl, [77], y **Especificación técnica de las canalizaciones subterráneas de baja y media tensión**. HidroCantábrico distribución eléctrica S.A.U. [79] con **modificaciones propias**. (Media-baja y baja tensión) **Elaboración propia** con datos de **La guía técnica de aplicación de caída de tensión**, Gobierno de España [80]. (Lifetime) **ATS Energía** [81].

El tipo de conexión empleada depende del tipo del cargador a utilizar, el cargador casero emplea una conexión de baja tensión, el cargador convencional una de baja-media tensión y por último el cargador rápido utiliza una conexión de media-alta tensión para conectarse al centro de transformación y una conexión de alta tensión para conectar este centro con el centro de reparto eléctrico.

Conociendo ya la utilidad de las diferentes conexiones justificaremos los datos expuestos en la Tabla 40.

Justificación de los datos de la Tabla 40 e hipótesis realizadas

-Redes de baja tensión: Datos obtenidos de la guía técnica de aplicación de caída de tensión [80].

-Redes de baja-media tensión: Datos obtenidos de la guía técnica de aplicación de caída de tensión [80].

-Redes de media-alta tensión: Se han obtenido datos de los diferentes autores [77], [79], [99]. Estos datos se han juntado buscando un equilibrio entre ellos y una mayor exactitud en la cantidad de todos los materiales empleados.

-Redes de alta tensión: Se han obtenido datos de los diferentes autores [77], [79], [99]. Estos datos se han juntado buscando un equilibrio entre ellos y una mayor exactitud en la cantidad de todos los materiales empleados.

Una vez enunciada la cantidad de materiales de las conexiones por unidad de longitud hay que introducir en el modelo la distancia media empleada en las conexiones (Tabla 41).

	Longitud red infraestructura conexión a sistema de carga de los EV (m/cargador)
Líneas de baja tensión para el cargador casero	40
Líneas de media-baja tensión para un cargador convencional	50
Líneas de media-alta tensión para un cargador rápido (unen el CT al cargador)	5
Líneas de alta tensión para un cargador rápido (unen el centro de reparto con el CT)	40

Fuente: Elaboración propia

Estas distancias han sido establecidas basándonos en la experiencia y la observación de instalaciones existentes pero estos valores están sujetos a mucha variabilidad en función de donde se haga la instalación, una casa unifamiliar no necesita apenas instalación pero un garaje comunitario si necesita la instalación de varias decenas de

metros de cable. Lo mismo ocurre con los demás tipos de conexión, en los cargadores convencionales depende de la instalación existente de canalización eléctrica y de la disposición de las calles de la ciudad por ejemplo. En los cargadores rápidos depende donde se sitúe el centro de reparto, si hay cruces o carreteras a la hora de hacer la canalización, etc...El impacto de esta incertidumbre en los resultados se evaluara en los resultados mediante un análisis de sensibilidad.

5.1.4 Datos e hipótesis referentes a la electrificación del ferrocarril

En cuanto al tren debemos introducir diferentes datos para que el modelo pueda empezar la simulación. También debemos incluir datos de tiempo de vida de las infraestructuras para contabilizar los materiales gastados cuando estas se renuevan. Los diferentes datos están expresados en la Tabla 42.

Longitud mundial de vías férreas (km)	1142014
Porcentaje de vías férreas electrificadas (%)	27%
Porcentaje de vías dobles, triples... (%)	50%
Tiempo de vida de las vías (años)	60
Tiempo de vida de la catenaria (años)	20

Fuente: Elaboración propia con datos de la UIC [27], [28] y de Rendimiento, precisión y fiabilidad en la construcción de catenaria, PLASSER ESPAÑOLA [100]

Estos datos han sido obtenidos de las diferentes referencias bibliográficas [27], [28], y en este caso ha sido necesario establecer algunas hipótesis o suposiciones con el fin de poder completar todos la información necesaria .

Hipótesis planteadas

-La serie histórica se ha obtenido utilizando los datos de la Imagen 3 y los datos actuales del ferrocarril (Tabla 42). Con estos datos tenemos un vacío en los valores desde el año 2010 hasta el presente, y es ahí donde se ha establecido la suposición de que los valores del 2010 llegan a los valores del presente de forma lineal.

-Al no poseer datos temporales del porcentaje de vías férreas dobles, triples...se ha establecido la hipótesis de que el porcentaje de este tipo de vías tiene la misma tendencia temporal que la electrificación, ya que ambas son tendencias que surgieron en la misma época y que han ido aumentando hasta ahora en gran medida en conjunto, ya que casi todas las vías electrificadas son dobles.

-Todas las vías que no son simples son dobles.

-La estimación de kilómetros de longitud del trazado de las vías férreas dependen de 2 parámetros históricos (longitud total del trazado/líneas a lo



largo del tiempo y longitud de las líneas/ número de locomotoras a lo largo del tiempo) que han ido evolucionando a lo largo del tiempo pero que, por simplicidad, hemos considerado constantes.

5.1.5 Datos e hipótesis referentes a los vehículos de hidrógeno

Los vehículos de pila de hidrogeno no serán modelados en MEDEAS, ya que habría que hacer una serie de cambios y añadidos en el modelo original cuya carga de trabajo excedería con creces el ámbito de este TFG.

Sin embargo esto no significa que estos vehículos no se vayan a evaluar, se hará una simulación estática en el programa Microsoft Excel asumiendo ciertas hipótesis que nos permitan obtener una evolución temporal de este tipo de automóviles y sus gastos de platino asociados.

Hipótesis planteadas

- Los vehículos de hidrogeno sustituirán completamente a los vehículos de gas convencionales (son similares en capacidades técnicas y en la manera de utilizarlos, por lo que pueden ser demandados por el mismo público), buscando una conversión de estos vehículos a un gas que no contamina en su zona de uso y que cuenta con una tecnología más eficiente, de esta forma podremos establecer una serie temporal de vehículos que usen esta tecnología.
- Nos centraremos en los materiales empleados por los automóviles y no se tendrá en cuenta la infraestructura necesaria para producir el hidrogeno debido a la extensa carga de trabajo que esto supondría.
- Se analizara el platino, ya que este tipo de vehículos tiene una gran cantidad de este mineral tan escaso comparado con los demás vehículos. El resto de materiales críticos que poseen estos vehículos están presentes en la batería de pequeña capacidad y cableado del vehículo y este ámbito será analizado en las simulaciones de MEDEAS enfocadas a las baterías.
- Se asumirá una cantidad de platino en cada tipo de vehículo proporcional al peso, con los datos de la Imagen 64 podemos obtener la cantidad de platino de un vehículo particular de 4 ruedas y con esta, la cantidad de platino en los demás vehículos. Se asume además que el vehículo de mercancías ligero pesa lo mismo que el vehículo de pasajeros y que el vehículo de mercancías pesado pesa lo mismo que el bus (9,81 veces el peso del vehículo de pasajeros).
- Supondremos que en el escenario 1 se mantiene el ratio de reciclado actual del 50%, en los demás escenarios supondremos un ratio del 50% hasta el 2020 que luego crecerá de forma lineal hasta llegar a un ratio de reciclado final del 75% en 2050.

Una vez indicadas las diferentes hipótesis ya podemos operar con los datos que tenemos para hallar los resultados.

5.1.6 Datos e hipótesis referentes al reciclaje

En el modelo debemos introducir los ratios de reciclaje de los diferentes minerales para que la simulación los tenga en cuenta. Se han tomado los datos de UNEP, salvo en el caso del litio, ya que el dato que enuncia UNEP sobre su ratio de reciclado está muy desactualizado. Para establecer el ratio de reciclaje del litio en la actualidad hemos cruzado los datos de la revista PV-Magazine [101] con los datos de los diferentes tipos de reciclaje de las baterías presentes en la Tabla 10, obteniendo aproximadamente un 15% de ratio de reciclado.

	Li (Ma)	Ni (UNEP)	Co (UNEP)	Mn (UNEP)	Al (UNEP)	Fe (UNEP)	Cu (UNEP)
RC(%)	15	35	32	37	35	40	28,5

Fuente: Elaboración propia con datos de **Recycling Rates of metals**, UNEP [31] y **Lithium-ion recycling rates far higher than some statistics suggest**, Marija Maisch.[101]

Hipótesis planteadas

Con la estimación del 50% de reciclado actual de baterías, la información de la noticia en PV-magazine [101] y la información sobre el porcentaje de reciclado de los diferentes métodos del reciclado de baterías (Tabla 10) podemos fijar que las tasas actuales de reciclado son 50%·85%·porcentaje máximo teórico de la tabla.

El dato del 85% es un factor de corrección que ha sido tomado con la finalidad de indicar la imposibilidad termodinámica de recuperar prácticamente el 99% de materiales de la batería, pues este último dato, es un dato teórico y en condiciones perfectas de laboratorio alejadas de la realidad.

Suponiendo que el método usado en China y Corea del sur (donde se reciclan el 87% de las baterías recicladas) es el “Mecánico+pirometalurgia+hidrometalurgia” y el Pirometalúrgico en el resto del mundo (donde se reciclan el restante 13%), entonces la tasa de reciclado actual del Litio sería igual a: $0.5 \cdot 0.85 \cdot 0.57 \cdot 0.87 + 0.5 \cdot 0.85 \cdot 0 \cdot (1 - 0.87) = 21\%$, pero buscando ser conservadores lo dejaremos en un 15% de tasa de reciclado, ya que hemos aplicado diferentes suposiciones.

5.1.7 Datos e hipótesis referentes al cobalto

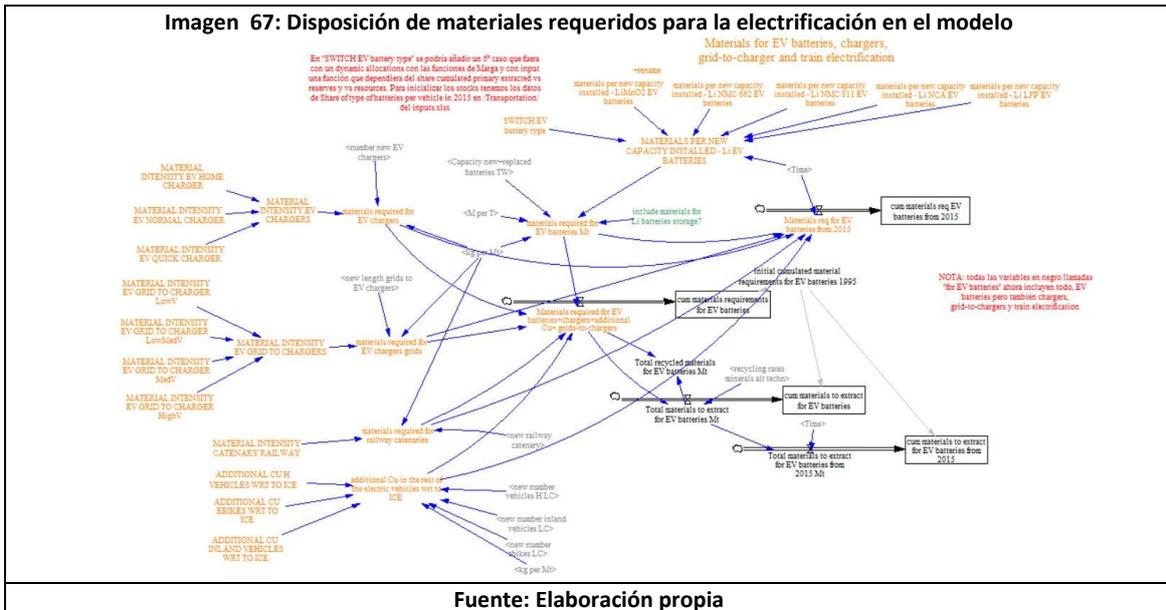
El cobalto no estaba introducido en el modelo MEDEAS-W, por lo tanto se ha tenido que incluir para poder realizar las simulaciones con este mineral.

Se han obtenido los datos anuales de demanda de cobalto antes del año 2016 de la USGS [102] y a partir del año 2016 se ha establecido la hipótesis que indica que la demanda de este mineral para el resto de la economía crece con la misma relación de crecimiento que la economía, como en los demás minerales del modelo.

5.2 Modificaciones empleadas en el modelo MEDEAS-W

Con el fin de poder simular todos los datos que hemos enunciado en el apartado anterior se ha tenido que modificar el modelo MEDEAS-W. Han sido añadidos diferentes elementos al modelo que podremos ver a continuación en las capturas de pantalla en color naranja:

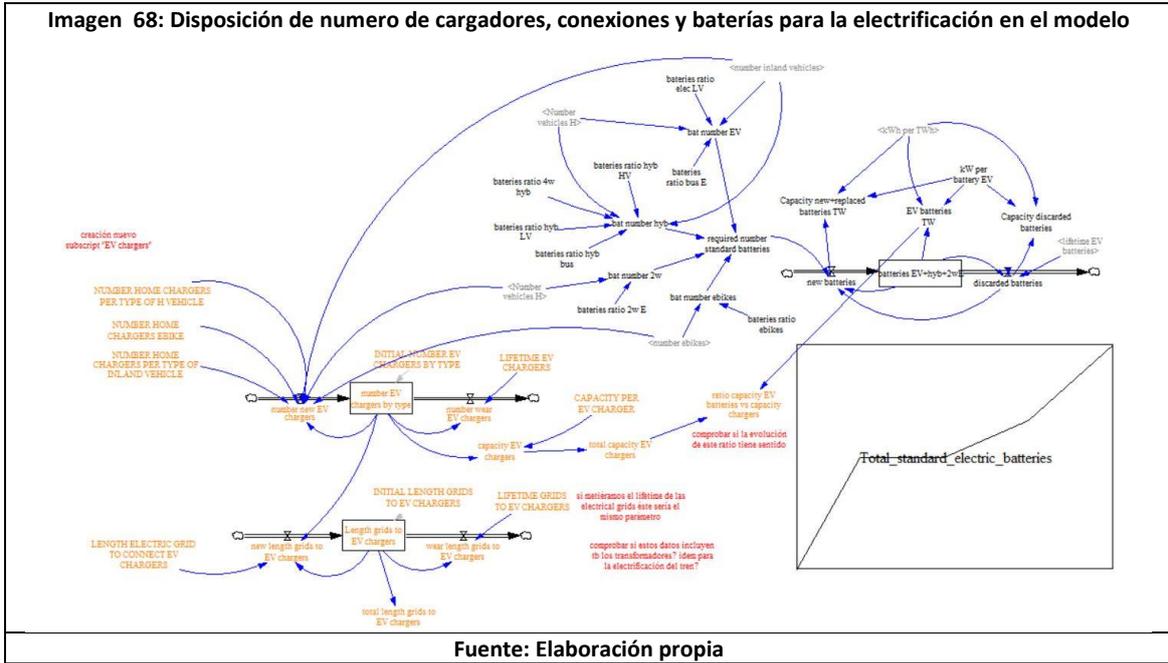
-Disposición de materiales requeridos para la electrificación en el modelo:



En esta primera captura (Imagen 67) podemos observar las modificaciones hechas para simular la cantidad de materiales requeridos por la electrificación. Se introducen los materiales presentes en los cargadores, conexiones a red, baterías y catenarias y posteriormente estos materiales son multiplicados por el número de cargadores, conexiones, baterías...obteniendo la cantidad total de minerales requeridos por la demanda de las tecnologías de electrificación. Posteriormente con los ratios de reciclaje se obtiene la cantidad de minerales extraídos de las minas. En esta captura también podemos ver un interruptor de baterías, ya que el modelo no elige automáticamente una mezcla de distintos tipos de baterías como ocurriría en la realidad (limitación del modelo), el modelo simula el mundo empleando únicamente la batería elegida en el interruptor a partir del año 2015.

-Disposición de número de cargadores, conexiones y baterías para la electrificación en el modelo:

Imagen 68: Disposición de numero de cargadores, conexiones y baterías para la electrificación en el modelo

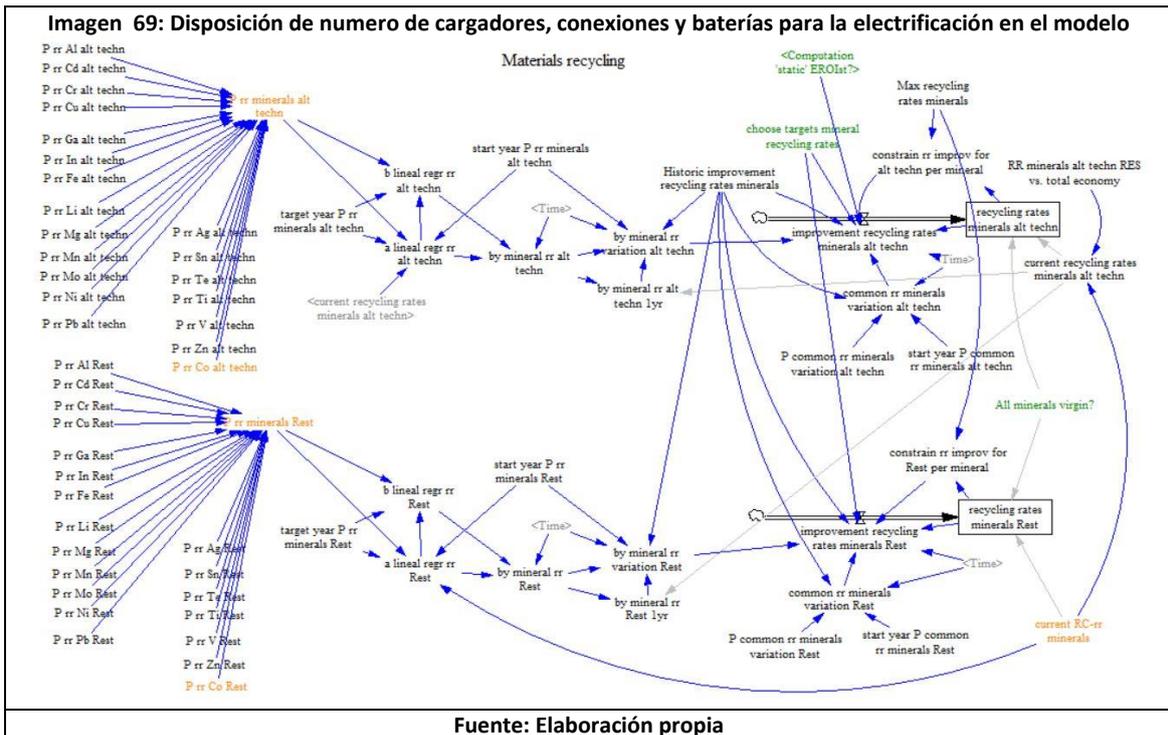


Fuente: Elaboración propia

En este caso podemos ver las modificaciones (Imagen 68) que se han ejecutado con el fin de obtener la cantidad de cargadores, de conexiones y de baterías para la electrificación. Estos datos luego son llamados en la captura 1 para obtener la demanda total de extracción de minerales como se ha enunciado anteriormente.

-Disposición de los diferentes ratios de reciclaje en el modelo:

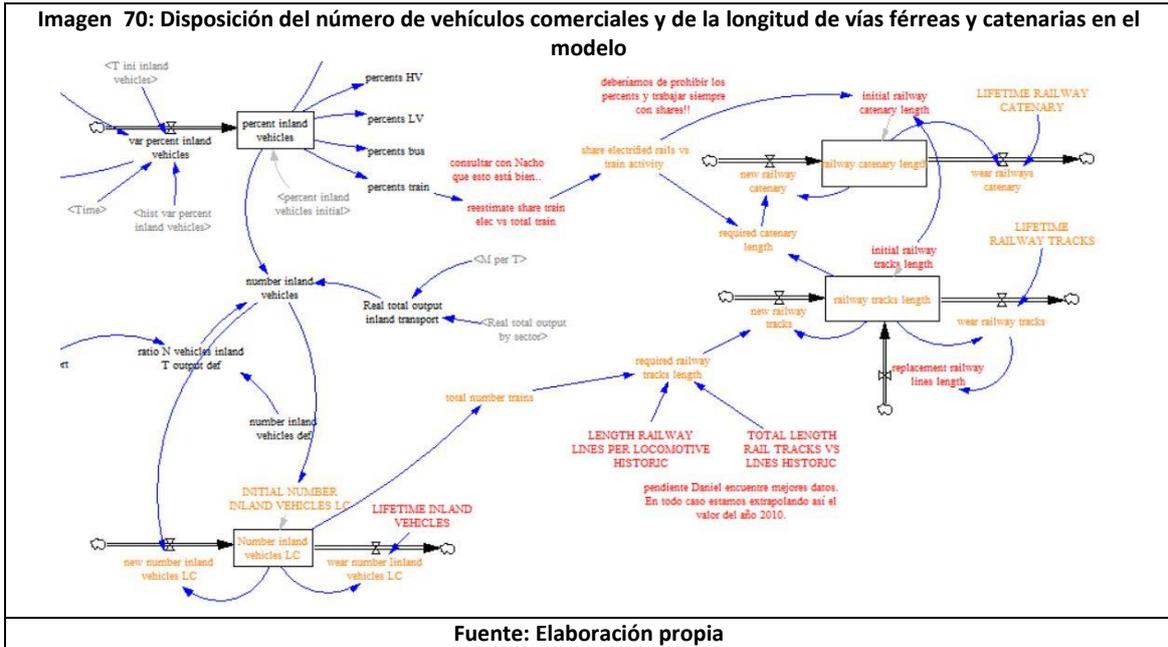
Imagen 69: Disposición de numero de cargadores, conexiones y baterías para la electrificación en el modelo



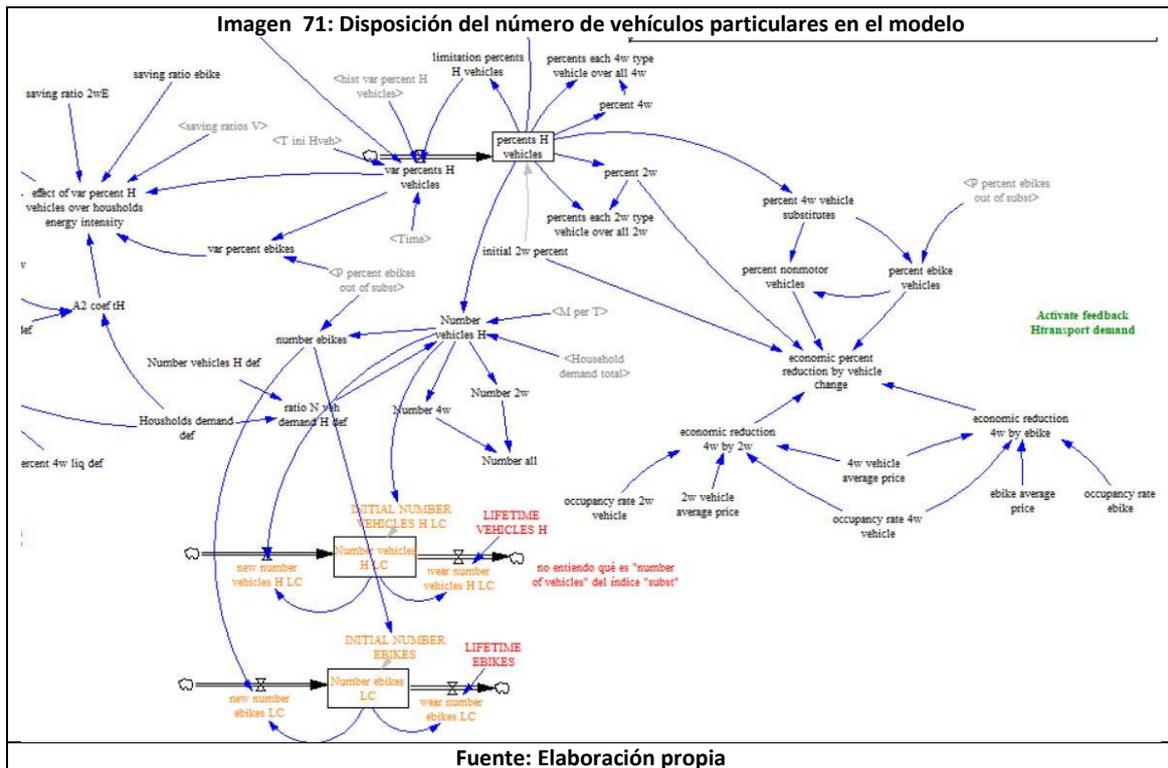
Fuente: Elaboración propia

En este caso se ha incluido el cobalto, ya que no se encontraba introducido en el modelo y aunque como podemos observar en la Imagen 69, se puede asignar diferentes ratios de reciclado a las tecnologías alternativas y al resto de la economía, en este caso se han establecido los mismos ratios para ambos.

-Disposición del número de vehículos comerciales y de la longitud de vías férreas y catenarias en el modelo:



En esta captura (Imagen 70) observamos la parte del modelo que calcula el número de vehículos comerciales (de qué tipo serán y que combustible emplean) que circulan por el mundo. También nos encontramos la parte del modelo que nos indica los kilómetros de vías férreas que hay a lo largo del mundo y si están o no electrificadas mediante las catenarias. Esta última parte también se encarga de ir electrificando las vías férreas en su totalidad paulatinamente para poder ver cuál sería la demanda total de materiales de unas vías férreas electrificadas en su totalidad.

-Disposición del número de vehículos particulares en el modelo:

En esta captura (Imagen 71) observamos la parte del modelo que calcula el número de vehículos particulares (de qué tipo serán y que combustible emplean) que circulan por el mundo.

5.3 Escenarios empleados en la simulación

Se simulan cuatro escenarios con el modelo MEDEAS-W para analizar las principales dinámicas de los gastos de materiales del transporte mundial. Los cuatro escenarios se centran en el sector del transporte y el resto del modelo sigue mediante una extrapolación de las tendencias observadas. En el Tabla 44 se recogen las hipótesis de entrada para cada escenario. Los cuatro escenarios simulados son:

- **Tendencias EV esperadas:** Este escenario proyecta las tendencias actuales y esperadas. El porcentaje objetivo de cada tipo de vehículo en 2050 está determinado por las tendencias observadas. Los datos históricos del número de vehículos se toman de la AIE y la OICA [25], [103], [104], las previsiones hasta 2030 de la AIE [105], [106] y el número de autobuses de Façanha et al ([107]). El número de vehículos híbridos actuales se estima aproximadamente a partir de las ventas de los principales fabricantes, los datos de dos ruedas provienen de la AIE [108], y los vehículos de gas natural de la IANGV [109]. El número de locomotoras actuales se obtiene de la AIE [110] y de García-Olivares et al [111].



Los objetivos de los vehículos ligeros y los autobuses se establecen igual que los vehículos domésticos. Los vehículos pesados híbridos y de gas tienen un porcentaje de objetivo insignificante, ya que se trata de un escenario de tendencias actuales y su crecimiento en esta década ha sido prácticamente nulo. Los objetivos de los trenes mantienen los niveles actuales.

- **EV Alto:** Este es un escenario hipotético de muy alta electrificación en el transporte terrestre. Para 2050, se supone que todos los coches personales, autobuses y motocicletas serán reemplazados por vehículos eléctricos de batería y que el 80% de los vehículos pesados serán híbridos. Este escenario no pretende ser realista, pero sirve como ejemplo de electrificación extrema sin cambios en los patrones culturales del transporte.
- **E-bike:** Este es otro escenario hipotético en el que los gobiernos toman medidas para promover una movilidad basada en vehículos eléctricos muy ligeros. Esta política puede estar motivada por diversas razones, como evitar la dependencia de minerales críticos potencialmente escasos, como el litio, y reducir los problemas inherentes al modelo de movilidad privada que genera problemas de ocupación del espacio público, atascos, accidentes de tráfico, segregación de espacios o la exigencia de grandes vías de comunicación. En este escenario, se supone que la mayoría de los automóviles personales son sustituidos por vehículos eléctricos de dos ruedas (60%), seguidos de las bicicletas electrónicas (20%) y los modos no motorizados (el 8% de los automóviles son sustituidos y se suman a la cantidad actual de viajes no motorizados). Sólo el 12% de los vehículos domésticos son similares a los actuales vehículos de cuatro ruedas, pero los vehículos de carga siguen basándose en los combustibles líquidos debido a las limitaciones para generalizar las baterías pesadas a gran escala. El paso a vehículos más ligeros tiene un efecto de retroalimentación en los sectores económicos relacionados con la fabricación y el mantenimiento de vehículos, ya que los vehículos más pequeños y sencillos significan menores ingresos para esas industrias. Se supone que el cambio modal de los camiones pesados de la ICE al ferrocarril eléctrico es del 30%, por lo que la proporción de la actividad de transporte de mercancías cubierta por el ferrocarril eléctrico aumenta del 30% actual al 60% para 2050.
- **Decrecimiento:** Este es un escenario personalizado que cumple con los objetivos de descarbonización y adaptación al pico de petróleo a través de una reducción en la demanda total de transporte combinada con cambios en los vehículos que imitan el cambio de comportamiento. La proporción de vehículos es la misma que en el escenario de la bicicleta electrónica, pero suponiendo que la demanda de transporte de los hogares se reduce fuertemente, debido a un profundo cambio en



los patrones de movilidad cultural (reducción media del 60% para el transporte terrestre y acuático, y del 85% para la aviación frente a la demanda de los hogares en 2020). Al igual que en el escenario de la bicicleta electrónica, se supone un cambio modal de los camiones pesados de la ICE hacia el ferrocarril eléctrico del 30%, por lo que la proporción de la actividad de transporte de mercancías cubierta por el ferrocarril eléctrico aumenta del 50% actual al 100% para 2050. Este escenario supone el contexto de un futuro en el que se realizan esfuerzos serios y coordinados para cambiar la actual economía orientada al crecimiento por otra que satisfaga las necesidades humanas sin necesidad de un crecimiento continuo, como la que defiende el movimiento de decrecimiento [112]–[114]. Este escenario, en lugar de perseguir un crecimiento económico continuo, apunta a una economía de estado estable de 5.000 dólares de los EE.UU. de 1995 en promedio per cápita para 2050 frente a los 6.500 dólares de 1995 actuales.

Se supone que se duplicarán las tasas de reciclado actuales (en contenido reciclado, RC) durante el período de simulación 2020-2050 en los 3 escenarios, EV alto, E-bike y Decrecimiento: 70% para el aluminio, 57% para el cobre, 64% para el cobalto 30% para el litio, 74% para el manganeso y de 70% para el níquel. Aunque podrían lograrse tasas de recuperación de minerales más elevadas en un contexto de incentivos adecuados [67] (Tabla 10), los altos niveles de crecimiento de las baterías que llegan a final de su vida útil dificultan que la industria del reciclaje pueda hacer frente a las cantidades cada vez mayores de desechos a procesar[101], [115].

En la Imagen 72 podemos observar las emisiones de CO₂ de cada tipo de vehículo en los diferentes escenarios y en la Tabla 44 se presentan las principales hipótesis de los cuatro escenarios:

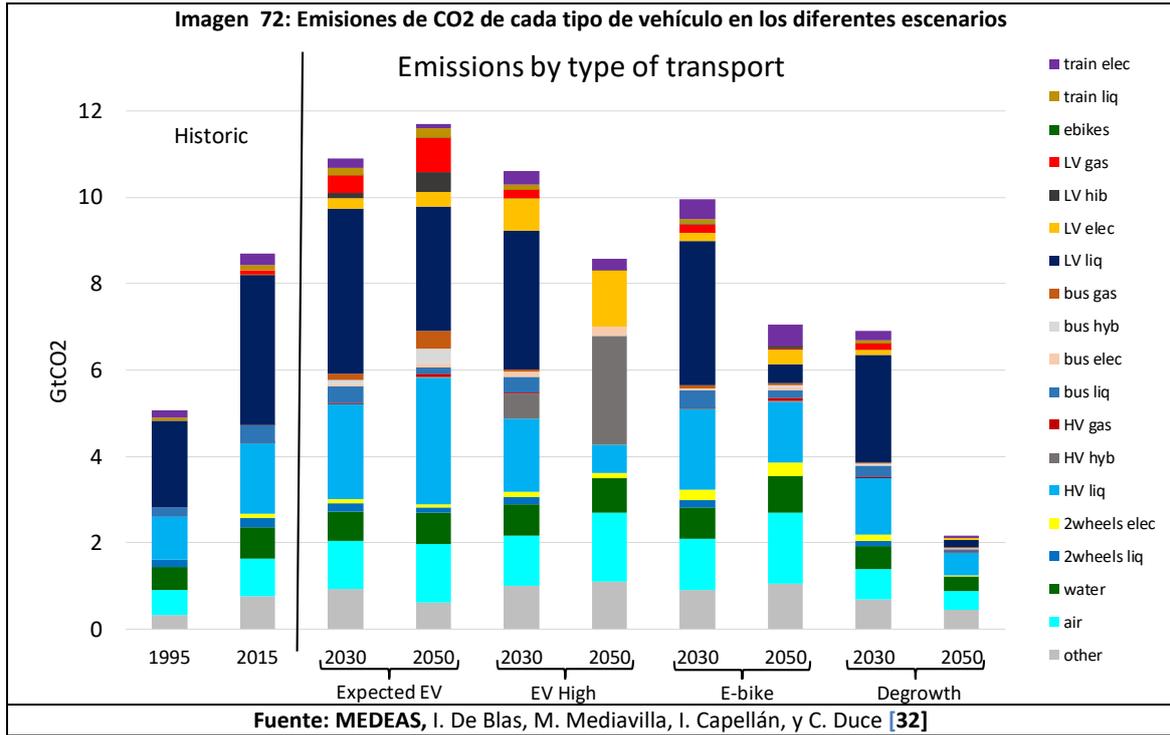


Tabla 44: Diferentes valores de variables según el escenario simulado

		Presente (2015)	Tendencias EV esperadas	EV alto	E-bike	Decrecimiento	
Vehículos particulares	4-ruedas	Líquido	65.00%	15.00%	0.00%	2.20%	2.20%
		eléctrico	0.50%	35.00%	66.00%	9.60%	9.60%
		híbrido	0.10%	10.00%	0.00%	0.10%	0.10%
		gas	1.20%	6.00%	0.00%	0.10%	0.10%
	2-ruedas	líquido	23.70%	6.80%	0.00%	0.00%	0.00%
		eléctrico	9.50%	27.20%	34.00%	60.00%	60.00%
	Otros vehículos	e-bikes	0.00%	0.00%	0.00%	20.00%	20.00%
Sin motor		0.00%	0.00%	0.00%	8.00%	8.00%	
Vehículos comerciales pesados	líquido	99.80%	99.80%	20.00%	98.00%	98.00%	
	híbrido	0.10%	0.10%	80.00%	1.00%	1.00%	
	gas	0.10%	0.10%	0.00%	1.00%	1.00%	
Vehículos comerciales ligeros	Líquido	98.90%	23.00%	0.00%	18.00%	18.00%	
	eléctrico	0.10%	53.00%	100.00%	80.00%	80.00%	
	híbrido	0.10%	15.00%	0.00%	1.00%	1.00%	
	gas	0.90%	9.00%	0.00%	1.00%	1.00%	
Buses	Líquido	100.00%	23.00%	0.00%	19.00%	19.00%	
	eléctrico	0.00%	53.00%	100.00%	40.00%	40.00%	
	híbrido	0.00%	15.00%	0.00%	40.00%	40.00%	
	gas	0.00%	9.00%	0.00%	1.00%	1.00%	
Tren	líquido	50.00%	50.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
	eléctrico	50.00%	50.00%	100.00%	100.00%	100.00%	
Cambio modal HV a tren (% aumento de trenes)			0.00%	0.00%	30.00%	30.00%	
		Presente (2015)	Tendencias EV esperadas	EV alto	E-bike	Decrecimiento	
Ratio de reciclaje de los minerales (RC)	Aluminio (Al)	35.00%	35.00%	70.00%	70.00%	70.00%	
	Cobre (Cu)	28.50%	28.50%	57.00%	57.00%	57.00%	
	Cobalto (Co)	32.00%	32.00%	64.00%	64.00%	64.00%	
	Litio (Li)	15.00%	15.00%	30.00%	30.00%	30.00%	
	Manganeso (Mn)	37.00%	37.00%	74.00%	74.00%	74.00%	
	Níquel (Ni)	35.00%	35.00%	70.00%	70.00%	70.00%	
		Tendencias históricas (1979-2014)	Tendencias EV esperadas	EV alto	E-bike	Decrecimiento	
El PIBpc previsto		1.4%/año	1.4%/año	1.4%/año	1.4%/año	Economía de estado estable a 5.000 dólares de 1995 per cápita. (actual 6.500 dólares de 1995)	
Gestión de la demanda de los hogares (pct vs 2020 Demanda de los hogares)	Transporte terrestre	NO	NO	NO	NO	-60.00%	
	Transporte acuático					-60.00%	
	Transporte aéreo					-85.00%	

Fuente: MEDEAS, I. De Blas, M. Mediavilla, I. Capellán, y C. Duce [32]

6. Resultados

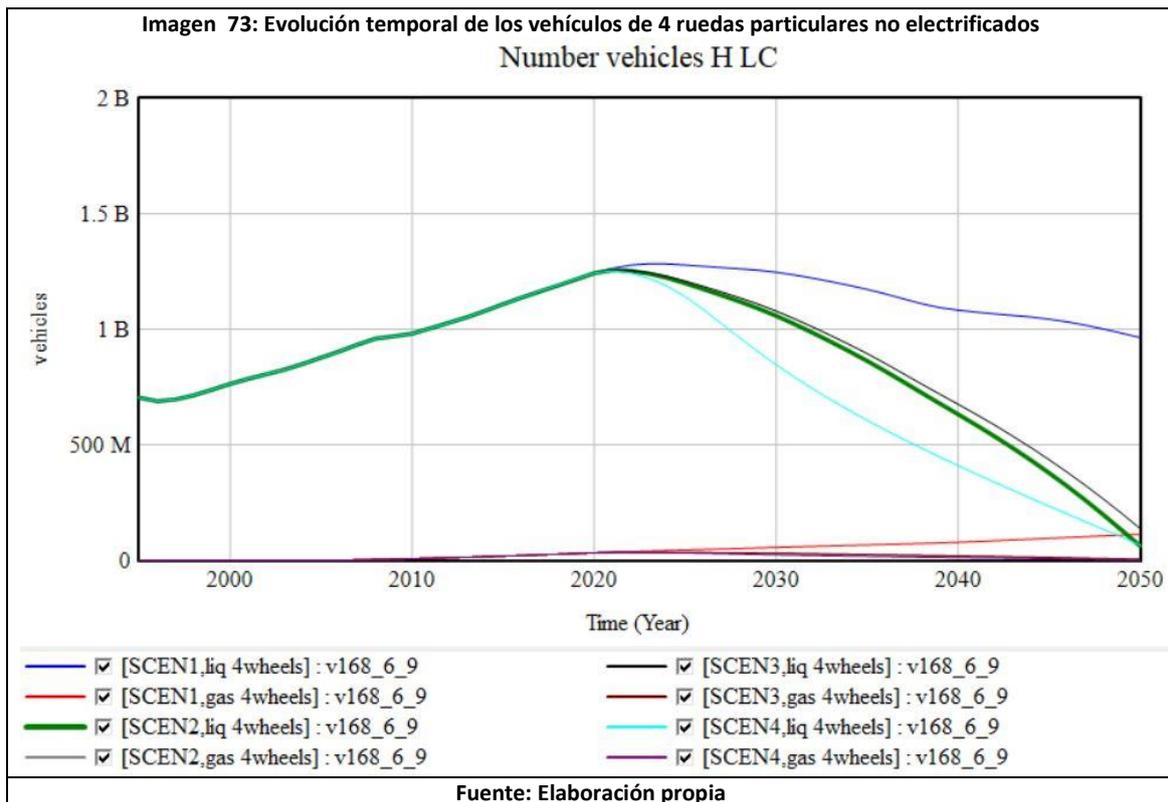
En este apartado representaremos y explicaremos tanto los resultados obtenidos en la simulación para los vehículos incluidos en MEDEAS como los obtenidos mediante Microsoft Excel para los vehículos de hidrogeno. A su vez este apartado estará dividido en diversos subapartados, con el fin de facilitar la representación y explicación de los resultados.

6.1 Número de vehículos por tipo

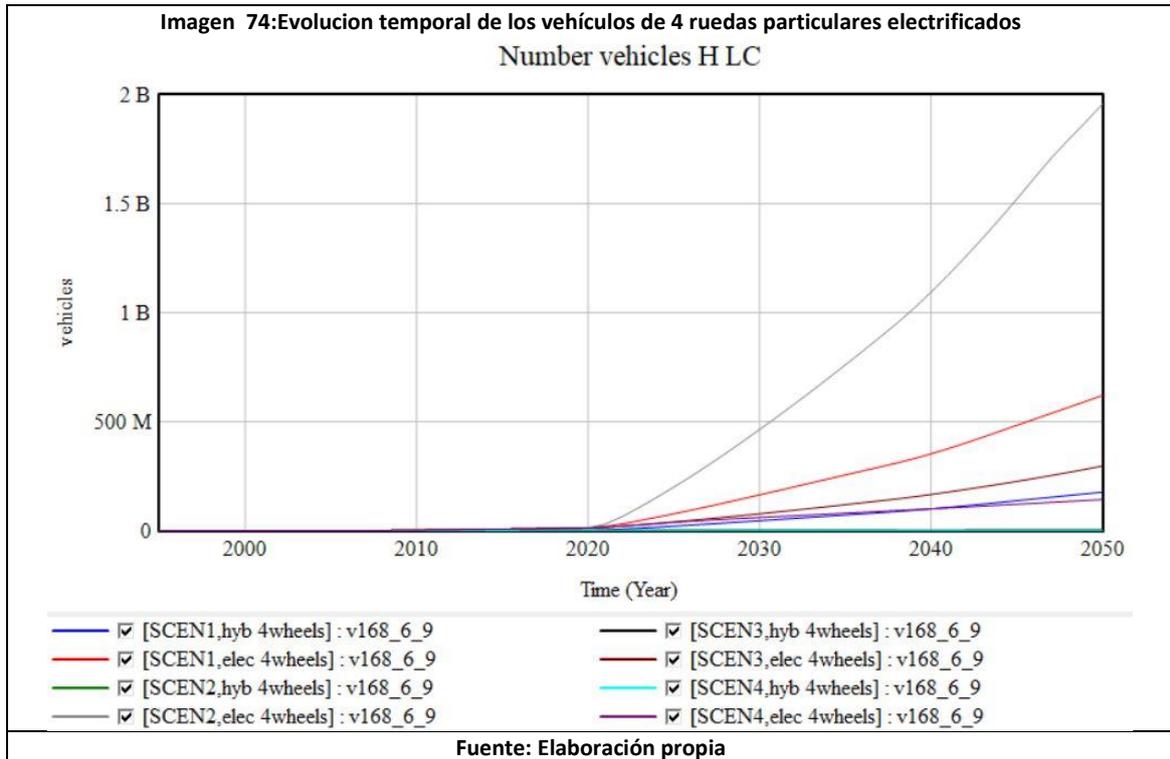
Empezaremos mostrando el número de vehículos en circulación a lo largo del tiempo, empezaremos con los vehículos particulares y acabaremos con los vehículos comerciales y de transporte de pasajeros.

Vehículos particulares

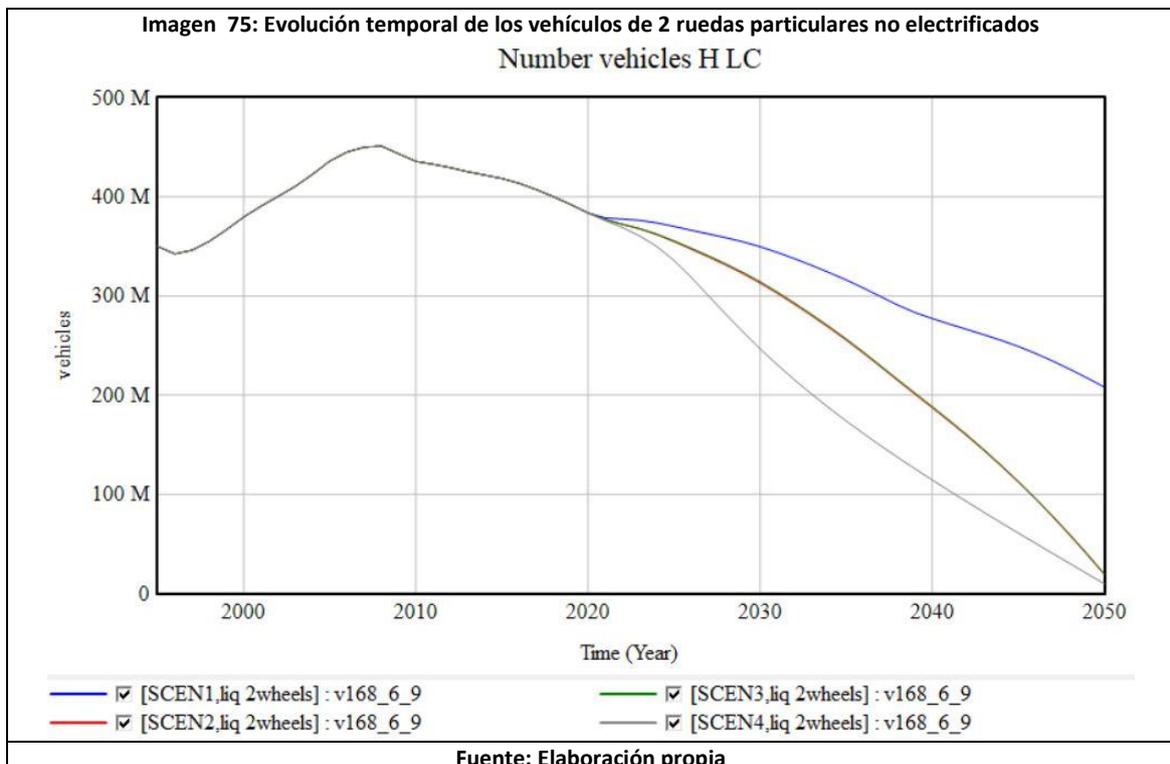
-4W: Vehículos particulares de 4 ruedas motorizados sin ningún tipo de electrificación (combustible líquido o gas).



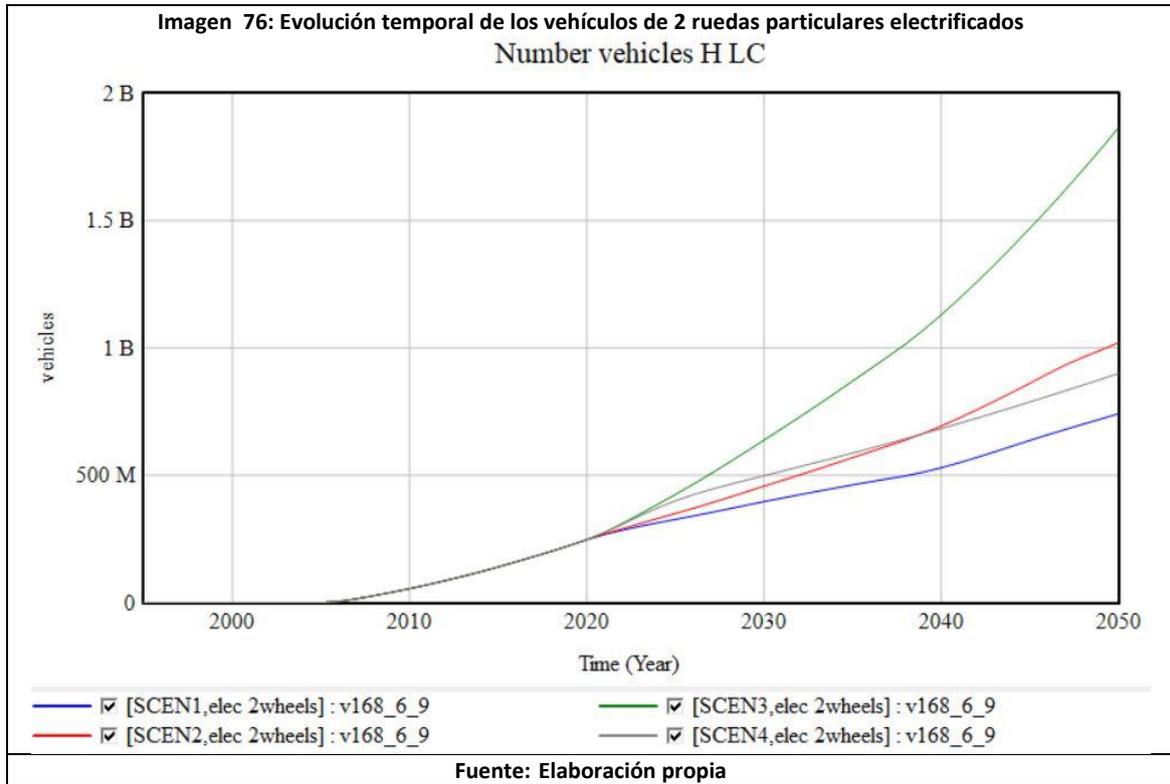
-4We: Vehículos particulares de 4 ruedas motorizados con algún tipo de electrificación (híbrido y eléctrico).



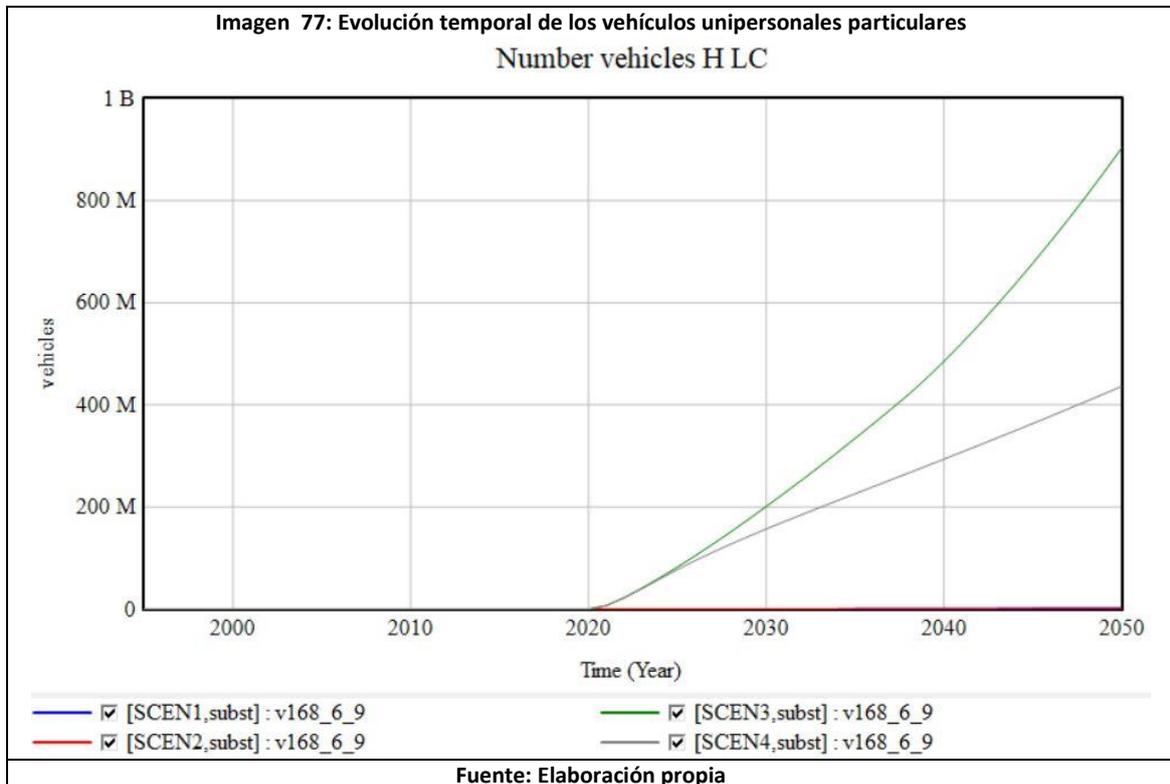
-2W: Vehículos particulares de 2 ruedas motorizados sin ningún tipo de electrificación (combustible líquido)



-2We: Vehículos particulares de 2 ruedas motorizados con algún tipo de electrificación (eléctricos).



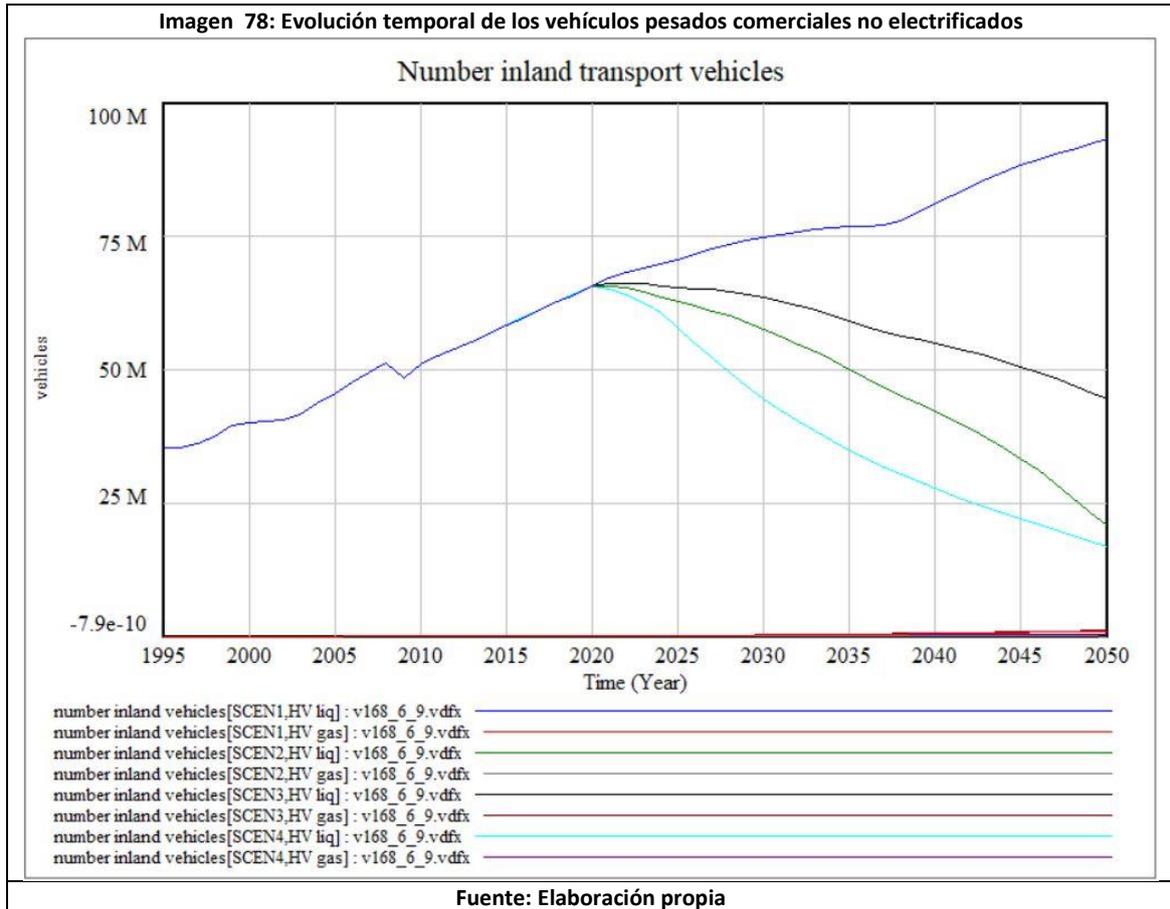
-Otros vehículos: Vehículos unipersonales (e-bike y sin motor).



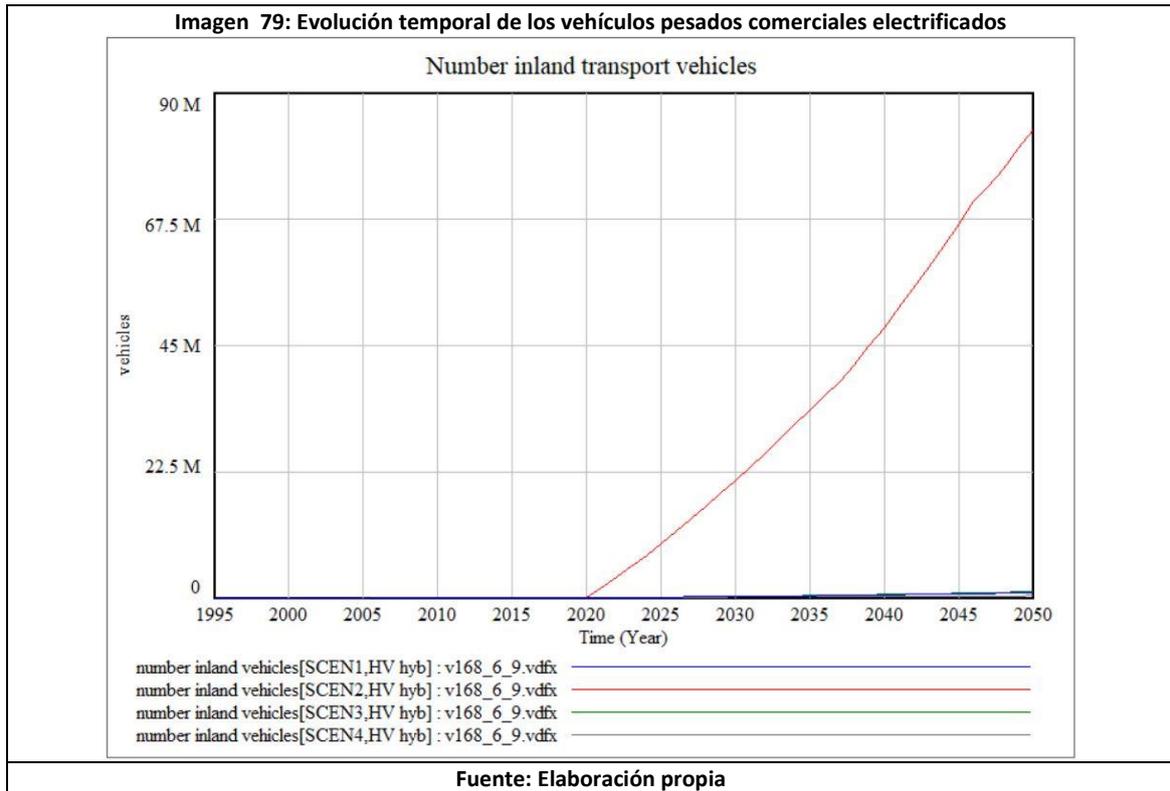
Como podemos observar, independientemente de las diferencias propias de cada escenario y de cada vehículo, la tendencia general es que los vehículos de combustión interna se reducen, al contrario que los vehículos electrificados y unipersonales que aumentan notablemente su demanda mundial.

Vehículos comerciales

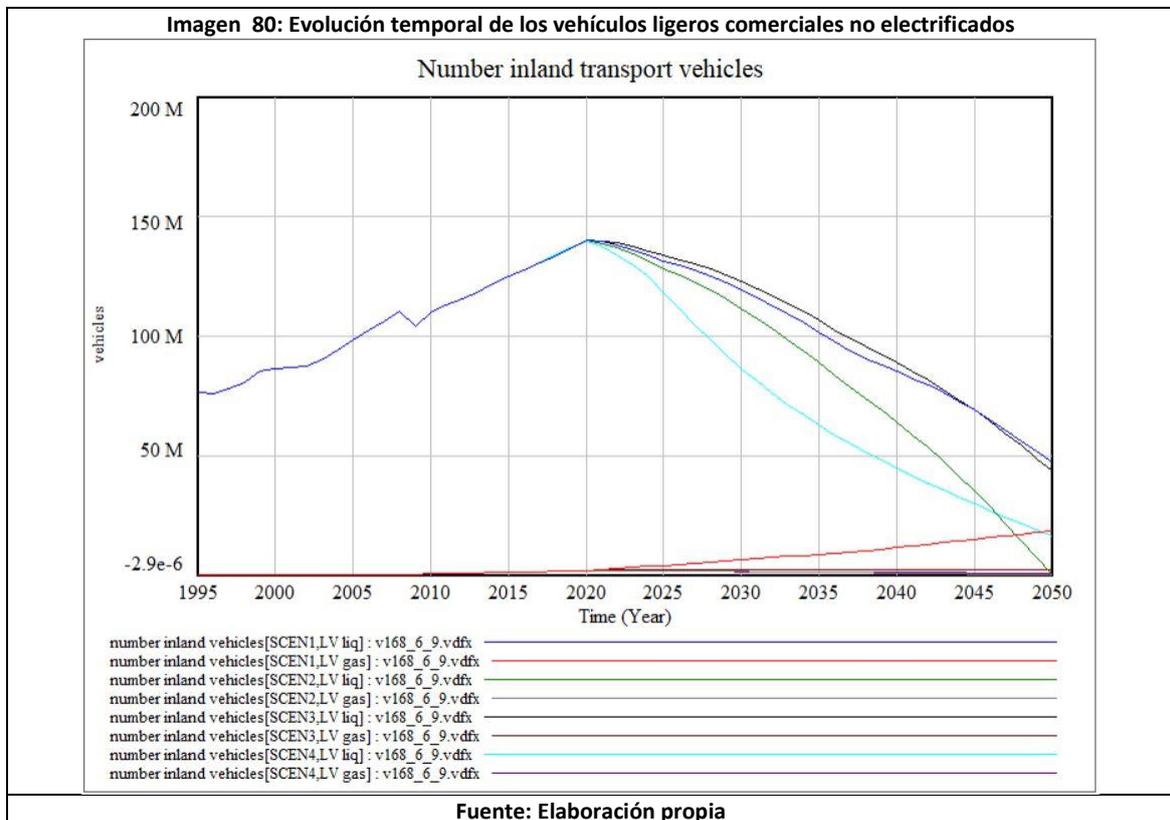
-HV: Vehículos comerciales pesados no electrificados (combustible líquido y gas).



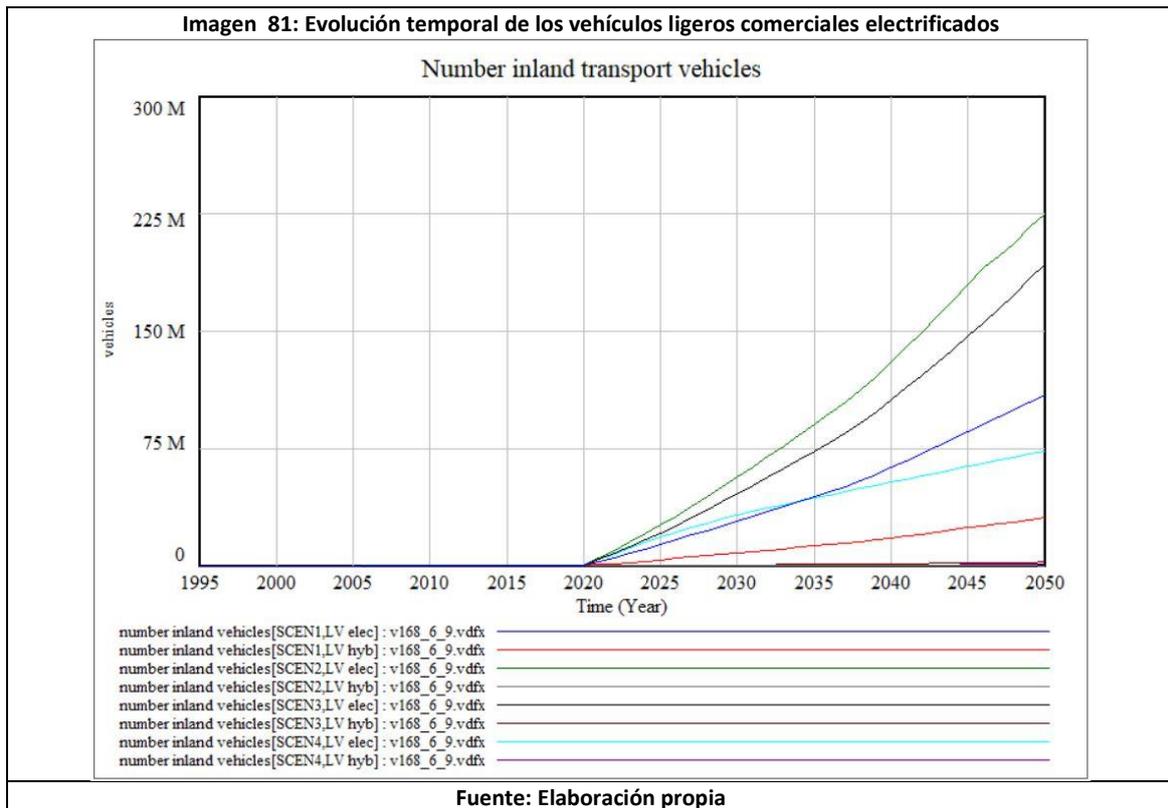
-HVe: Vehículos comerciales pesados electrificados (híbridos)



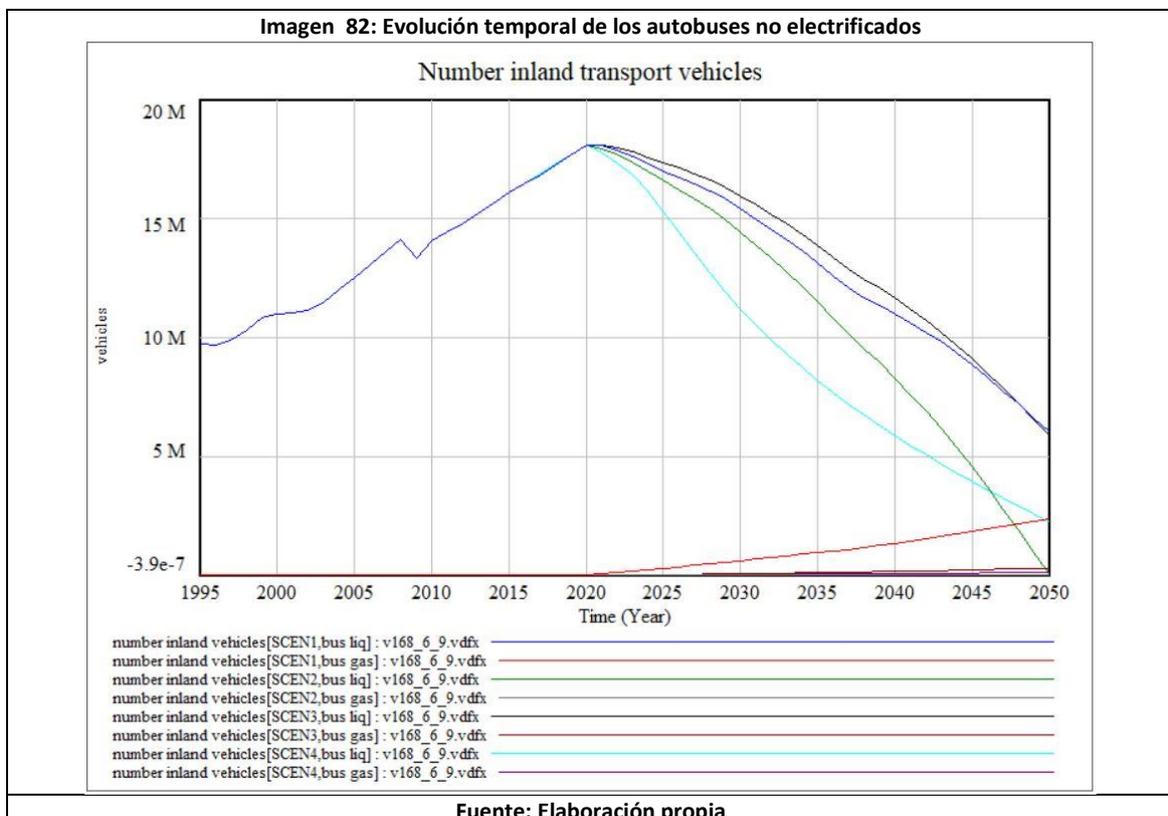
-LV: Vehículos comerciales ligeros no electrificados (combustible líquido y gas)



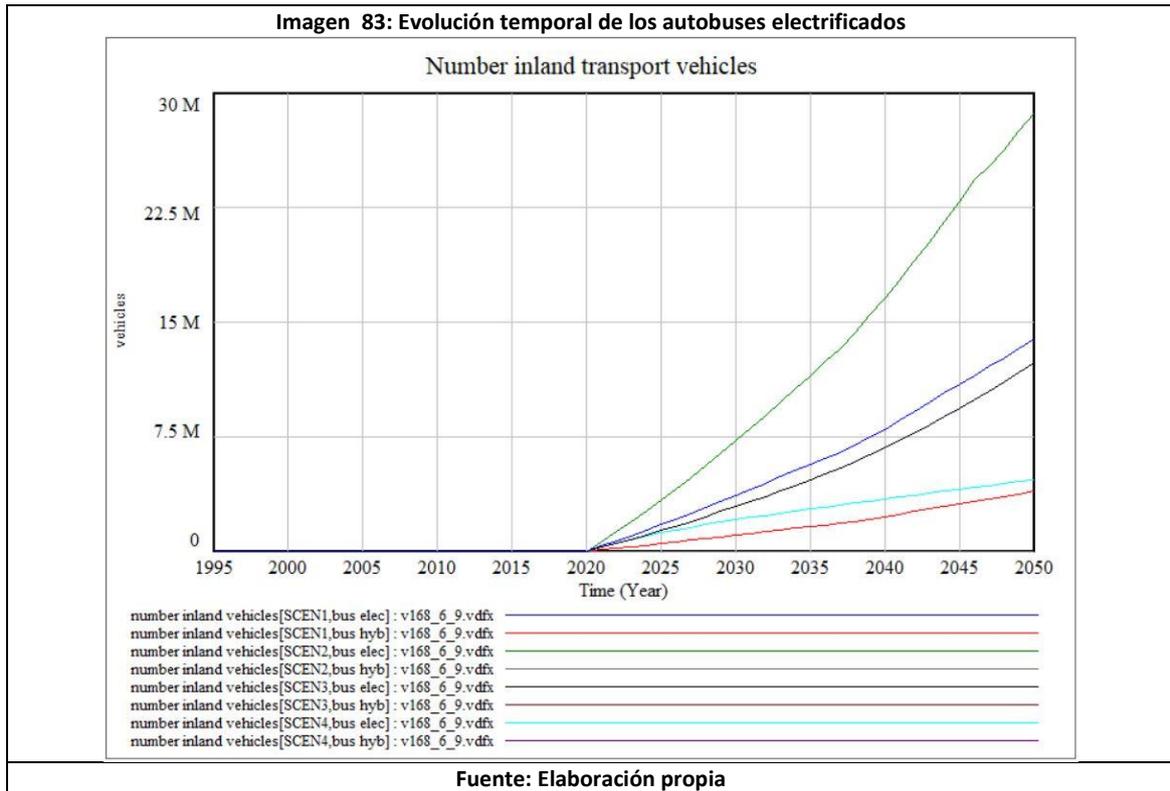
-LVe: Vehículos comerciales ligeros electrificados (híbridos y eléctricos),



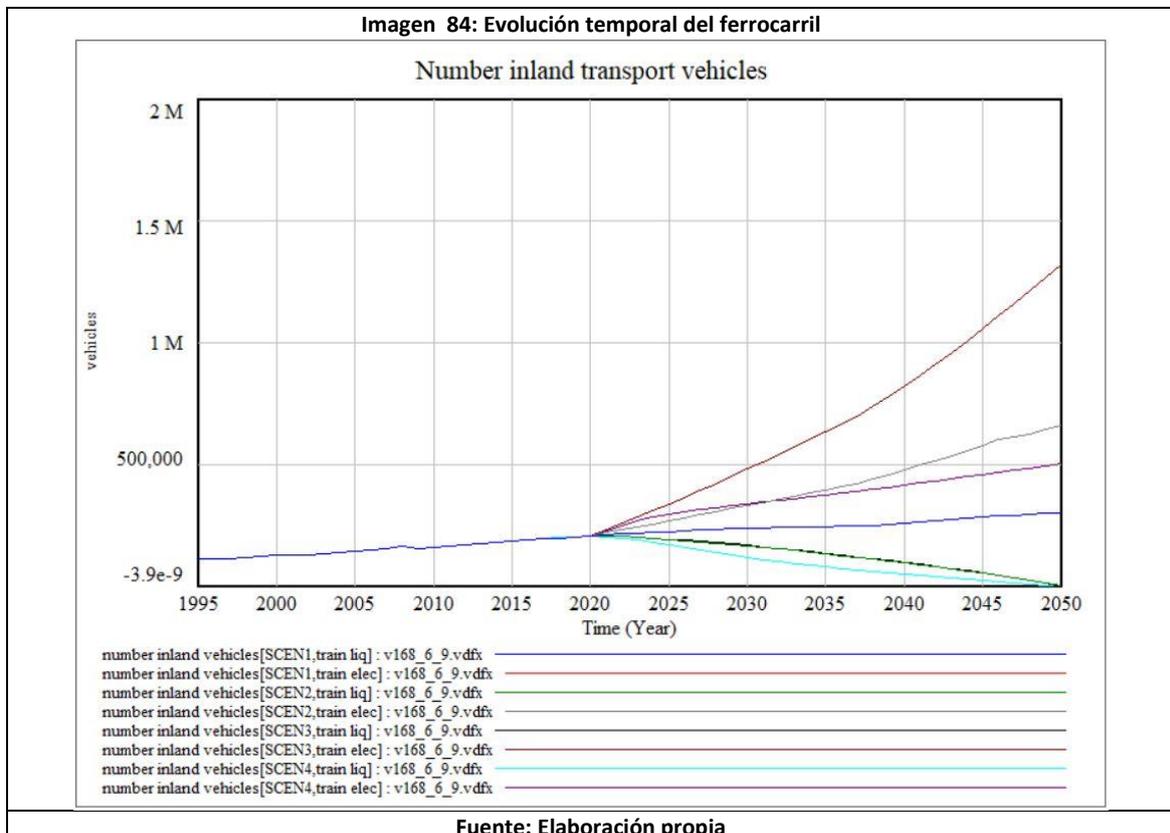
-Bus: Autobuses sin electrificar (combustible líquido y gas).



-eBus: Autobuses electrificados (híbridos y eléctricos)



-Ferrocarri (combustible líquido y eléctrico).



En el caso de los vehículos comerciales las tendencias no son tan generalizadas. En el caso de los vehículos ligeros y los autobuses si podemos llegar a las mismas conclusiones que en los vehículos particulares, es decir, una reducción del número de vehículos de combustión interna y un aumento de los vehículos electrificados en todos los escenarios. En cambio en los vehículos pesados y en el ferrocarril el porcentaje de electrificación depende en gran medida del escenario adoptado, siendo dispares los resultados finales en cada escenario.

6.2 Materiales demandados

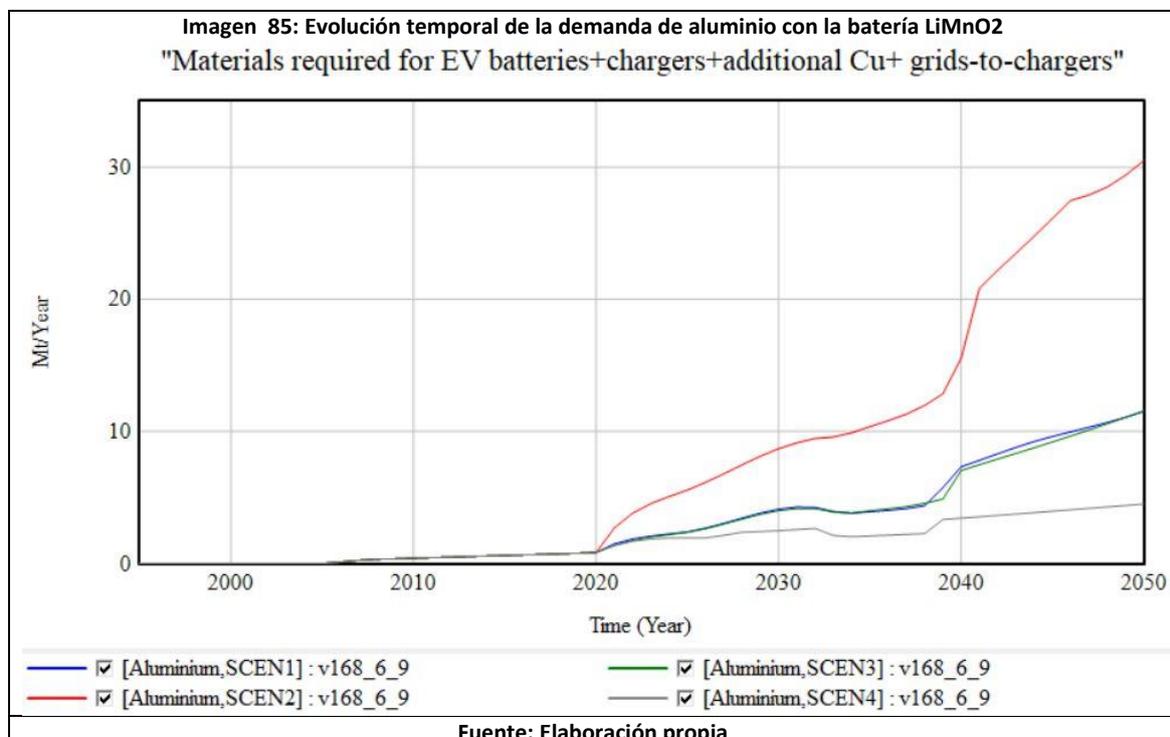
Continuaremos enunciando los materiales que demandan todas las tecnologías de electrificación y los vehículos electrificados. En estos resultados están reflejados los materiales necesarios para conformar los vehículos electrificados y las diferentes infraestructuras para hacerlos funcionar (catenarias, puntos de carga...).

En la simulación debemos elegir el tipo de batería que queremos que lleven todos los vehículos electrificados a partir del año 2015 y así, podremos comparar los resultados utilizando los distintos tipos de baterías.

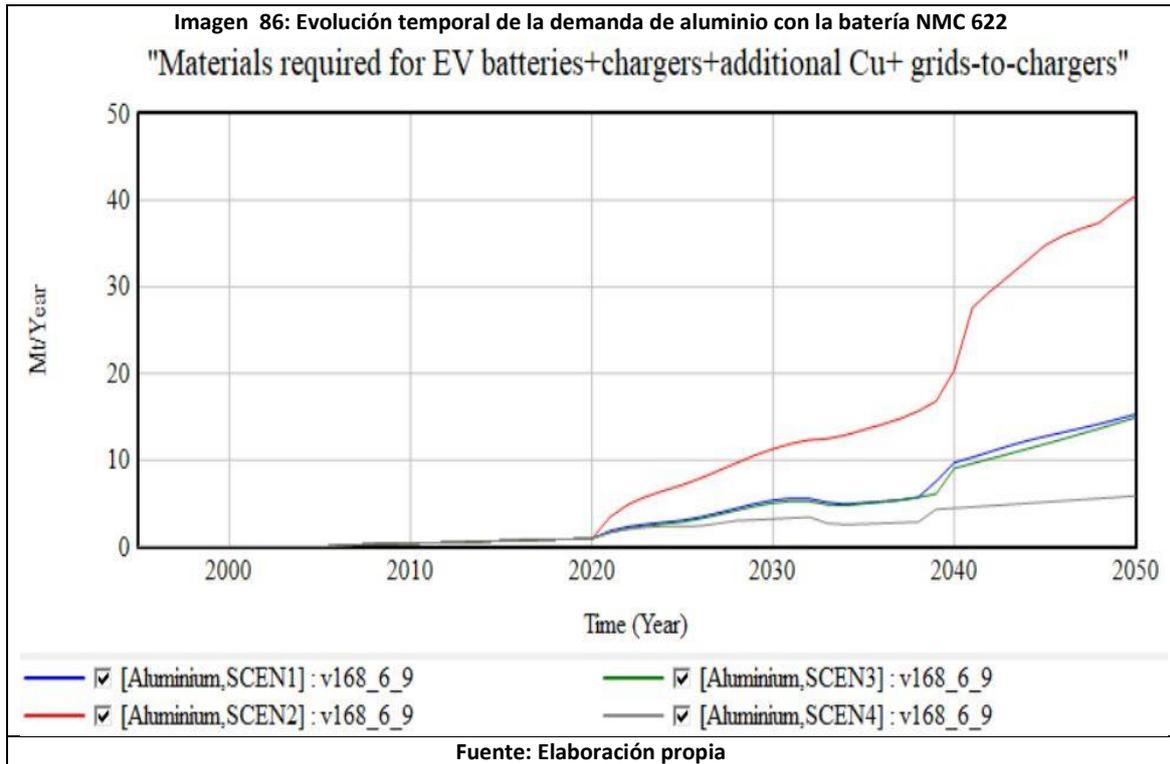
Expresaremos los resultados según el material del que queremos obtener la información y la batería elegida.

Aluminio

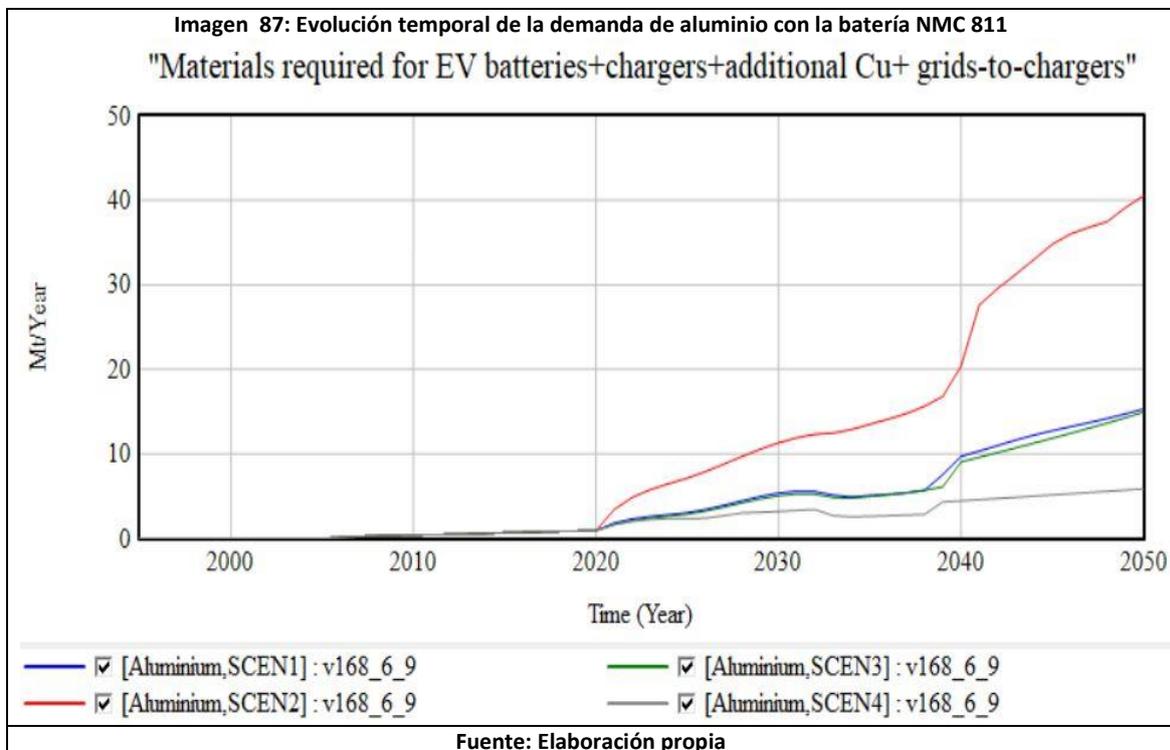
-Batería LiMnO₂



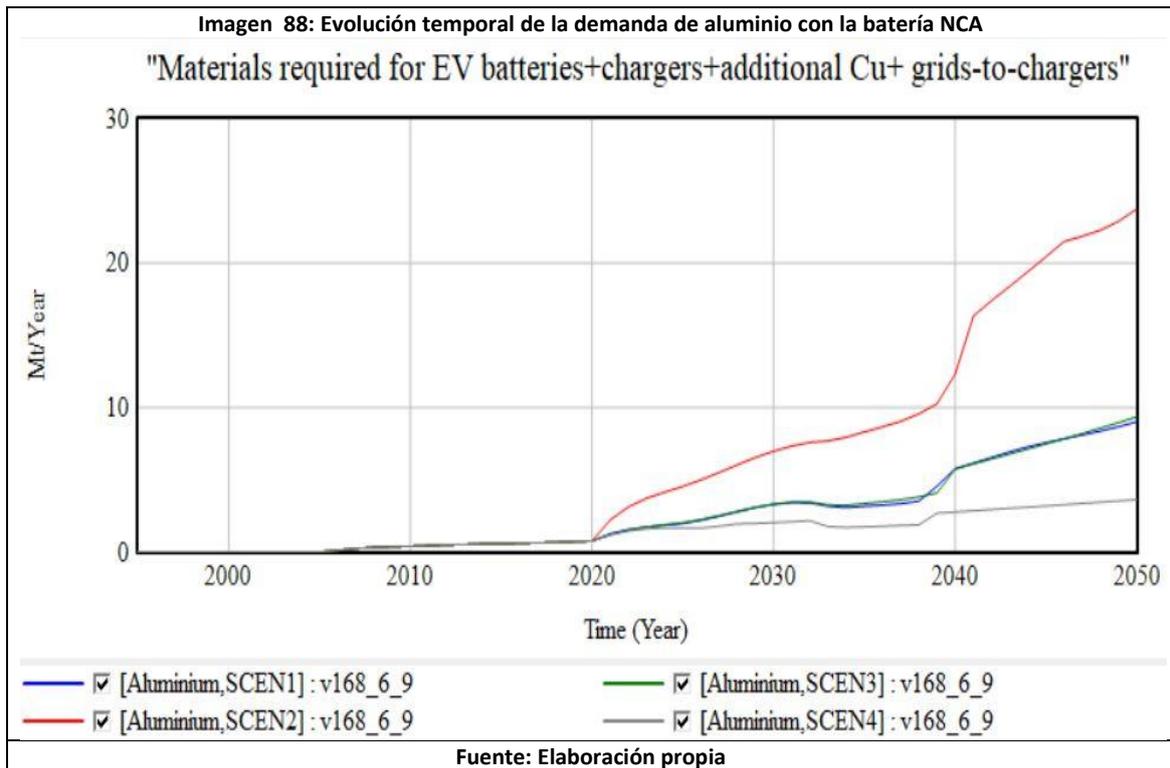
-Batería NMC 622



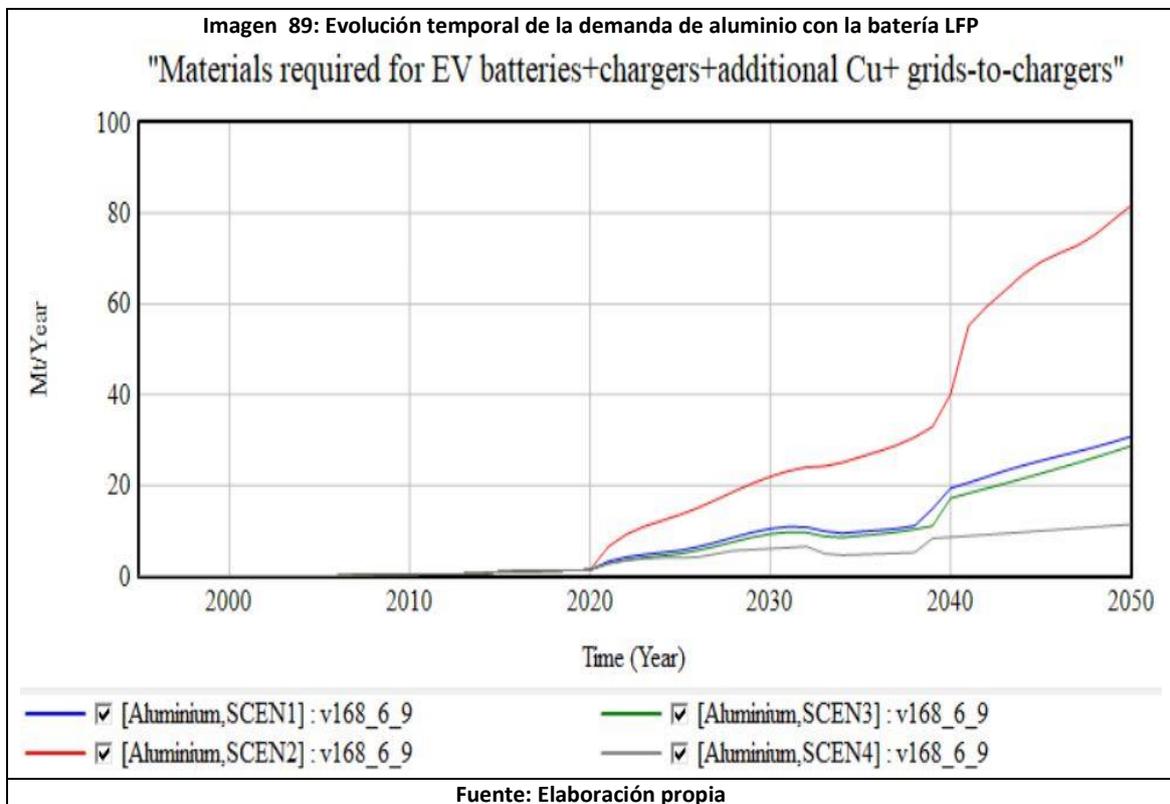
-Batería NMC 811



-Batería NCA



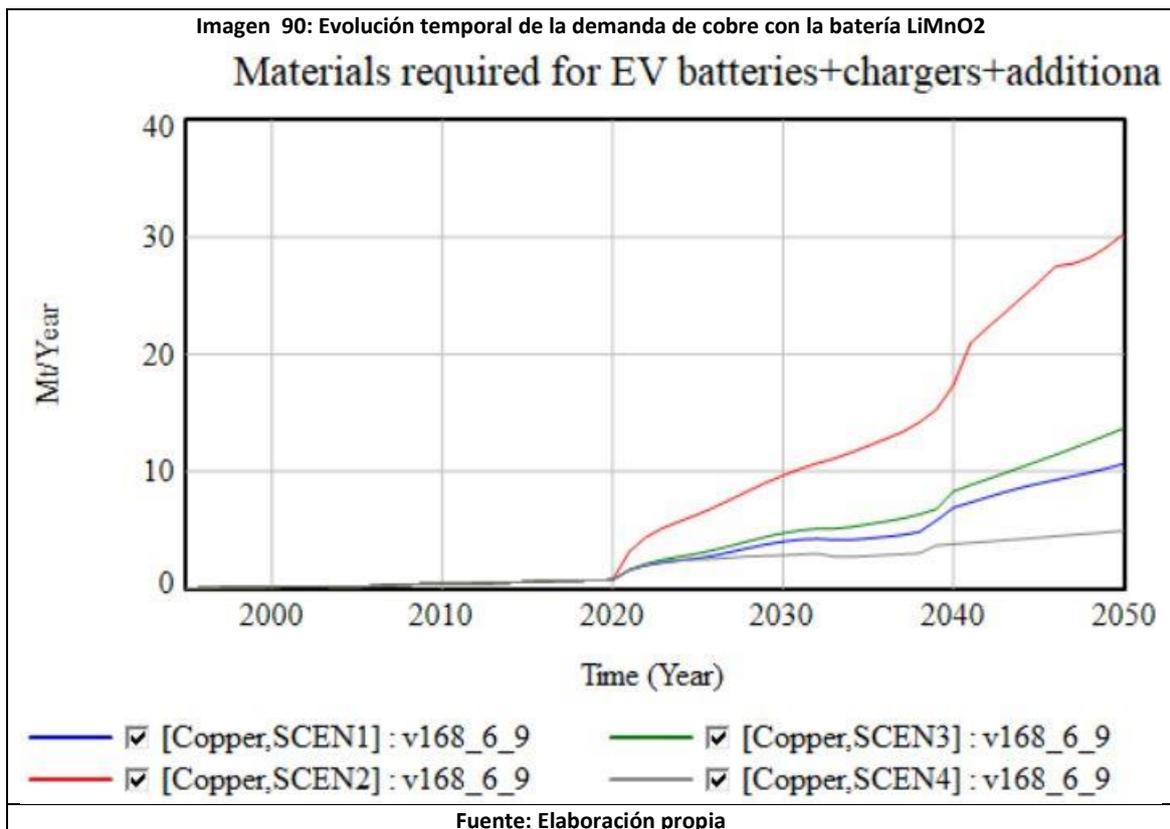
-Batería LFP



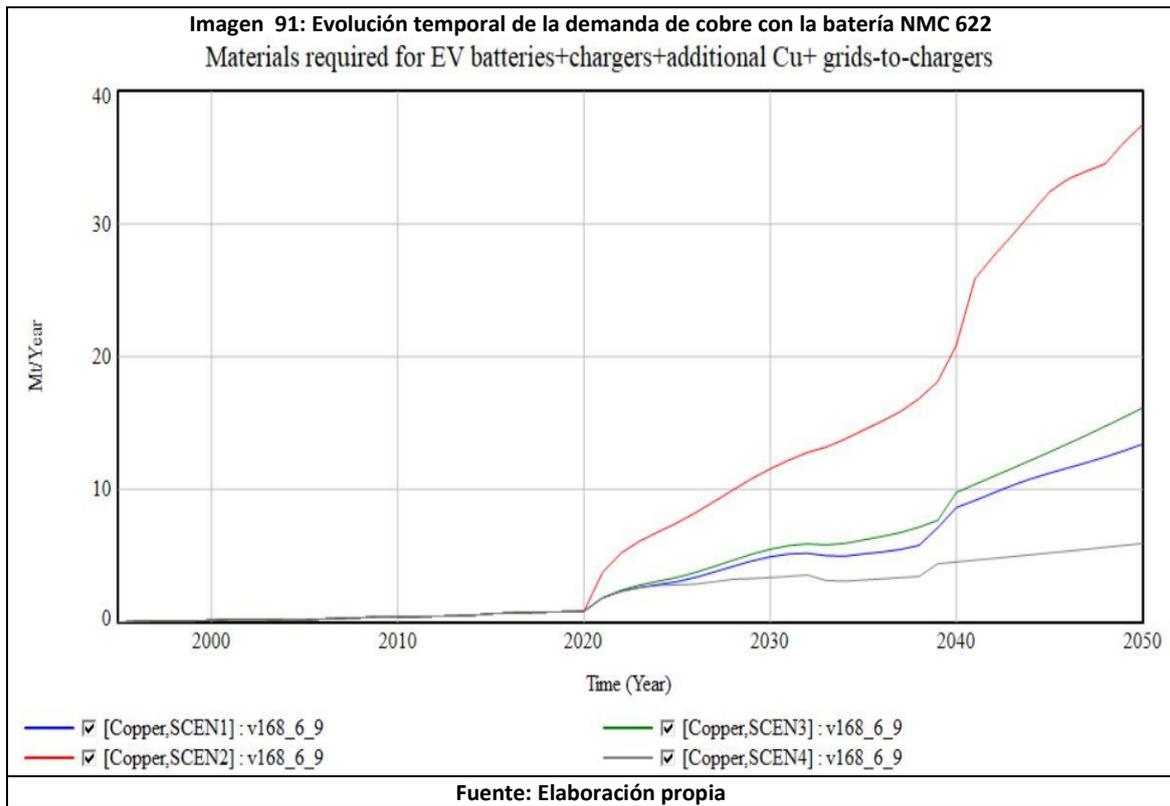
En el aluminio podemos enunciar que obtenemos una gráfica ascendente en todos los escenarios y baterías. Los valores temporales varían de forma notable según el escenario o batería adoptada tomando valores entre los 3Mt/año (escenarios con un número reducido de baterías y empleando baterías con una baja cantidad de aluminio) y las 80 Mt/año (escenarios con alto número de baterías, que poseen gran cantidad de aluminio) en el año 2050.

Cobre

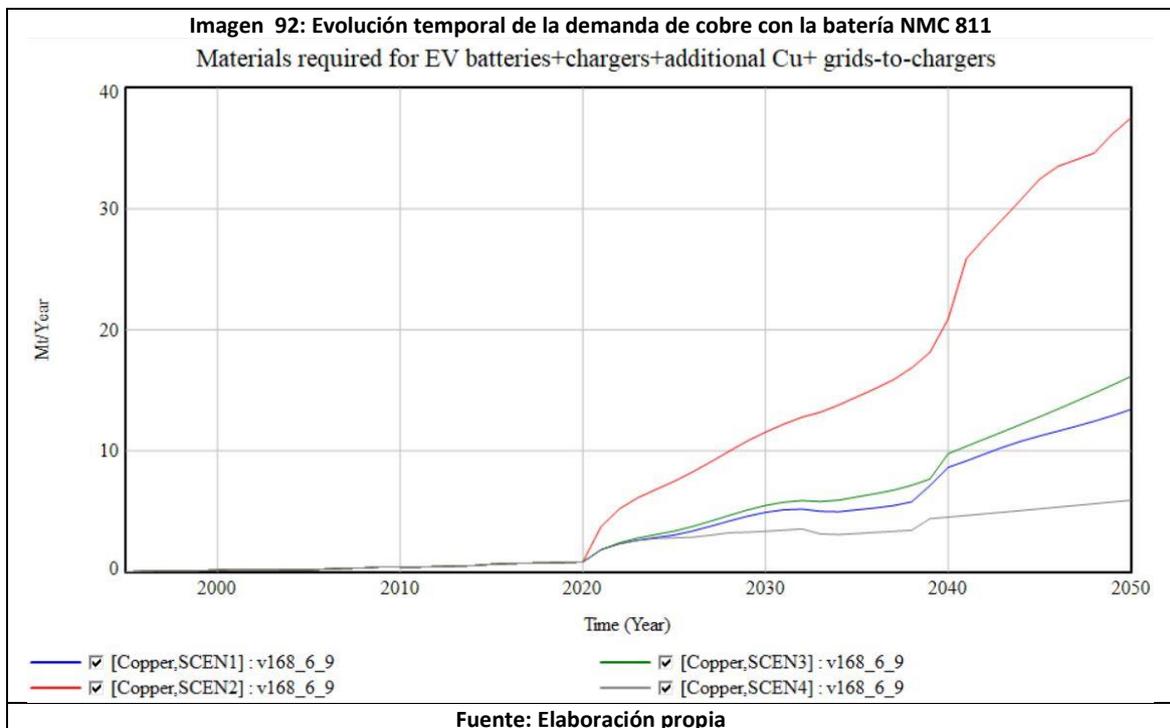
-Batería LiMnO₂



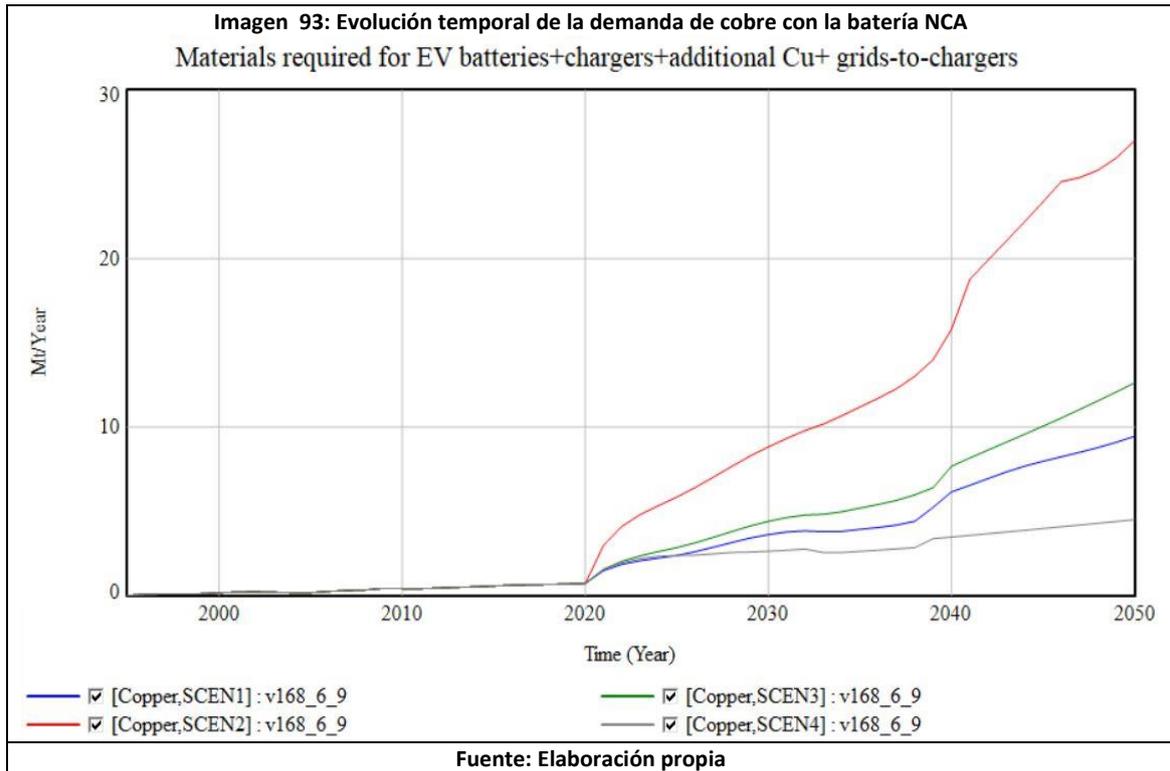
-Batería NMC 622



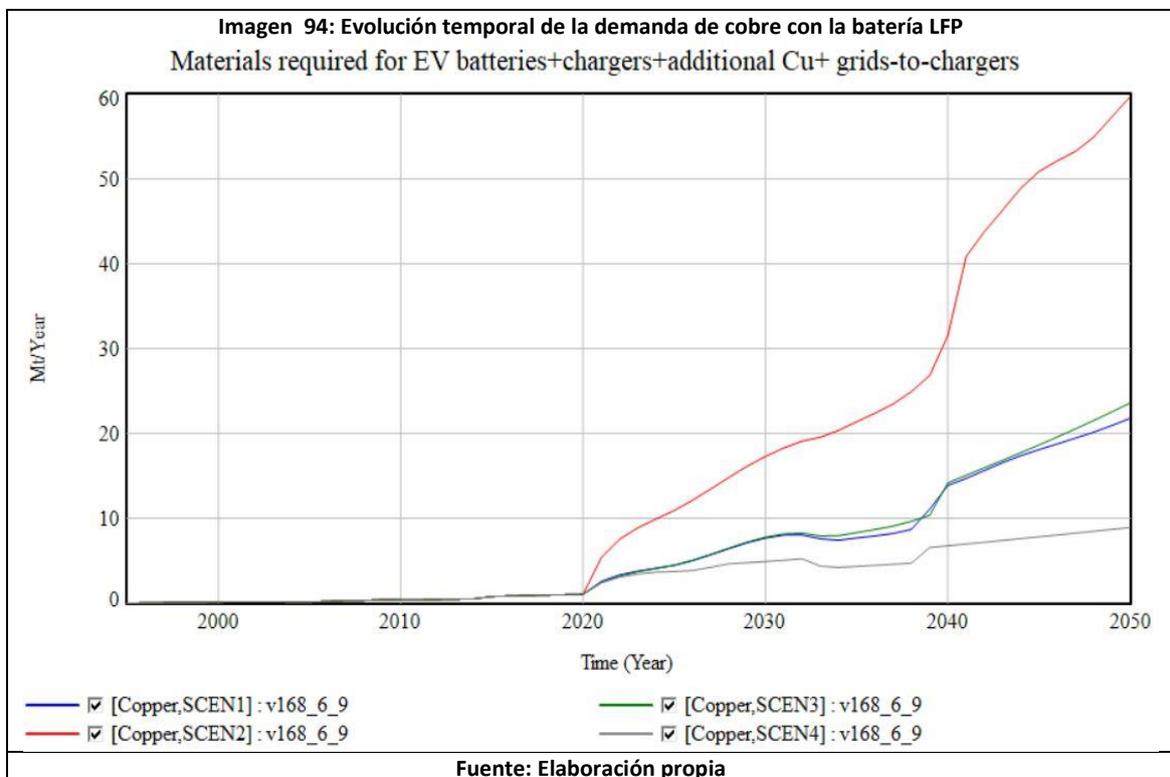
-Batería NMC 811



-Batería NCA



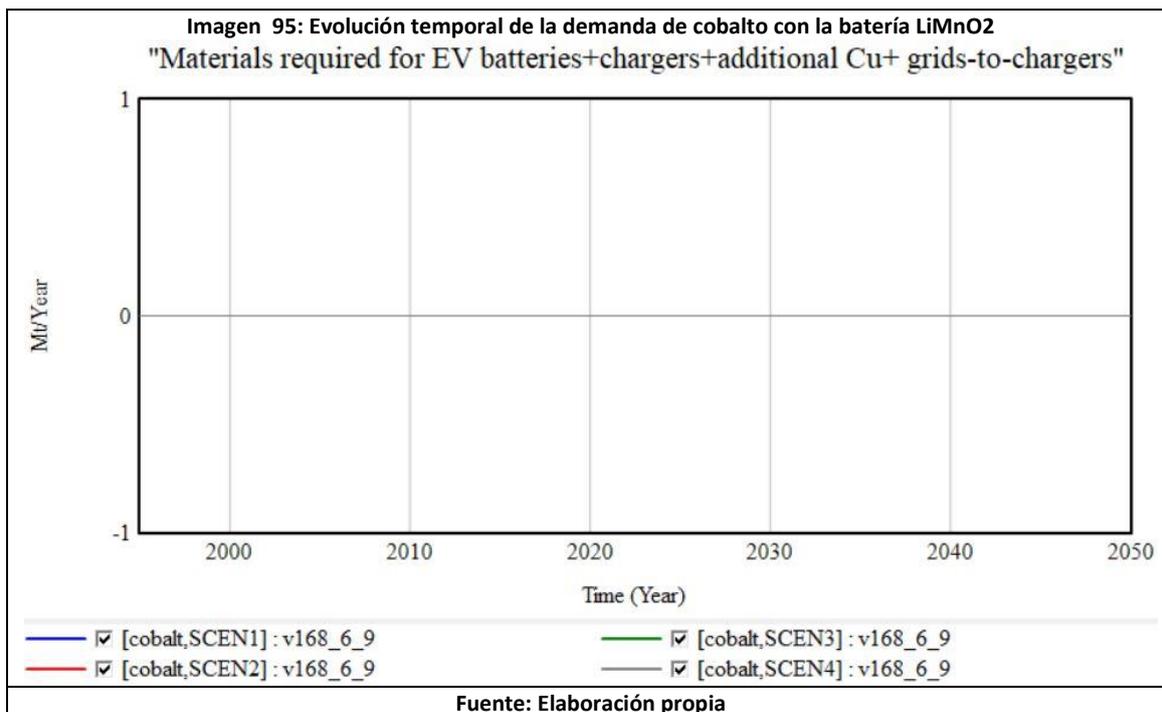
-Batería LFP



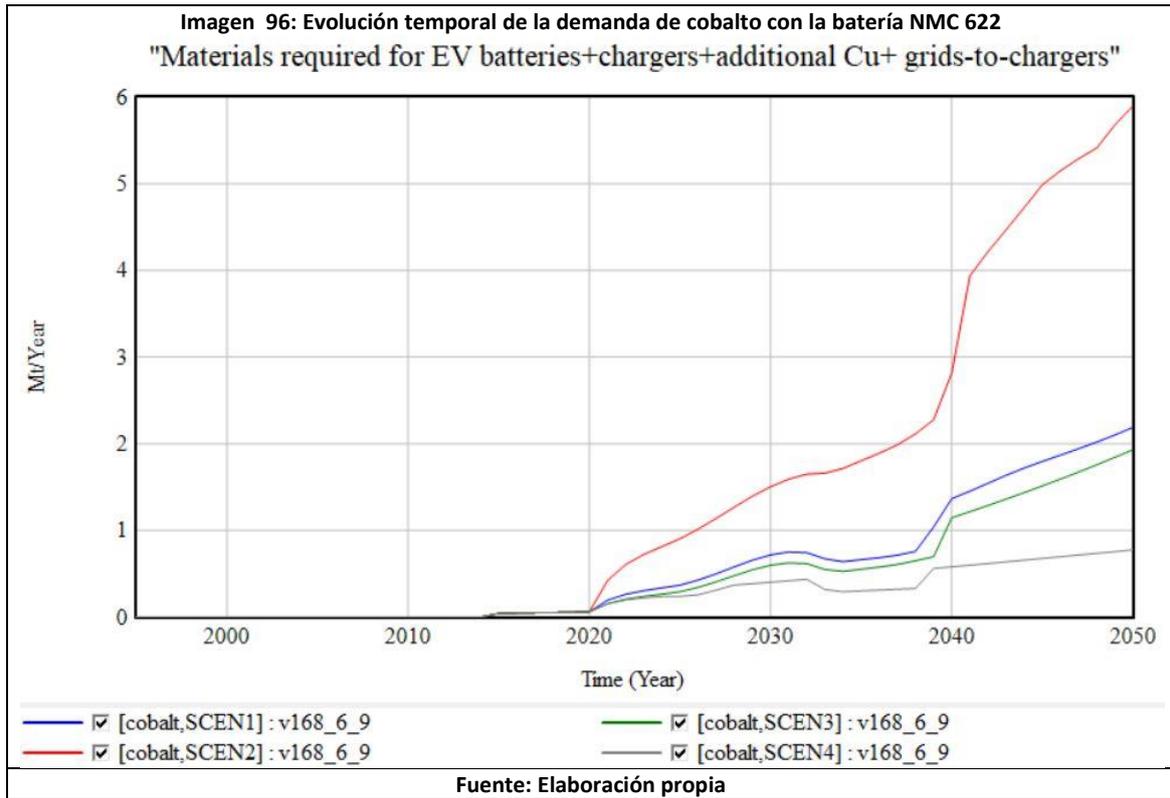
En el cobre podemos enunciar algo similar al aluminio, obtenemos curvas ascendentes en todos los escenarios y baterías en las que los valores varían de forma acusada dependiendo del escenario o batería empleados. En este caso nos encontramos valores entre los 6 Mt/año y los 60 Mt/año en el año 2050.

Cobalto

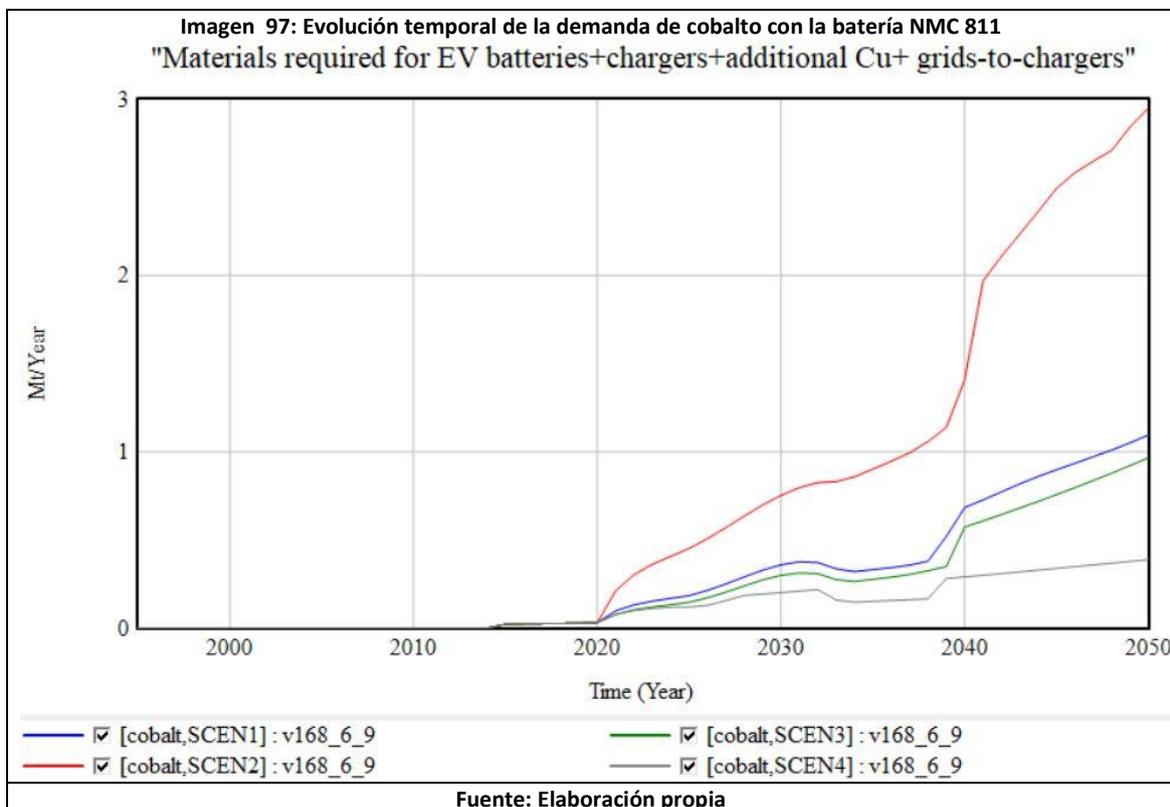
-Batería LiMnO₂



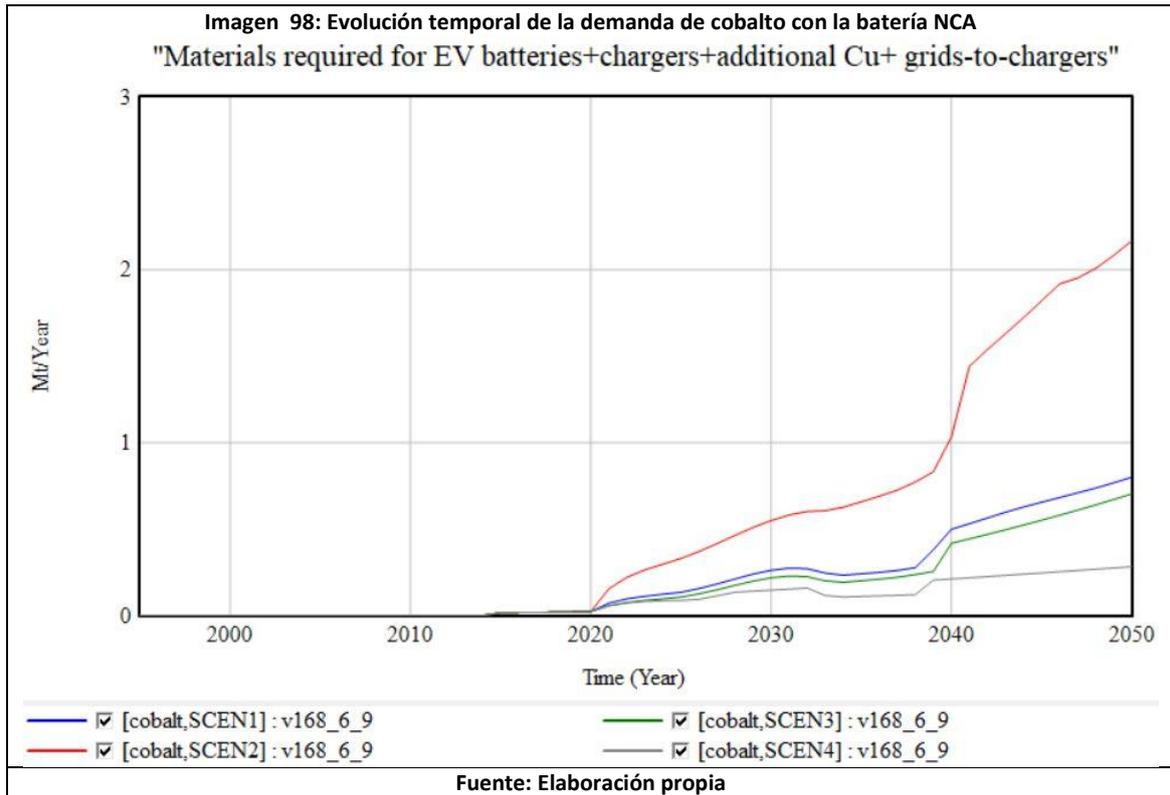
-Batería NMC 622



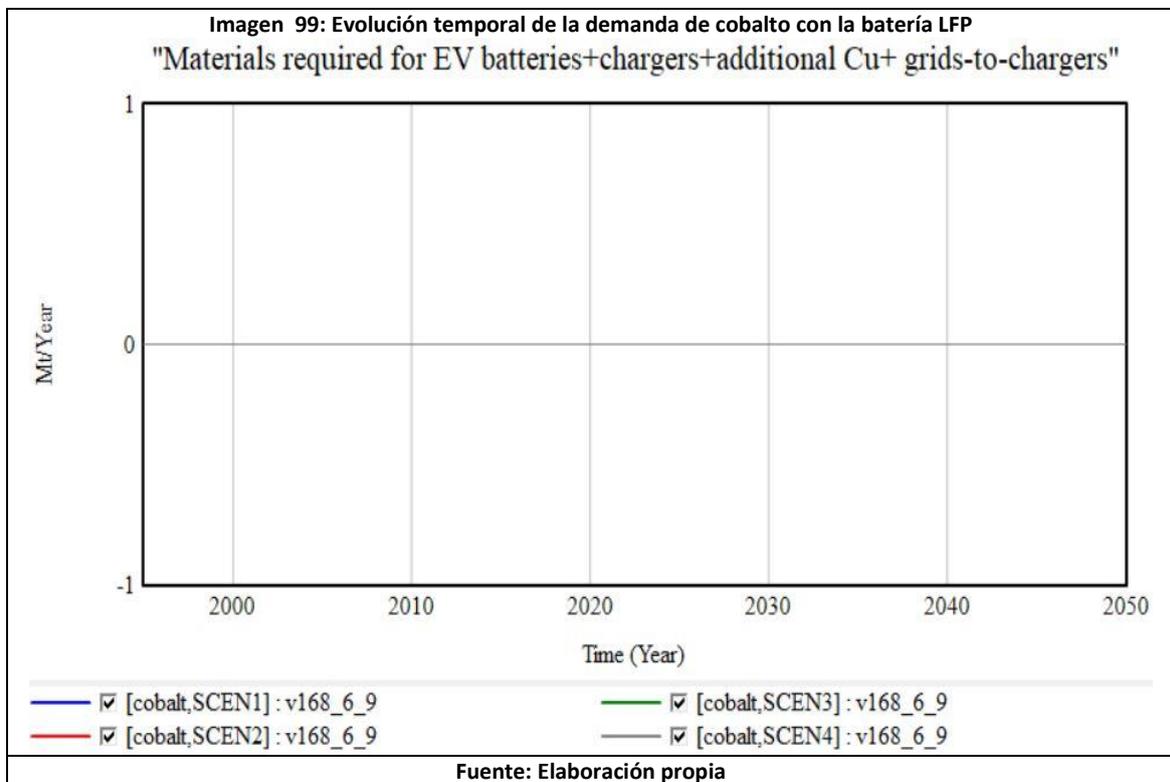
-Batería NMC 811



-Batería NCA



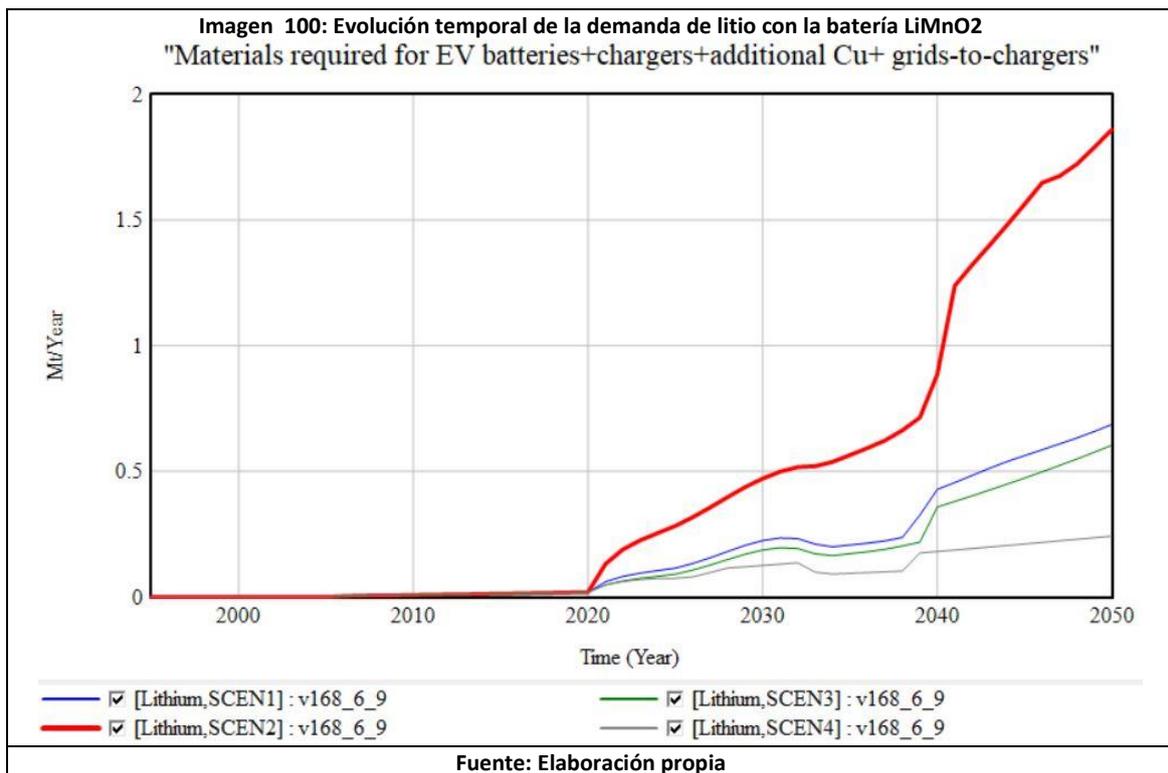
-Batería LFP



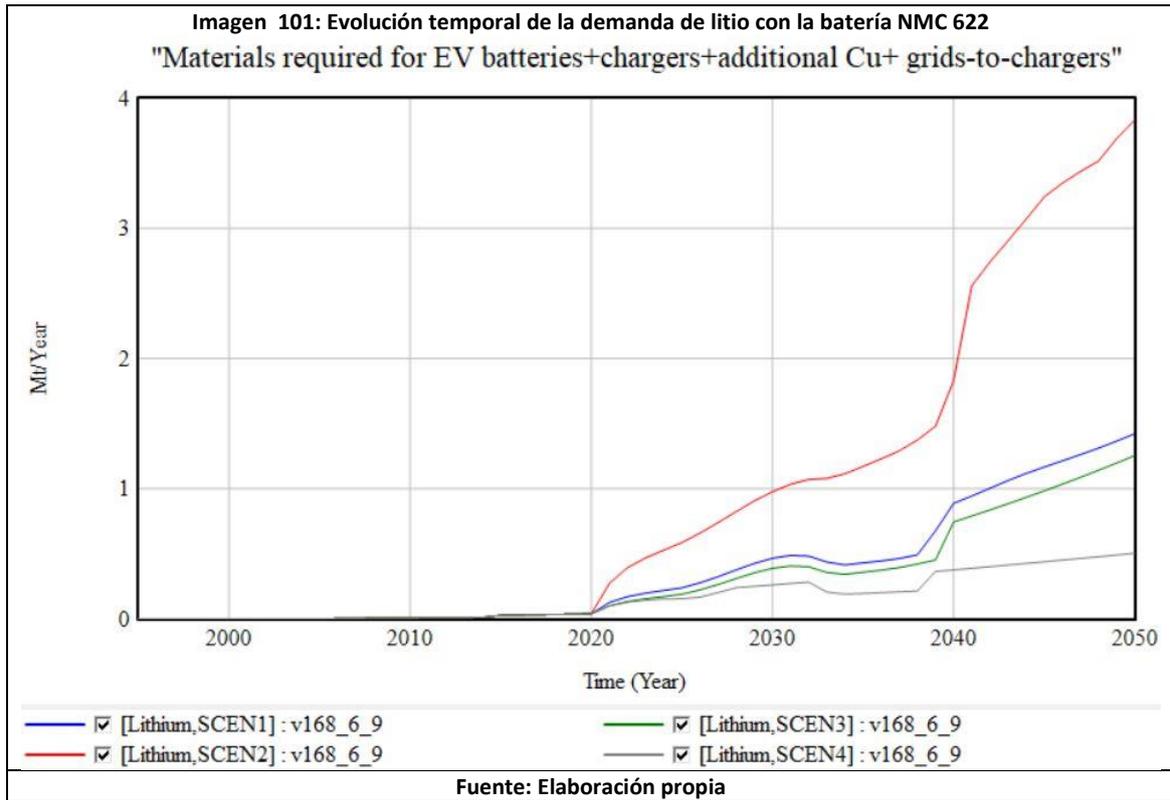
En lo respectivo al cobalto podemos repetir lo mismo que hemos dicho anteriormente para el cobre o el aluminio, obtenemos curvas ascendentes con valores que se sitúan entre los 0,3 Mt/año y las 6 Mt/año en el año 2050, pero en este caso, se presentan dos excepciones. Las baterías LiMnO₂ y las baterías LFP no presentan cobalto, además como ninguna infraestructura posee tampoco este material nos encontramos que la demanda de cobalto con esas baterías es de 0.

Litio

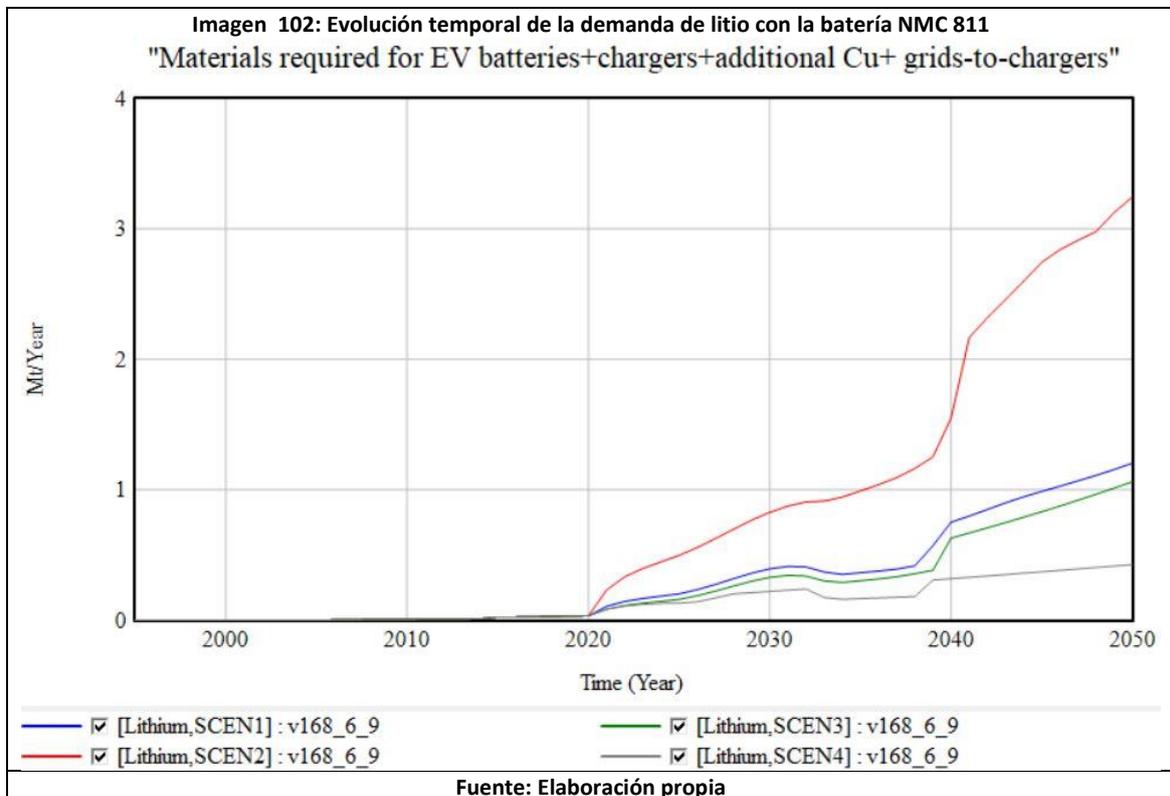
-Batería LiMnO₂



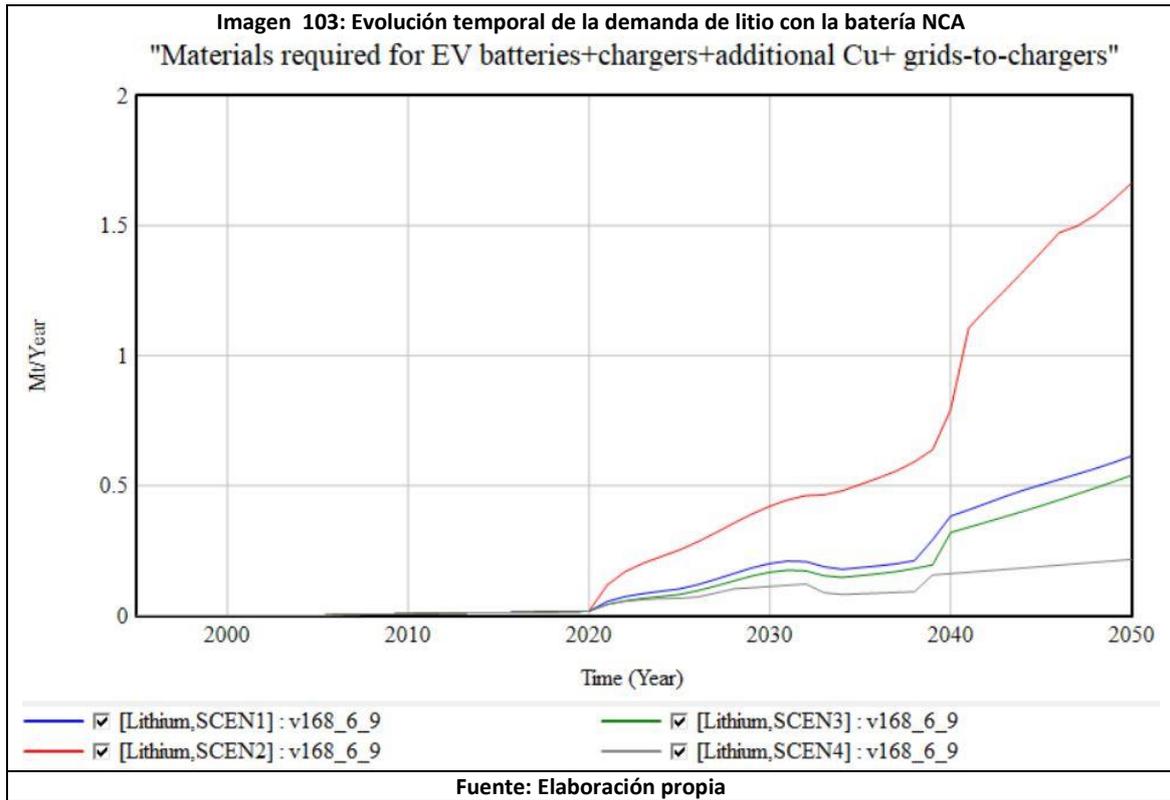
-Batería NMC 622



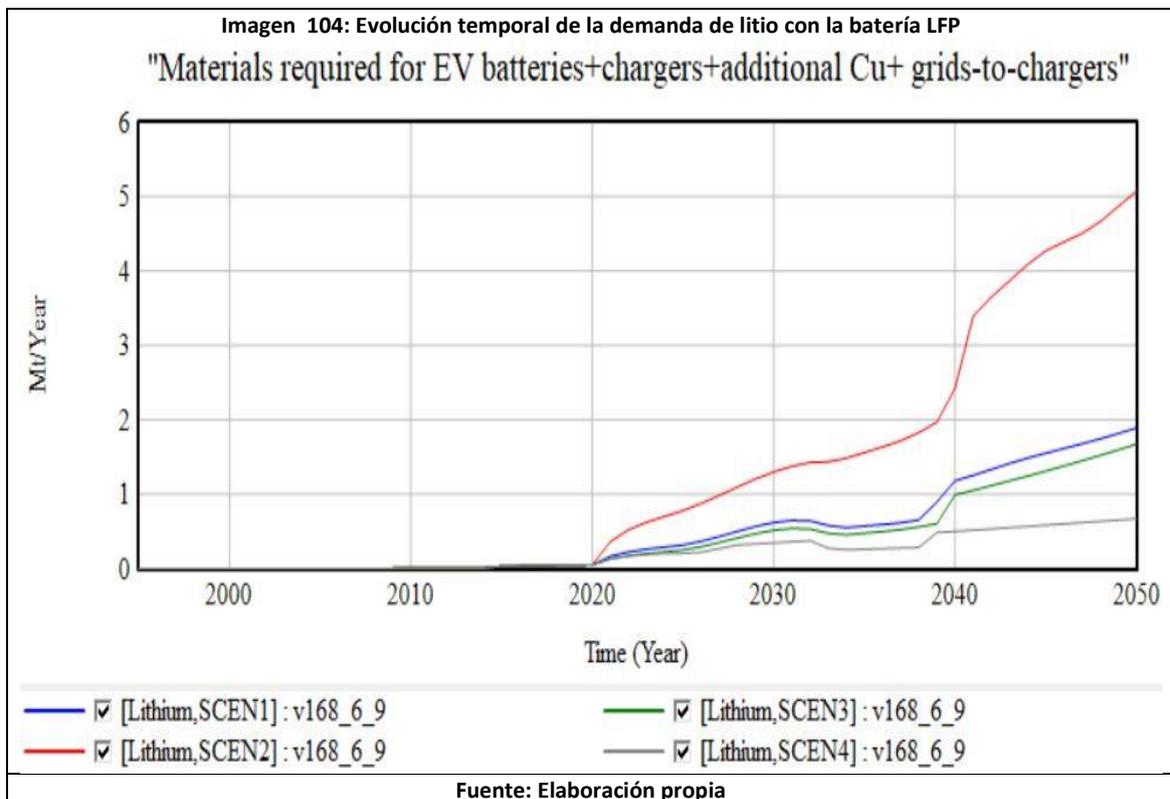
-Batería NMC 811



-Batería NCA



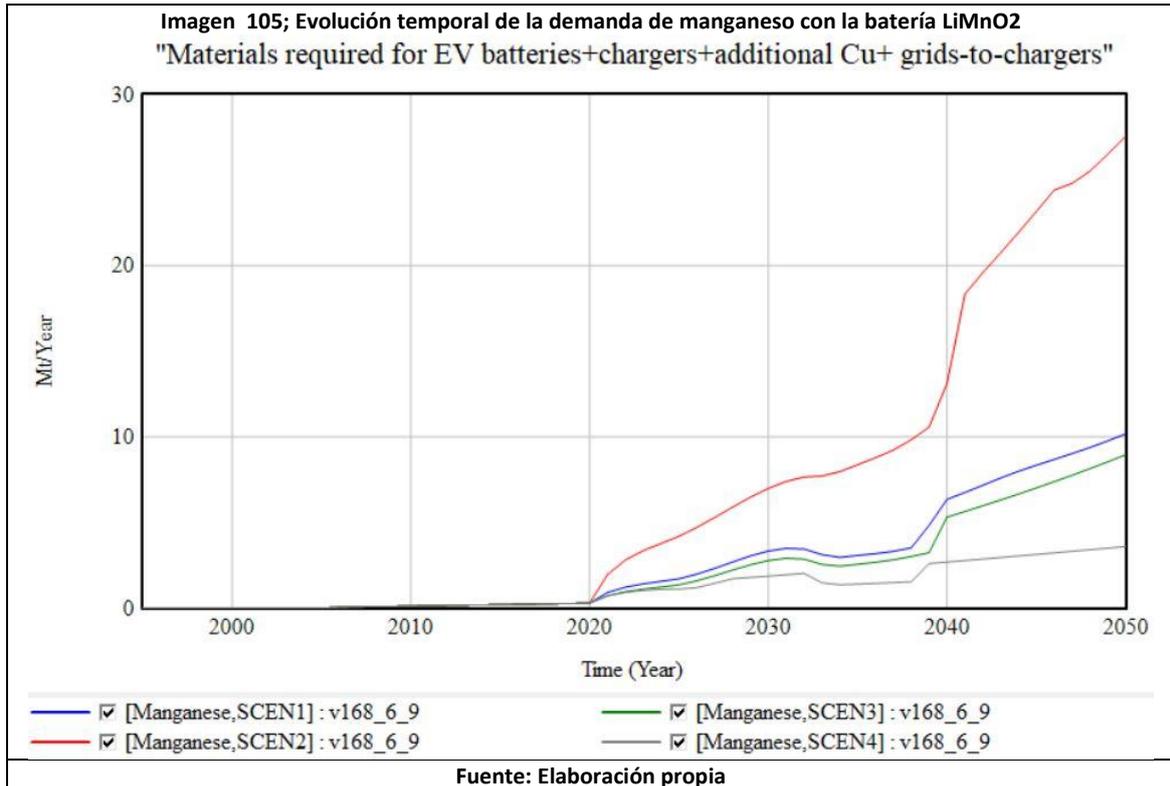
-Batería LFP



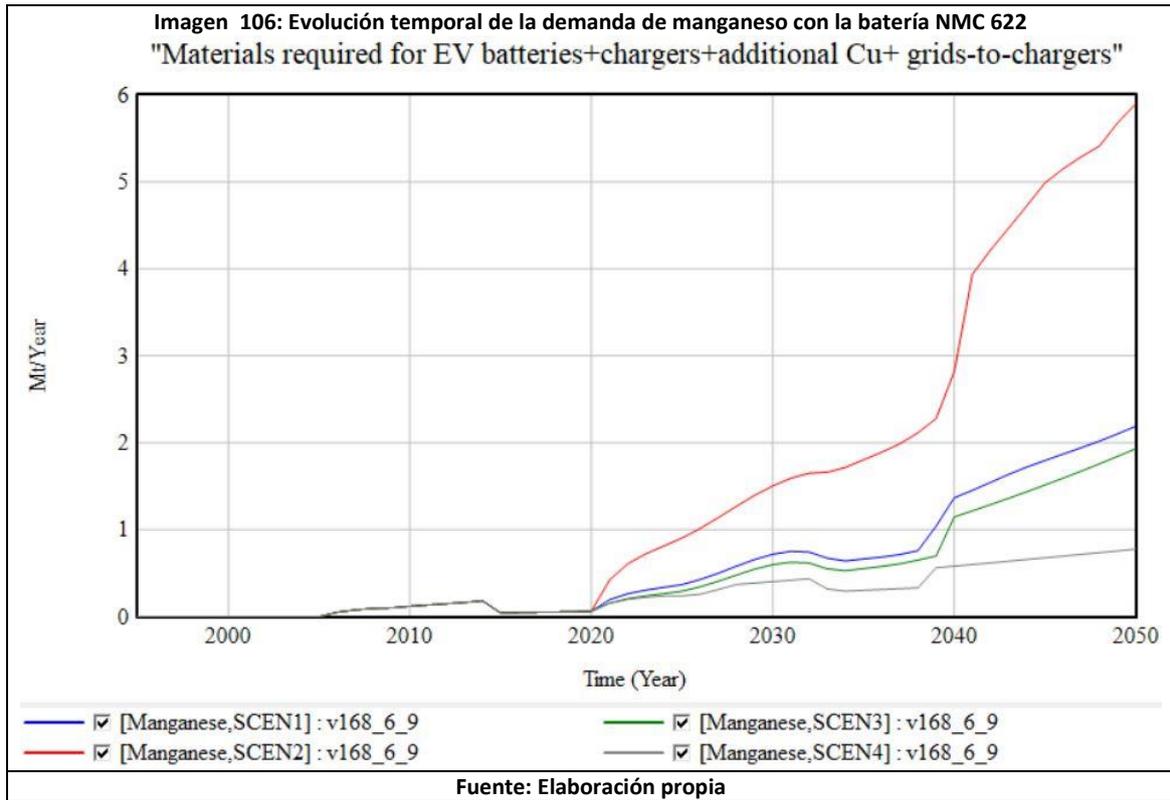
En el litio podemos enunciar algo similar al aluminio, obtenemos curvas ascendentes en todos los escenarios y baterías en las que los valores varían de forma acusada dependiendo del escenario o batería empleados. En este caso nos encontramos valores entre las 0,2 Mt/año y las 5 Mt/año.

Manganeso

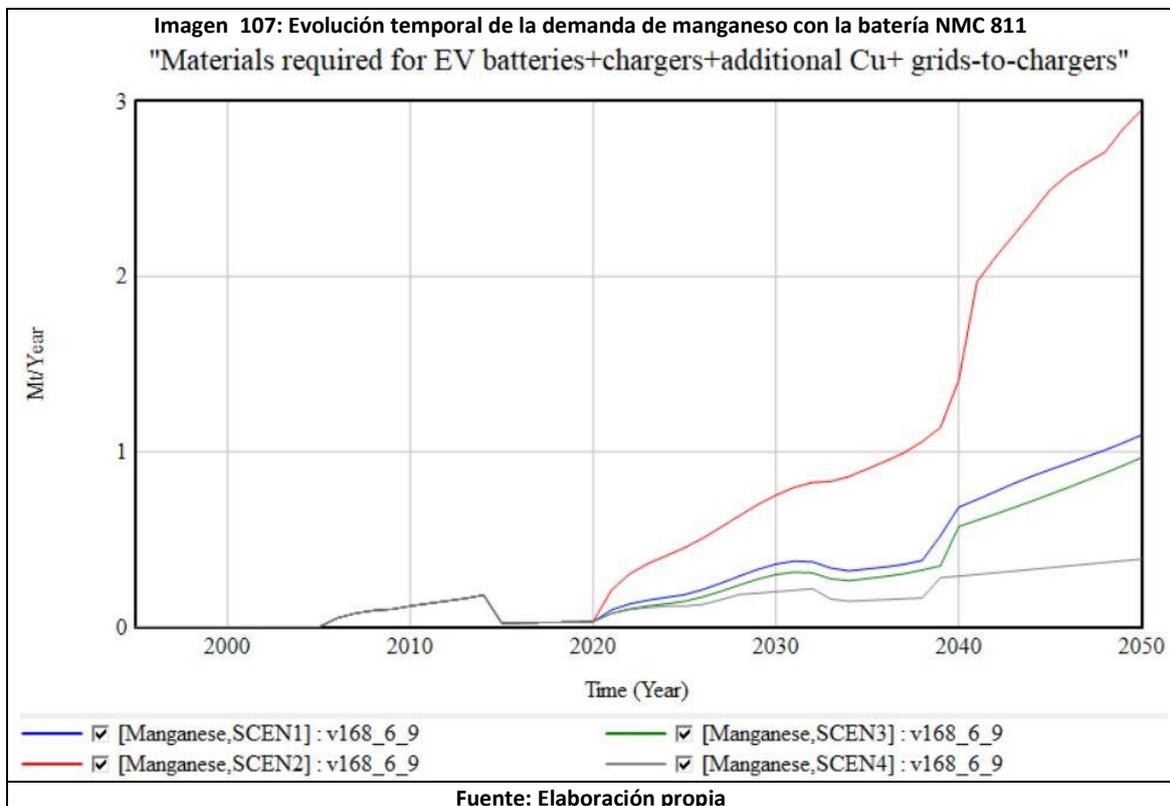
-Batería LiMnO₂



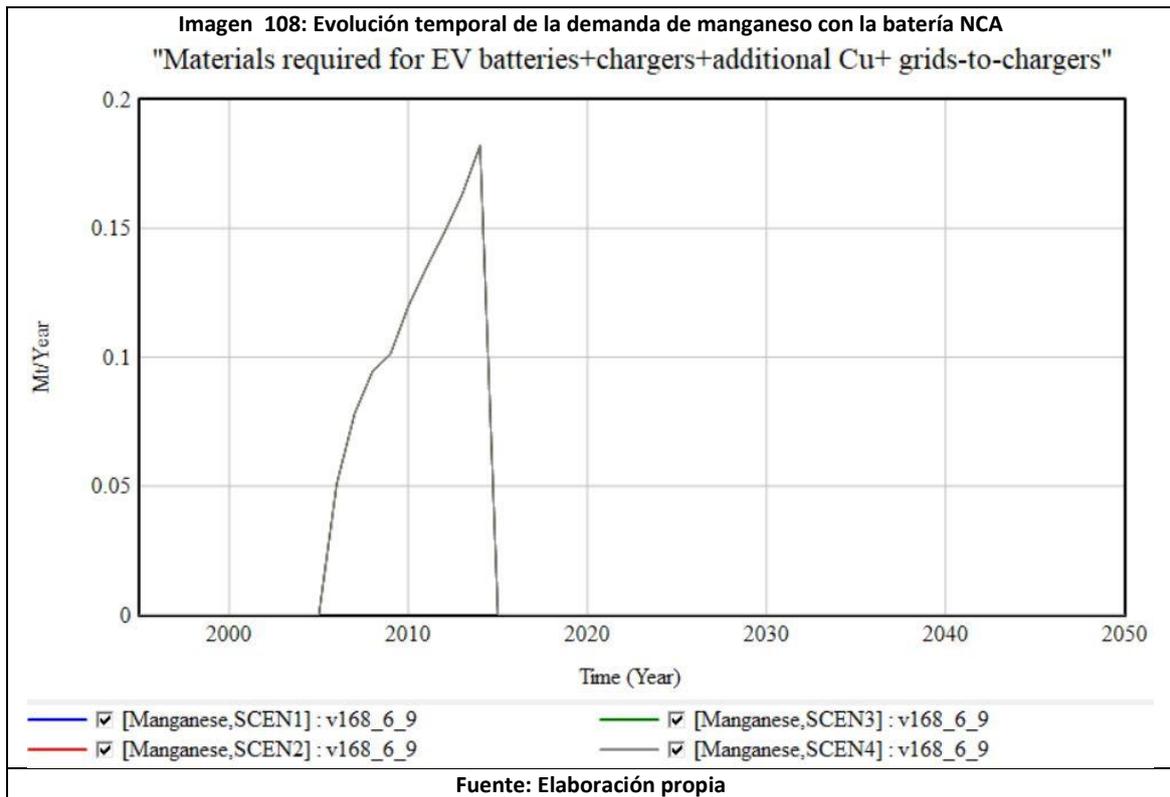
-Batería NMC 622



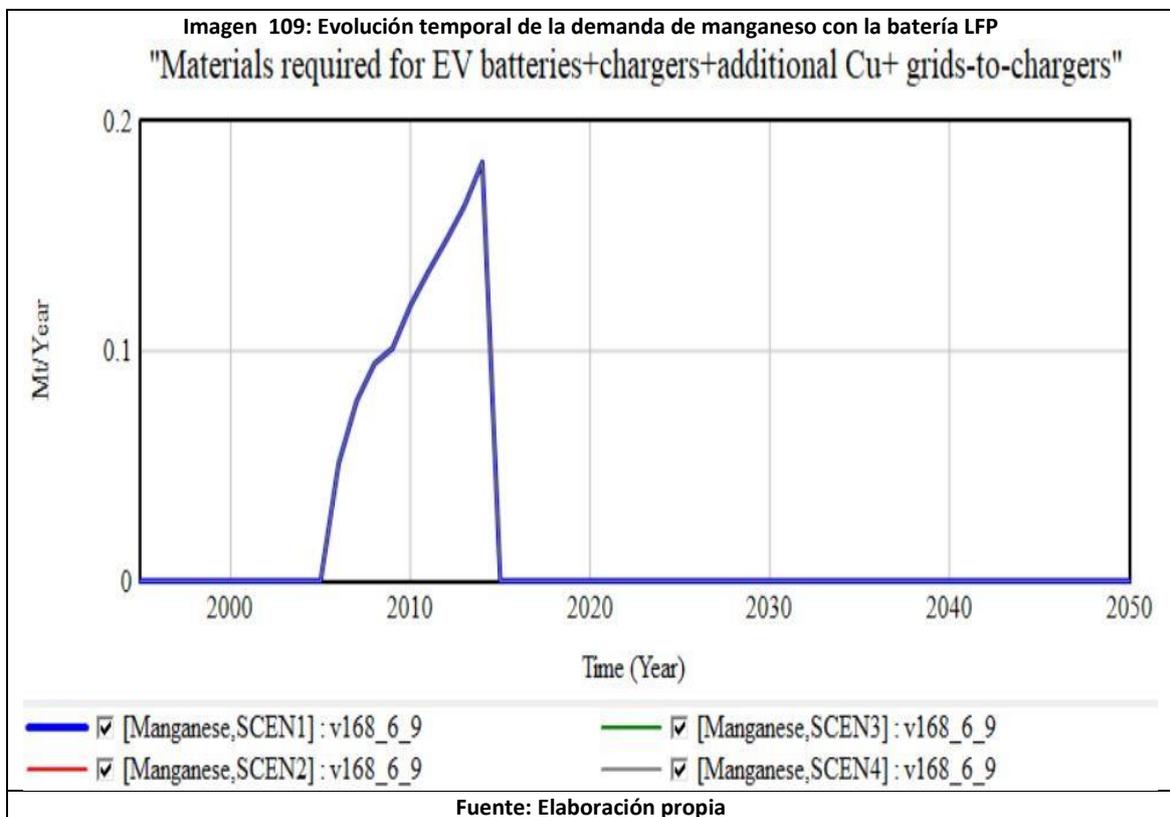
-Batería NMC 811



-Batería NCA



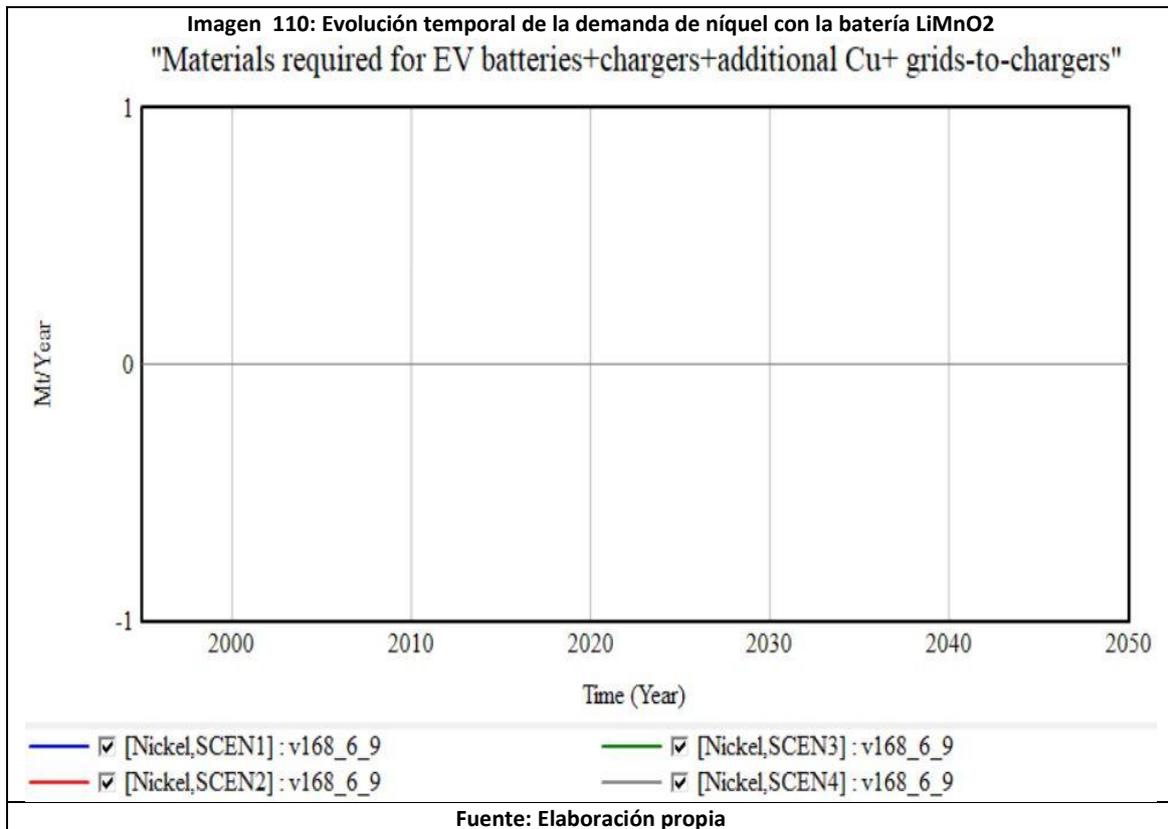
-Batería LFP



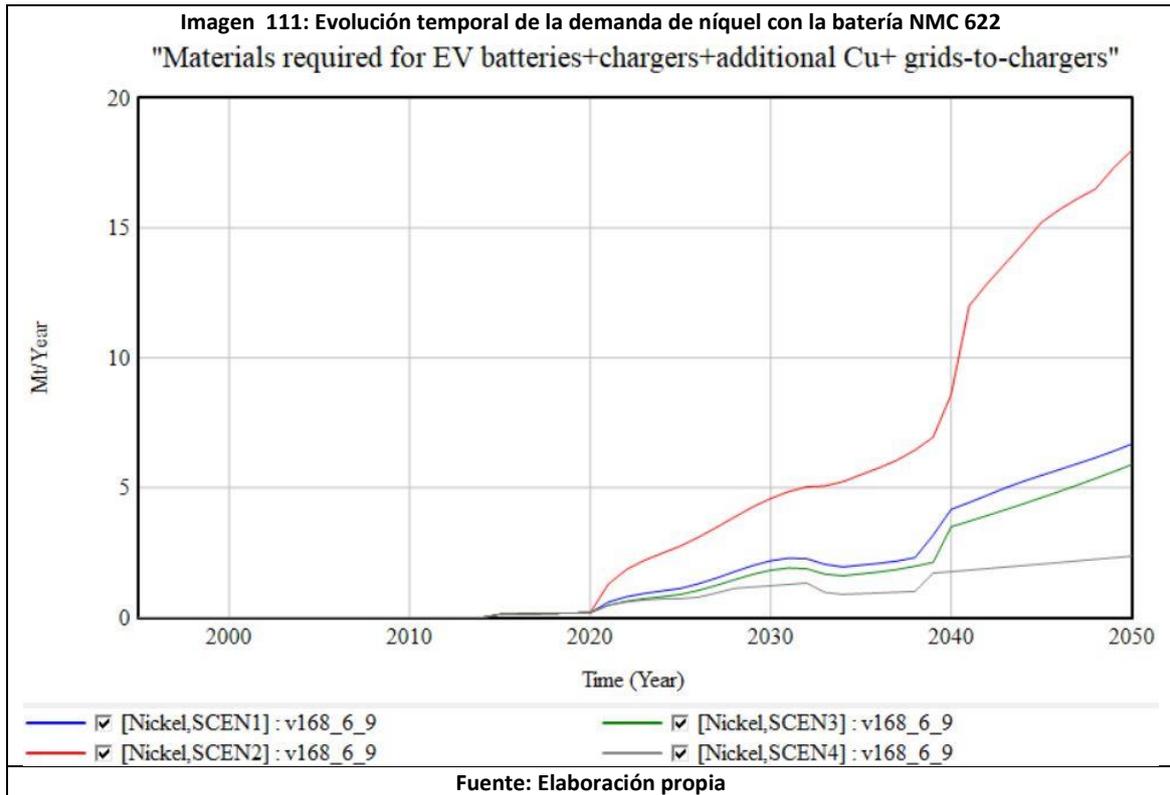
En lo respectivo al cobalto podemos repetir lo mismo que hemos dicho anteriormente para el cobre o el aluminio, obtenemos curvas ascendentes con valores que se sitúan entre los 0,4 Mt/año y las 27 Mt/año en el año 2050, pero en este caso, se presentan dos excepciones. Las baterías NCA y las baterías LFP no presentan manganeso, además como ninguna infraestructura posee tampoco este material nos encontramos que la demanda de cobalto con esas baterías es de 0 a partir del 2015 (ya que anteriormente se supone que todas las baterías son LiMnO₂).

Níquel

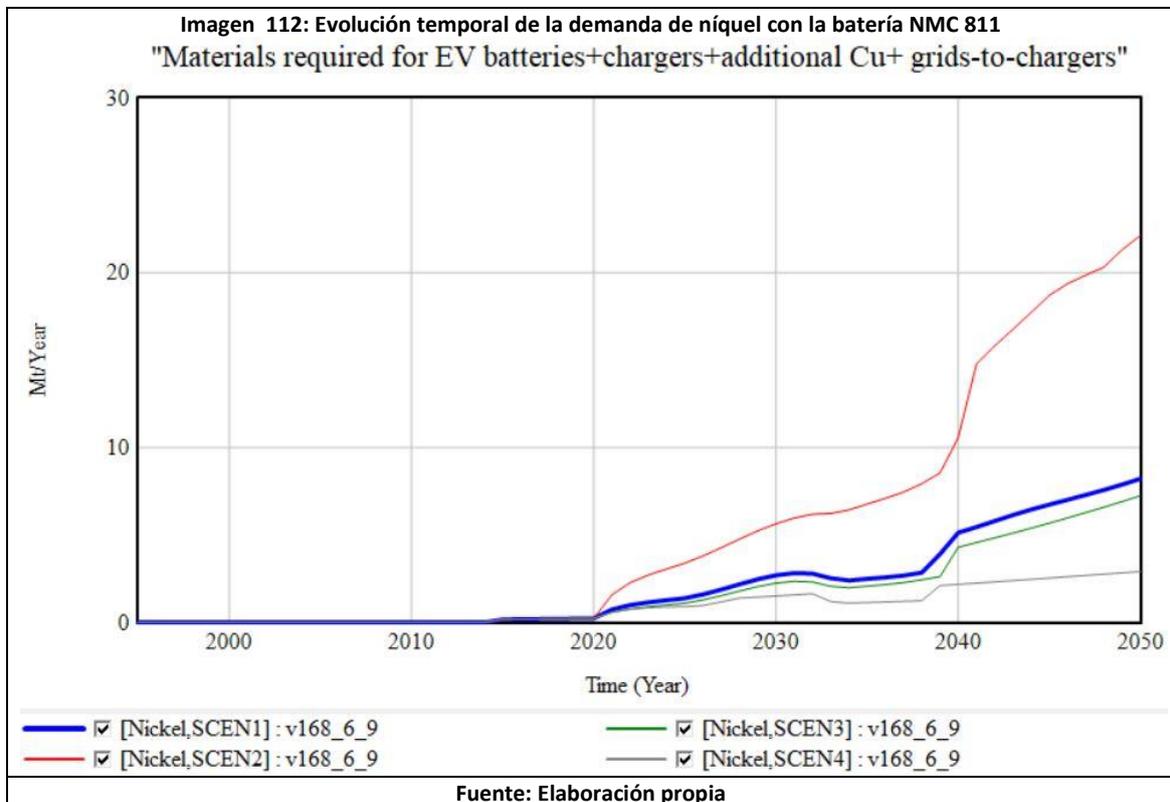
-Batería LiMnO₂



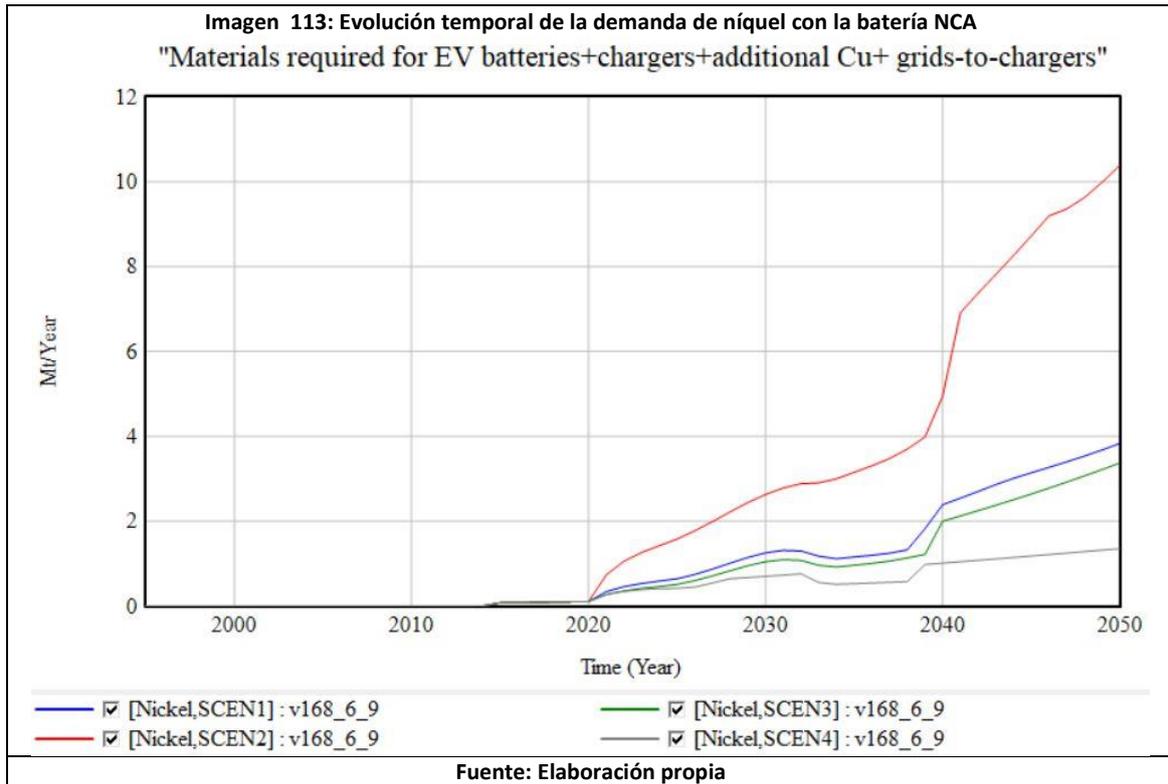
-Batería NCM 622



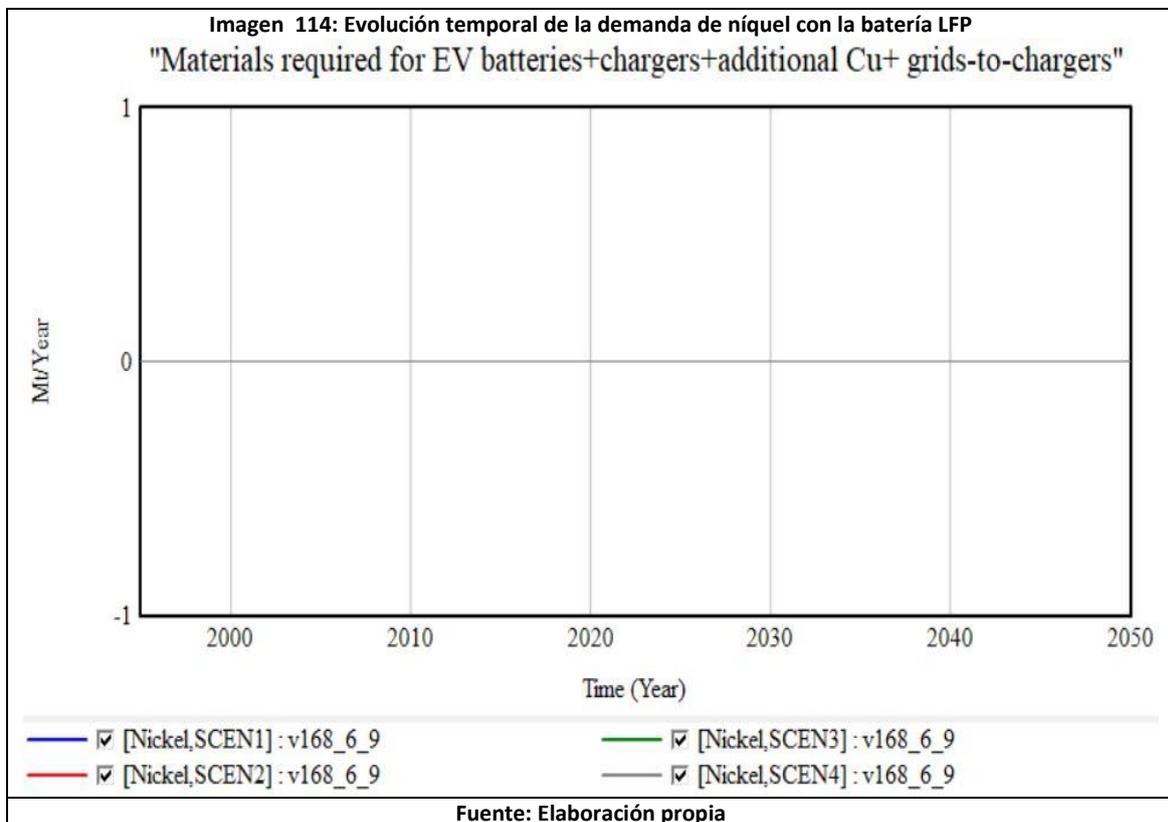
-Batería NMC 811



-Batería NCA



-Batería LFP



En lo respectivo al Níquel podemos repetir lo mismo que hemos dicho anteriormente para el cobre o el aluminio, obtenemos curvas ascendentes con valores que se sitúan entre los 1,5 Mt/año y las 22 Mt/año en el año 2050, pero en este caso, se presentan dos excepciones. Las baterías LiMnO₂ y las baterías LFP no presentan níquel, además como ninguna infraestructura posee tampoco este material nos encontramos que la demanda de cobalto con esas baterías es de 0.

6.3 Requerimientos de extracción de materiales

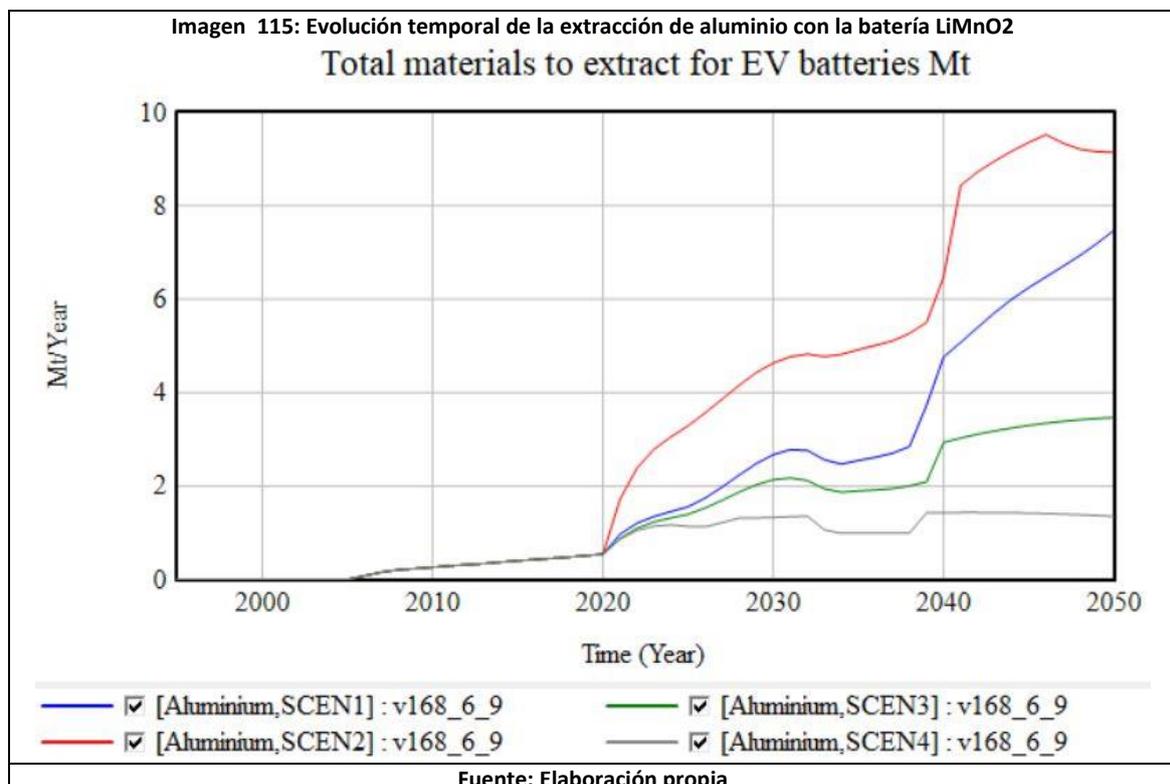
Ahora enunciaremos los materiales que se requeriría extraer de las minas debido a la demanda de todas las tecnologías de electrificación y los vehículos electrificados. En estos resultados están reflejados los materiales necesarios para conformar los vehículos electrificados y las diferentes infraestructuras para hacerlos funcionar (catenarias, puntos de carga...) junto con su ratio de reciclado que hace que la cantidad extraída de minerales sea menor a la demandada.

En la simulación debemos elegir el tipo de batería que queremos que lleven todos los vehículos electrificados a partir del año 2015 y así, podremos comparar los resultados utilizando los distintos tipos de baterías.

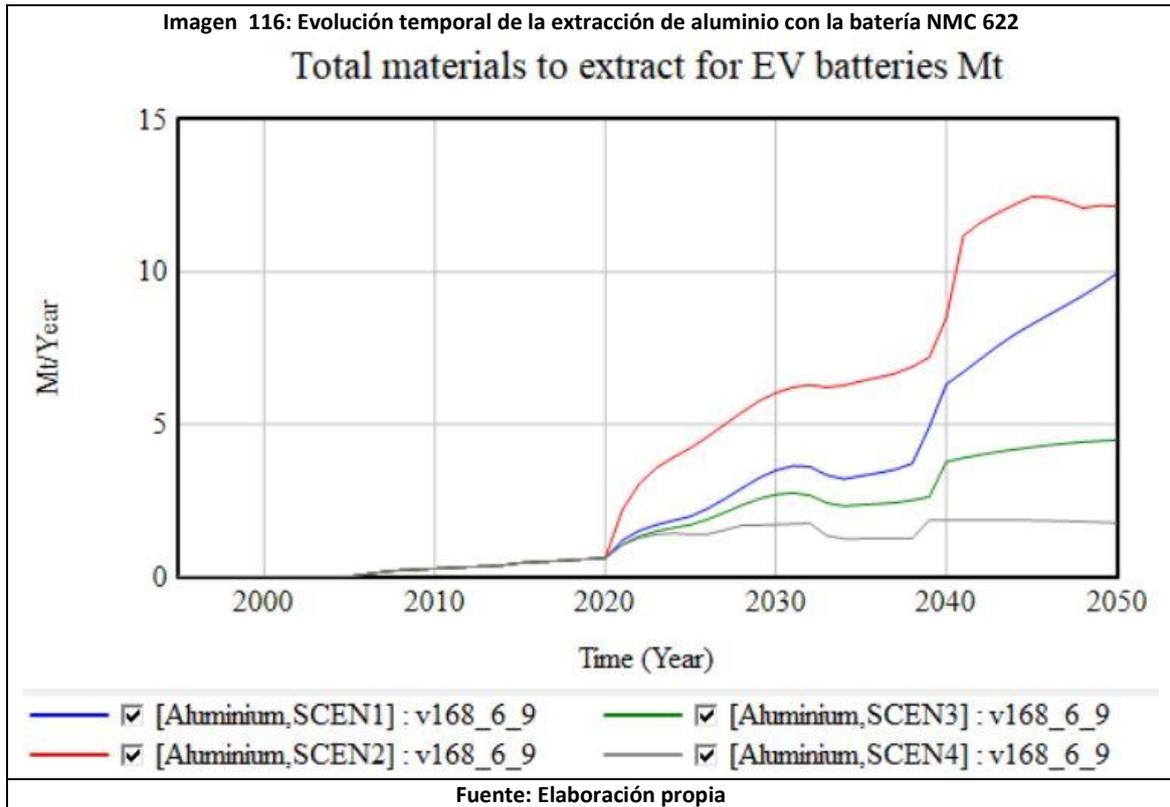
Expresaremos los resultados según el material del que queremos obtener la información y la batería elegida.

Aluminio

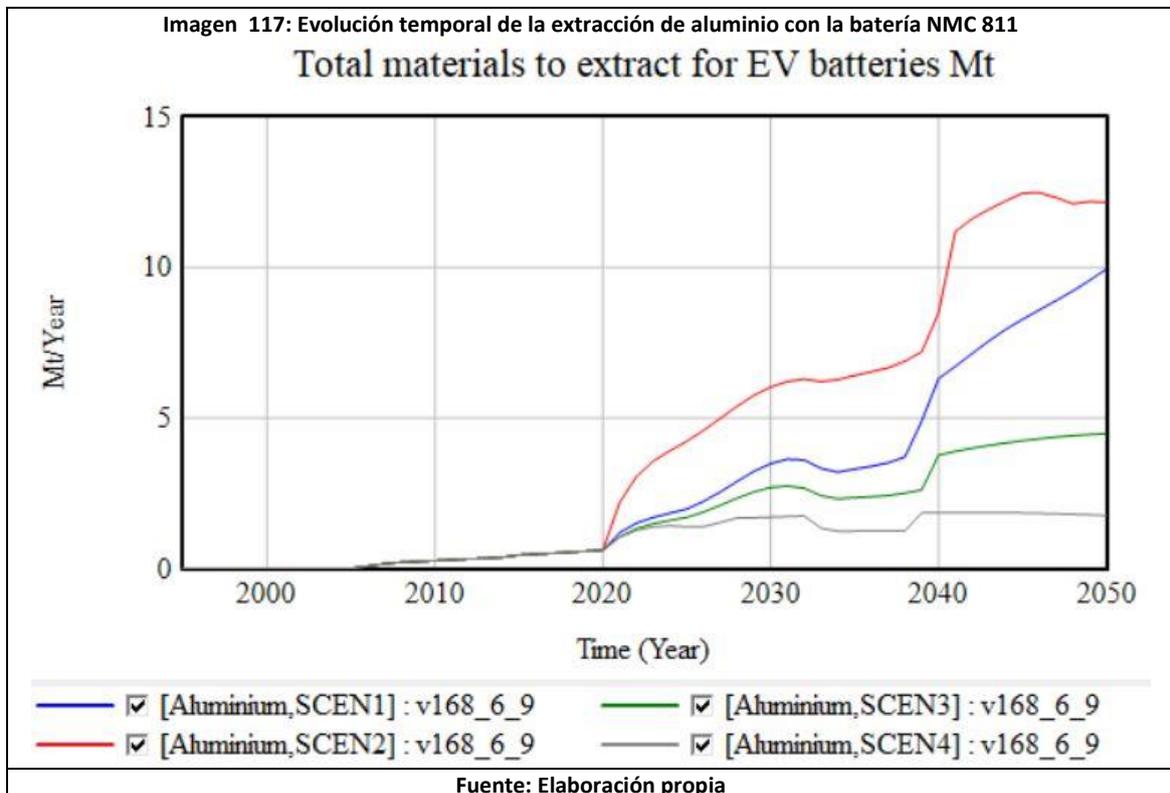
-Batería LiMnO₂



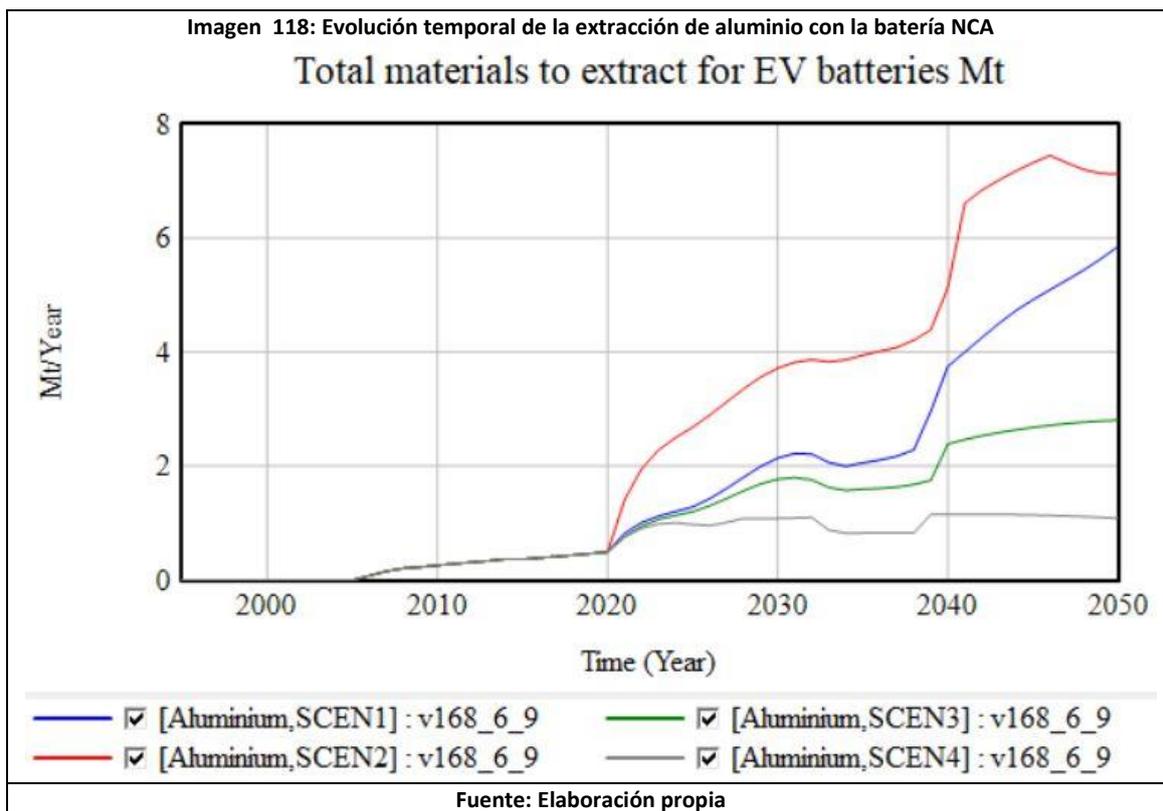
-Batería NMC 622



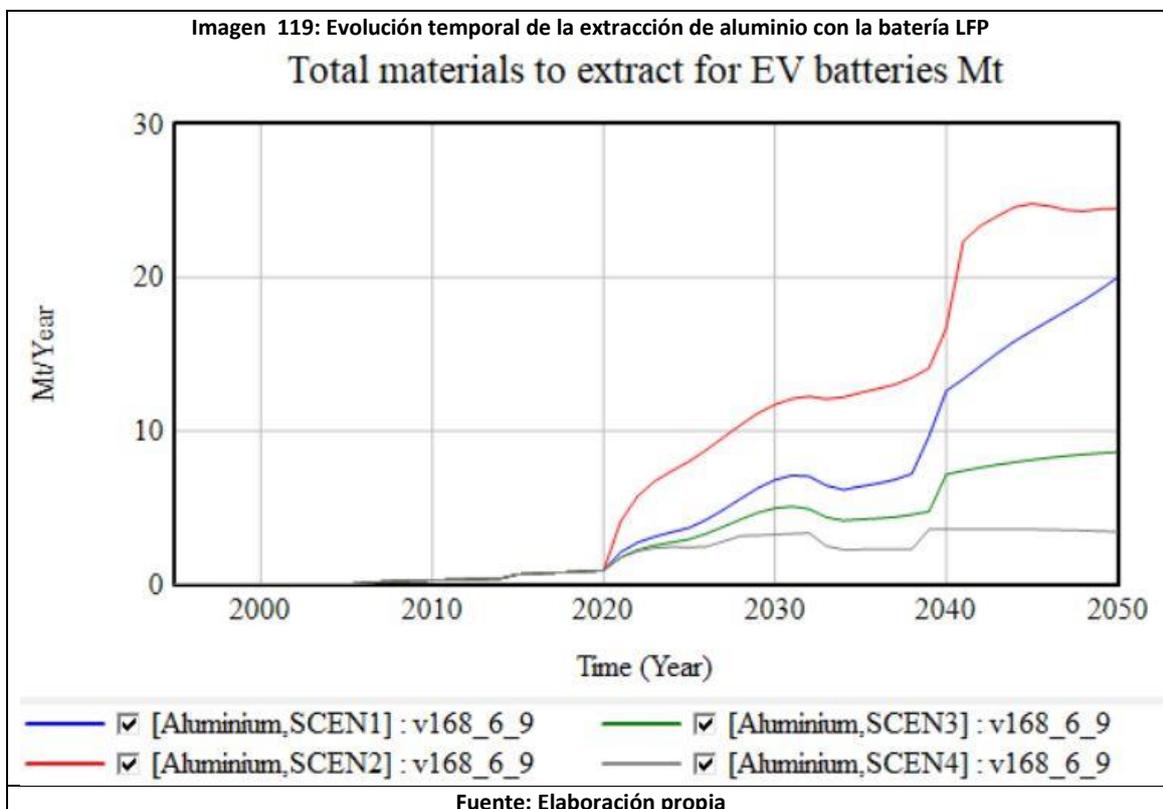
-Batería NMC 811



-Batería NCA



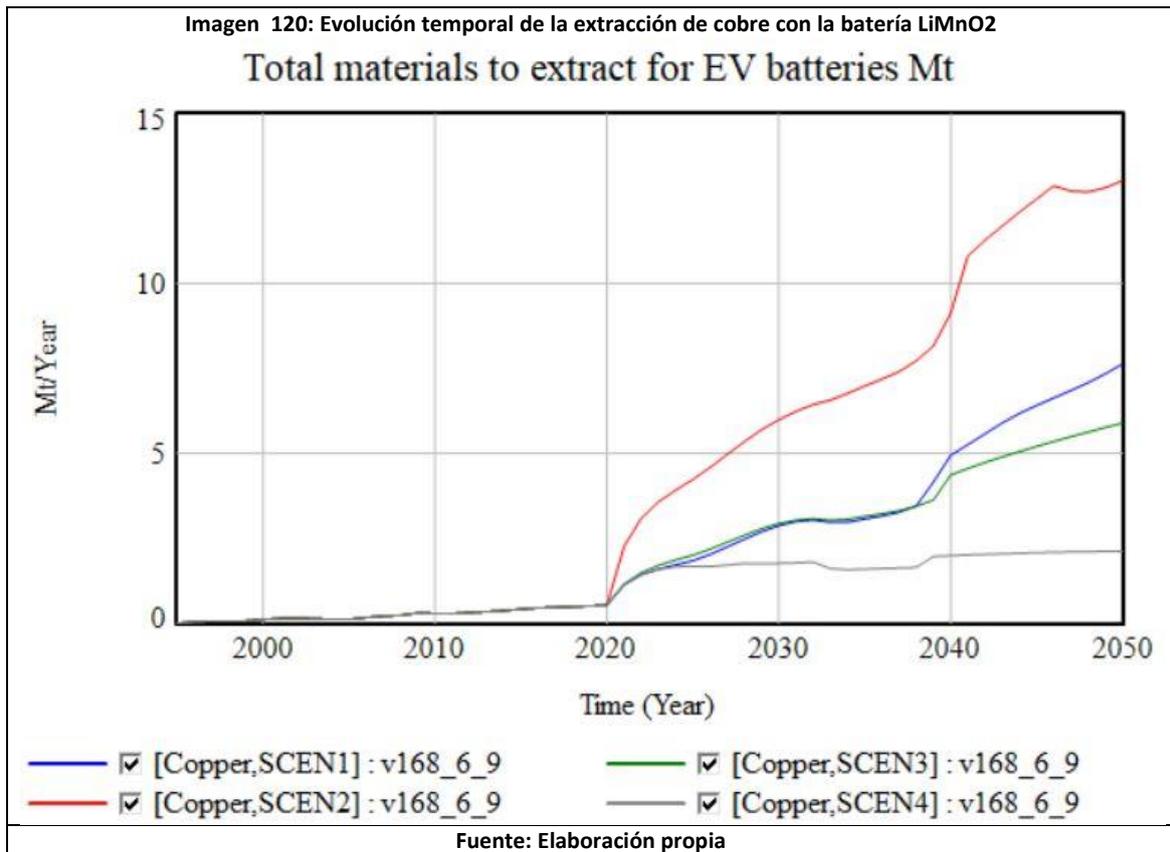
-Batería LFP



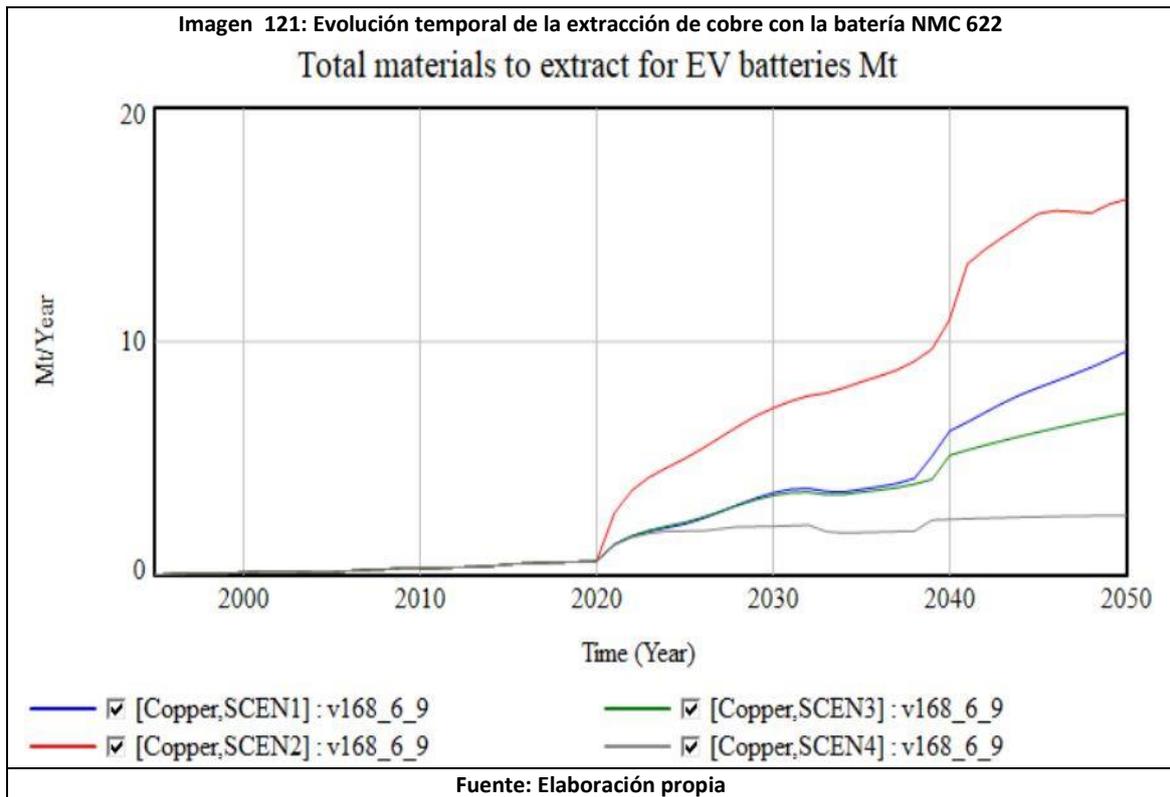
En el aluminio podemos enunciar que obtenemos una gráfica ascendente en casi todos los escenarios y baterías. Los valores temporales varían de forma notable según el escenario o batería adoptada tomando valores entre los 1Mt/año (escenarios con un número reducido de baterías y empleando baterías con una baja cantidad de aluminio) y las 24 Mt/año (escenarios con alto número de baterías, que poseen gran cantidad de aluminio) en el año 2050.

Cobre

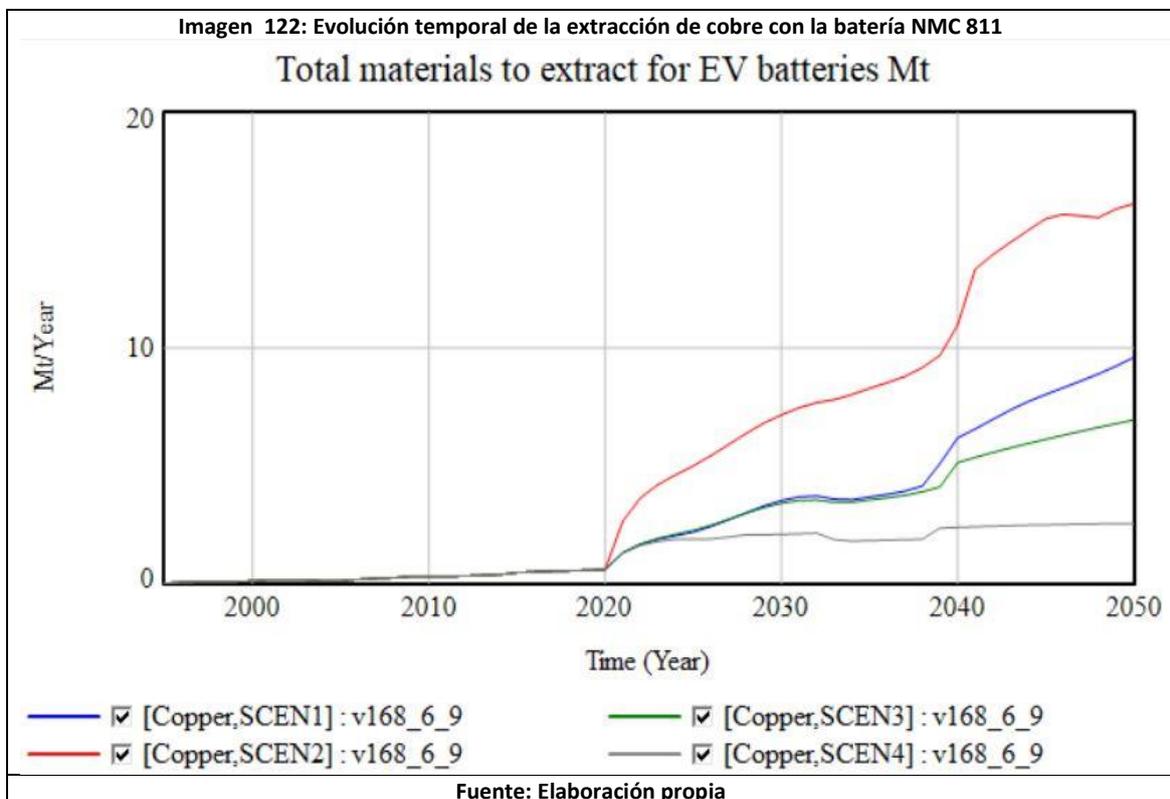
-Batería LiMnO₂



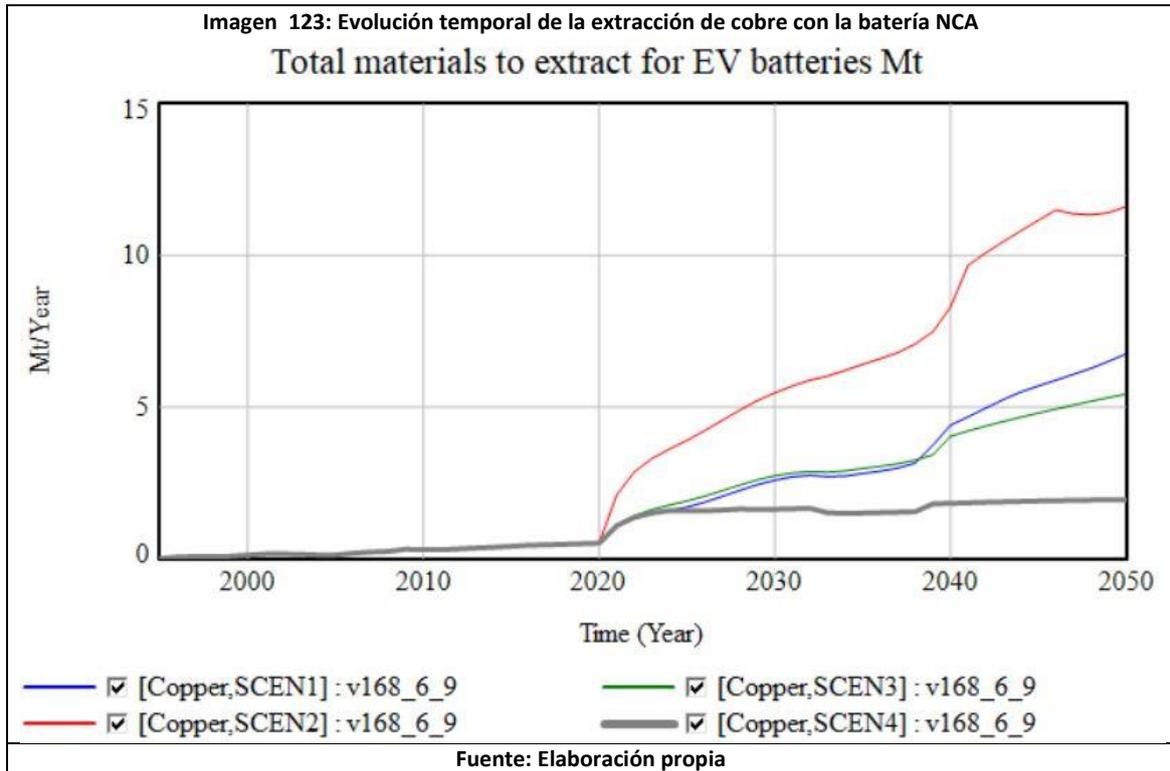
-Batería NMC 622



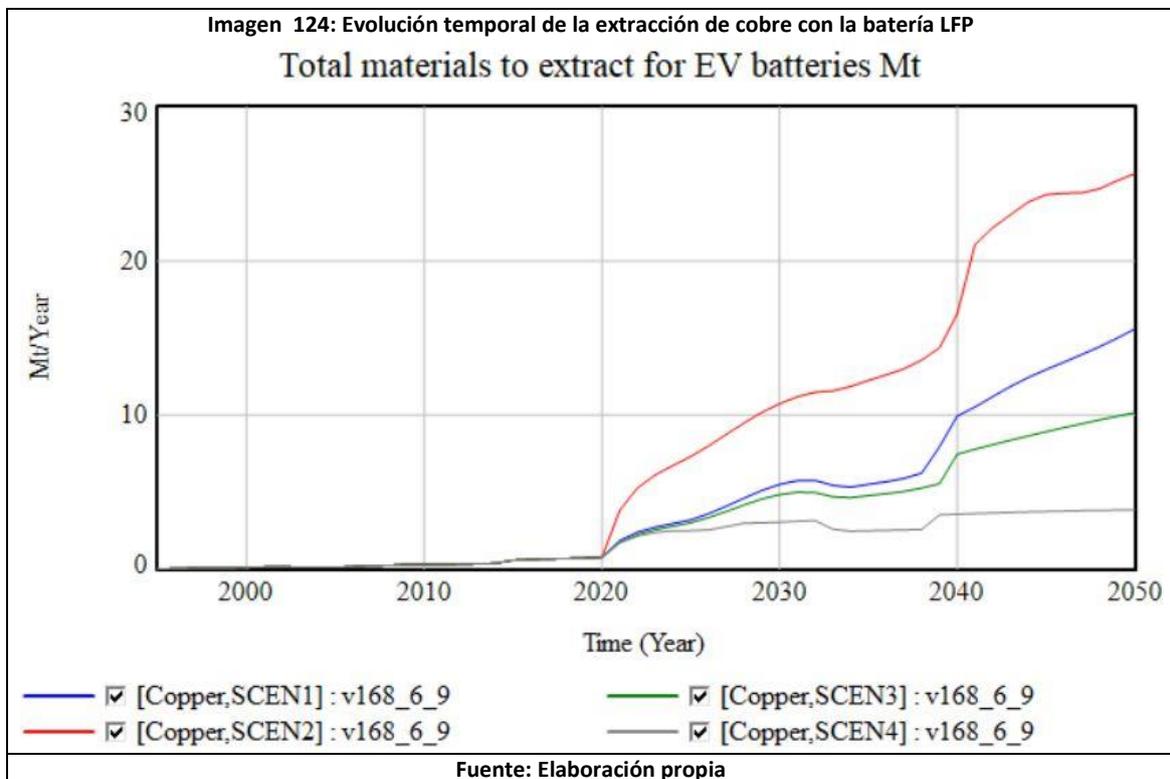
-Batería NMC 811



-Batería NCA



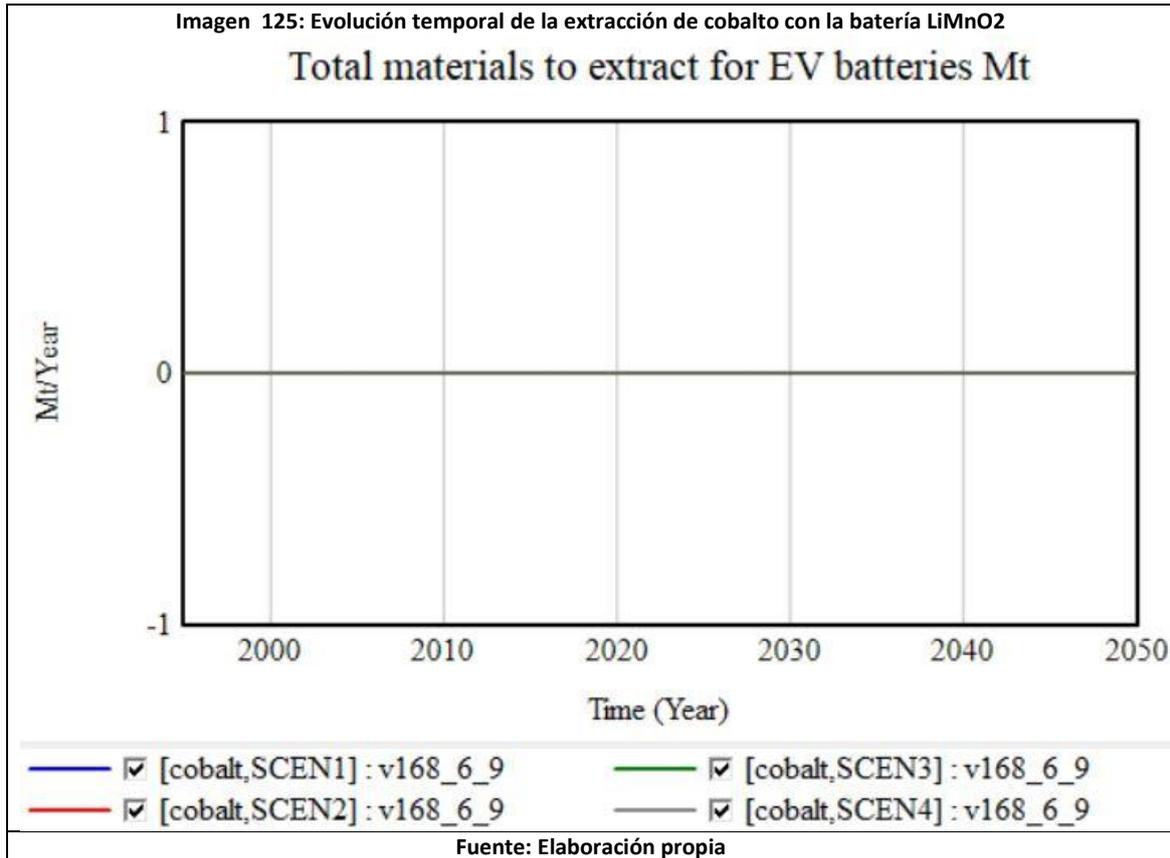
-Batería LFP



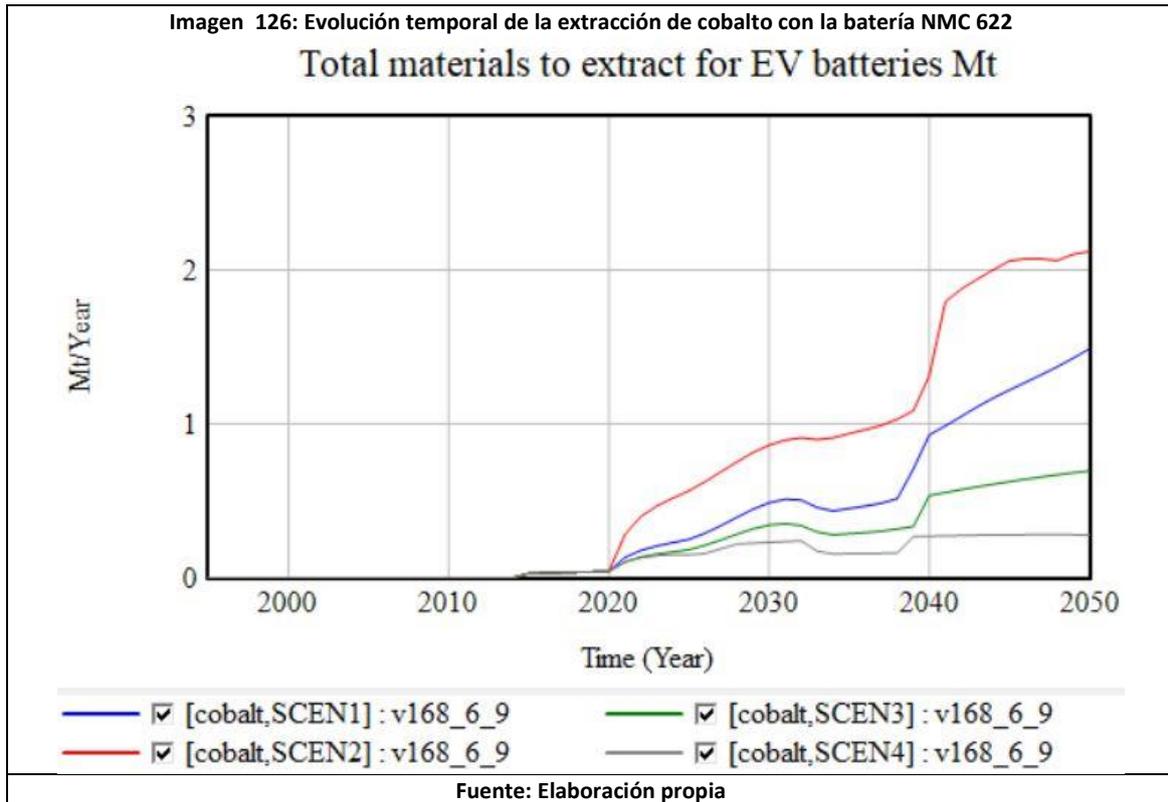
En el cobre podemos enunciar algo similar al aluminio, obtenemos curvas ascendentes en todos los escenarios y baterías en las que los valores varían de forma acusada dependiendo del escenario o batería empleados. En este caso nos encontramos valores entre las 2,5 Mt/año y las 26 Mt/año en el año 2050.

Cobalto

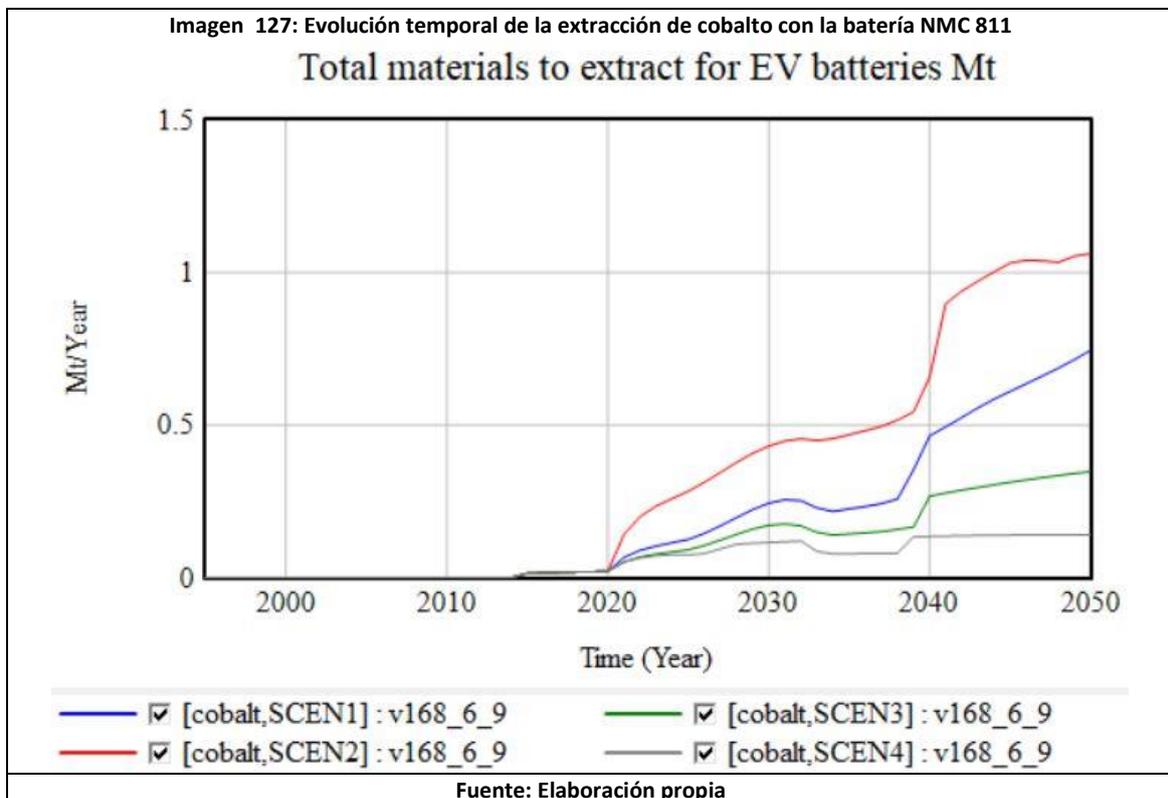
-Batería LiMnO₂



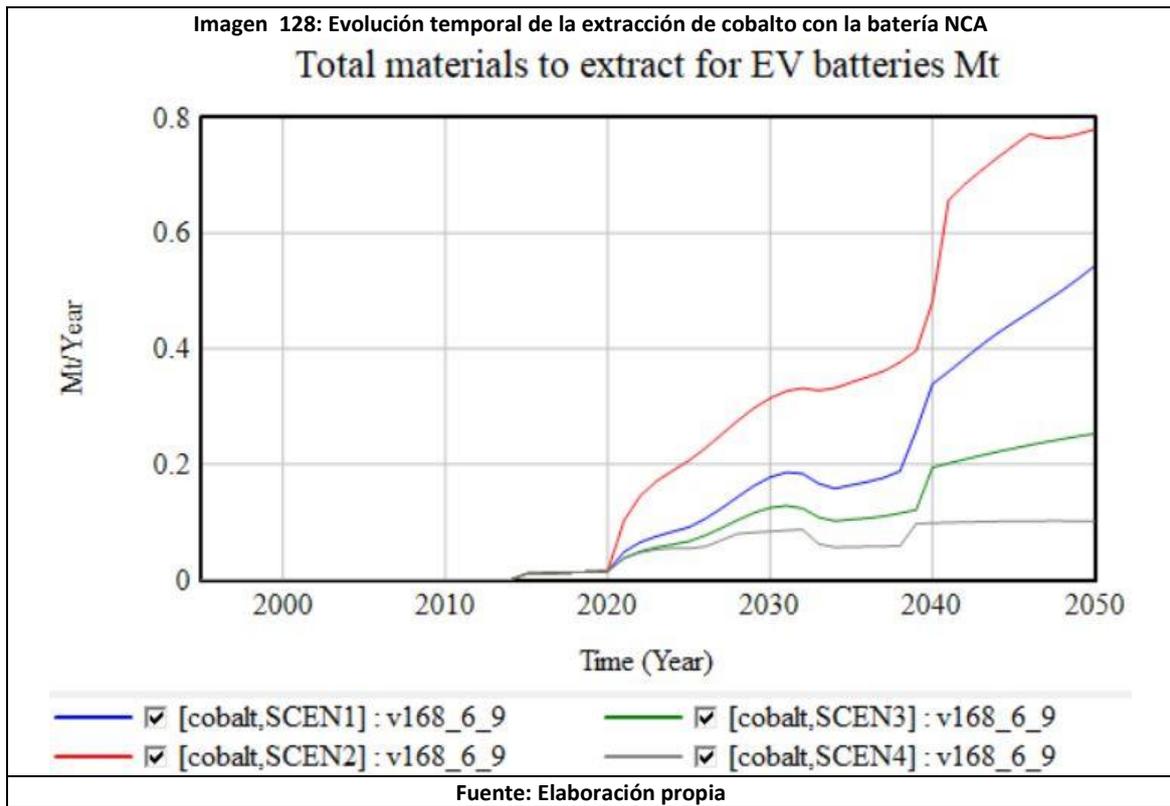
-Batería NMC 622



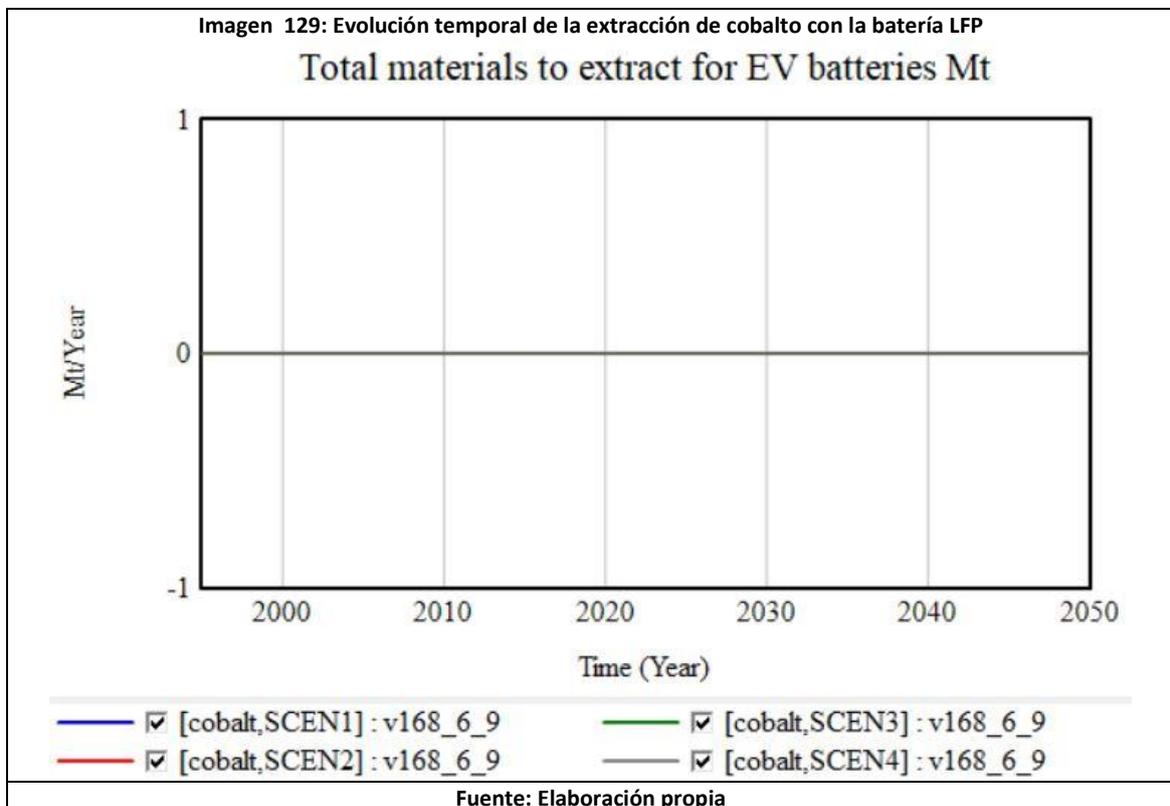
-Batería NMC 811



-Batería NCA



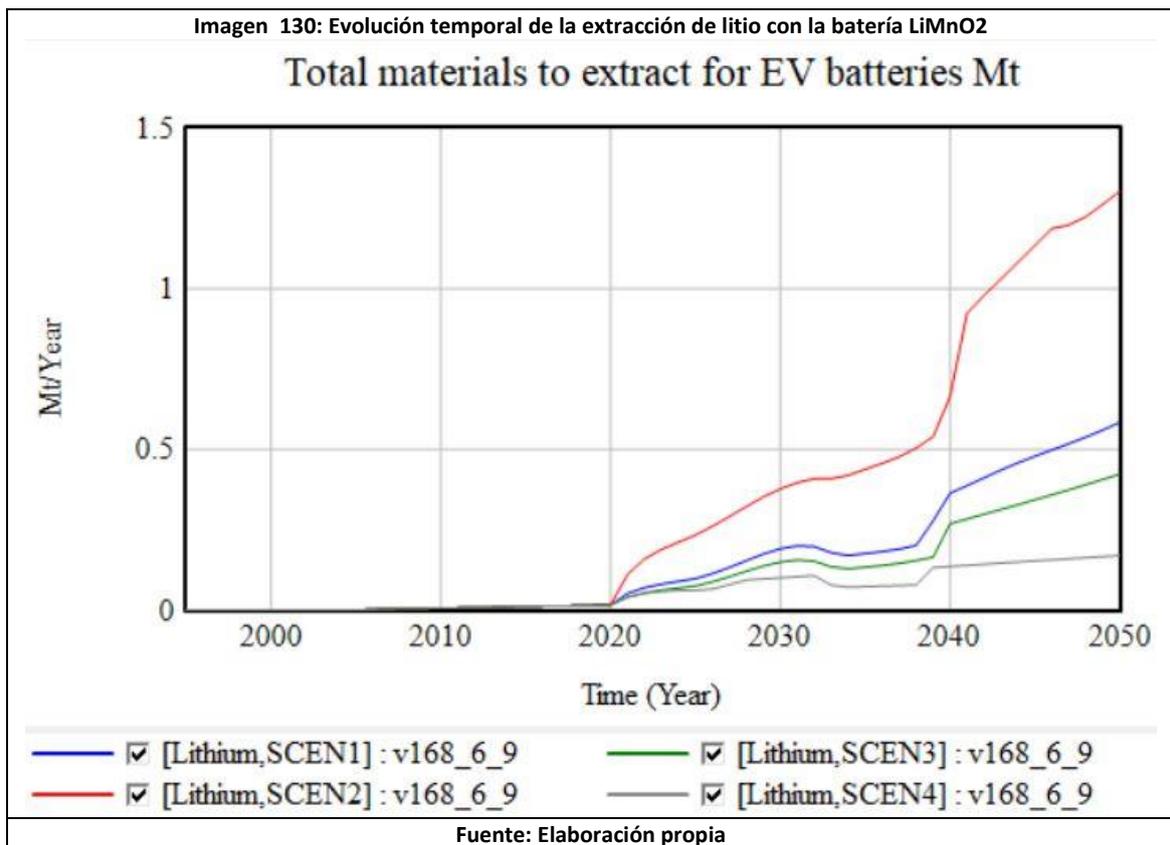
-Batería LFP



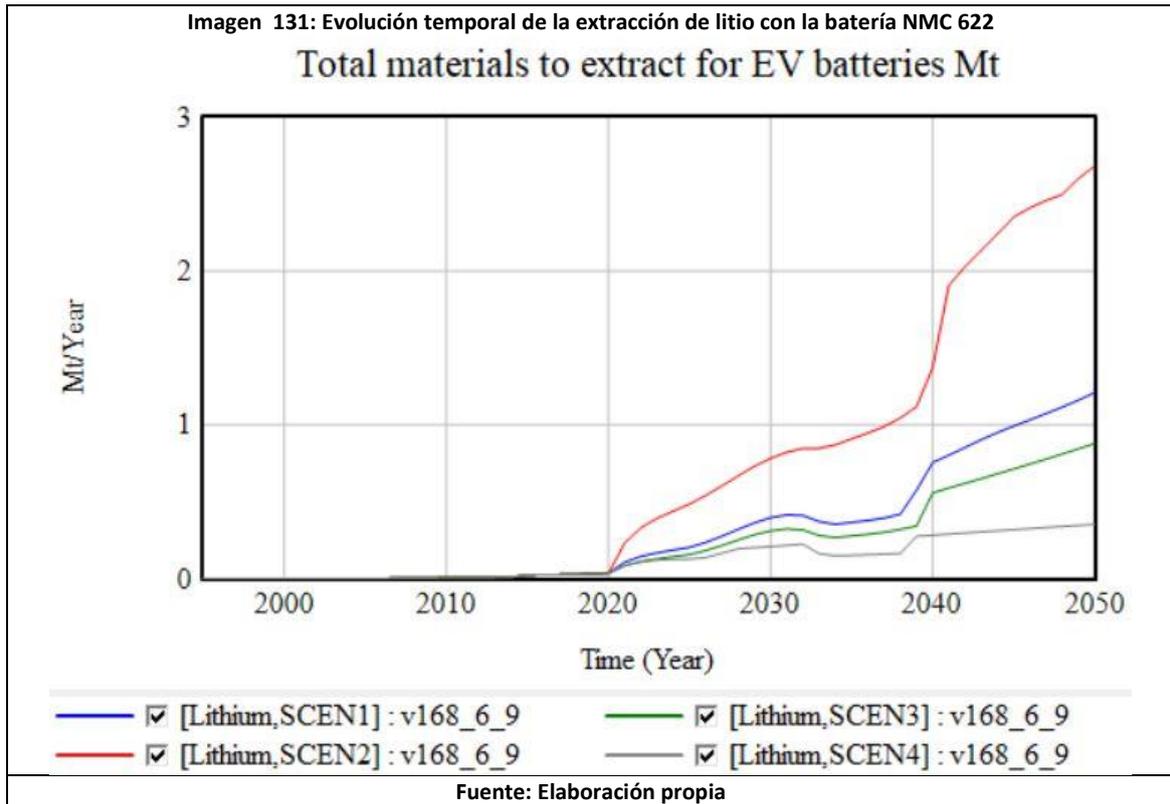
En lo respectivo al cobalto podemos repetir lo mismo que hemos dicho anteriormente para el cobre o el aluminio, obtenemos curvas ascendentes con valores que se sitúan entre las 0,1 Mt/año y las 2,1 Mt/año en el año 2050, pero en este caso, se presentan dos excepciones. Las baterías LiMnO₂ y las baterías LFP no presentan cobalto, además como ninguna infraestructura posee tampoco este material nos encontramos que la demanda de cobalto con esas baterías es de 0.

Litio

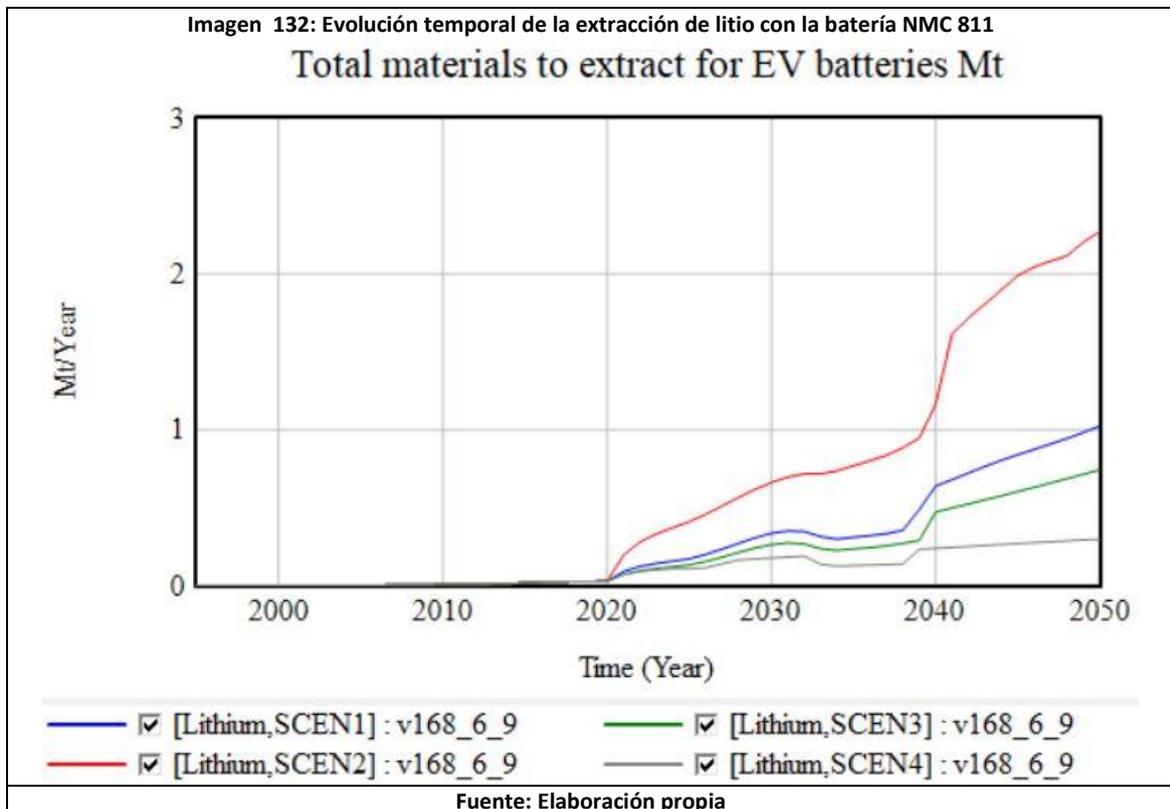
-Batería LiMnO₂



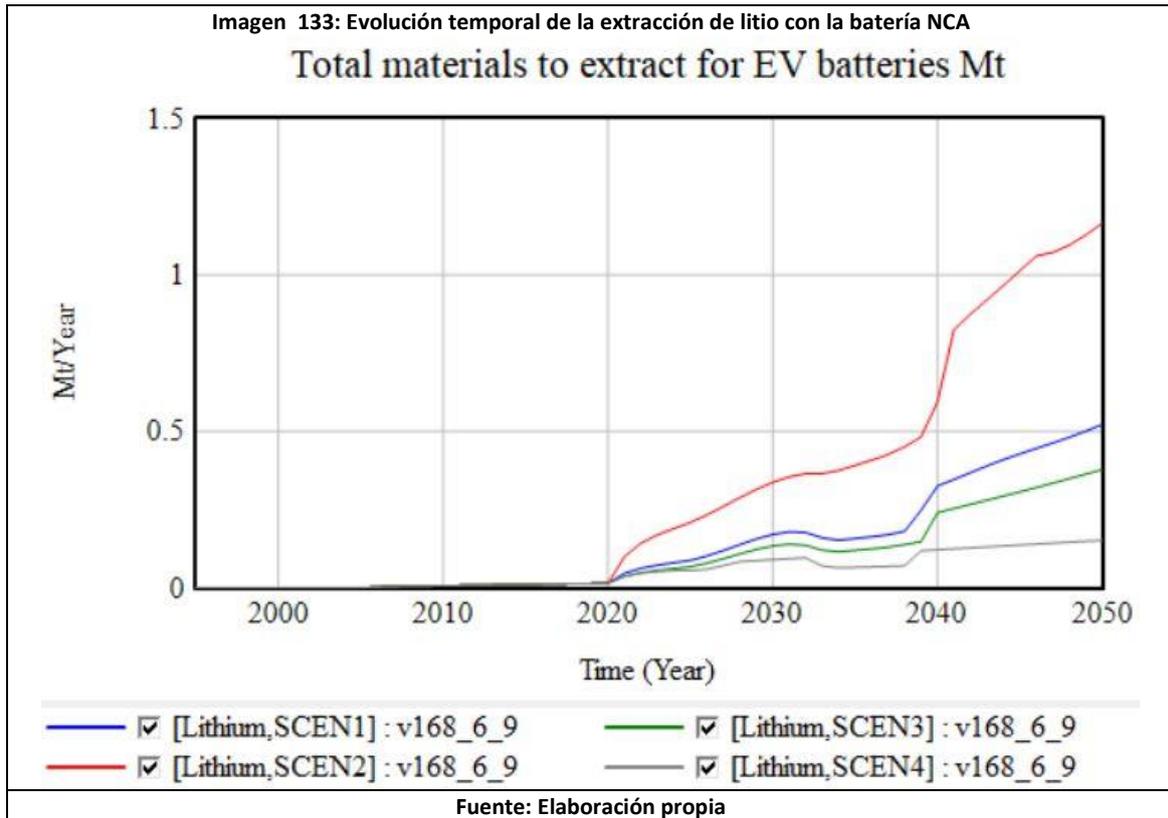
-Batería NMC 622



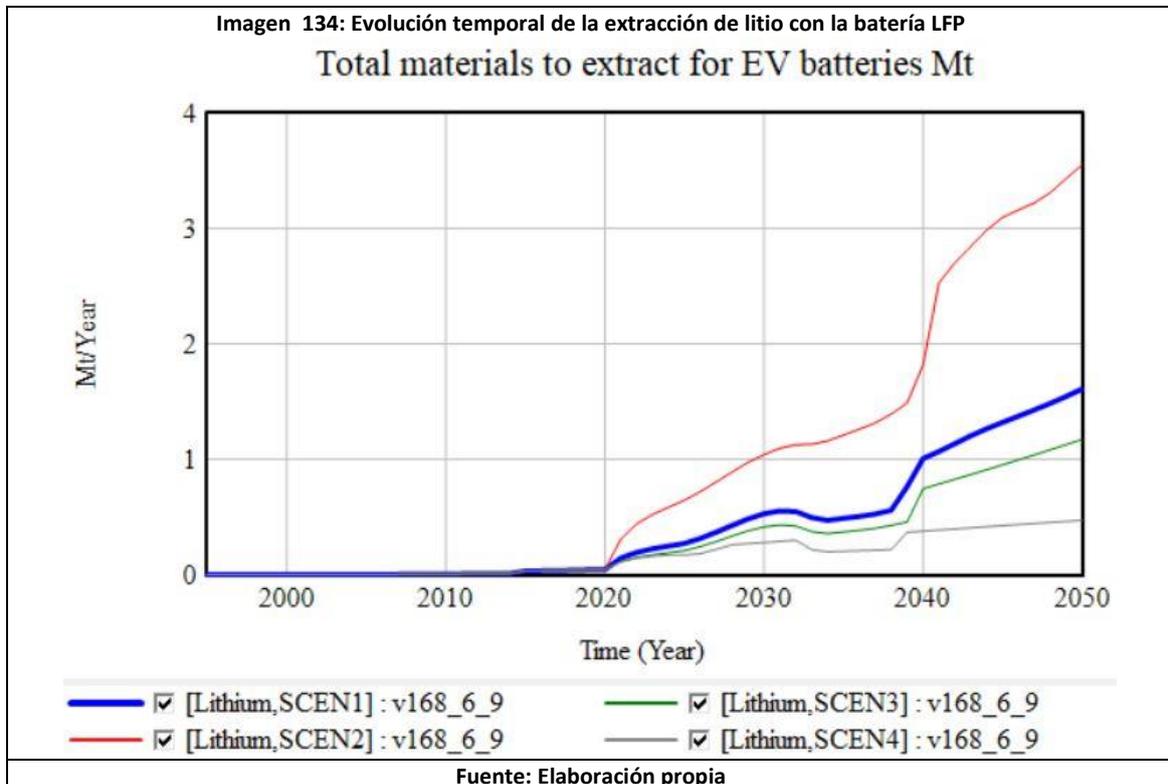
-Batería NMC 811



-Batería NCA



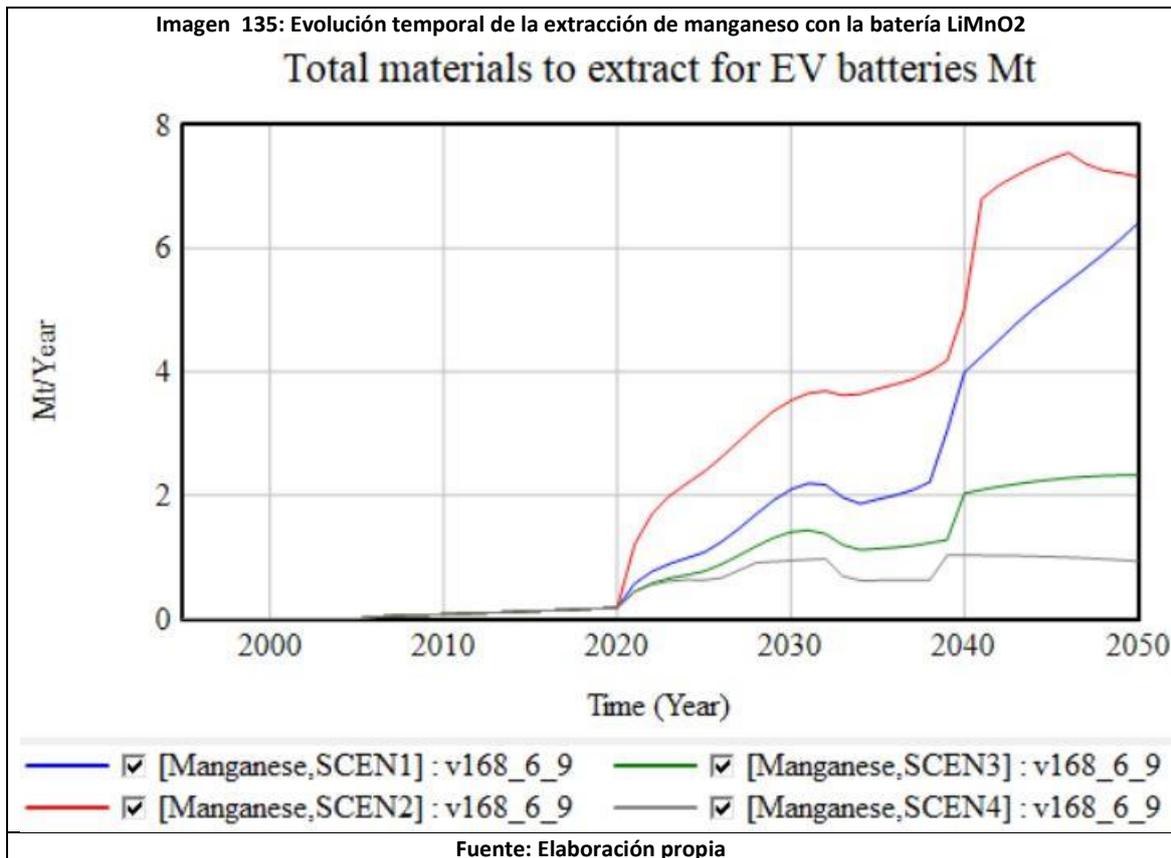
-Batería LFP



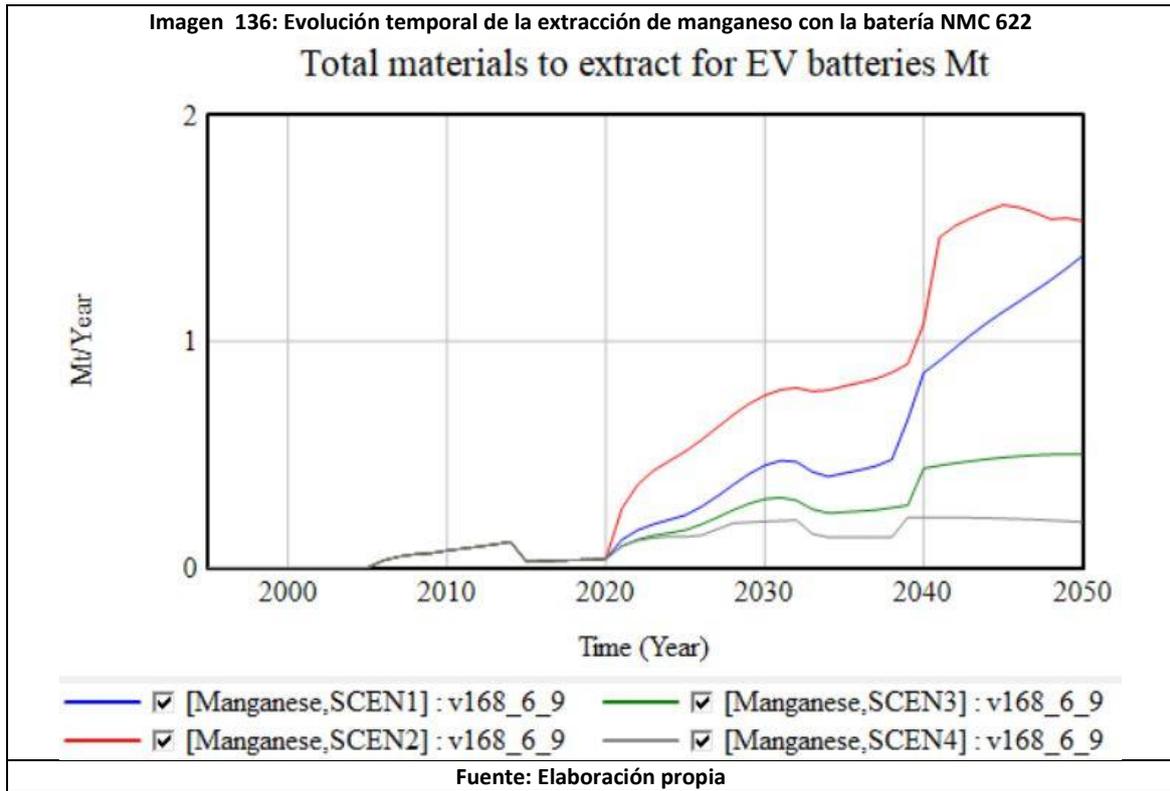
En el litio podemos enunciar algo similar al aluminio, obtenemos curvas ascendentes en todos los escenarios y baterías en las que los valores varían de forma acusada dependiendo del escenario o batería empleados. En este caso nos encontramos valores entre las 0,15 Mt/año y las 3,5 Mt/año en el año 2050.

Manganeso

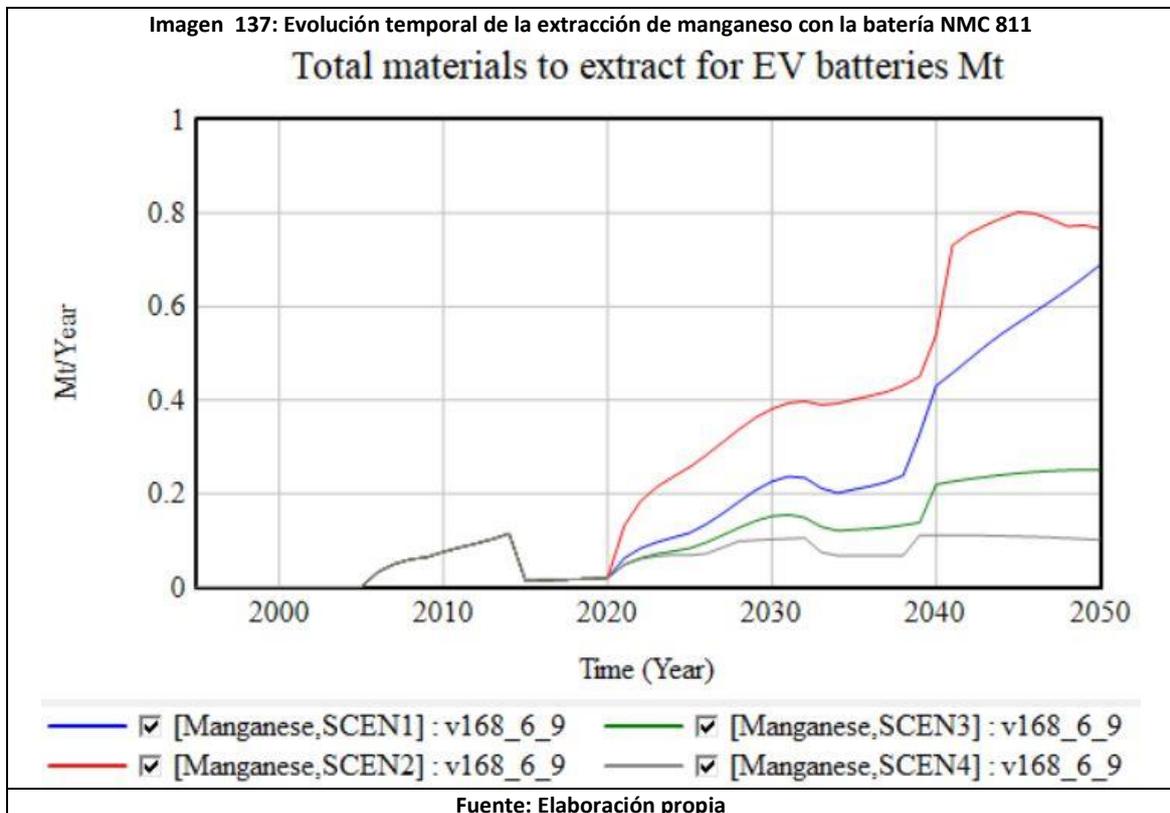
-Batería LiMnO₂



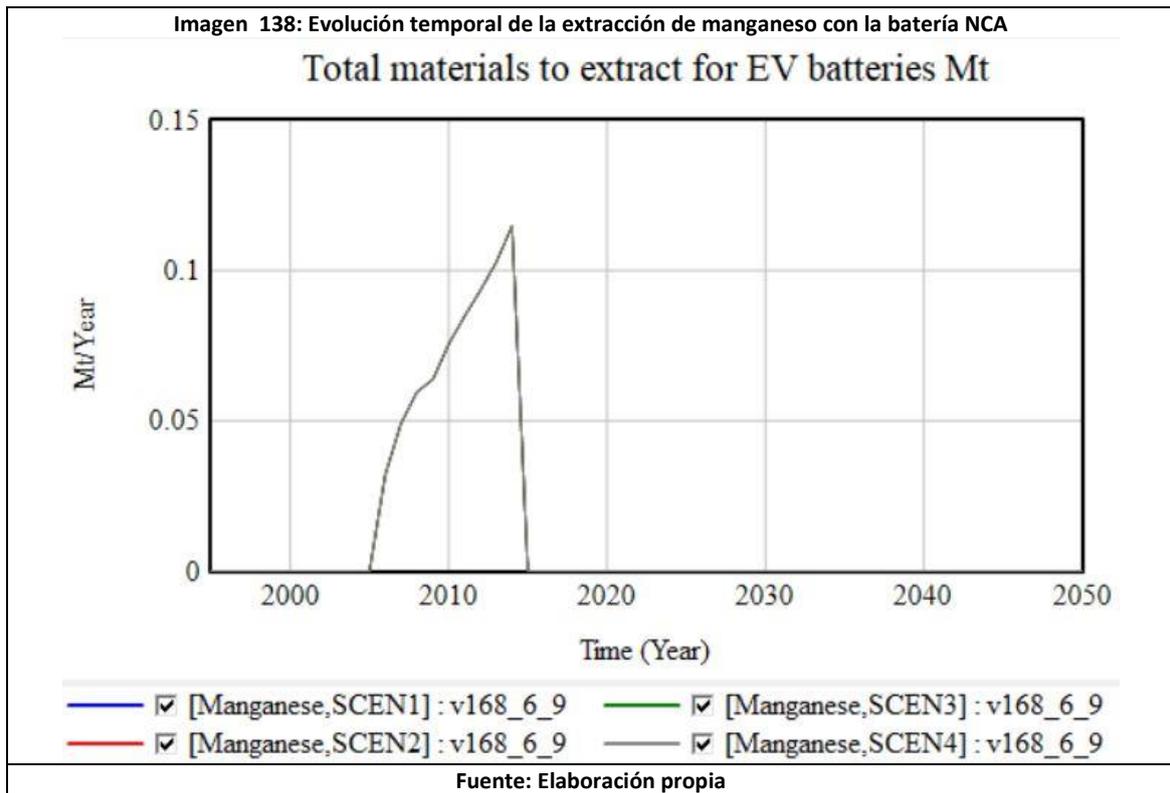
-Batería NMC 622



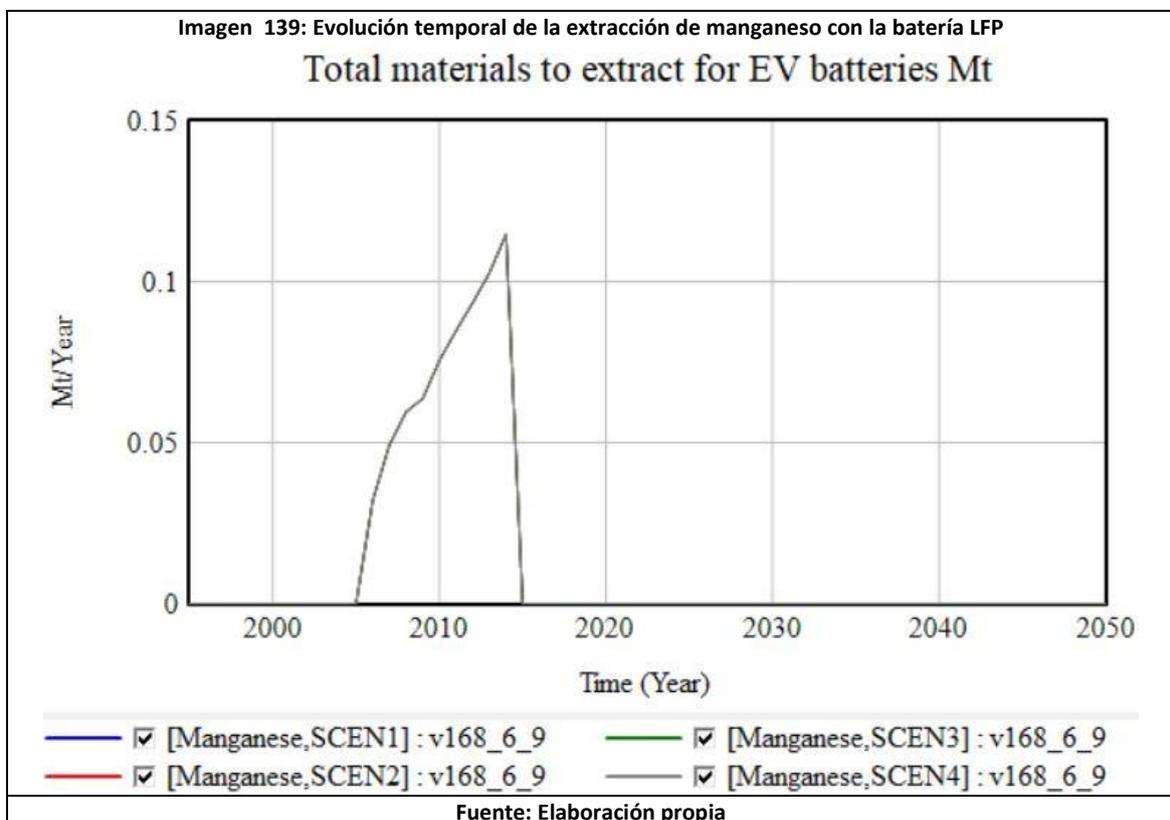
-Batería NMC 811



-Batería NCA



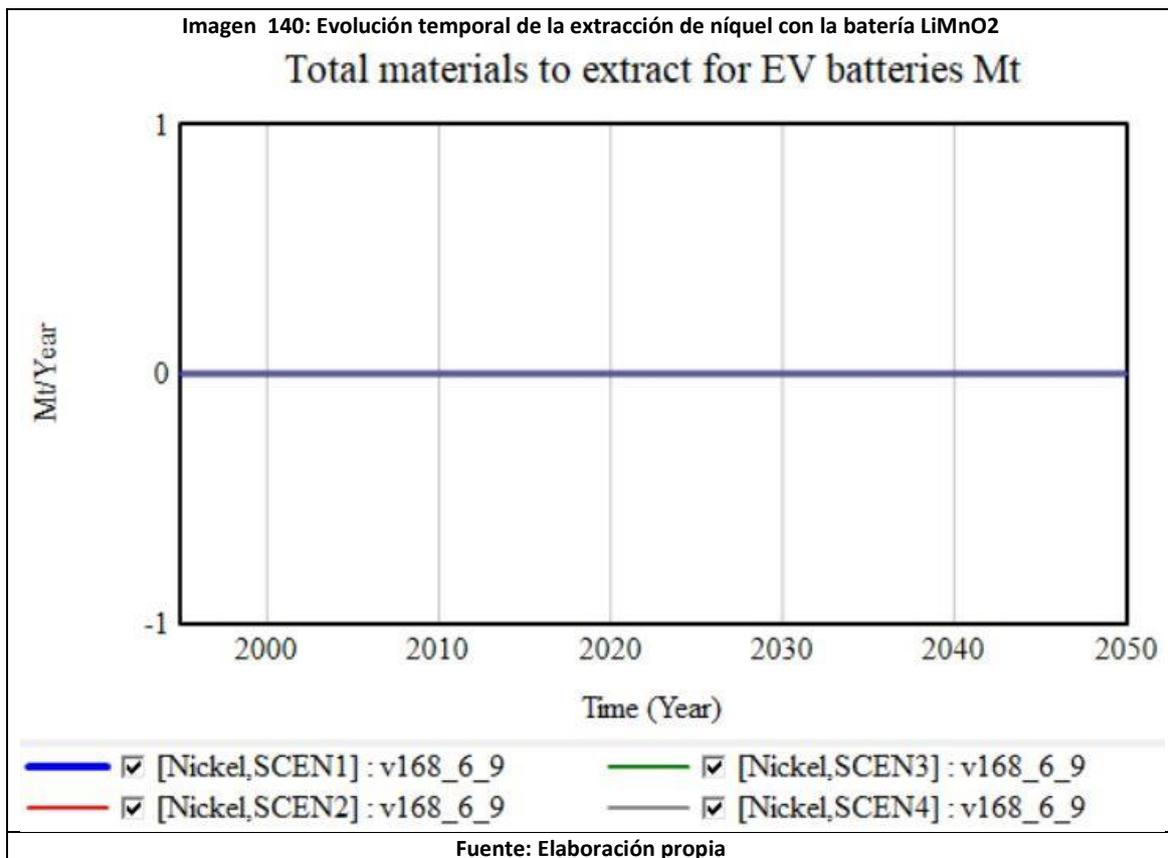
-Batería LFP



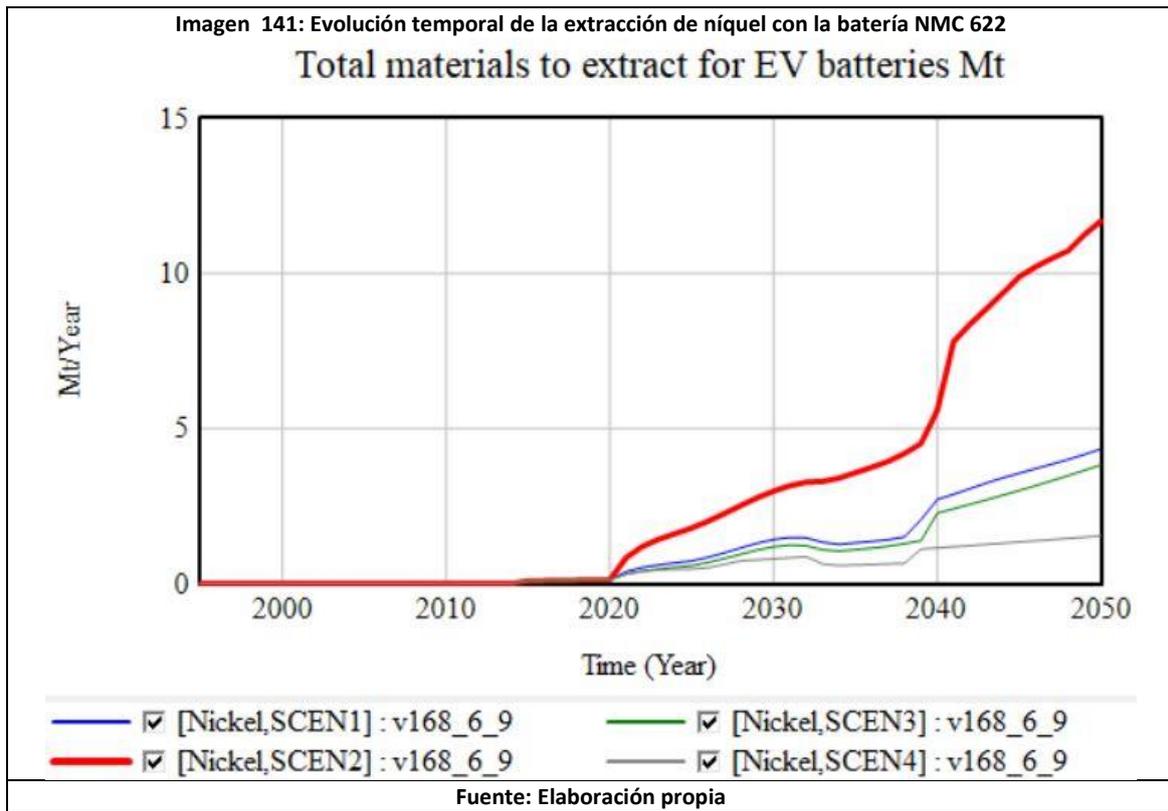
En lo respectivo al cobalto podemos repetir lo mismo que hemos dicho anteriormente para el cobre o el aluminio, obtenemos curvas ascendentes con valores que se sitúan entre los 0,1 Mt/año y las 7 Mt/año en el año 2050, pero en este caso, se presentan dos excepciones. Las baterías NCA y las baterías LFP no presentan manganeso, además como ninguna infraestructura posee tampoco este material nos encontramos que la demanda de cobalto con esas baterías es de 0 a partir del 2015 (ya que anteriormente se supone que todas las baterías son LiMnO₂).

Níquel

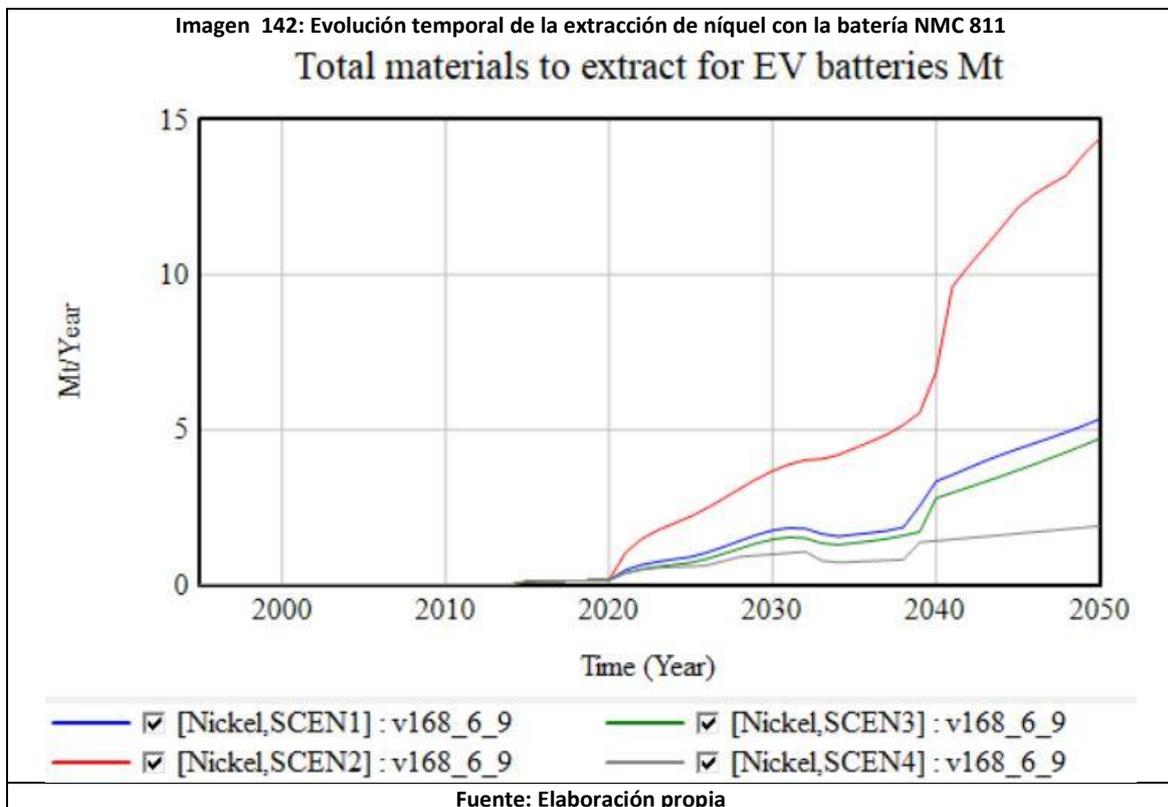
-Batería LiMnO₂



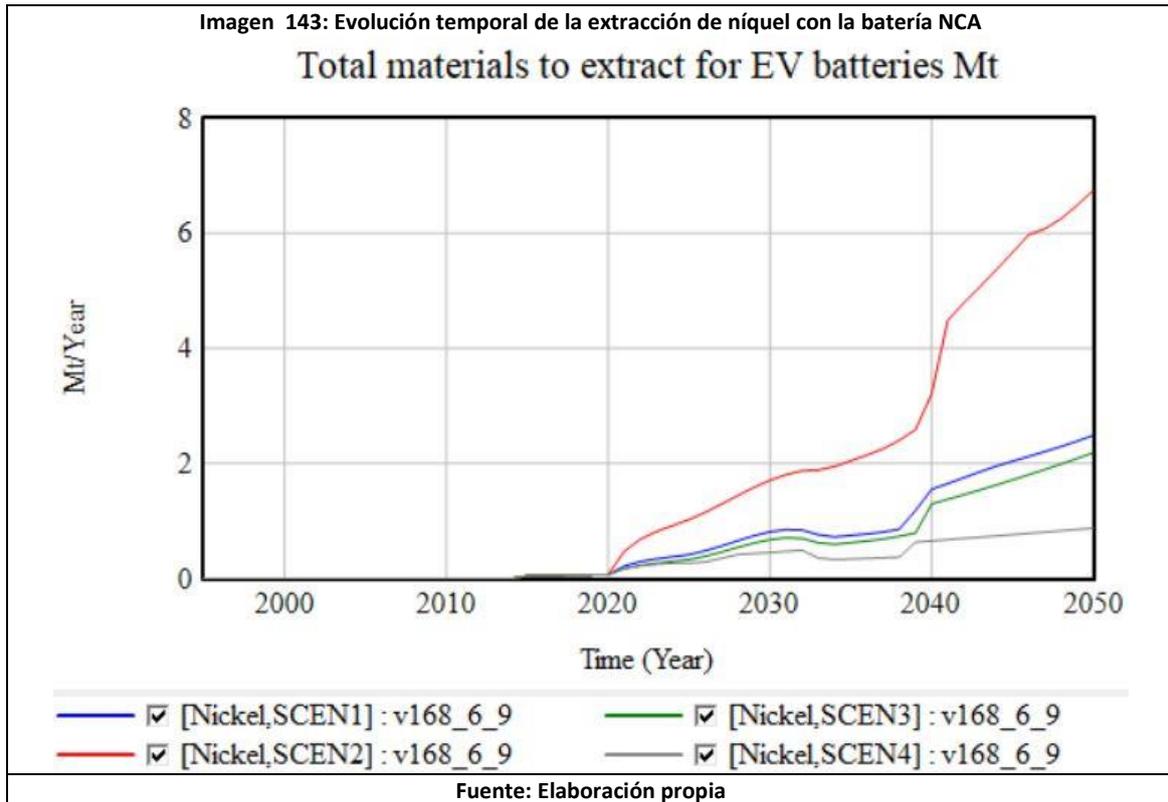
-Batería NCM 622



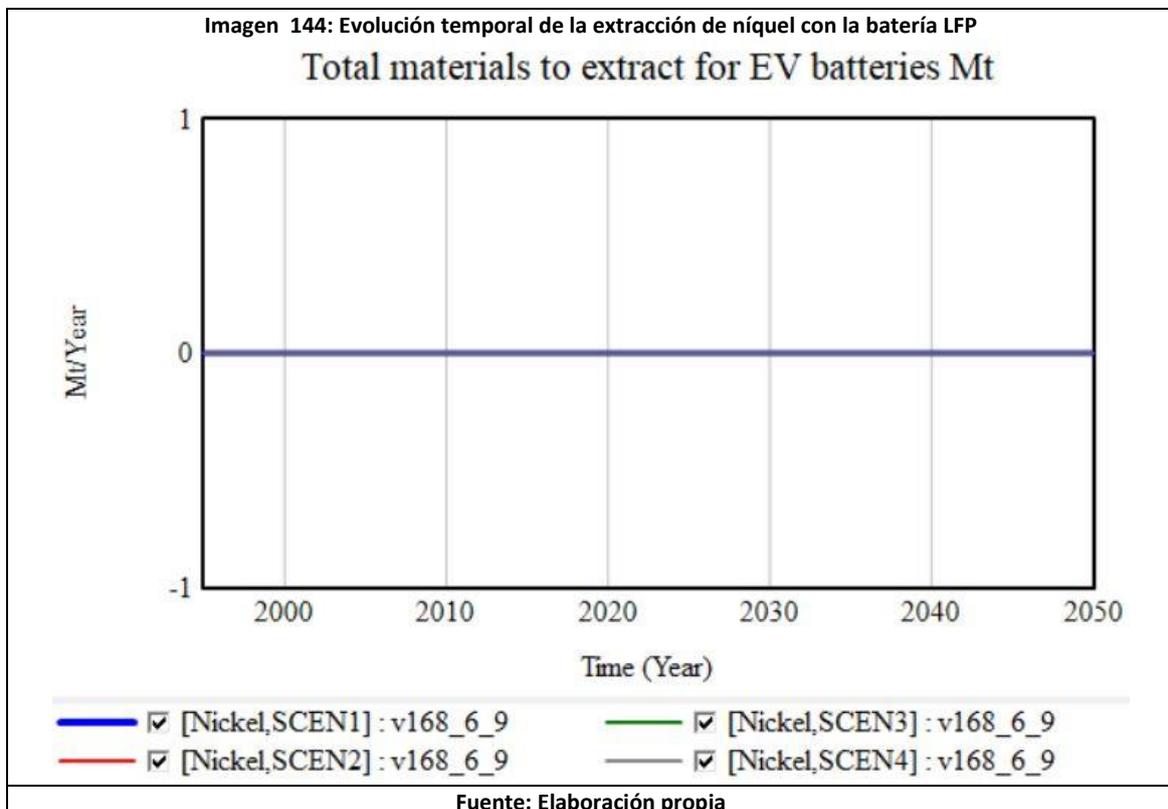
-Batería NMC 811



-Batería NCA



-Batería LFP



En lo respectivo al Níquel podemos repetir lo mismo que hemos dicho anteriormente para el cobre o el aluminio, obtenemos curvas ascendentes con valores que se sitúan entre los 1 Mt/año y las 14 Mt/año en el año 2050, pero en este caso, se presentan dos excepciones. Las baterías LiMnO₂ y las baterías LFP no presentan níquel, además como ninguna infraestructura posee tampoco este material nos encontramos que la demanda de cobalto con esas baterías es de 0.

6.4 Demanda de los materiales respecto a las reservas

Finalmente enunciaremos la demanda general de los materiales respecto a sus reservas, representaremos la demanda, tanto de todas las tecnologías de electrificación y los vehículos electrificados, como del resto de la economía, por lo tanto en estos resultados están reflejados los materiales necesarios para cubrir la demanda mundial de los minerales.

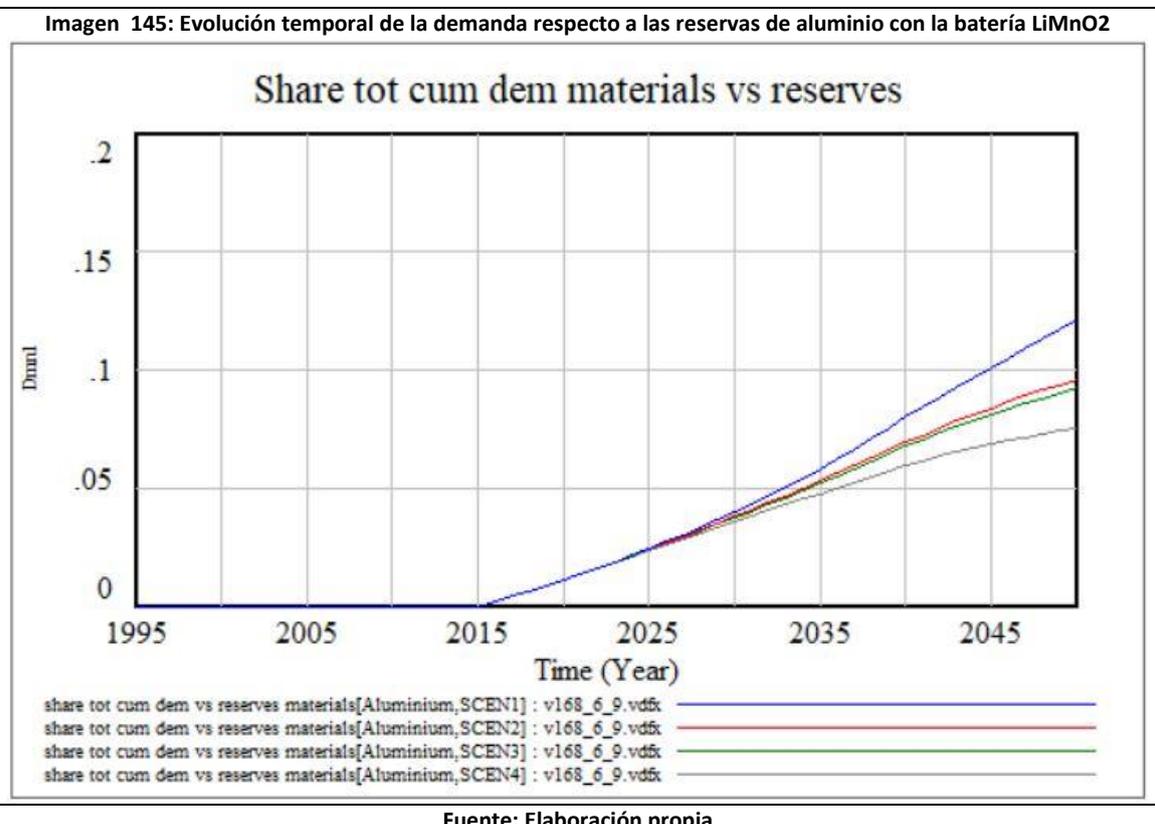
En la simulación debemos elegir el tipo de batería que queremos que lleven todos los vehículos electrificados a partir del año 2015 y así, podremos comparar los resultados utilizando los distintos tipos de baterías.

Expresaremos los resultados según el material del que queremos obtener la información y la batería elegida.

Aluminio

-Batería LiMnO₂

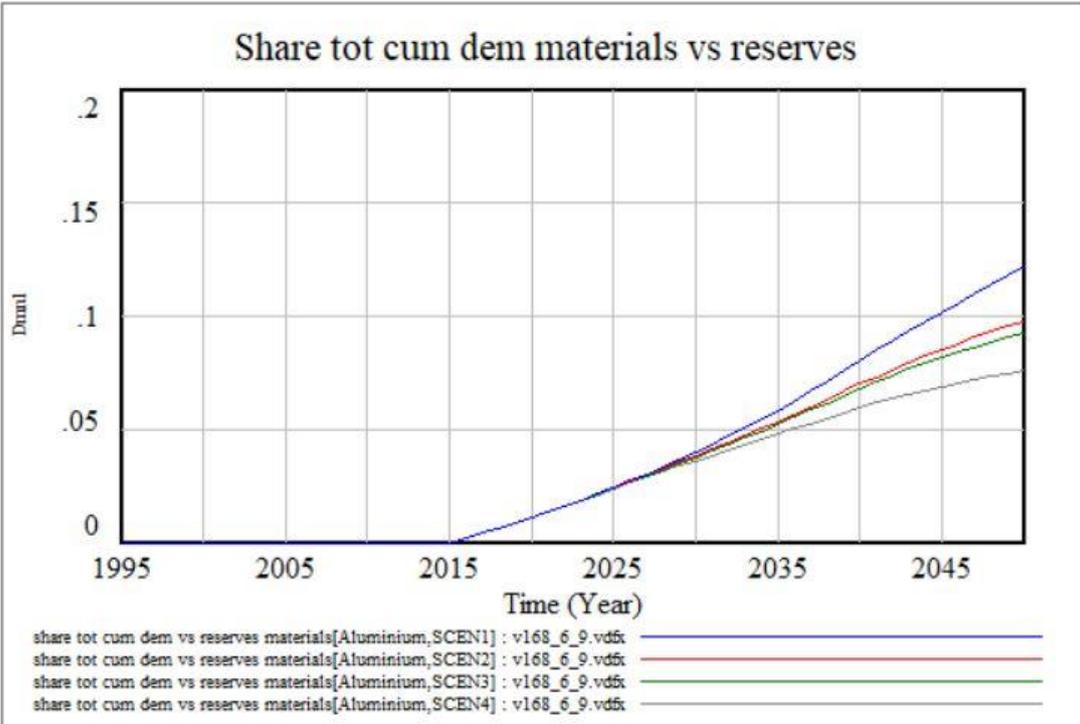
Imagen 145: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de aluminio con la batería LiMnO₂



Fuente: Elaboración propia

-Batería NMC 622

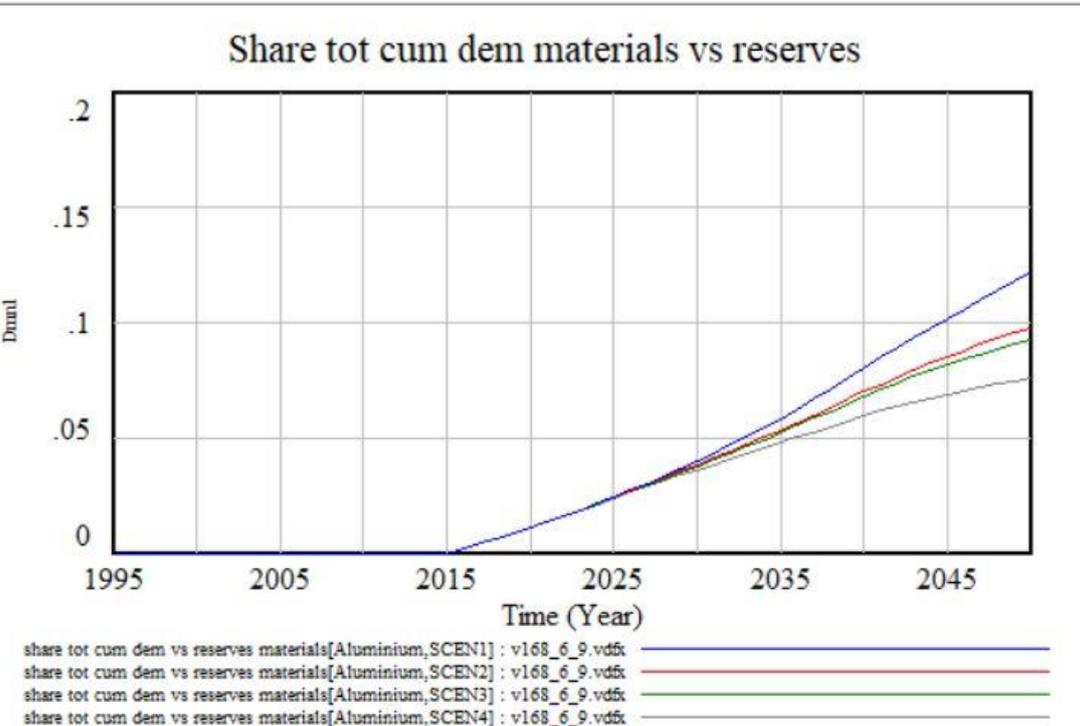
Imagen 146: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de aluminio con la batería NMC 622



Fuente: Elaboración propia

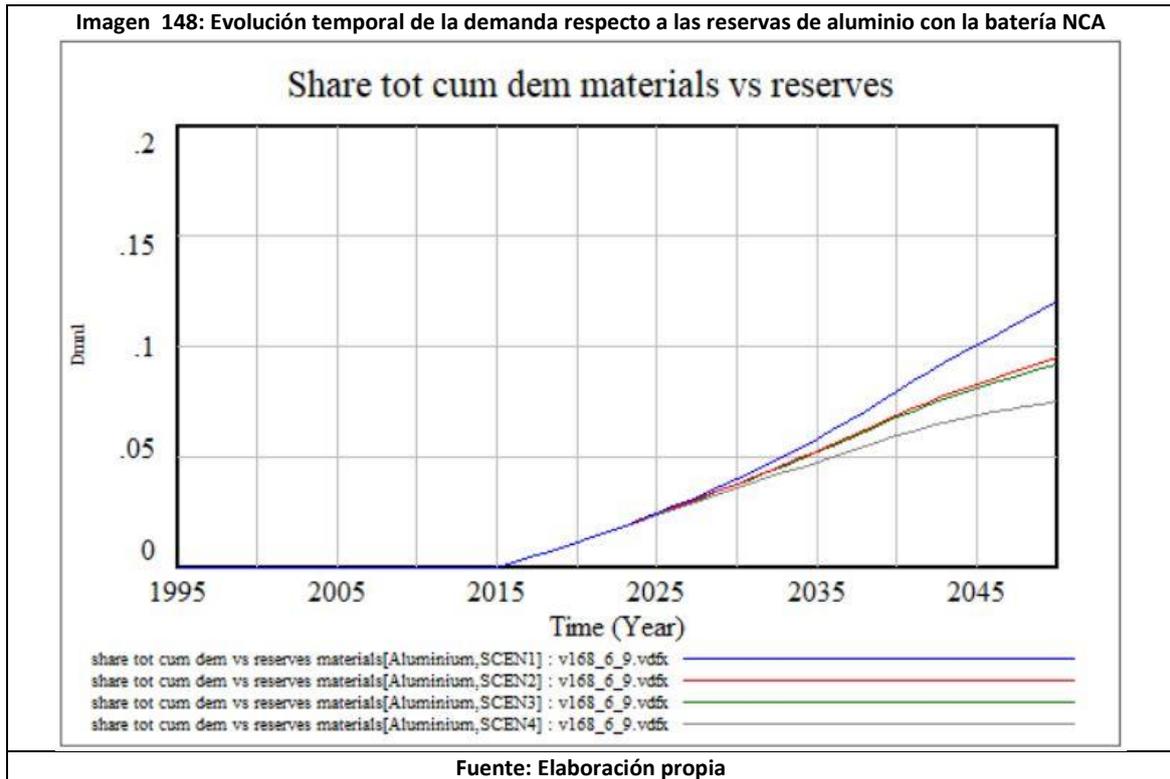
-Batería NMC 811

Imagen 147: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de aluminio con la batería NMC 811

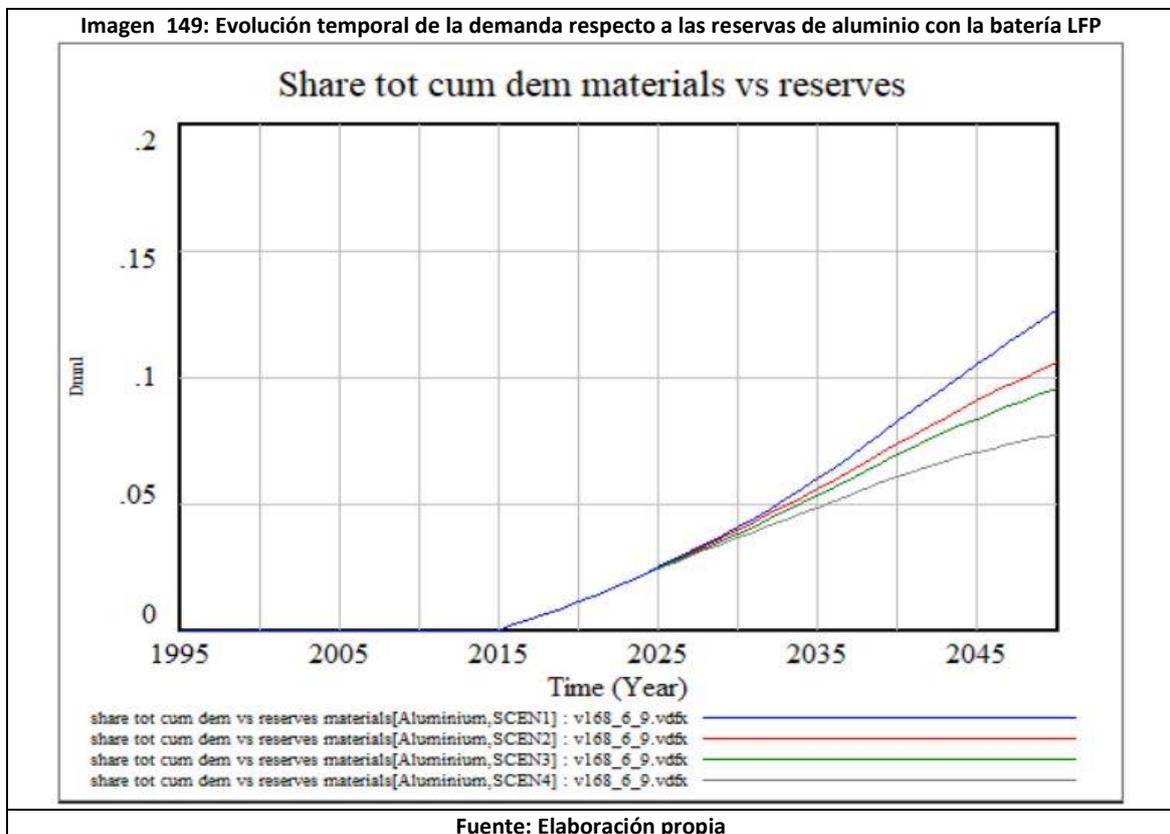


Fuente: Elaboración propia

-Batería NCA



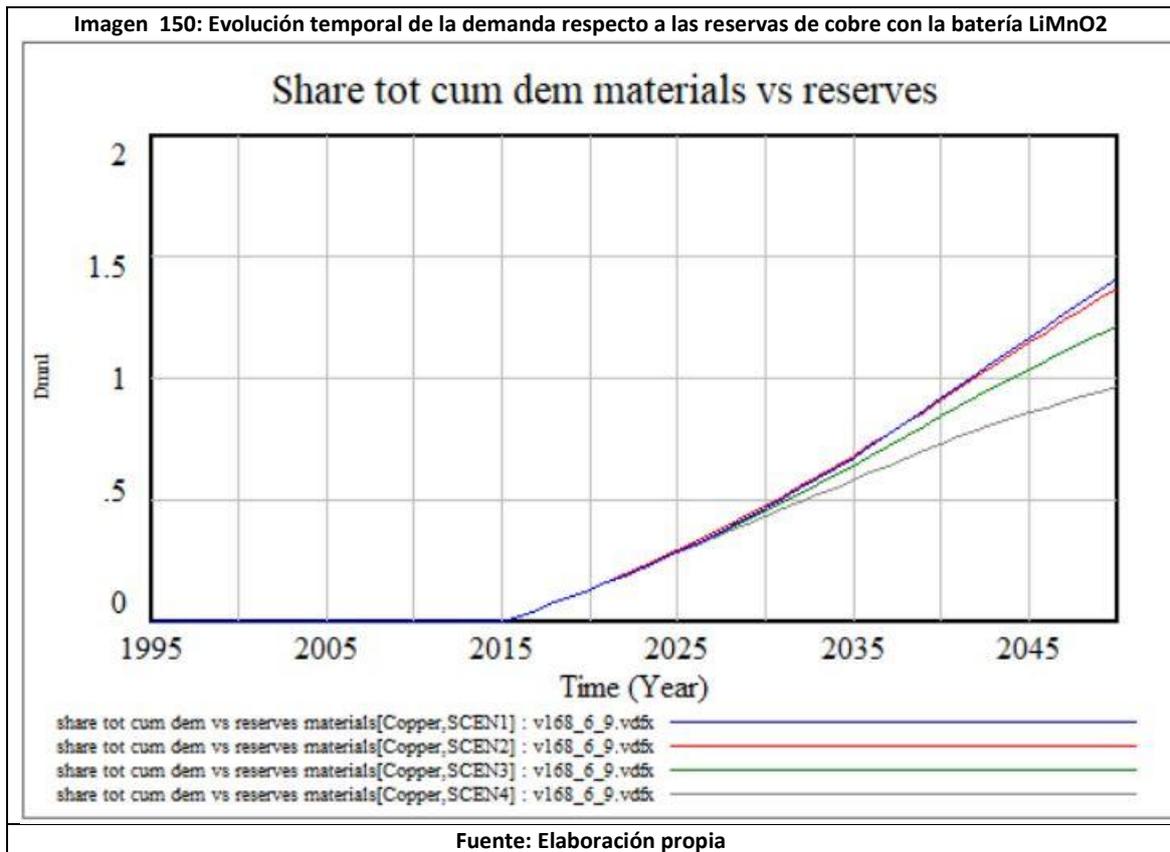
-Batería LFP



En el aluminio podemos enunciar que no sufrimos un agotamiento significativo de las reservas en el año 2015. Los valores temporales varían según el escenario o batería adoptada tomando valores entre un 7,5% (escenarios con un número reducido de baterías y empleando baterías con una baja cantidad de aluminio) y un 12,5% (escenarios con alto número de baterías, que poseen gran cantidad de aluminio) de reservas agotadas en el año 2050.

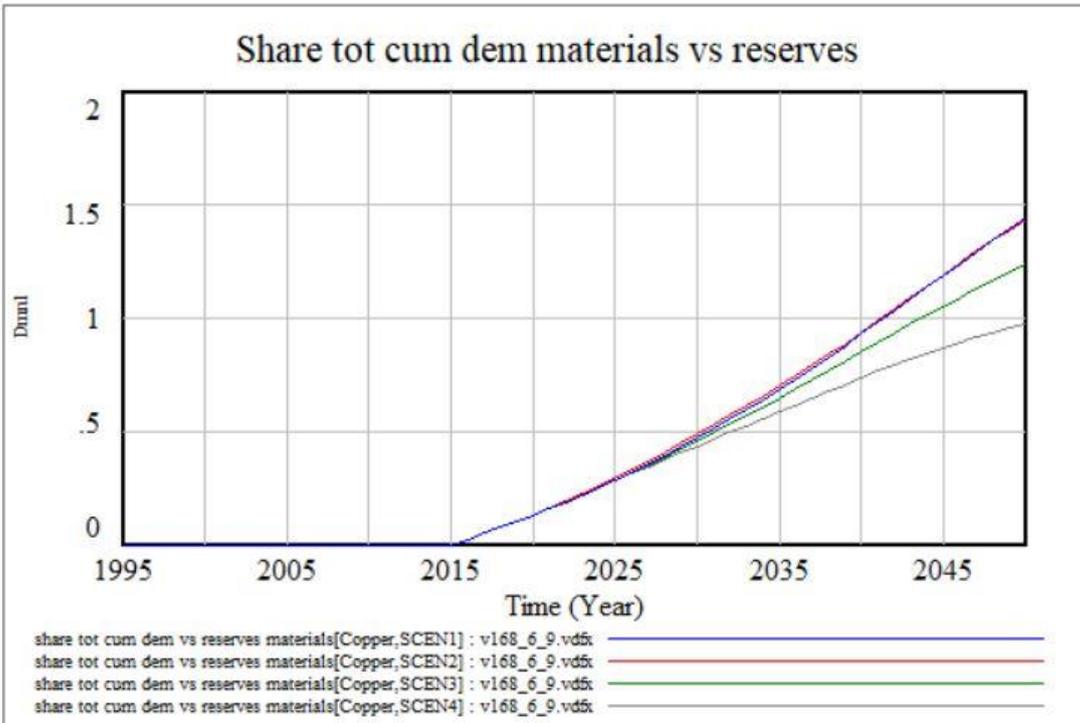
Cobre

-Batería LiMnO2



-Batería NMC 622

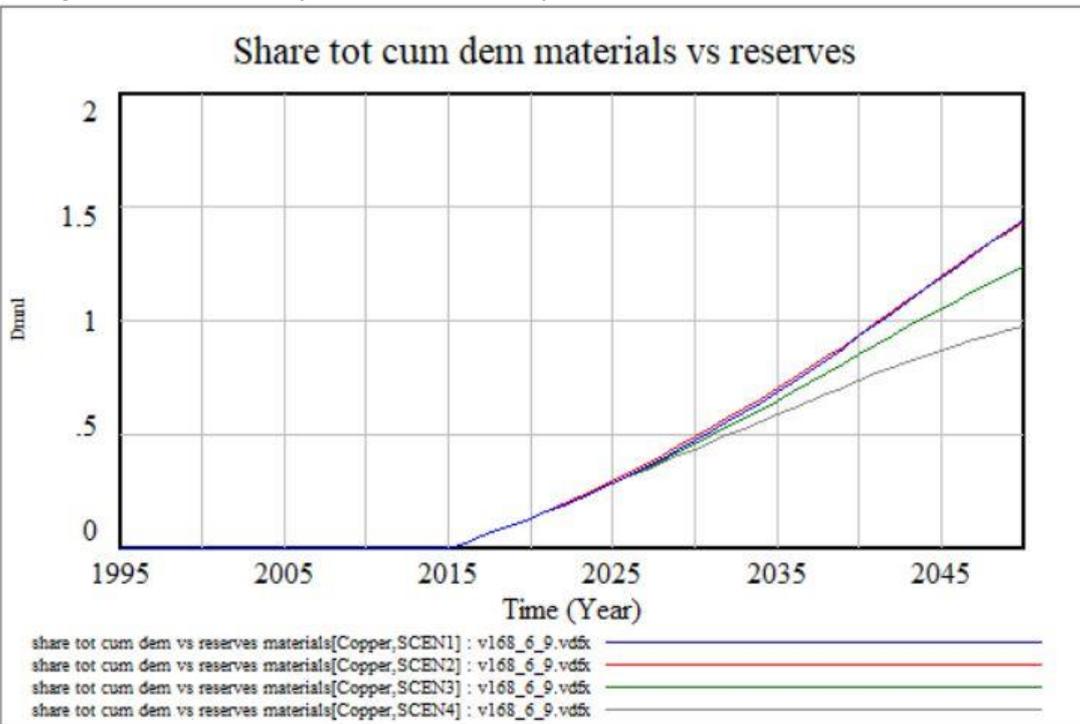
Imagen 151: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería NMC 622



Fuente: Elaboración propia

-Batería NMC 811

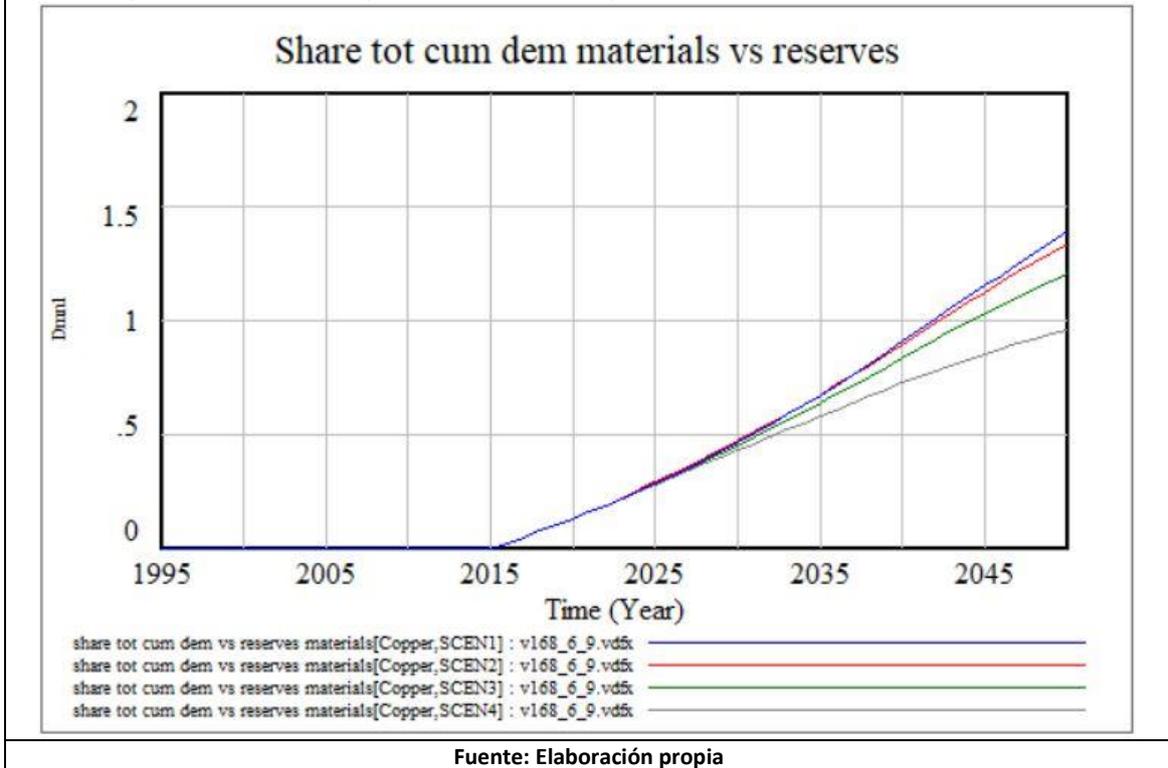
Imagen 152: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería NMC 811



Fuente: Elaboración propia

-Batería NCA

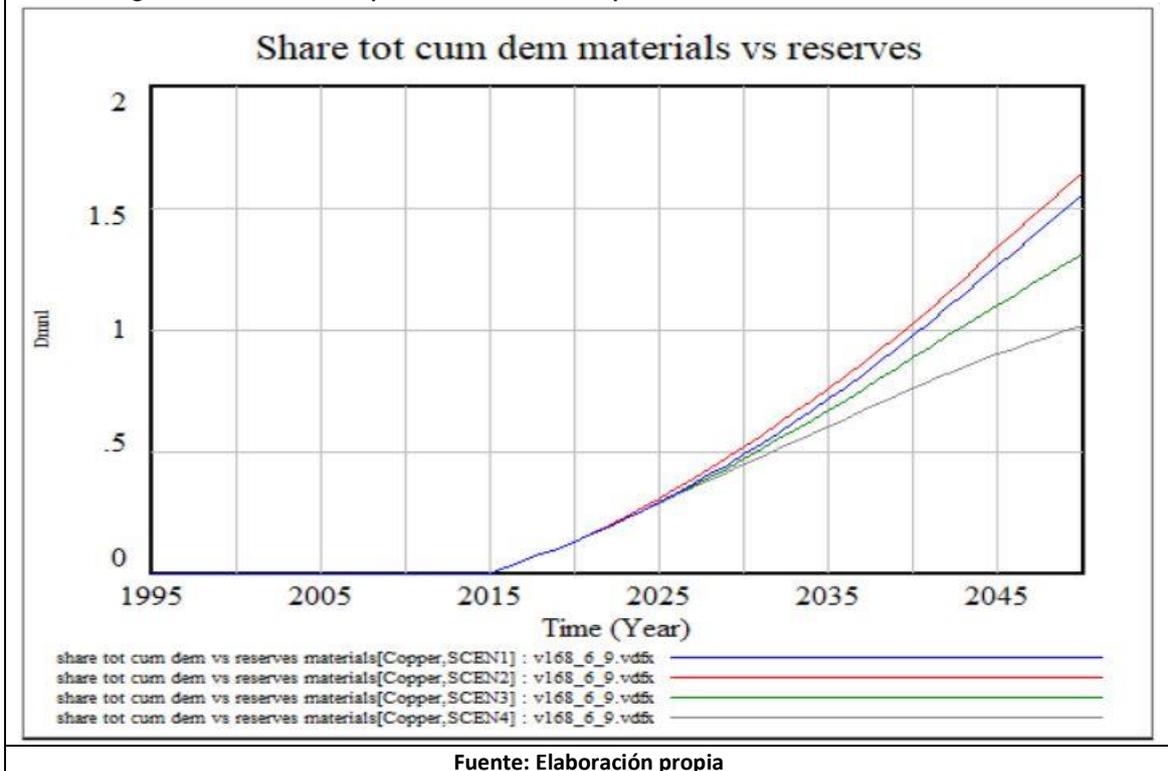
Imagen 153: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería NCA



Fuente: Elaboración propia

-Batería LFP

Imagen 154: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobre con la batería LFP

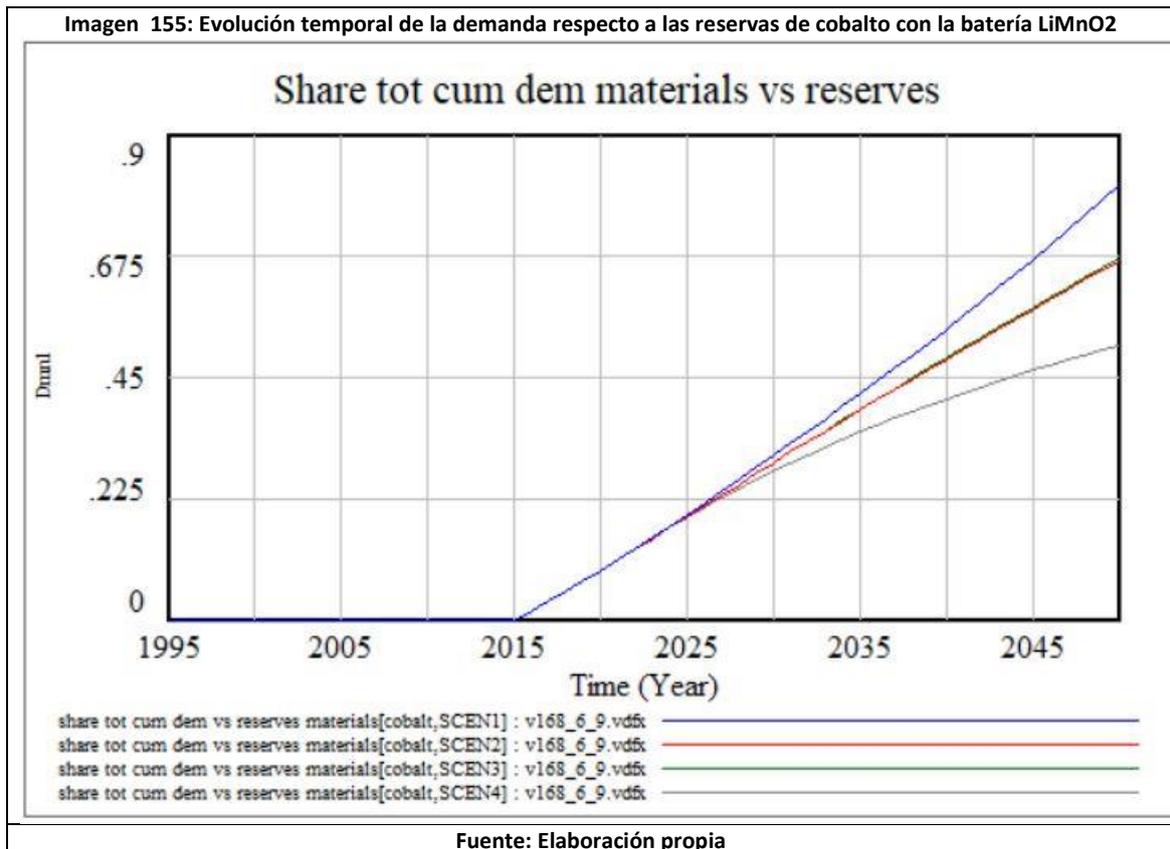


Fuente: Elaboración propia

En el cobre podemos enunciar que sufrimos agotamiento en todas las baterías y en todos los escenarios, salvo en el escenario 4. Este agotamiento llega bastante pronto, antes del año 2045 lo cual puede ser bastante preocupante. Solo el escenario 4 es capaz de modificar ligeramente la tendencia y llegar al 2045 sin agotar el cobre, aun así, se puede observar como en este escenario en el año 2050 nos encontramos igualmente con el agotamiento del cobre.

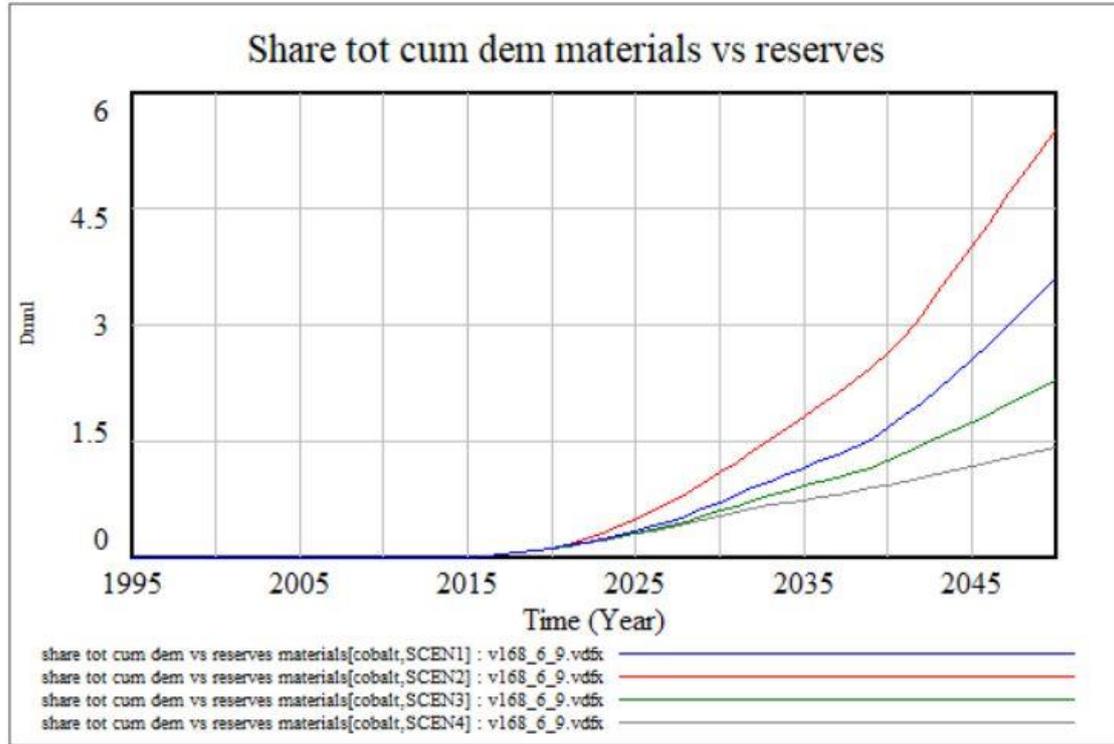
Cobalto

-Batería LiMnO2



-Batería NMC 622

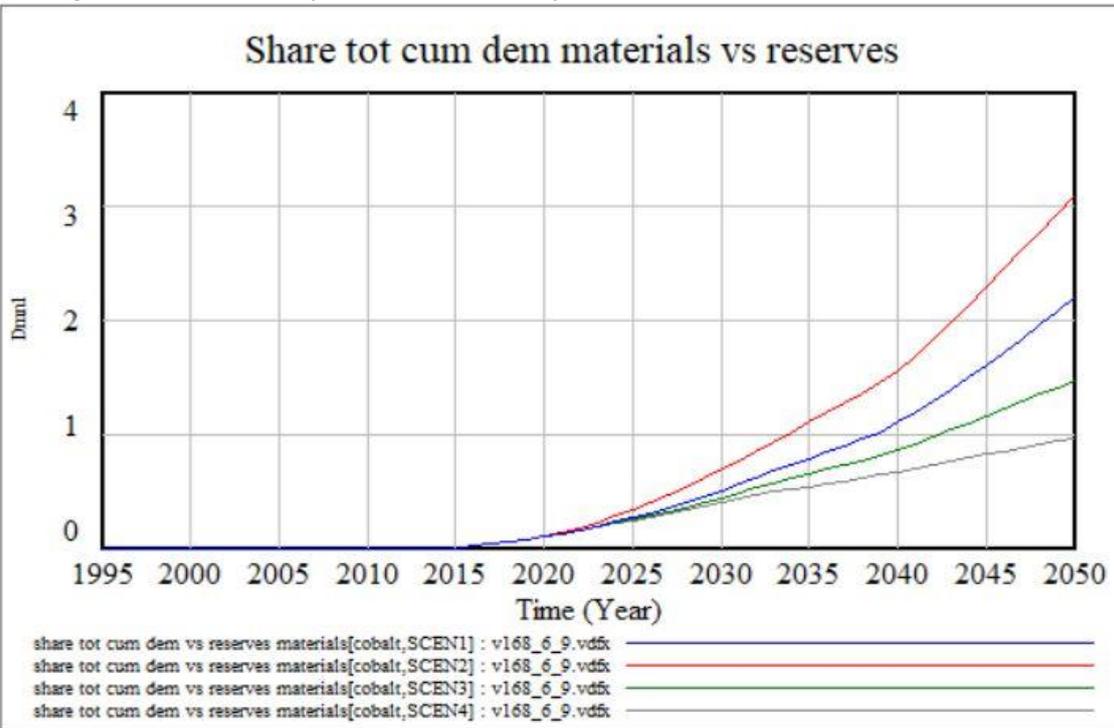
Imagen 156: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobalto con la batería NMC 622



Fuente: Elaboración propia

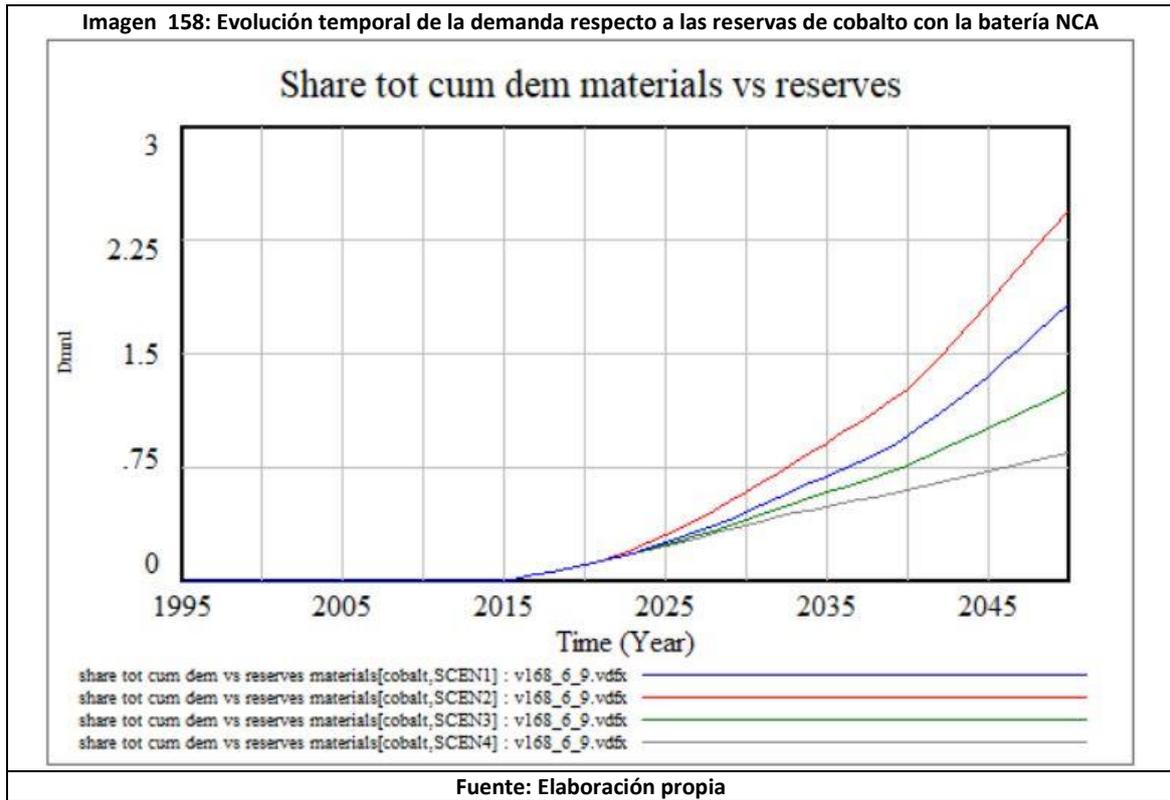
-Batería NMC 811

Imagen 157: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de cobalto con la batería NMC 811

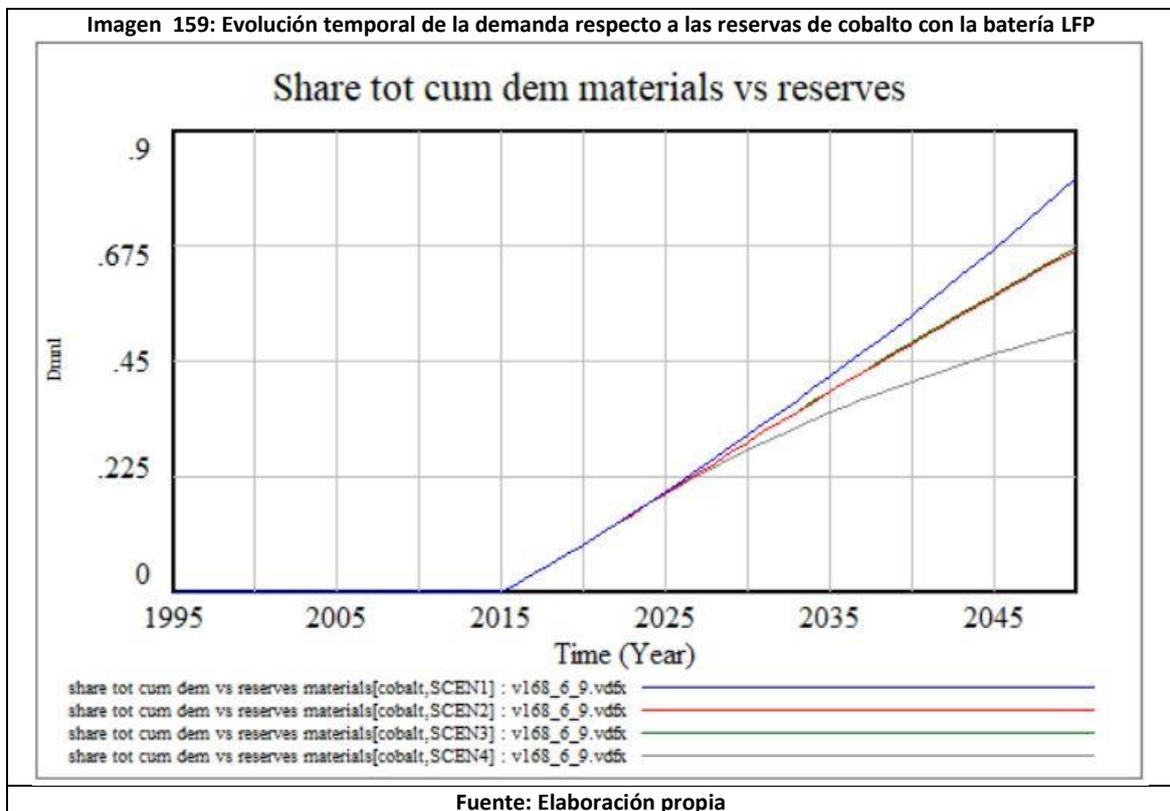


Fuente: Elaboración propia

-Batería NCA



-Batería LFP

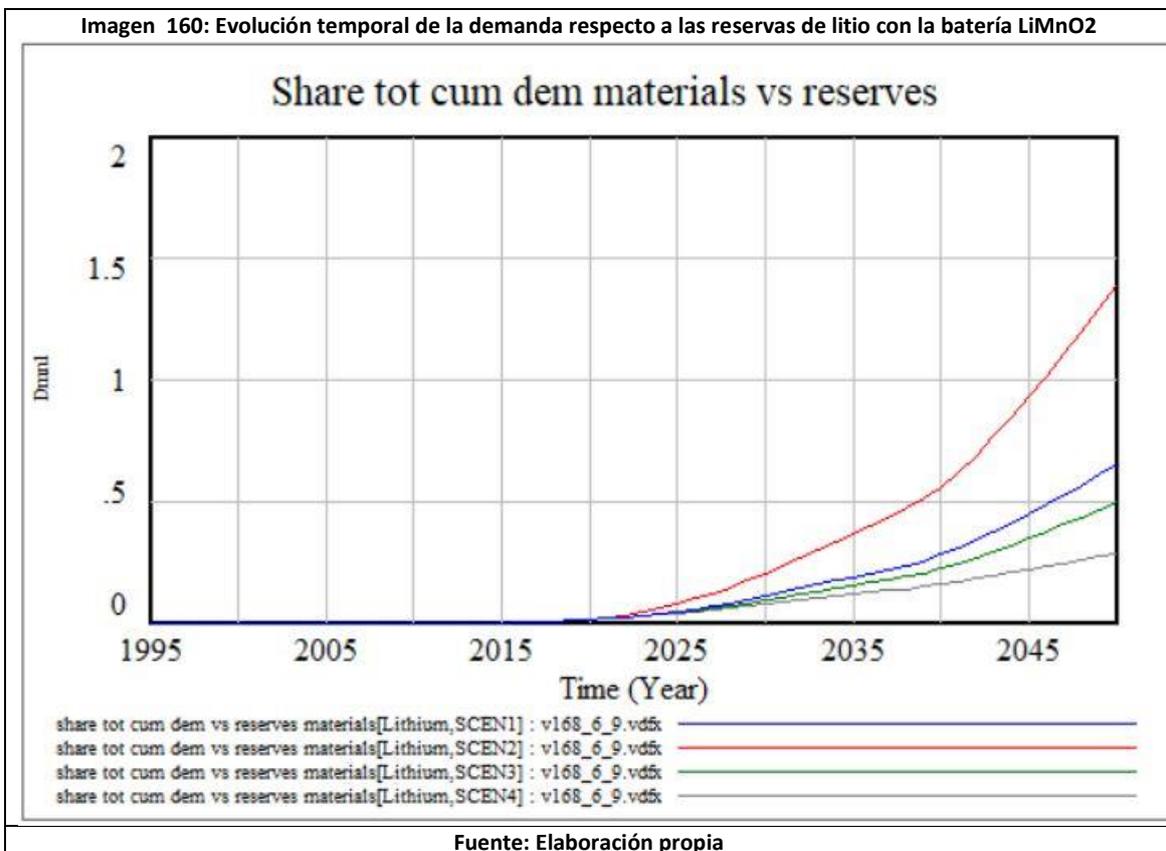


En lo respectivo al cobalto podemos enunciar que al ser un material tan escaso observamos una gran dependencia respecto a los escenarios o baterías elegidas. En el caso de escoger las baterías que no poseen este mineral vemos cómo podemos llegar al año 2050 sin agotarlo, habiendo gastado entre un 50 % y un 80 % del mineral. En el caso de escoger las baterías que emplean este material, observamos que sufrimos su agotamiento en casi todos los escenarios, siendo las baterías NCA y la NCM 811 en el escenario 4 las únicas combinaciones que no sufren agotamiento antes del año 2050 (aunque este está cercano).

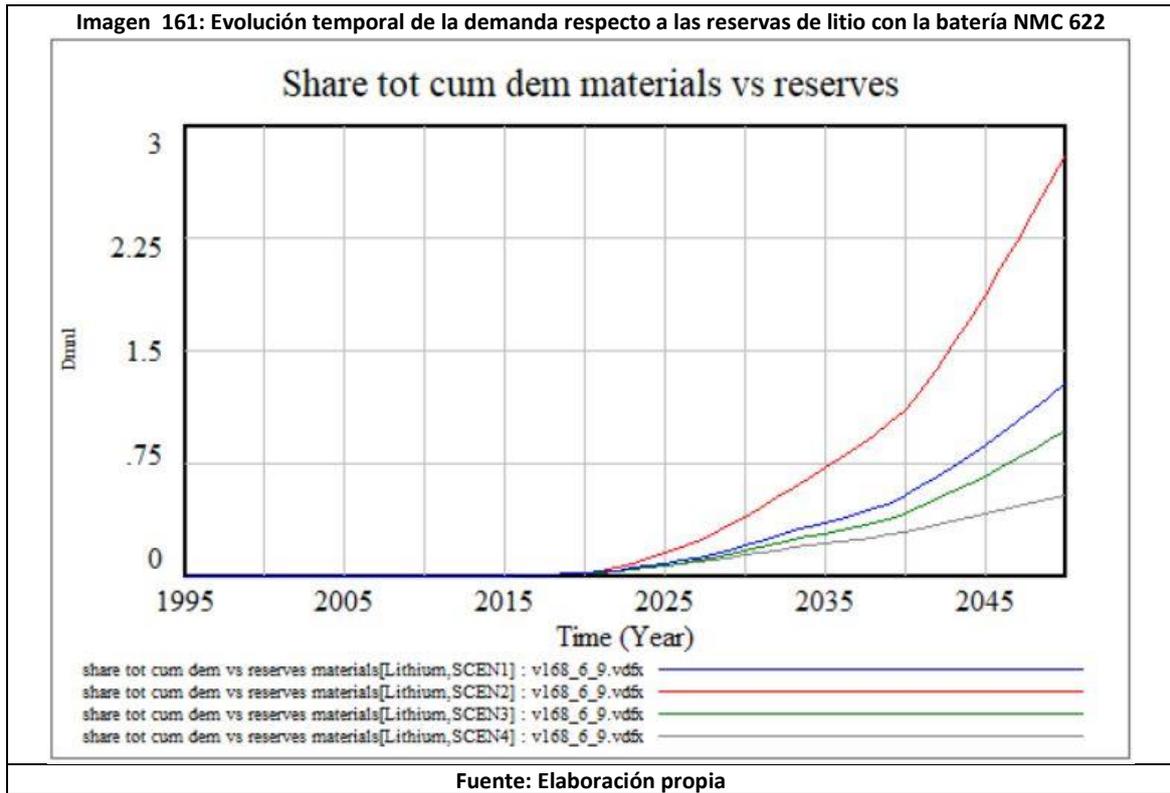
Litio

-Batería LiMnO₂

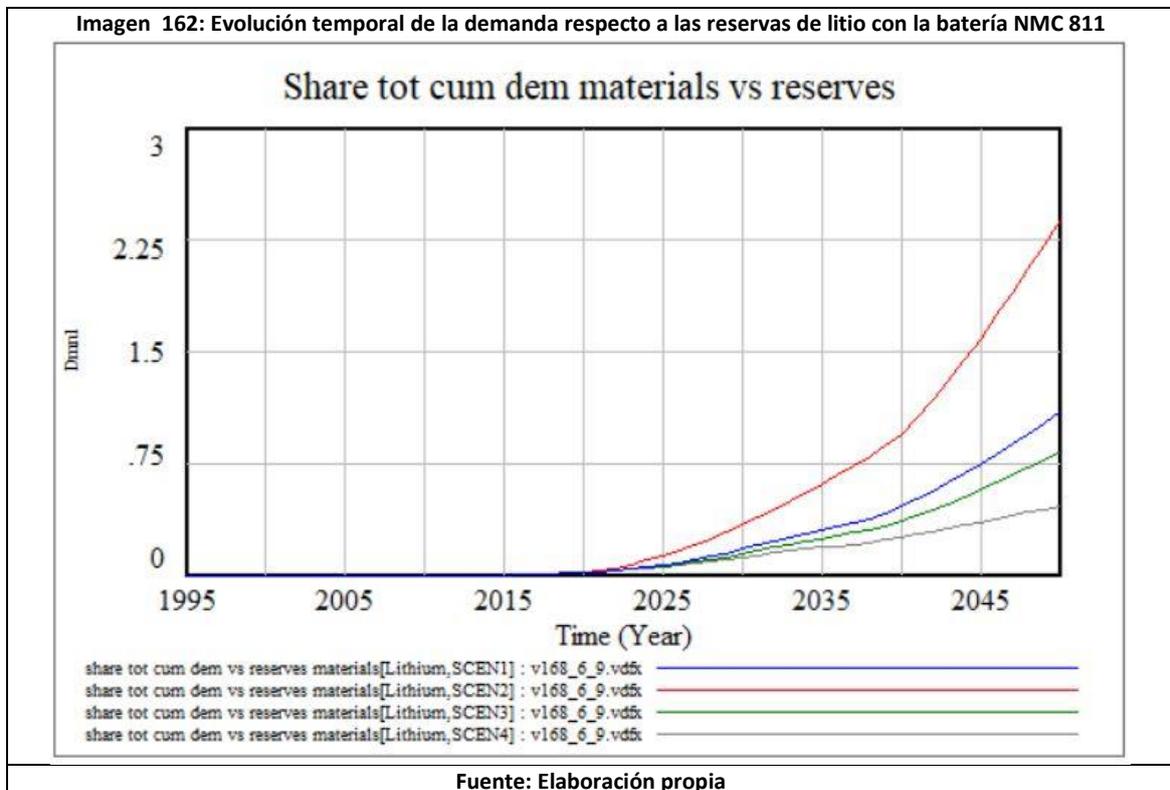
Imagen 160: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de litio con la batería LiMnO₂



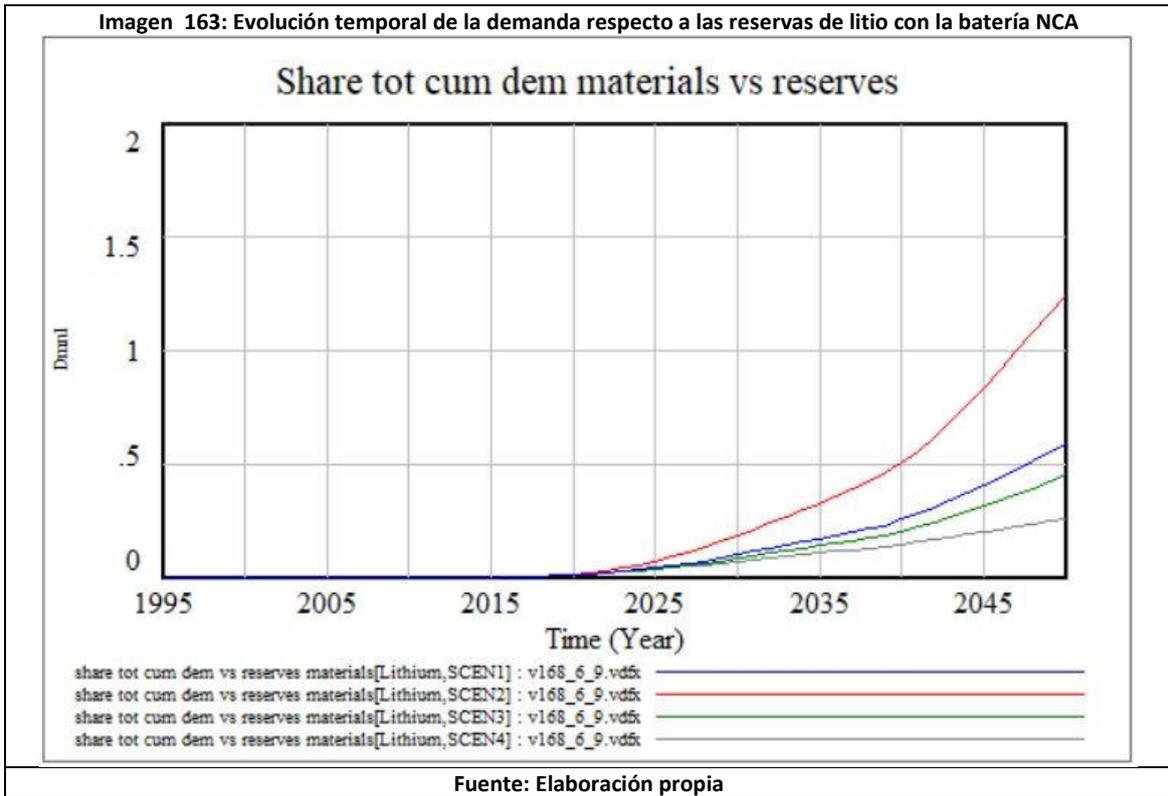
-Batería NMC 622



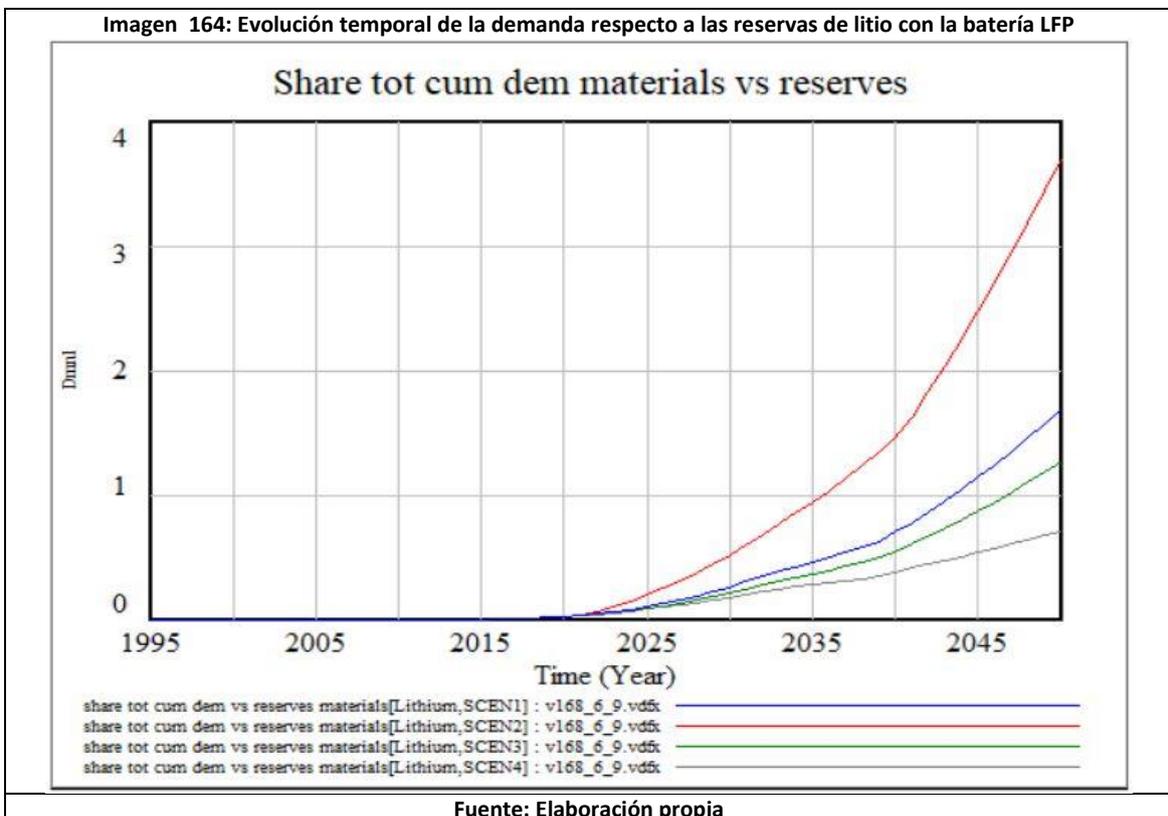
-Batería NMC 811



-Batería NCA



-Batería LFP

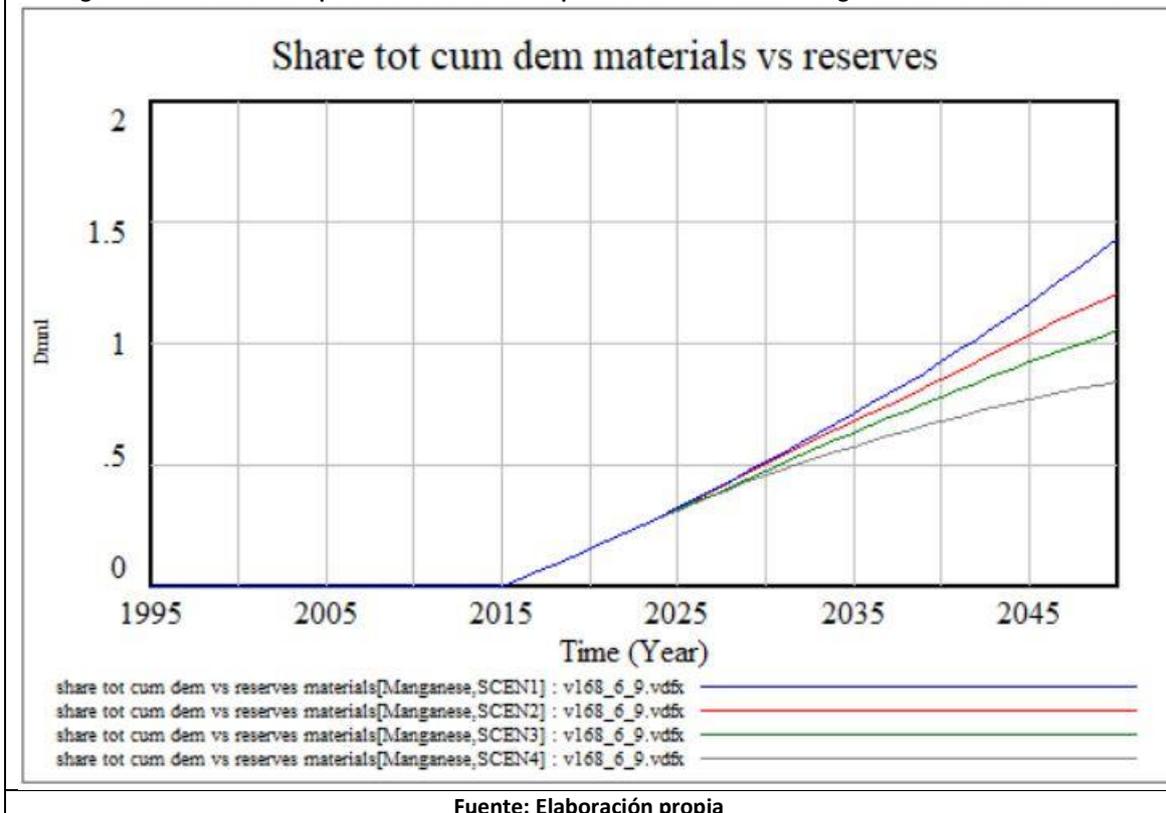


En el litio podemos enunciar que al ser un material tan escaso observamos una gran dependencia respecto a los escenarios o baterías elegidas. En el caso de escoger las baterías que poseen menor cantidad de este mineral, vemos cómo podemos llegar al año 2050 sin agotarlo en los escenarios favorables, sin embargo en el caso de escoger las baterías que emplean este material o escenarios no favorables, observamos que sufrimos su agotamiento antes del año 2050.

Manganeso

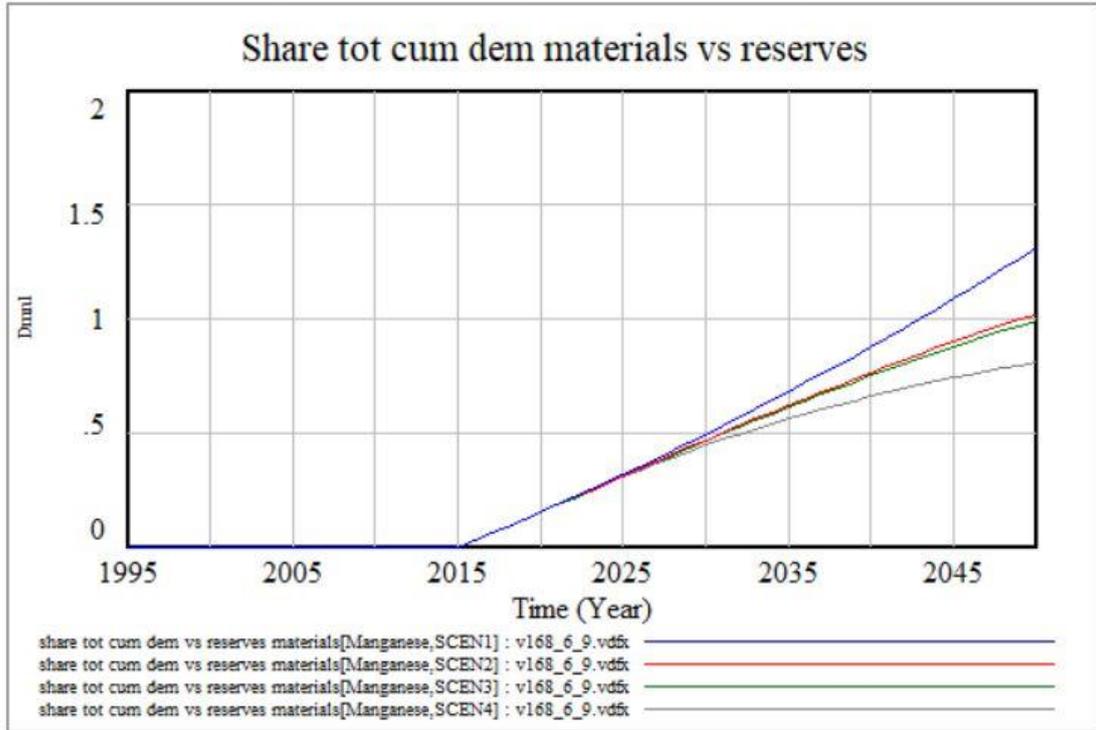
Batería LiMnO₂

Imagen 165: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería LiMnO₂



-Batería NMC 622

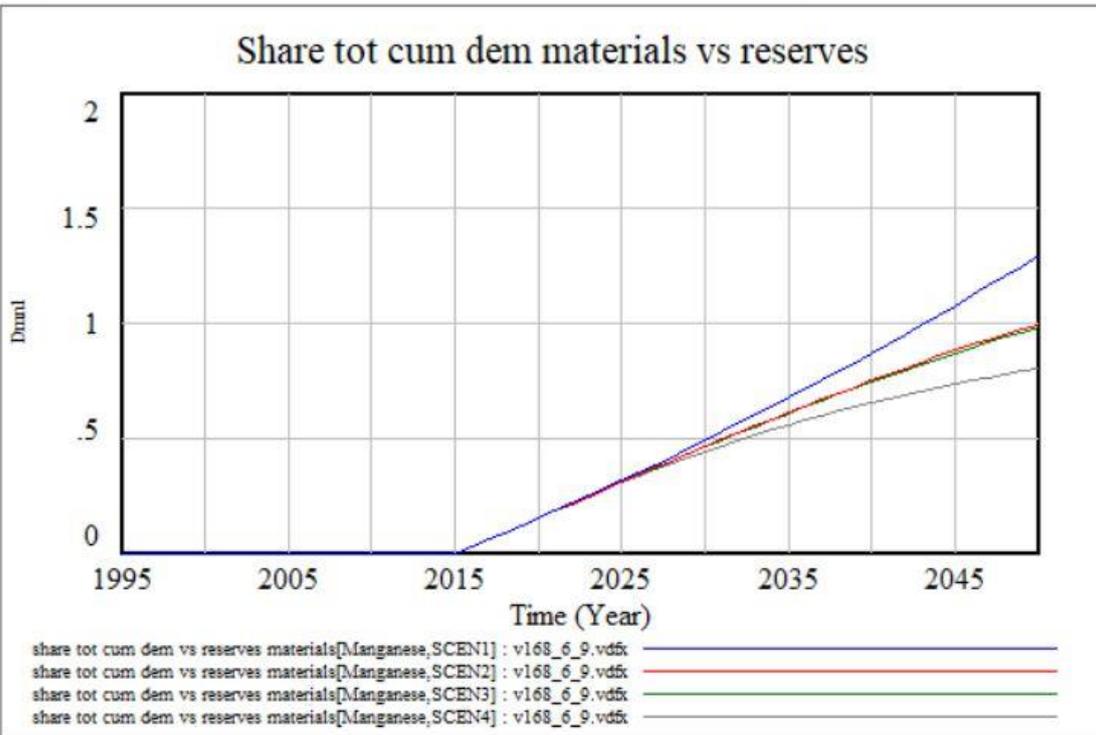
Imagen 166: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería NMC 622



Fuente: Elaboración propia

-Batería NMC 811

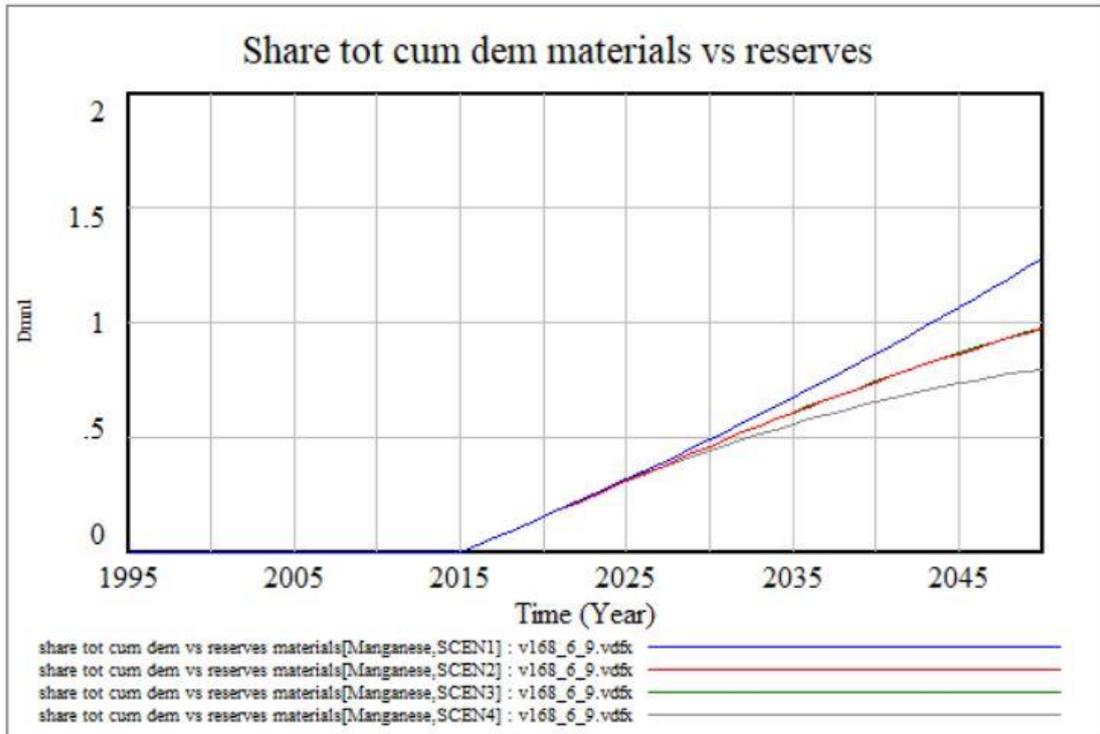
Imagen 167: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería NMC 811



Fuente: Elaboración propia

-Batería NCA

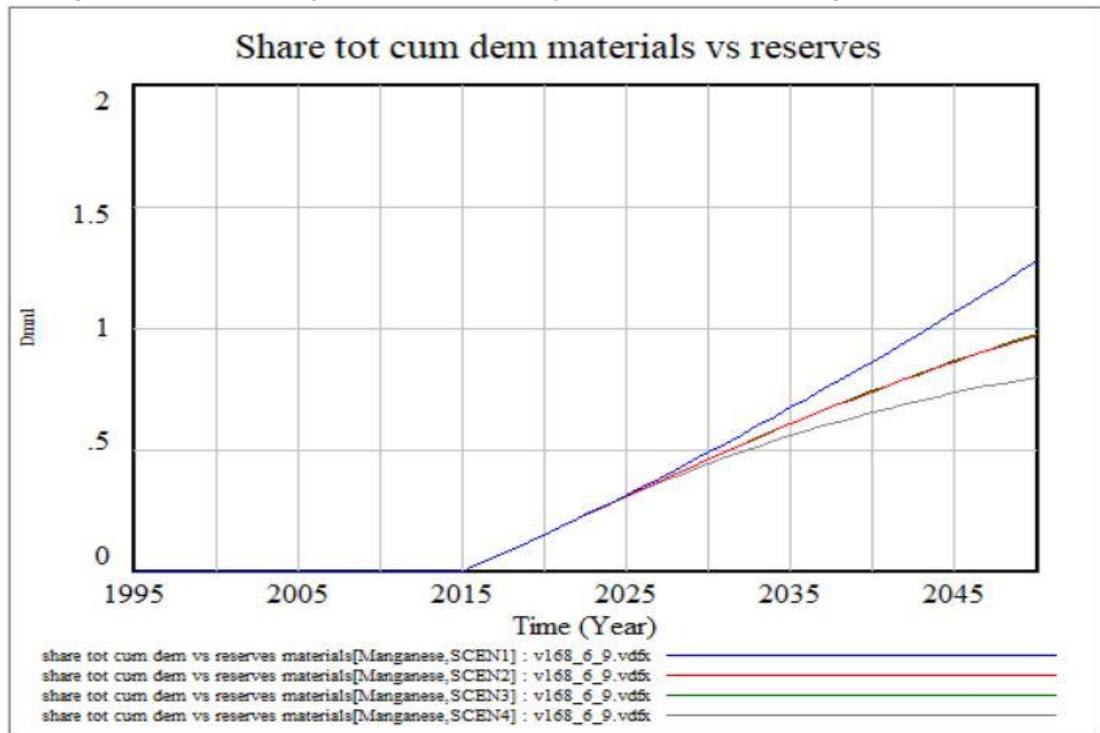
Imagen 168: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería NCA



Fuente: Elaboración propia

-Batería LFP

Imagen 169: Evolución temporal de la demanda respecto a las reservas de manganeso con la batería LFP

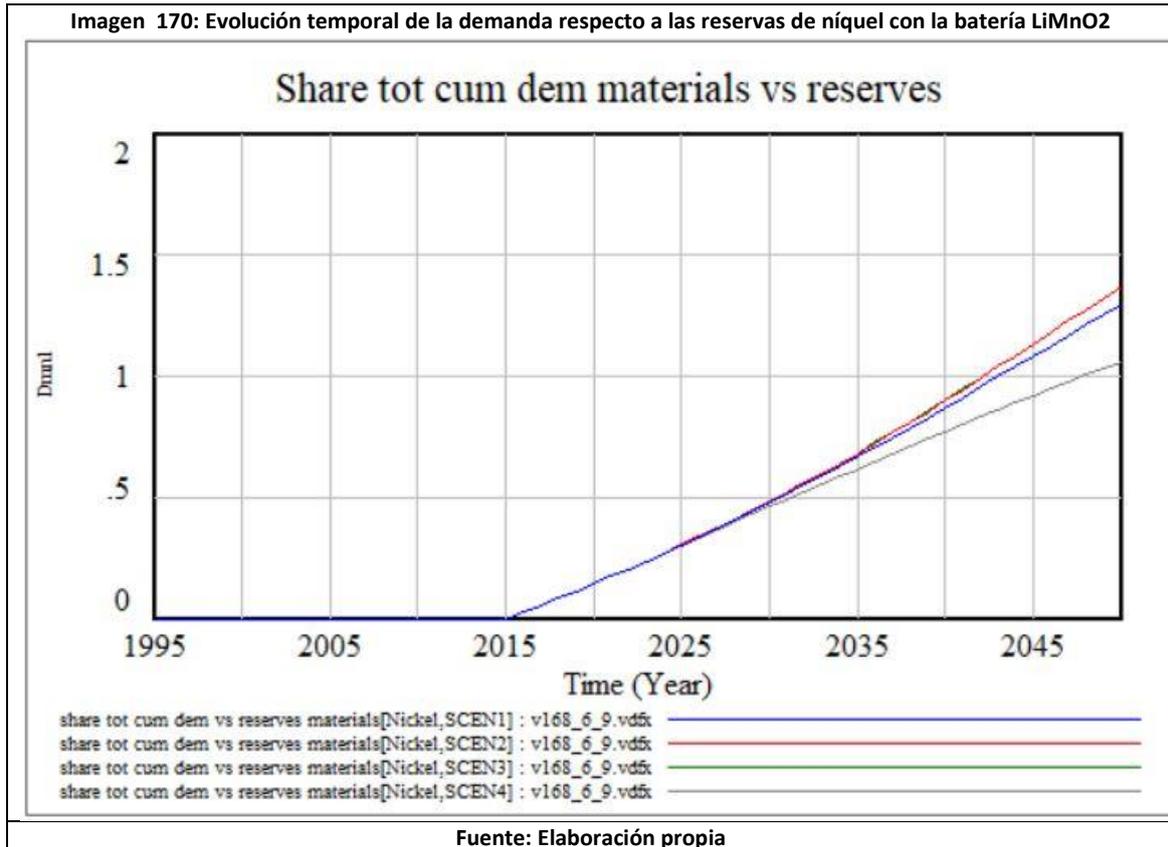


Fuente: Elaboración propia

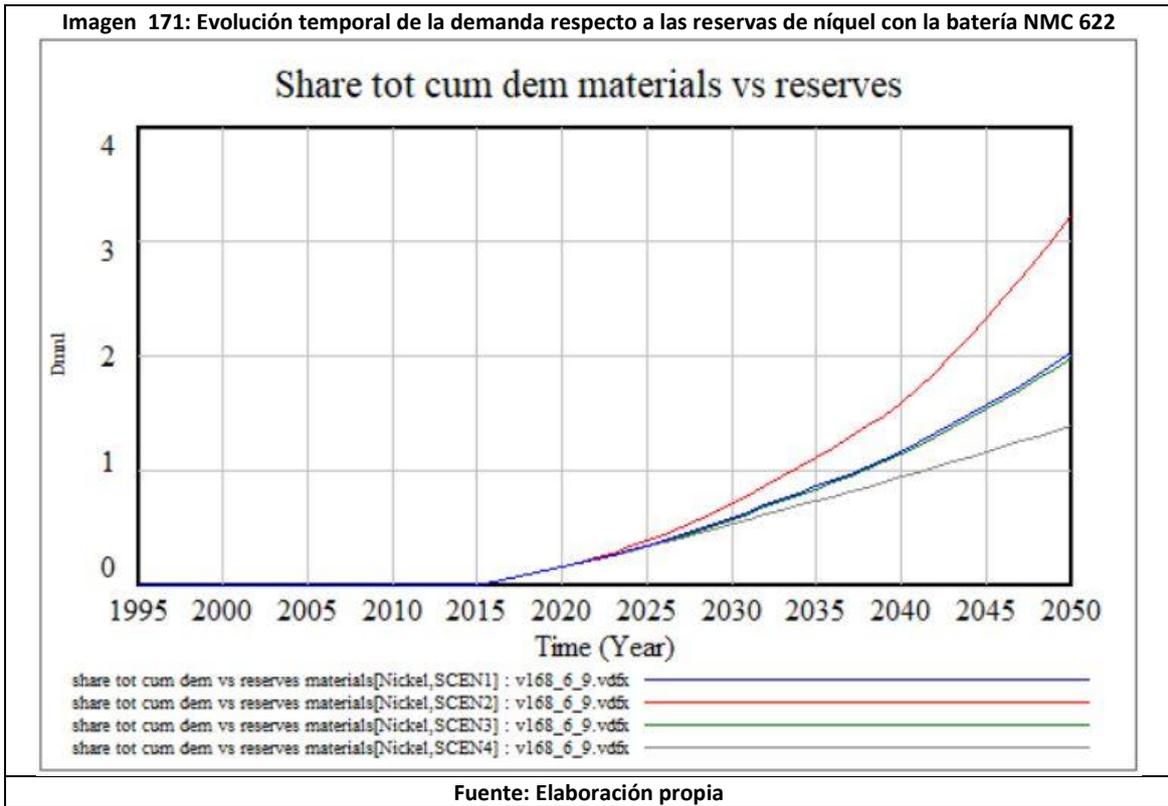
En lo respectivo al manganeso podemos enunciar lo contrario que hemos dicho anteriormente para el litio, es un material muy abundante y con gran demanda por parte del resto de la economía, por lo que la elección de un tipo batería u otro no es decisivo. En cambio si lo es el escenario, siendo el escenario 4, el único en el que este mineral no sufre el agotamiento de sus reservas para el año 2050.

Níquel

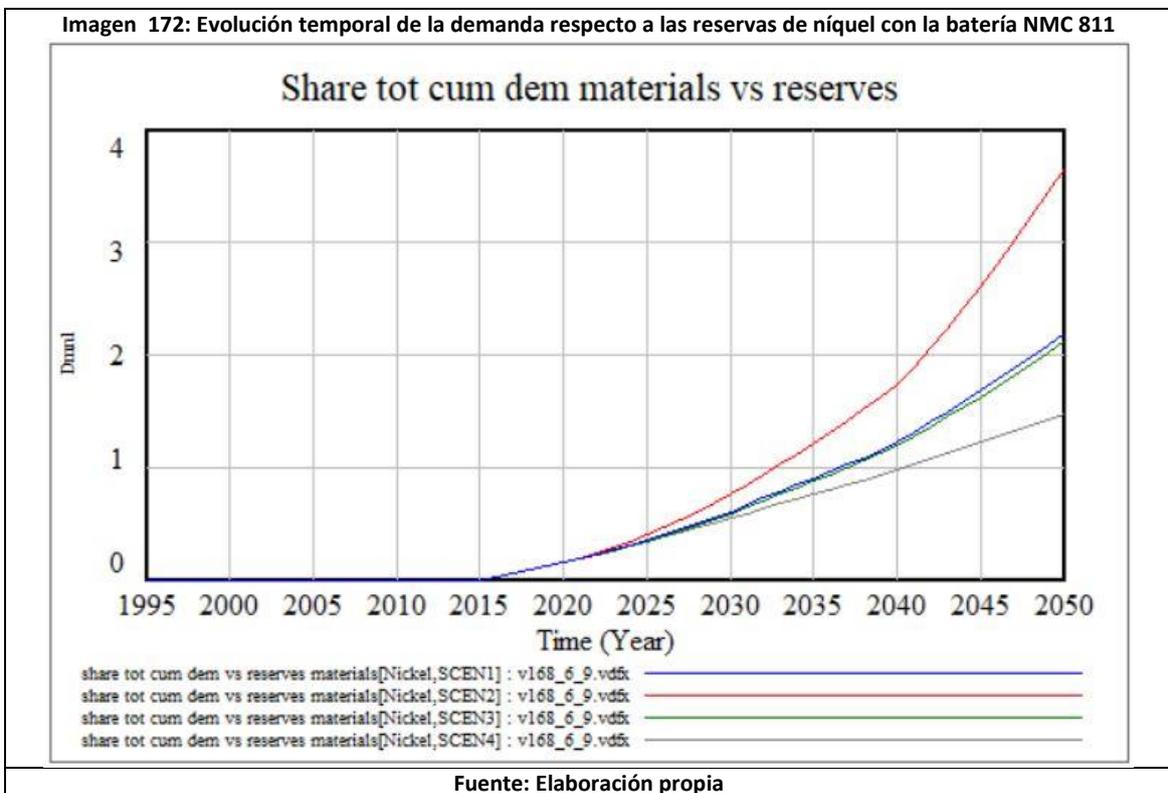
-Batería LiMnO₂



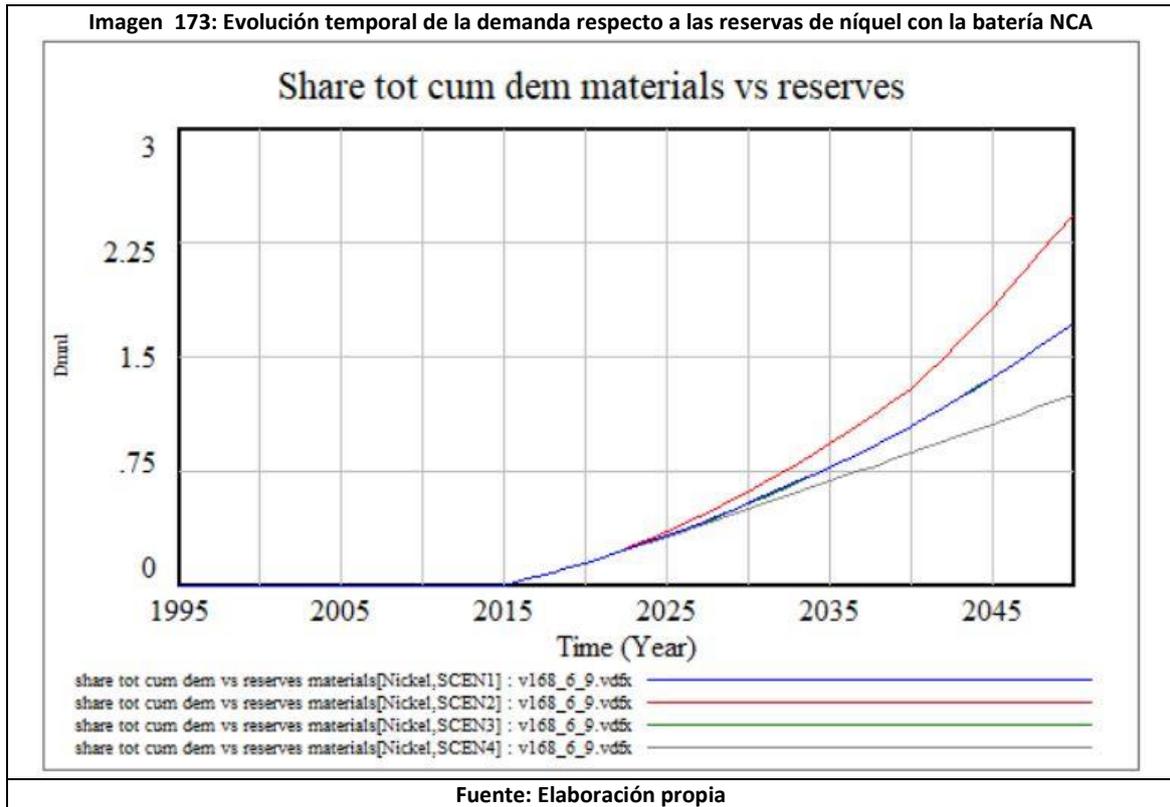
-Batería NCM 622



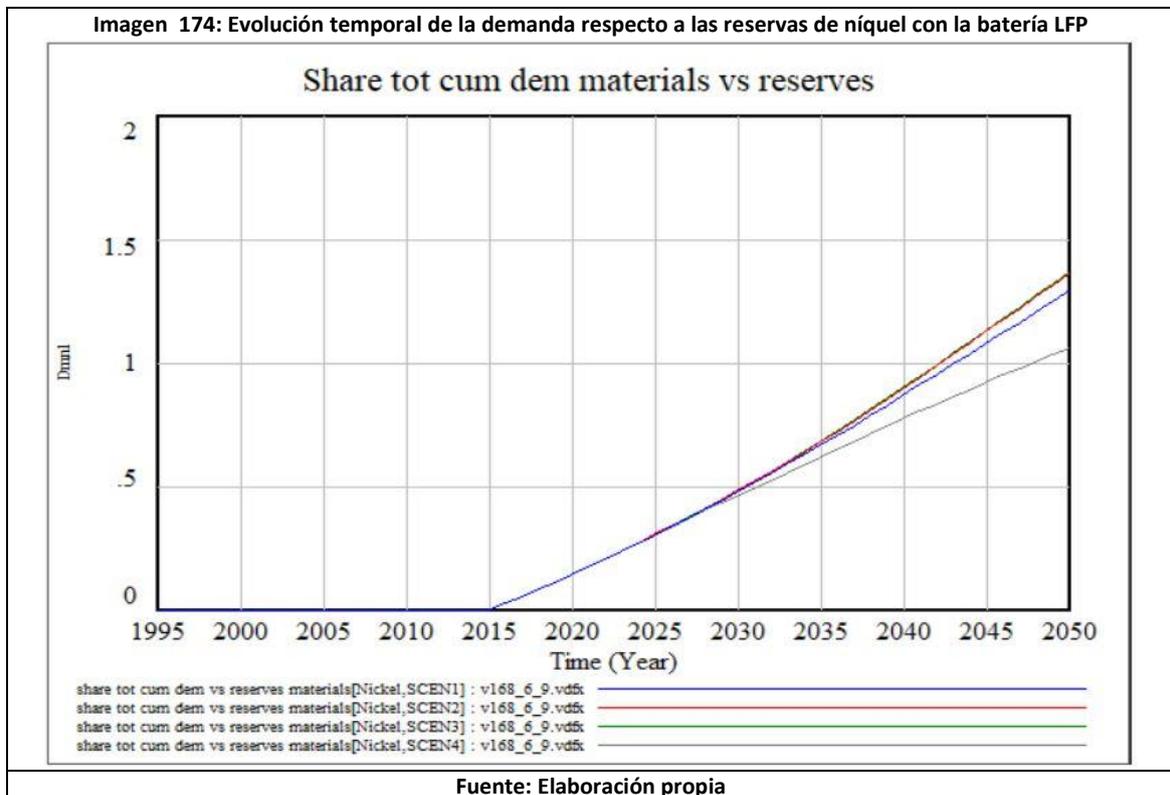
-Batería NMC 811



-Batería NCA



-Batería LFP



En lo respectivo al Níquel podemos decir que se observa un agotamiento prematuro generalizado y bastante preocupante, pero en este caso, se presenta una excepción, la batería NCA en el escenario 4 logra llegar al año 2050 sin haber agotado todas las reservas de este mineral.

6.5 Demanda de materiales respecto a los recursos

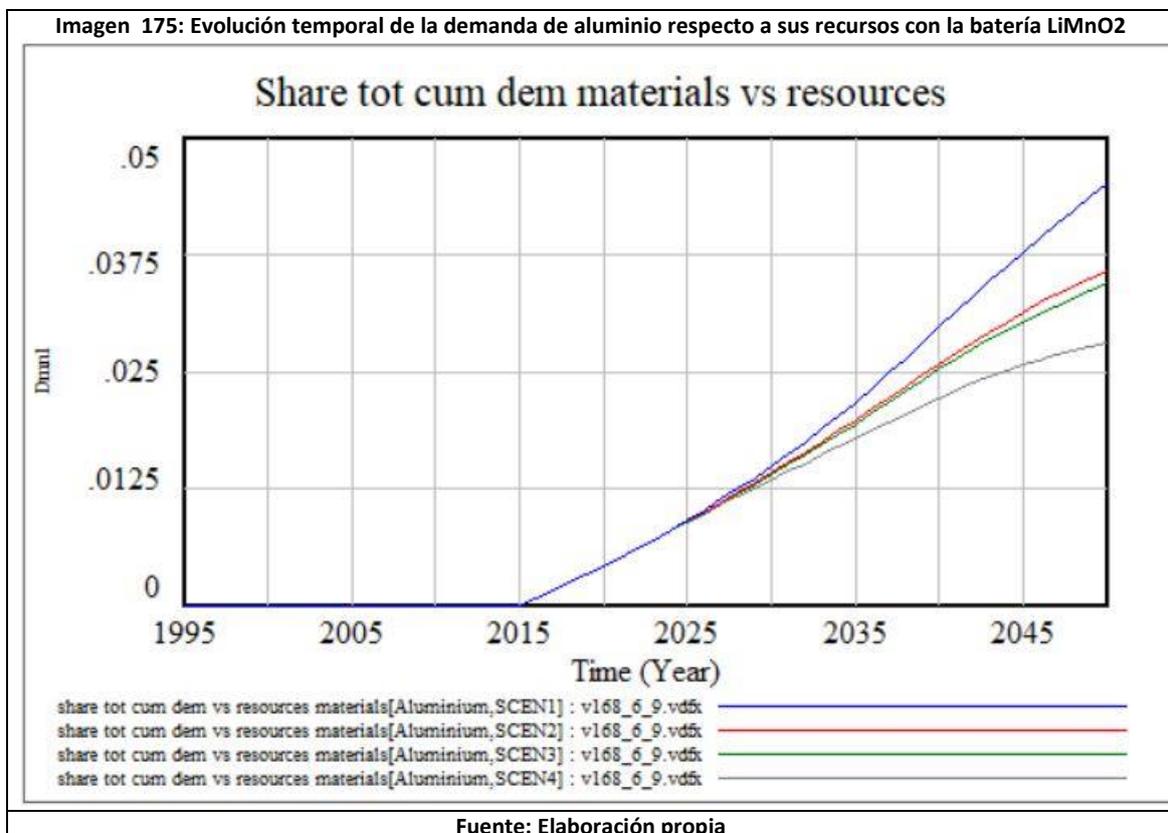
Finalmente enunciaremos la demanda general de los materiales respecto a sus recursos, representaremos la demanda, tanto de todas las tecnologías de electrificación y los vehículos electrificados, como del resto de la economía, por lo tanto en estos resultados están reflejados los materiales necesarios para cubrir la demanda mundial de los minerales.

En la simulación debemos elegir el tipo de batería que queremos que lleven todos los vehículos electrificados a partir del año 2015 y así, podremos comparar los resultados utilizando los distintos tipos de baterías.

Expresaremos los resultados según el material del que queremos obtener la información y la batería elegida.

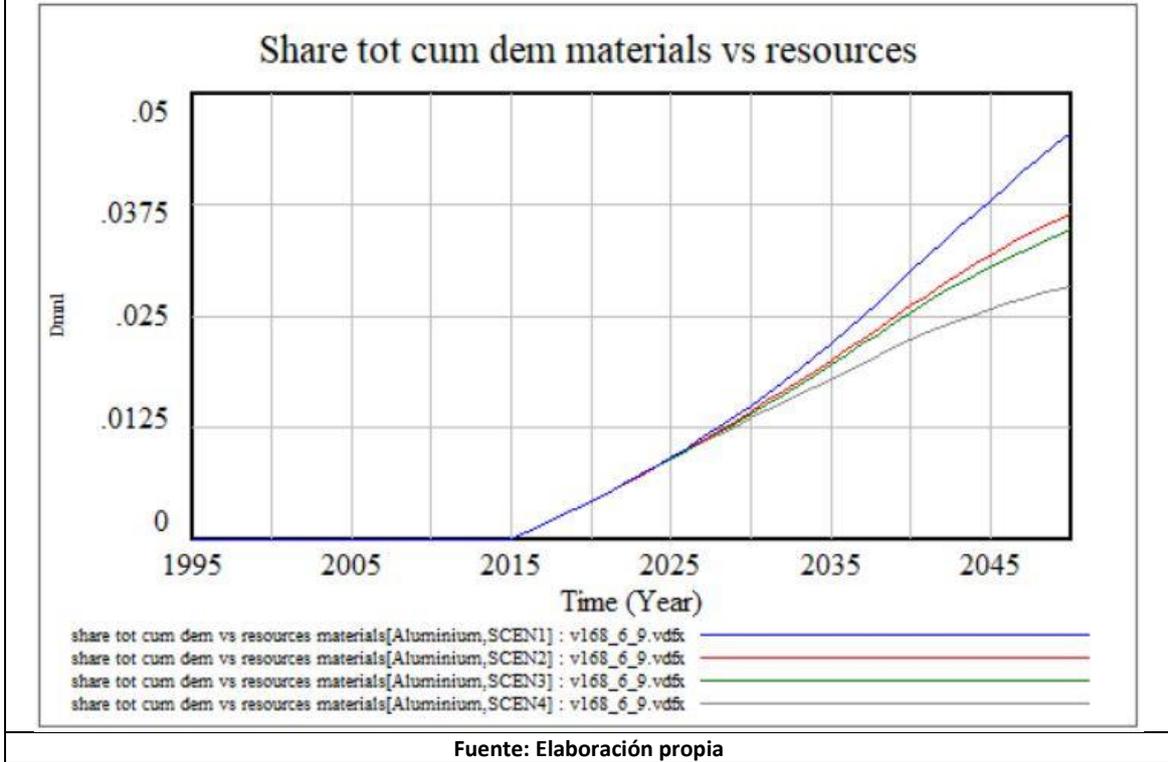
Aluminio

-Batería LiMnO₂



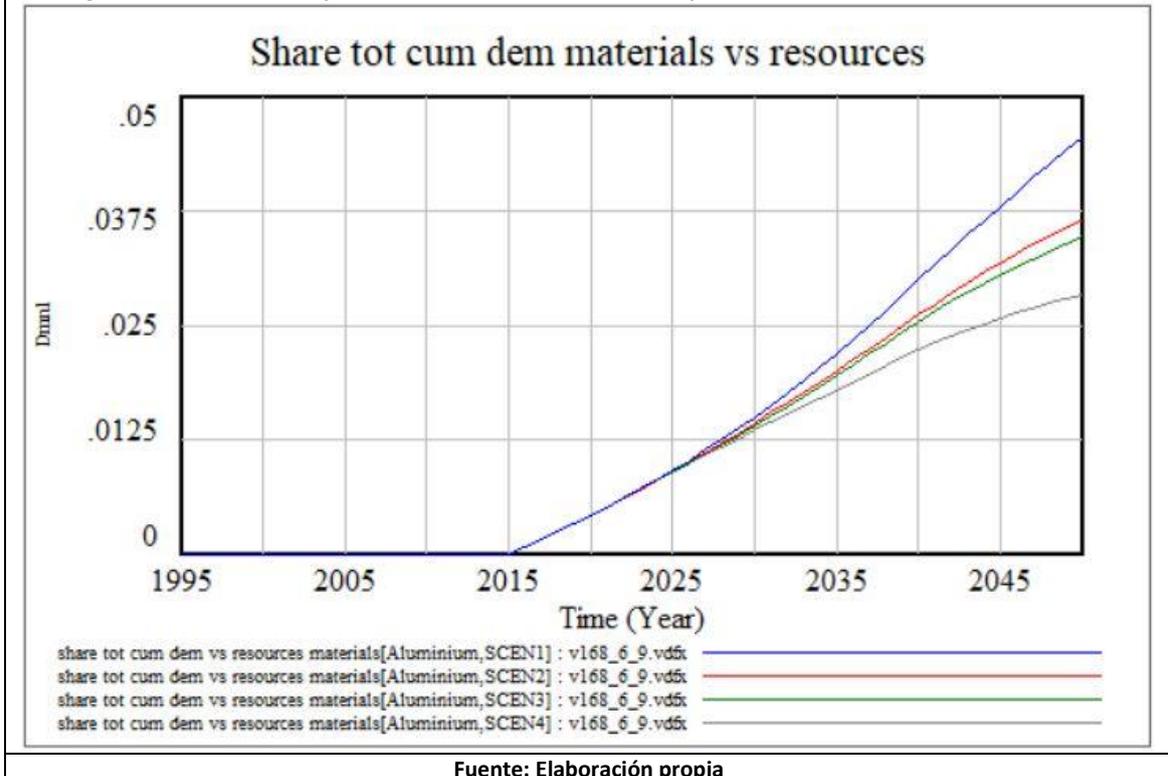
-Batería NMC 622

Imagen 176: Evolución temporal de la demanda de aluminio respecto a sus recursos con la batería NMC 622

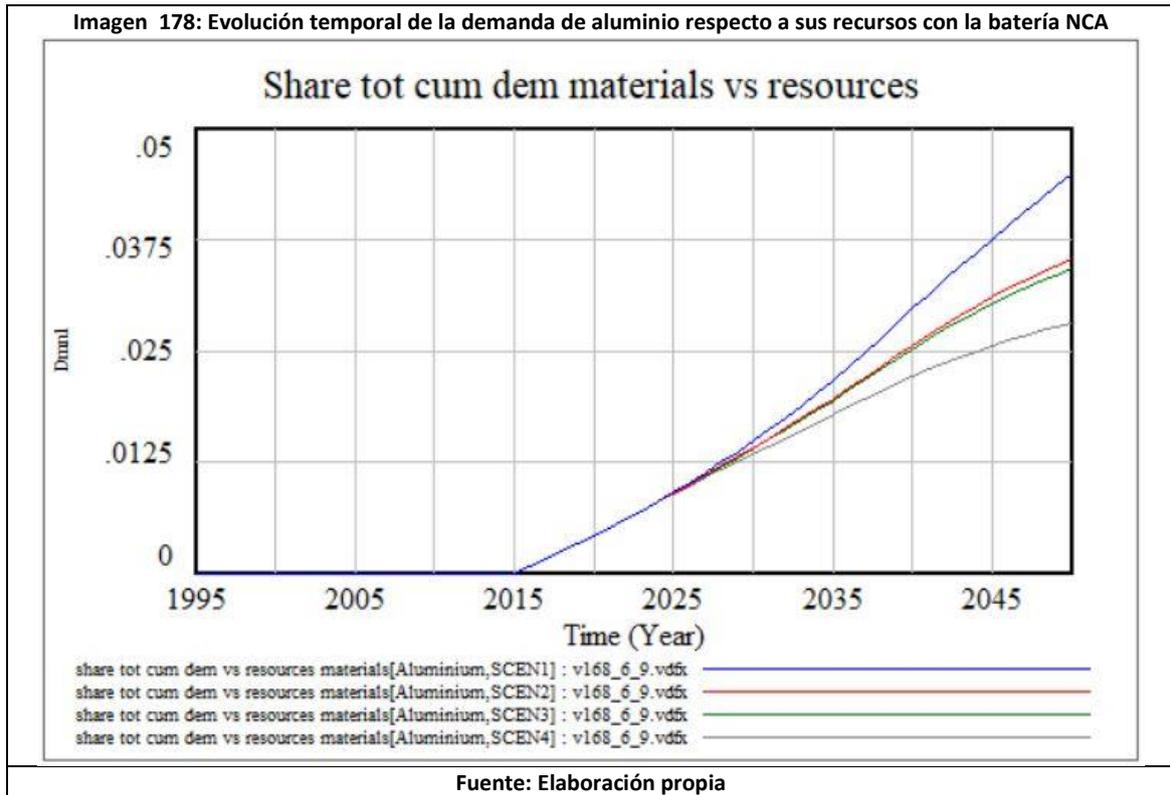


-Batería NMC 811

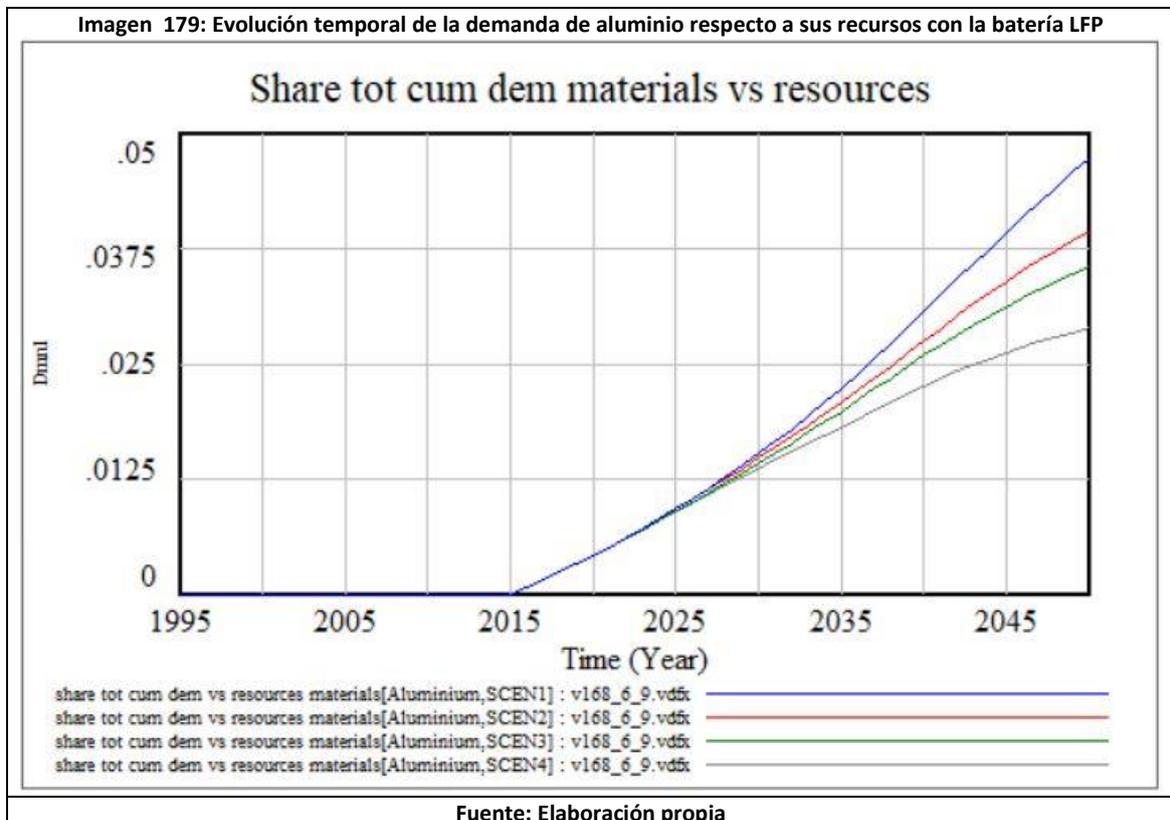
Imagen 177: Evolución temporal de la demanda de aluminio respecto a sus recursos con la batería NMC 811



-Batería NCA



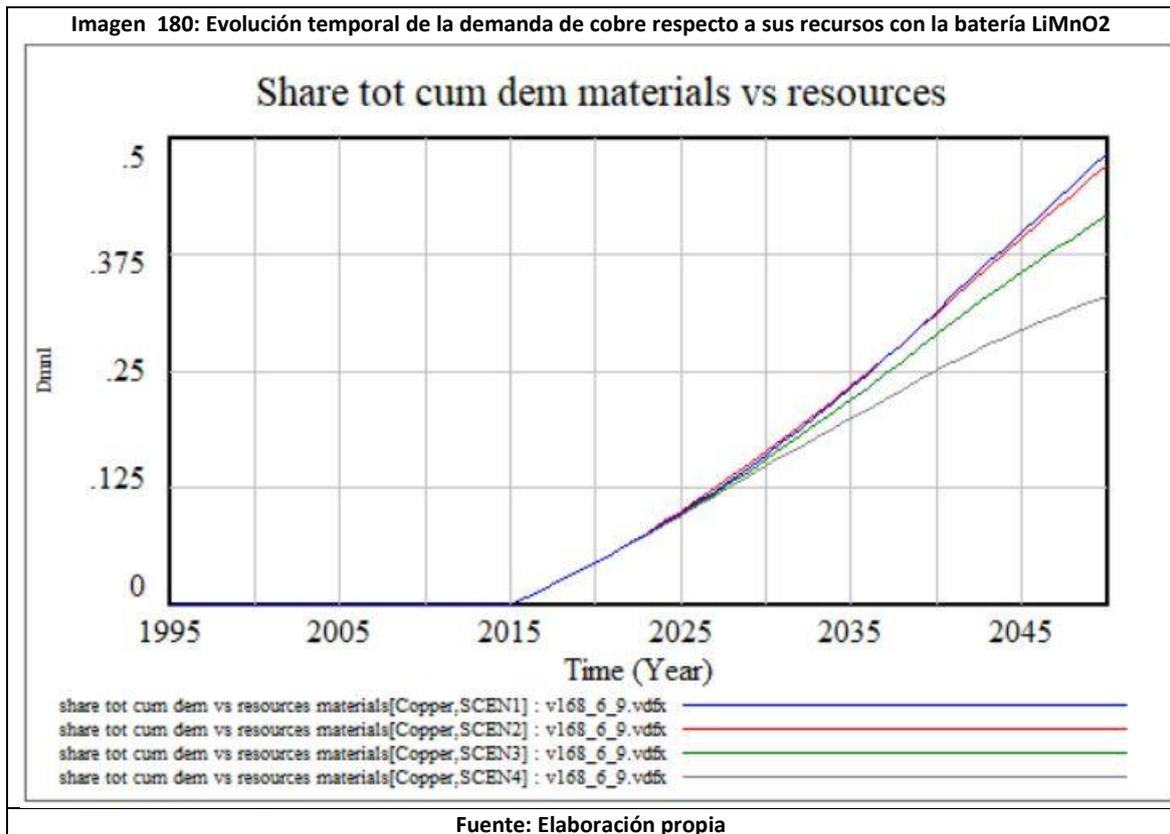
-Batería LFP



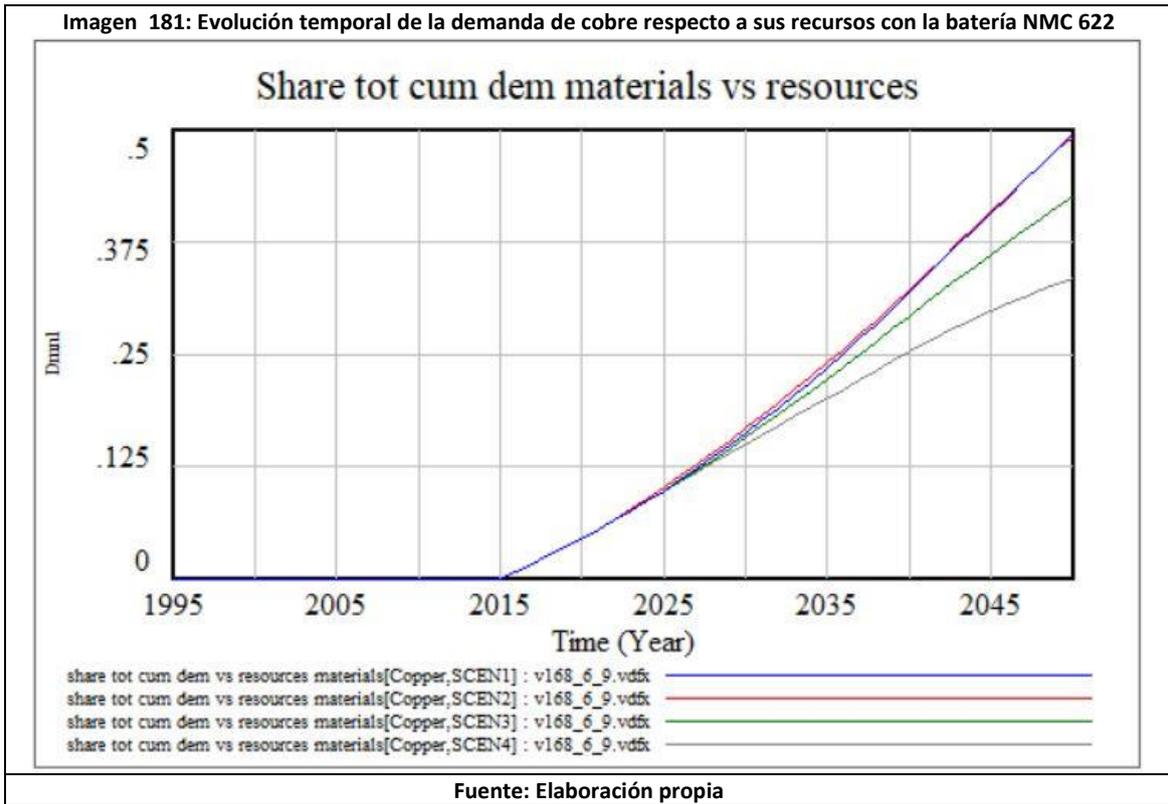
En el aluminio podemos enunciar que no sufrimos un agotamiento significativo de los recursos en el año 2050. Los valores temporales varían según el escenario o batería adoptada tomando valores entre un 0,3% (escenarios con un número reducido de baterías y empleando baterías con una baja cantidad de aluminio) y un 0,45% (escenarios con alto número de baterías, que poseen gran cantidad de aluminio) de recursos agotados en el año 2050.

Cobre

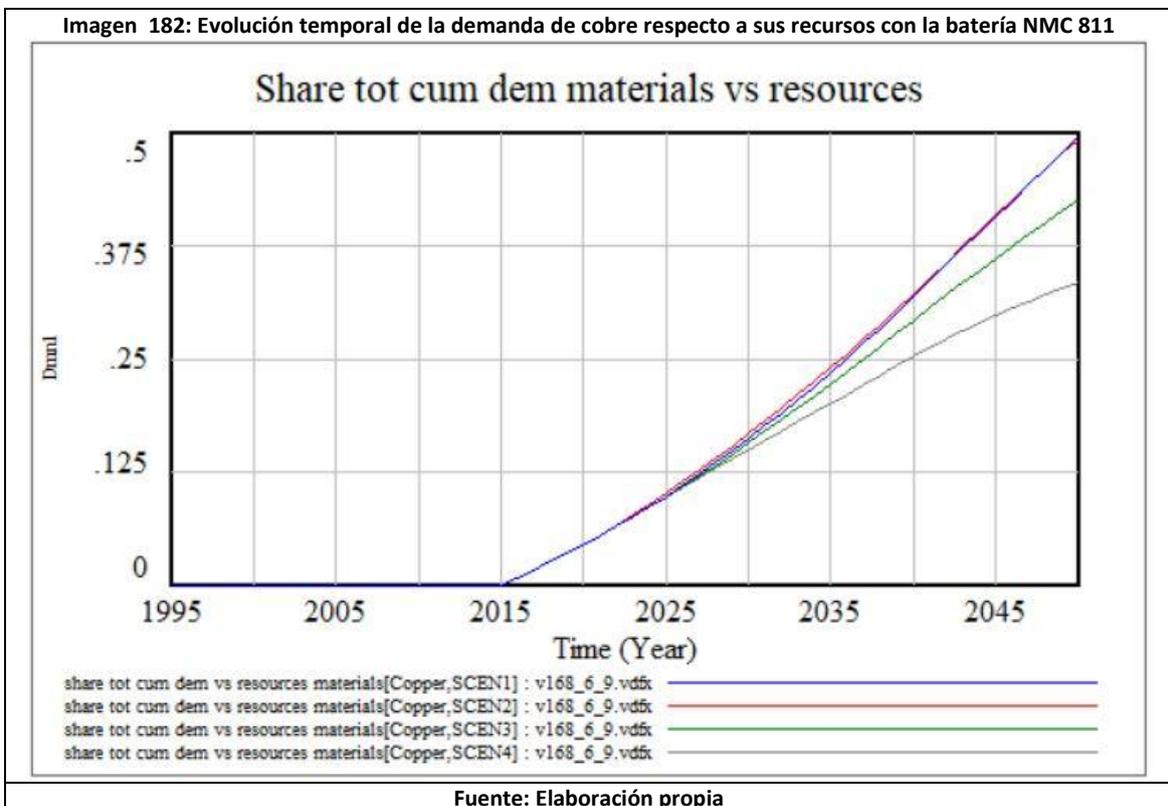
-Batería LiMnO2



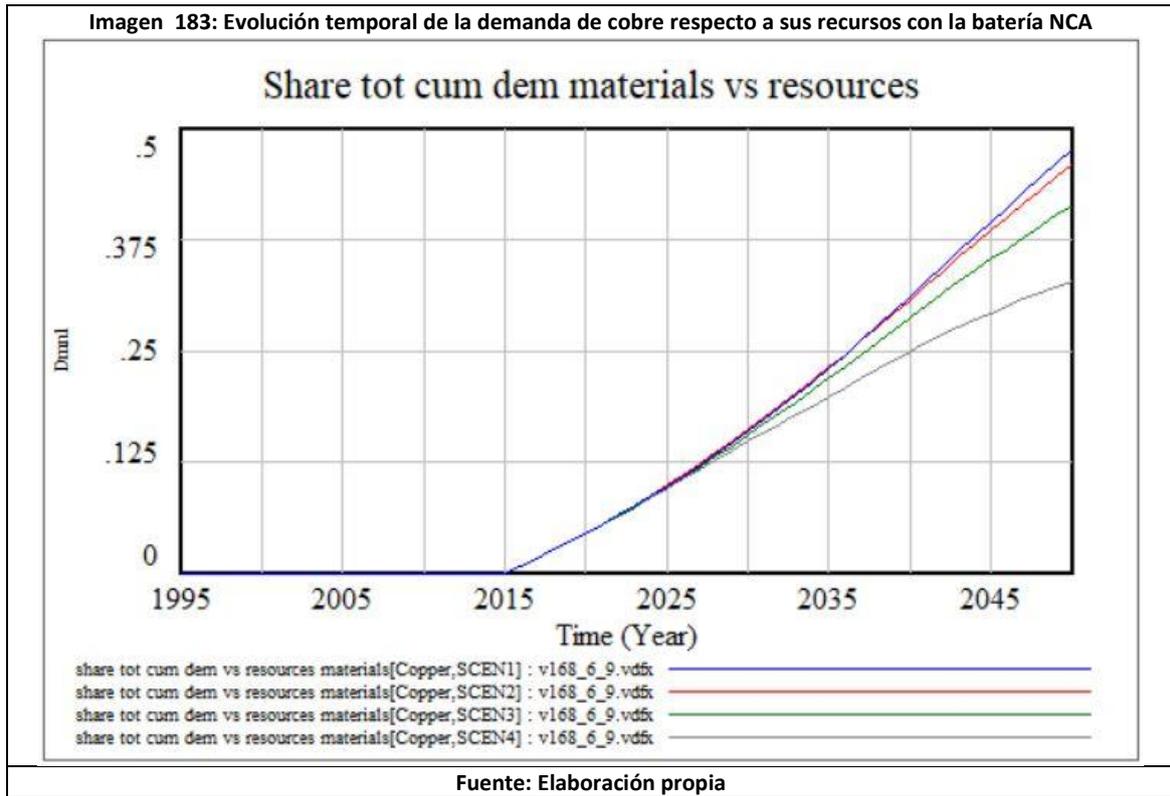
-Batería NMC 622



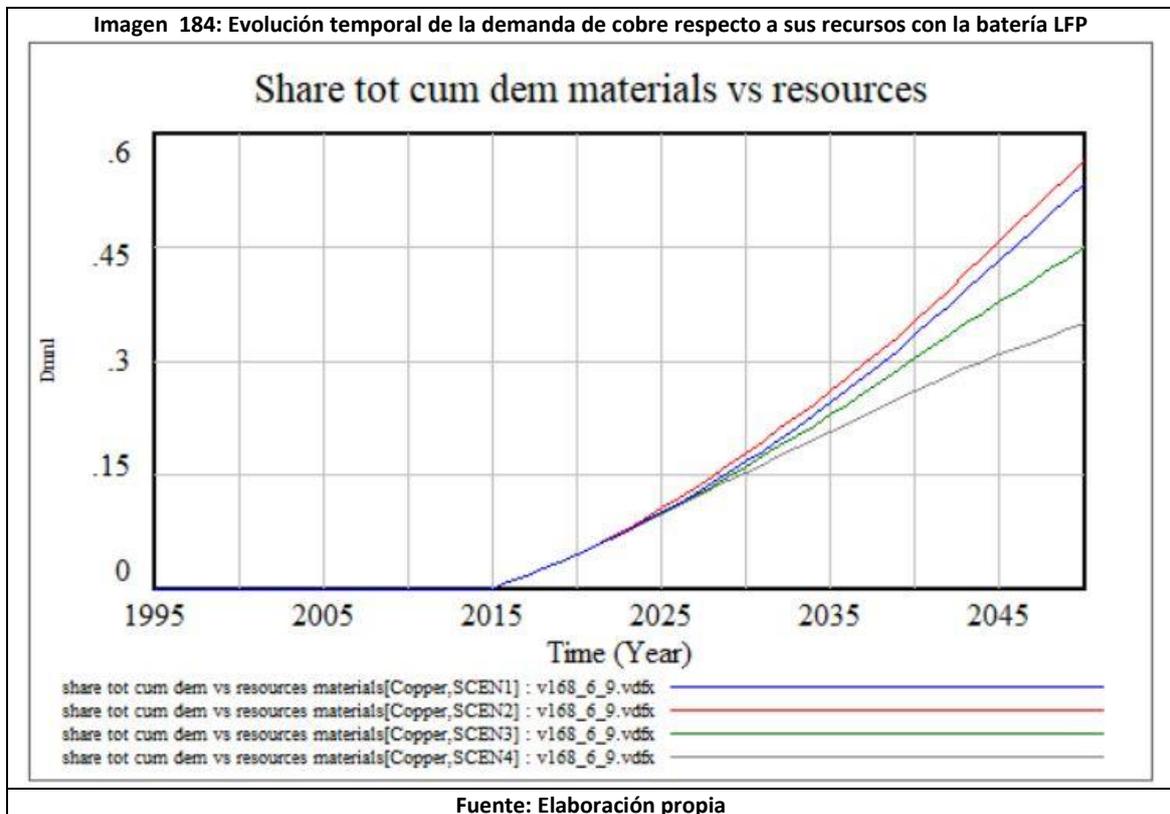
-Batería NMC 811



-Batería NCA



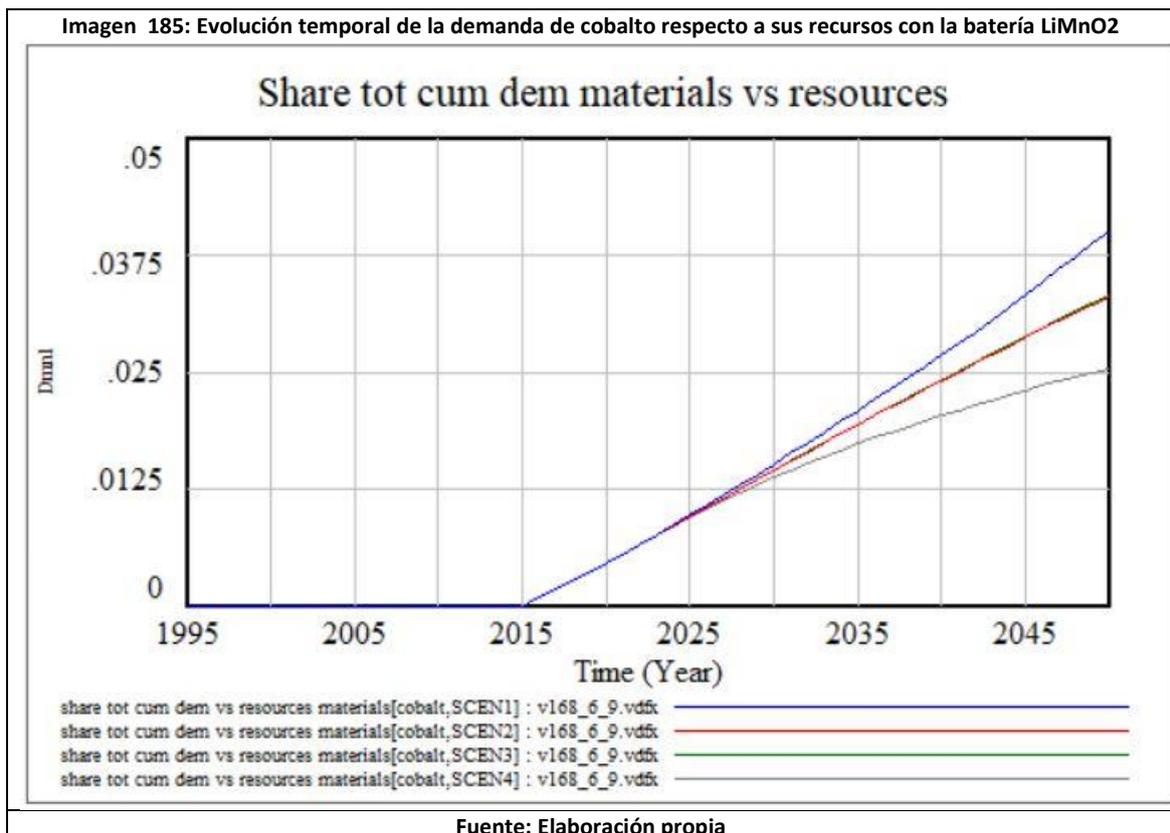
-Batería LFP



En el cobre podemos enunciar que sufrimos un agotamiento significativo de los recursos en el año 2050. Los valores temporales varían según el escenario o batería adoptada tomando valores entre un 25% (escenarios con un número reducido de baterías y empleando baterías con una baja cantidad de cobre) y un 50% (escenarios con alto número de baterías, que poseen gran cantidad de cobre) de recursos agotados en el año 2050.

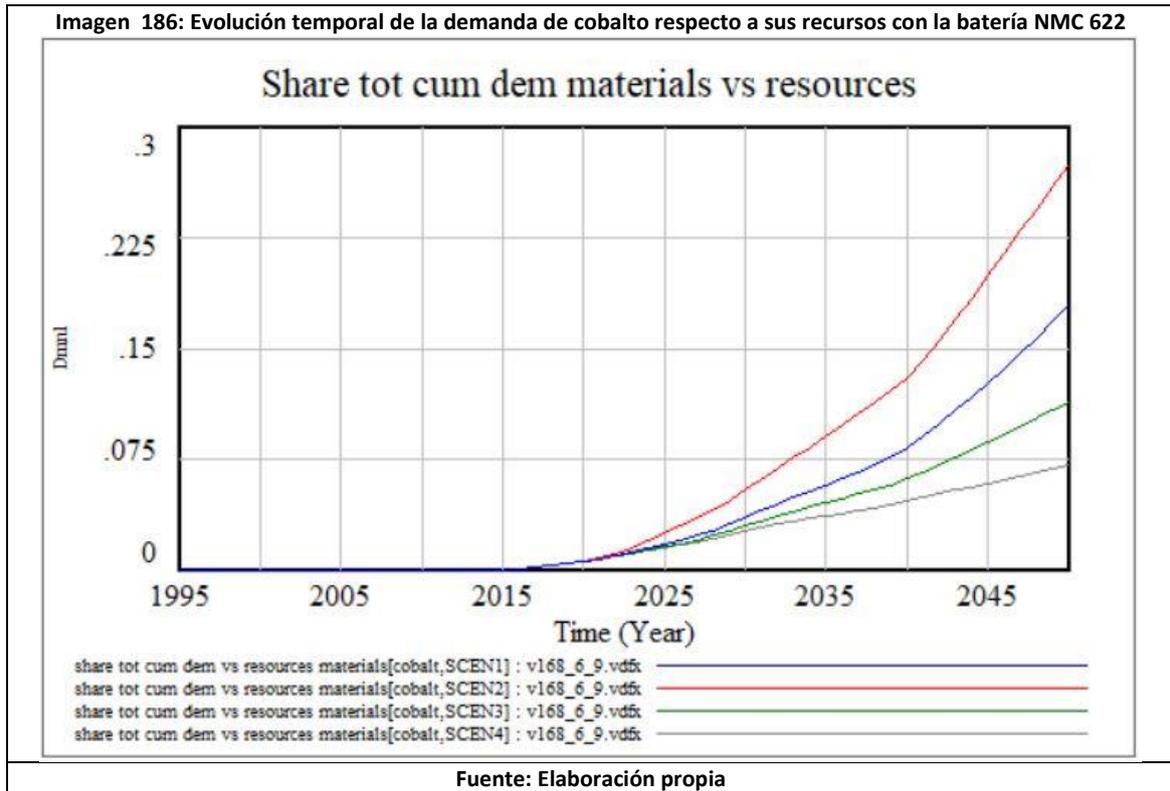
Cobalto

-Batería LiMnO2

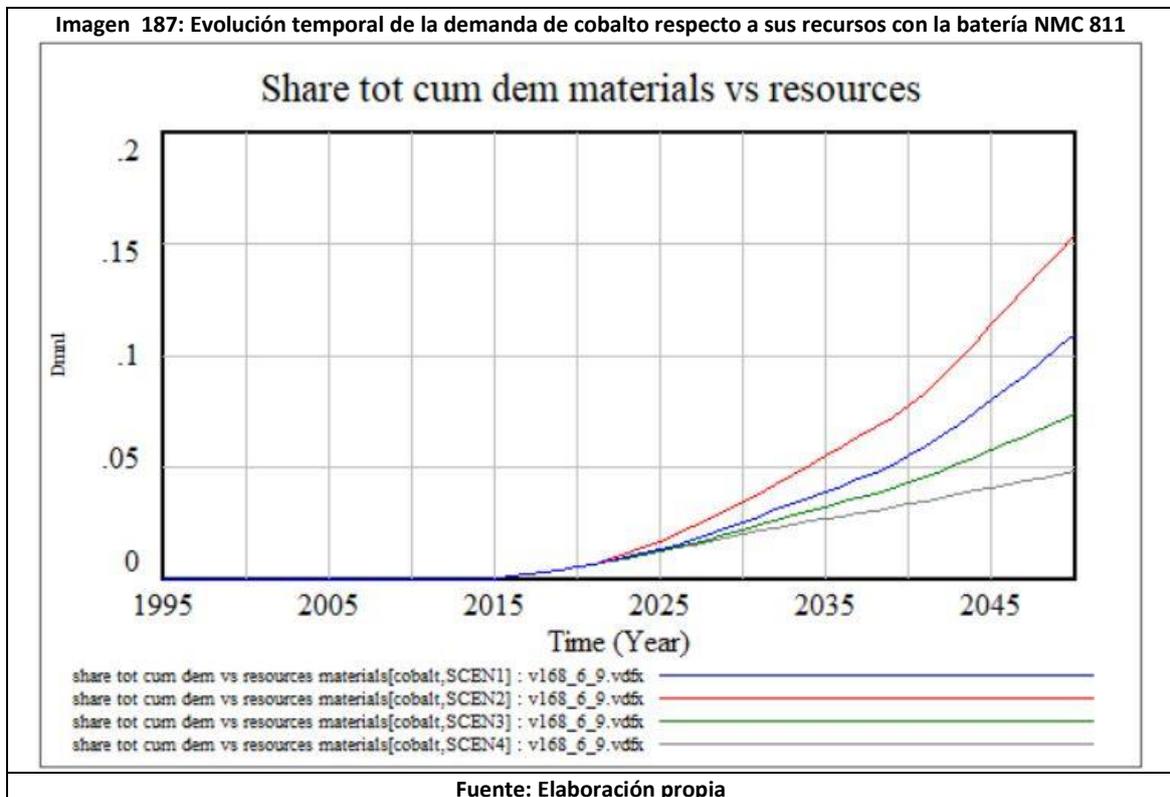


Fuente: Elaboración propia

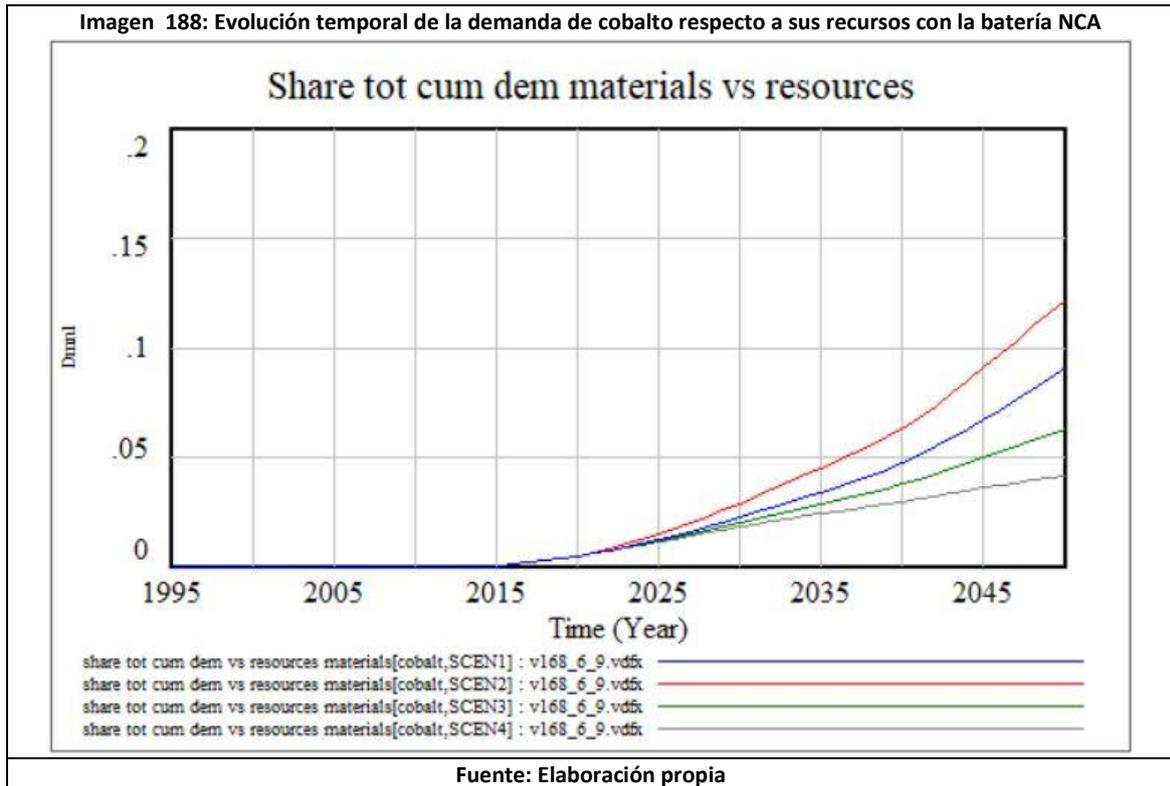
-Batería NMC 622



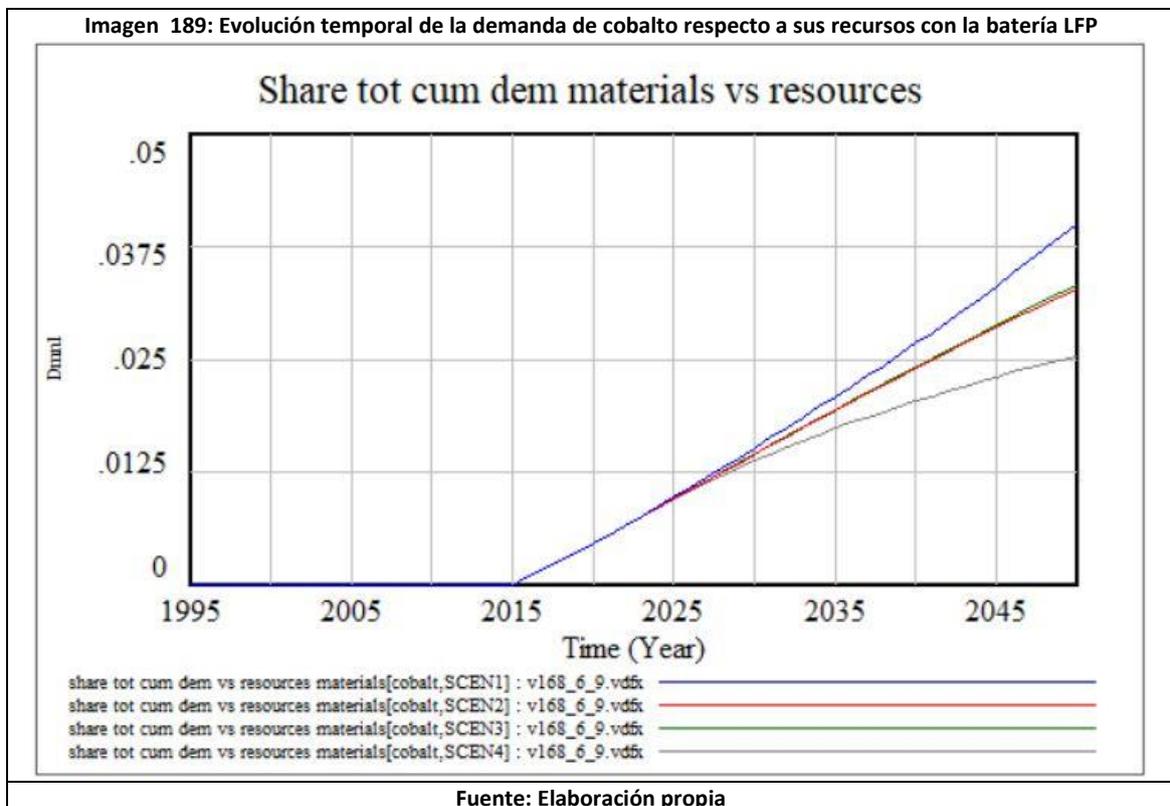
-Batería NMC 811



-Batería NCA



-Batería LFP

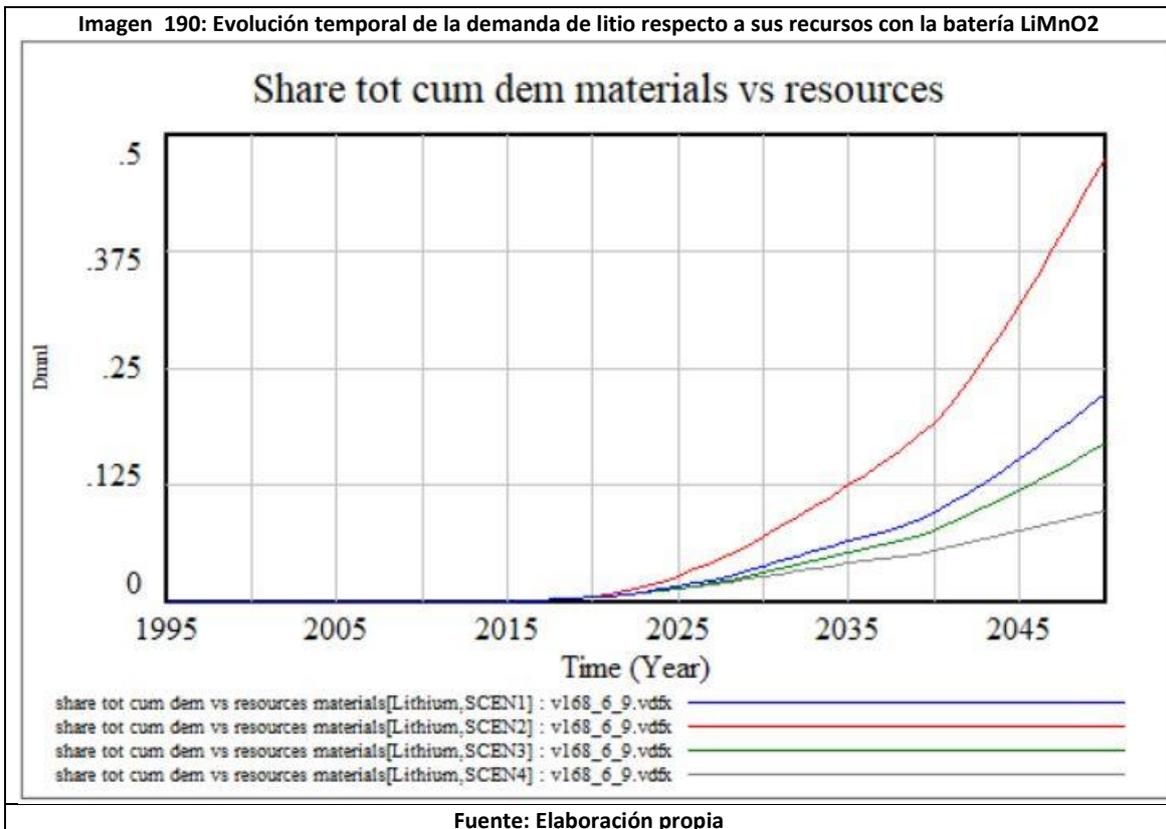


En lo respectivo al cobalto podemos enunciar que al ser un material tan escaso observamos una gran dependencia respecto a los escenarios o baterías elegidas. En el caso de escoger las baterías que no poseen este mineral vemos cómo podemos llegar al año 2050, habiendo gastado entre un 0,25 % y un 0,4 % del mineral. En el caso de escoger las baterías que emplean este material, encontramos una demanda mucho más significativa en casi todos los escenarios, obteniendo una demanda que se encuentra entre el 0.4% y el 27 % en el año 2050.

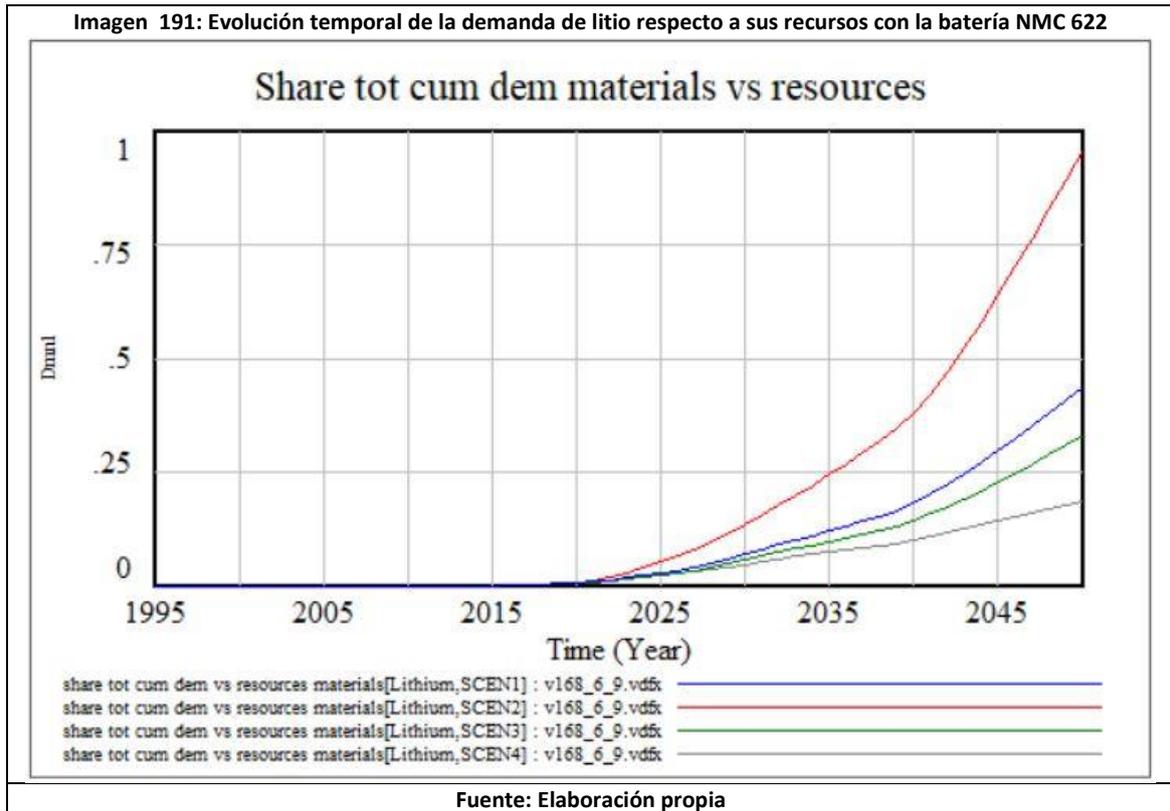
Litio

Batería LiMnO2

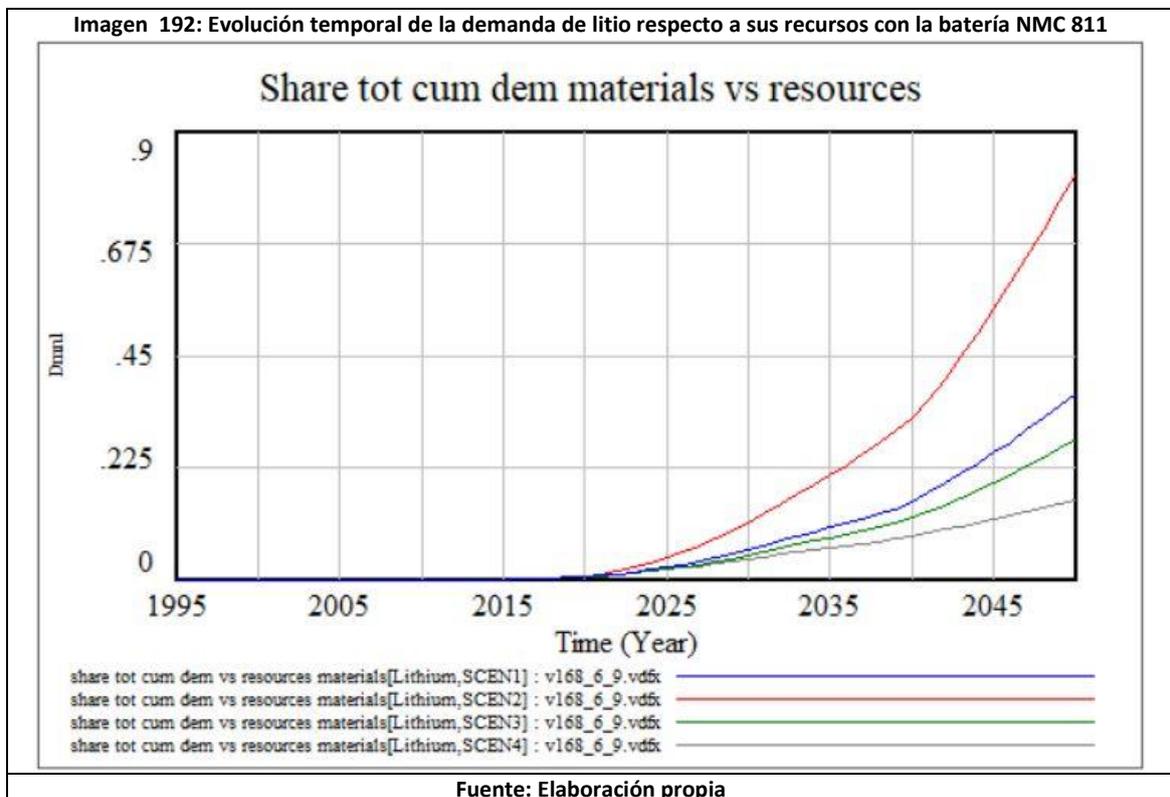
Imagen 190: Evolución temporal de la demanda de litio respecto a sus recursos con la batería LiMnO2



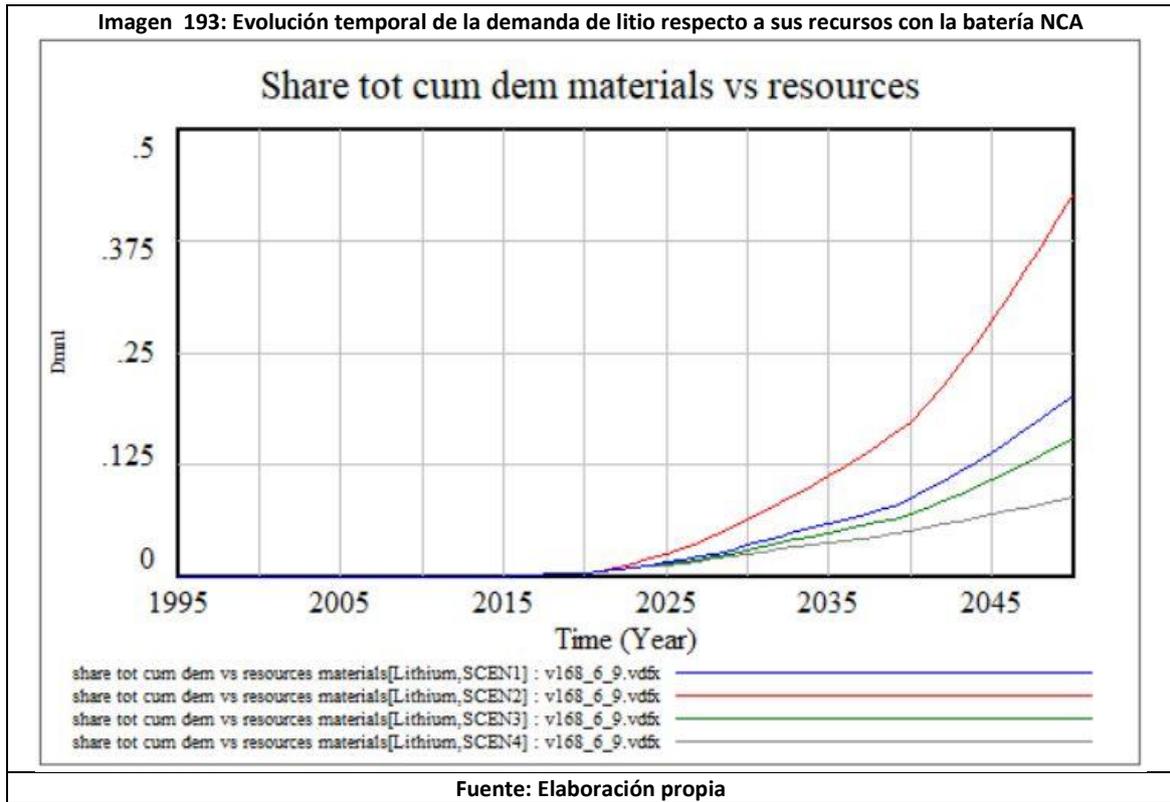
-Batería NMC 622



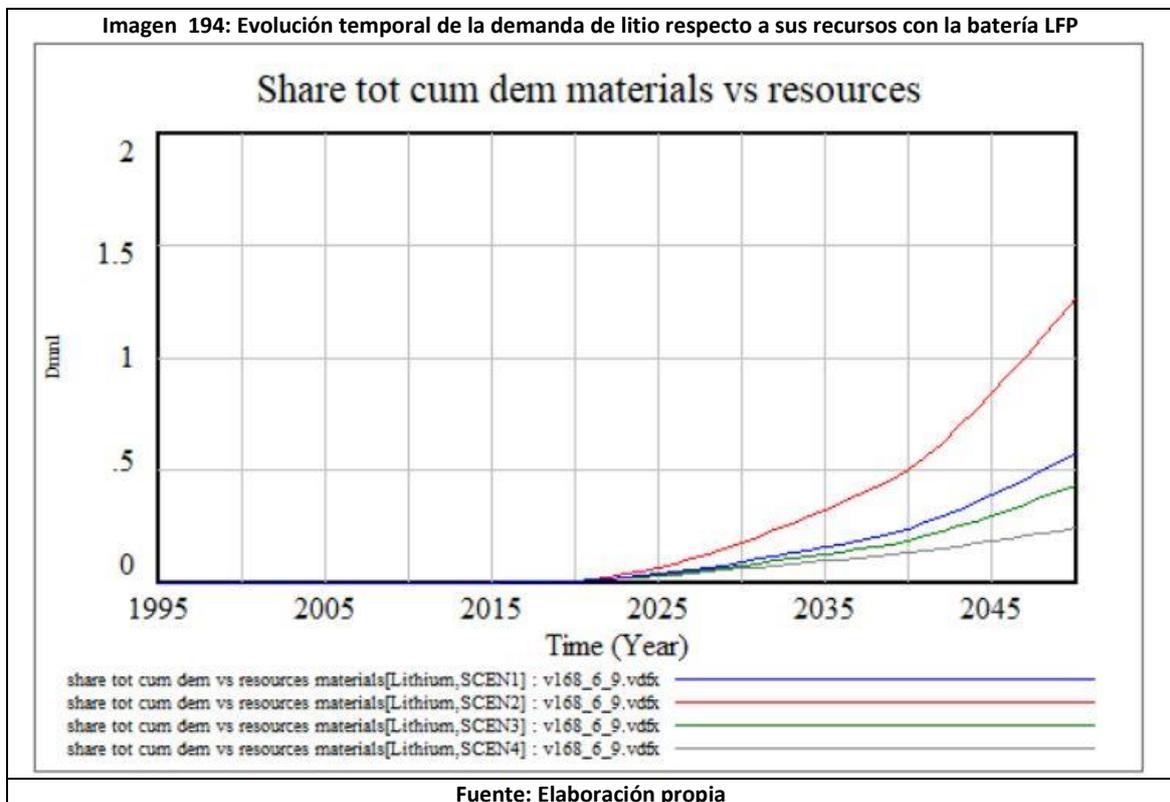
-Batería NMC 811



-Batería NCA



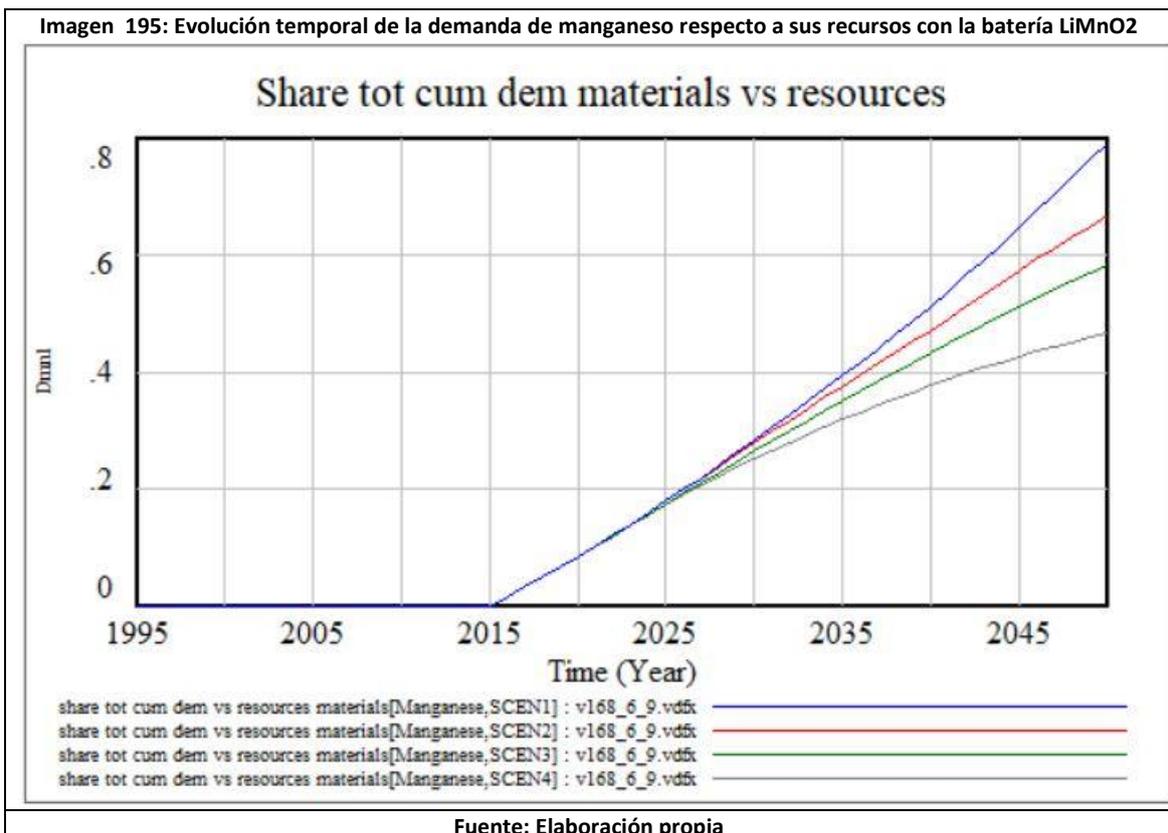
-Batería LFP



En el litio podemos observar que sufrimos un agotamiento significativo de los recursos en el año 2050. Los valores temporales varían según el escenario o batería adoptada tomando valores entre un 9% (escenarios con un número reducido de baterías y empleando baterías con una baja cantidad de aluminio) y un 90% (escenarios con alto número de baterías, que poseen gran cantidad de aluminio) de recursos agotados en el año 2050.

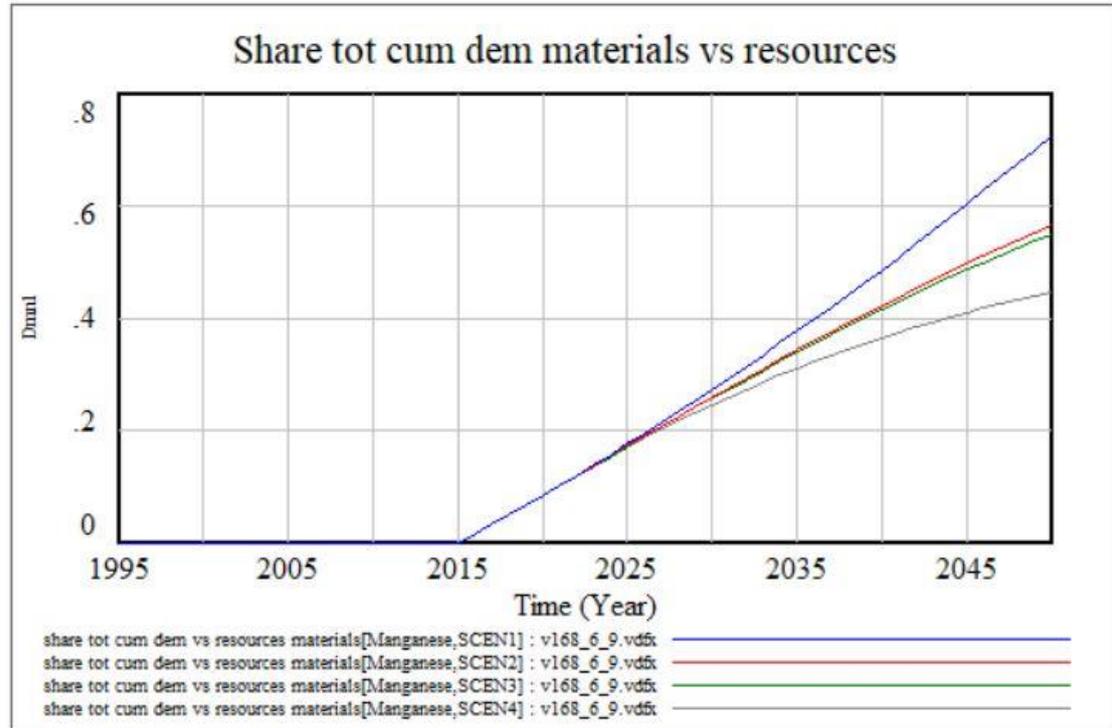
Manganeso

-Batería LiMnO₂



-Batería NMC 622

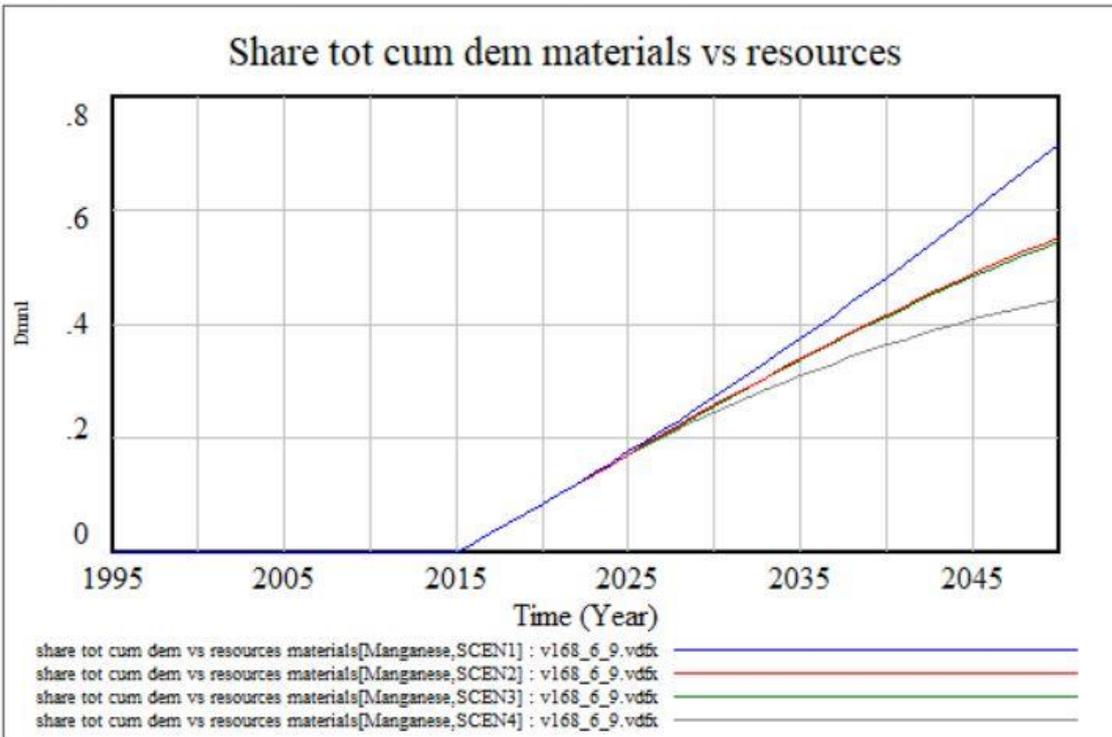
Imagen 196: Evolución temporal de la demanda de manganeso respecto a sus recursos con la batería NMC 622



Fuente: Elaboración propia

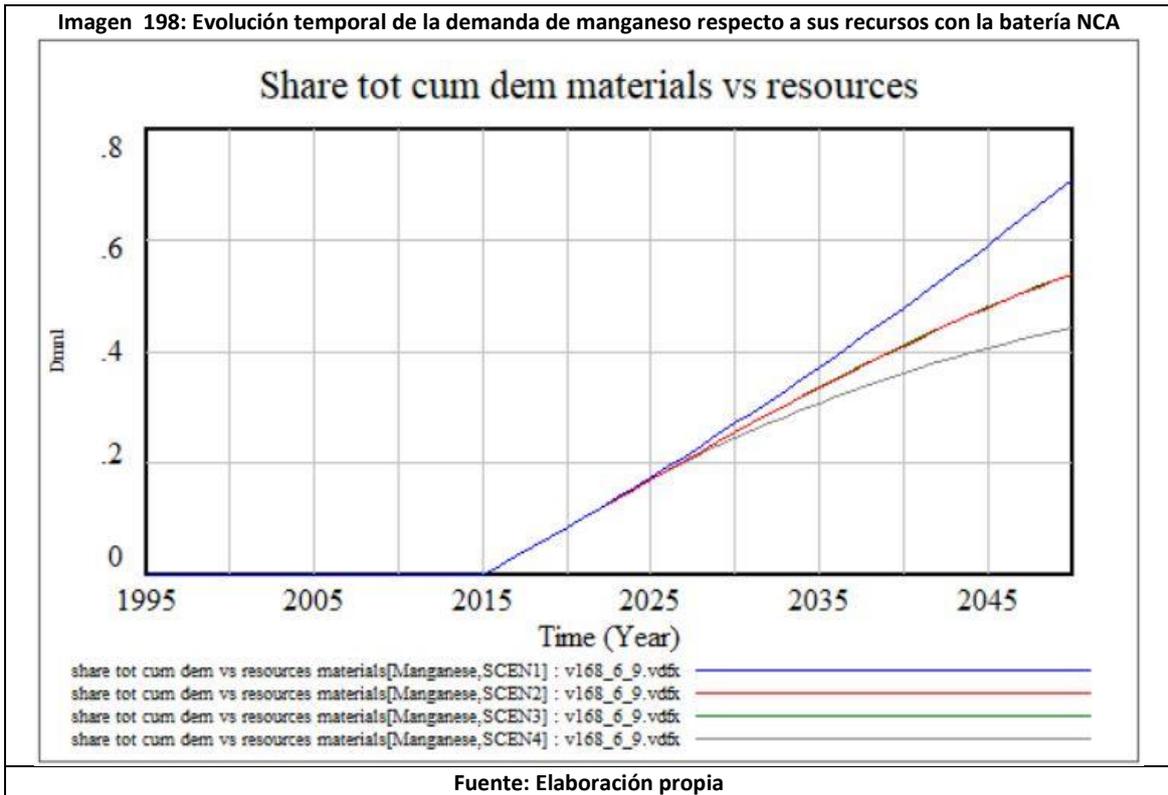
-Batería NMC 811

Imagen 197: Evolución temporal de la demanda de manganeso respecto a sus recursos con la batería NMC 811

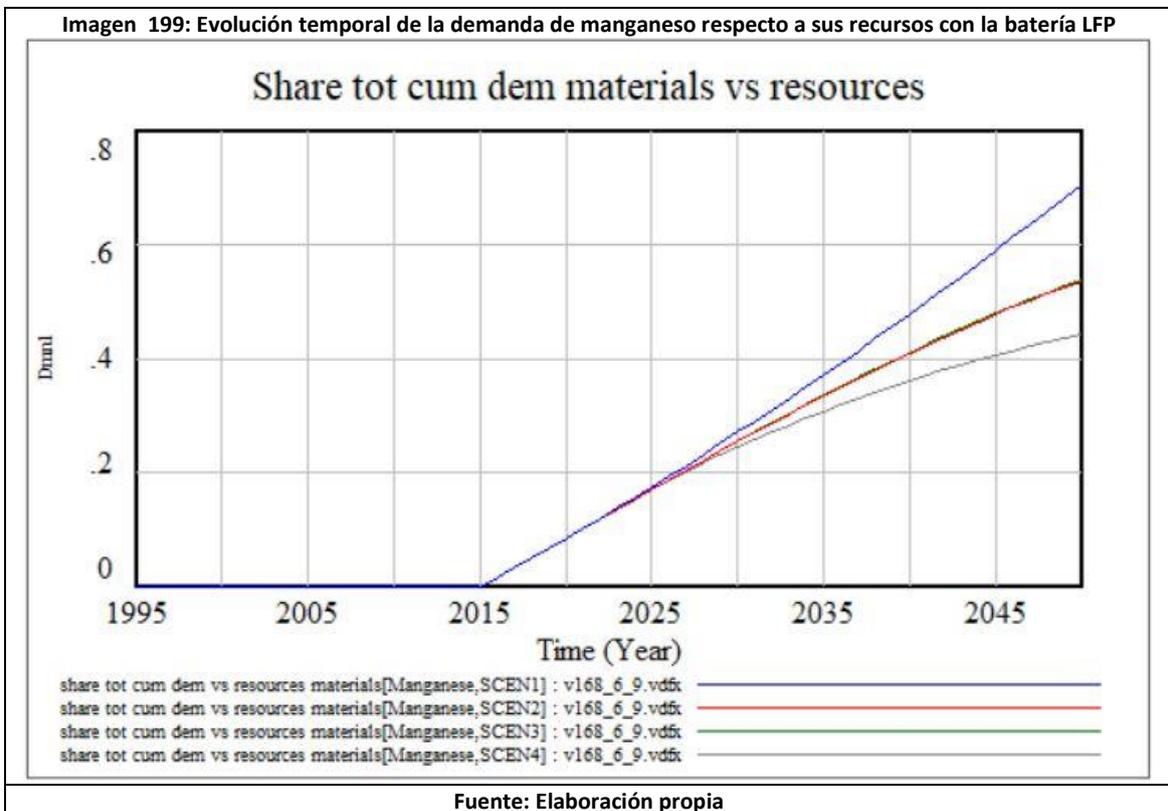


Fuente: Elaboración propia

-Batería NCA



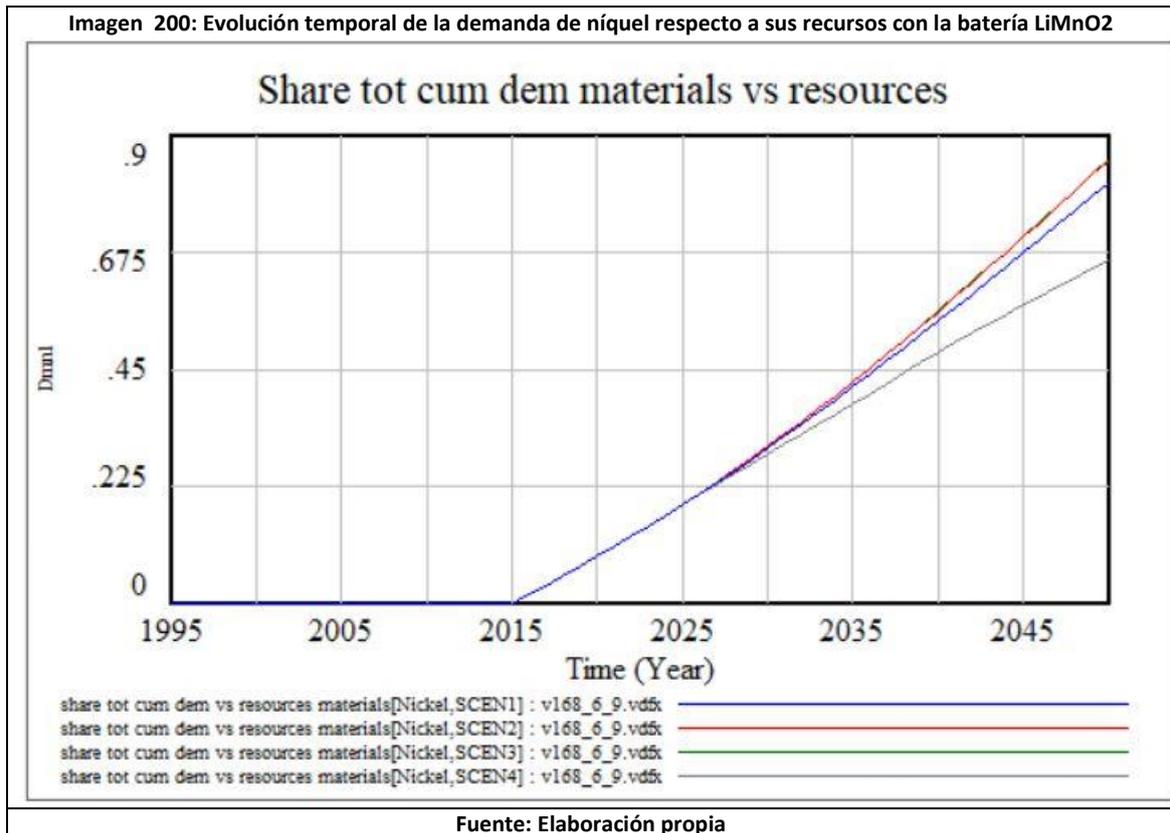
-Batería LFP



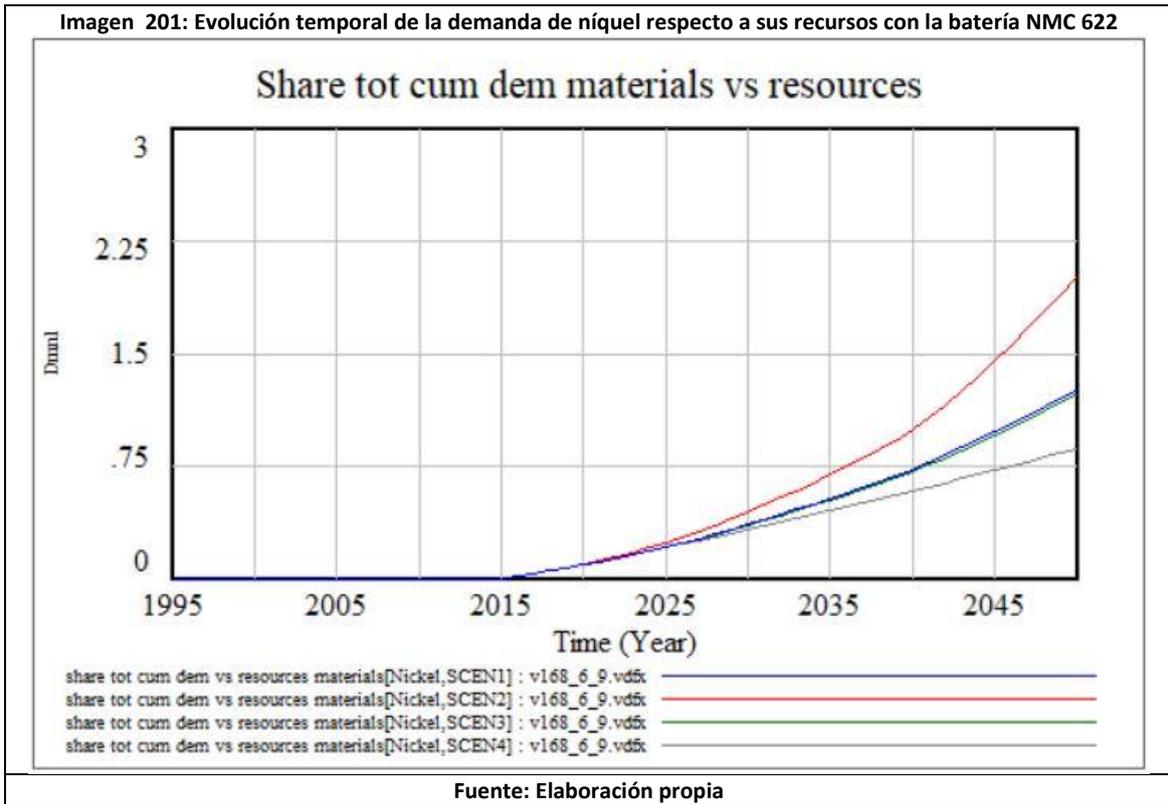
En lo respectivo al manganeso, podemos enunciar que al ser un material muy abundante y con gran demanda por parte del resto de la economía la elección de un tipo batería u otro no es decisivo. En cambio si lo es el escenario, situándose los valores temporales entre el 45% y el 70% de recursos agotados para el año 2050.

Níquel

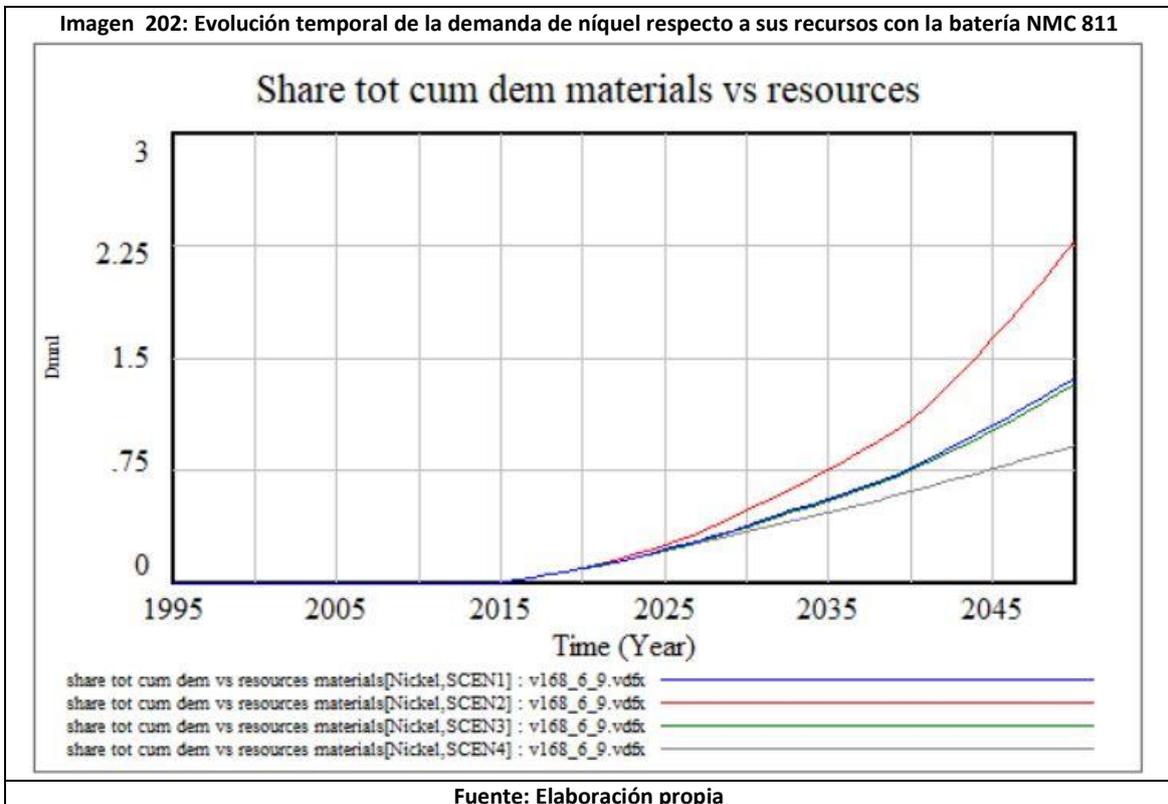
-Batería LiMnO2



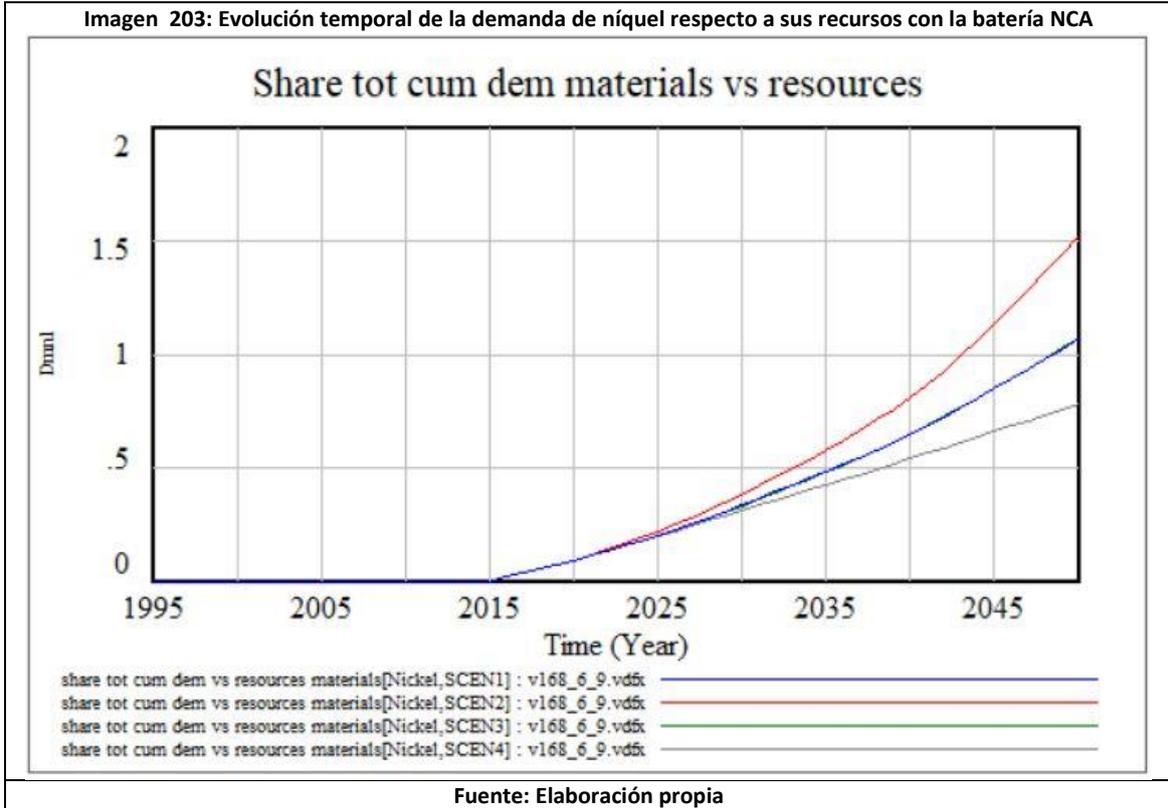
-Batería NCM 622



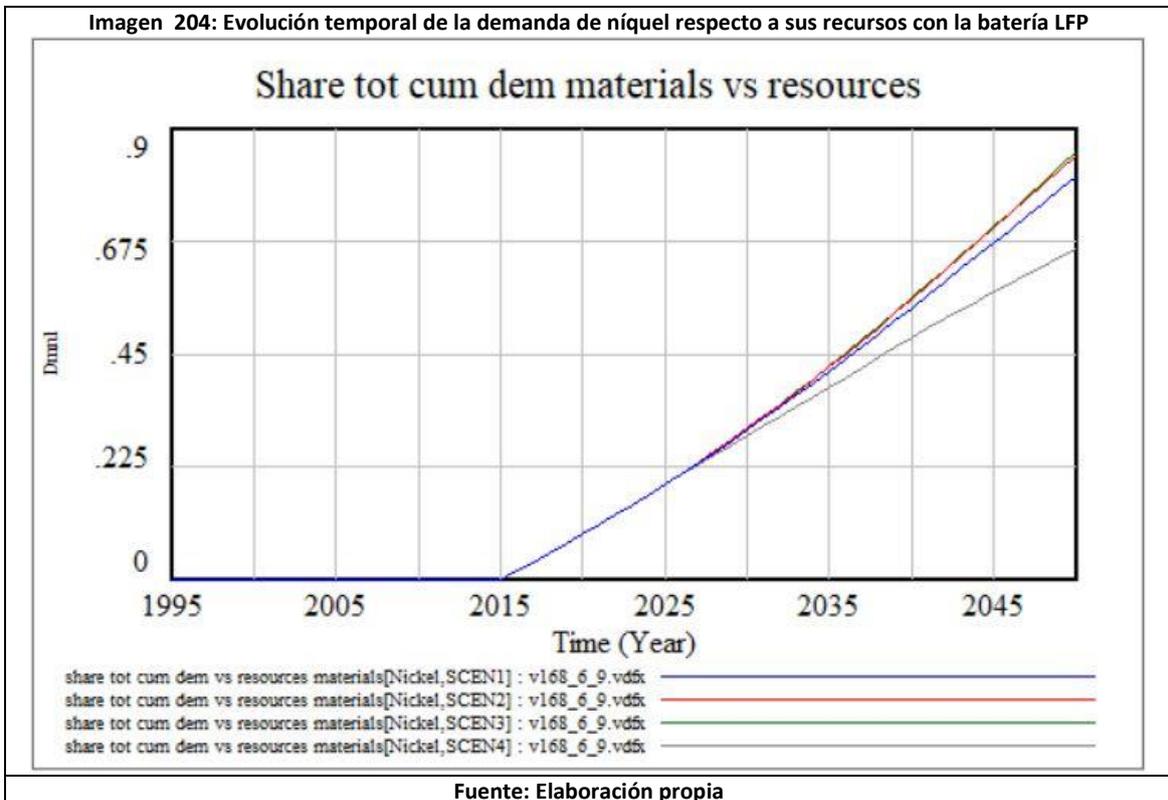
-Batería NMC 811



-Batería NCA



-Batería LFP



En lo respectivo al Níquel, podemos enunciar que sufre el agotamiento de sus recursos en las baterías que emplean este mineral, salvo en el escenario 4 donde la batería NCA y la NMC 811 consiguen no gastar totalmente sus recursos para el año 2050. En cambio con las baterías LiMnO₂ y las baterías LFP no presentan níquel, además como ninguna infraestructura posee tampoco este material nos encontramos que en ningún escenario se agotan los recursos de este mineral.

6.6 Resultados referentes a los vehículos de hidrogeno

En este apartado representaremos los datos de los vehículos de hidrogeno, ya que, como citamos anteriormente, estos no han sido modelados en MEDEAS. Los resultados serán expresados divididos por escenarios, a diferencia de los resultados de los demás vehículos, que estaban expresados por tipo de batería.

-Escenario 1

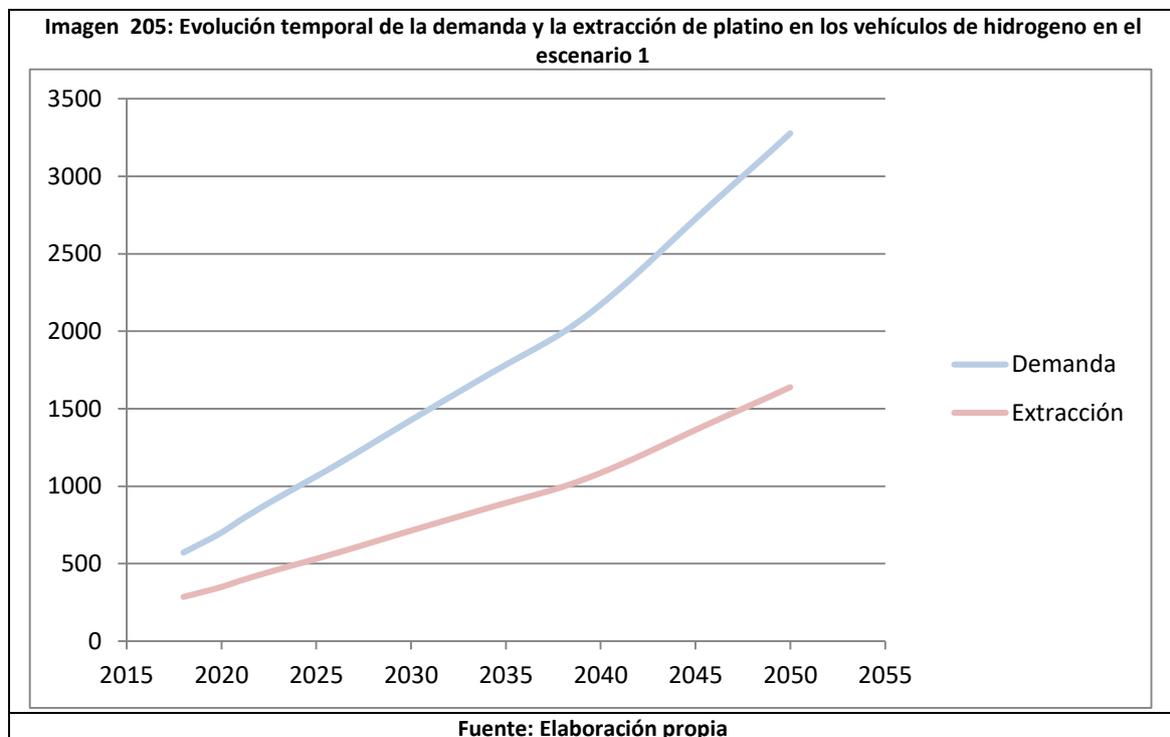
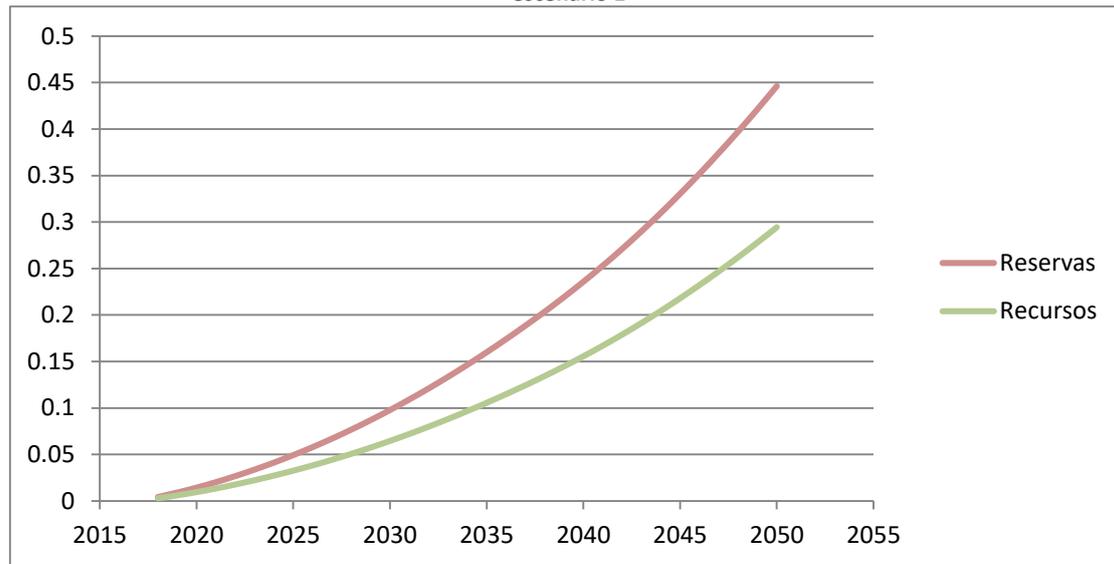


Imagen 206: Evolución temporal del gasto de las reservas y recursos de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 1

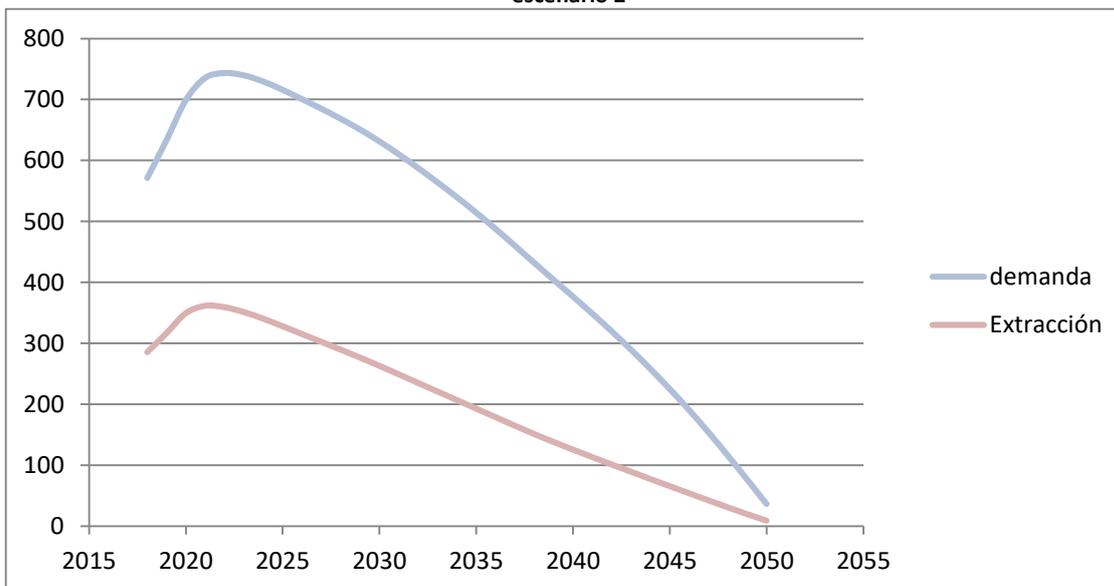


Fuente: Elaboración propia

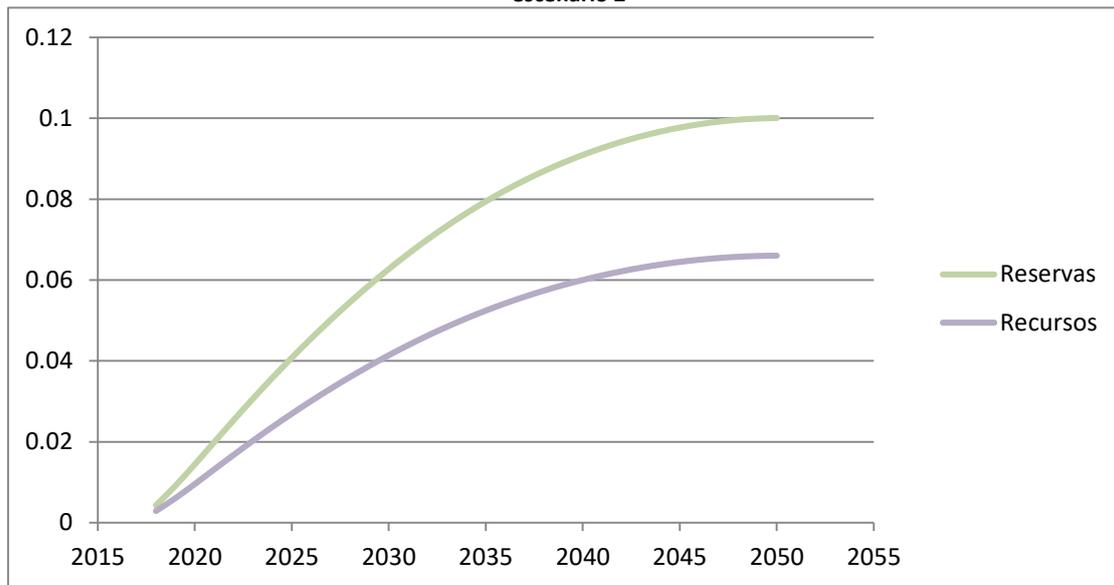
En este escenario podemos observar una gran demanda de vehículos de gas, por lo tanto esto causa una gran demanda de recursos. Esta gran demanda a su vez se traduce en agotar más de un 40 % de las reservas de platino en el año 2050 lo cual es un dato preocupante teniendo en cuenta que solo hemos contabilizado el platino en estos vehículos y no el empleado en la construcción de electrolizadores para producir hidrogeno o el demandado por el resto de la economía. Además la tendencia en el año 2050 no es alentadora y mantiene una pendiente bastante elevada

-Escenario 2

Imagen 207: Evolución temporal de la demanda y la extracción de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 2



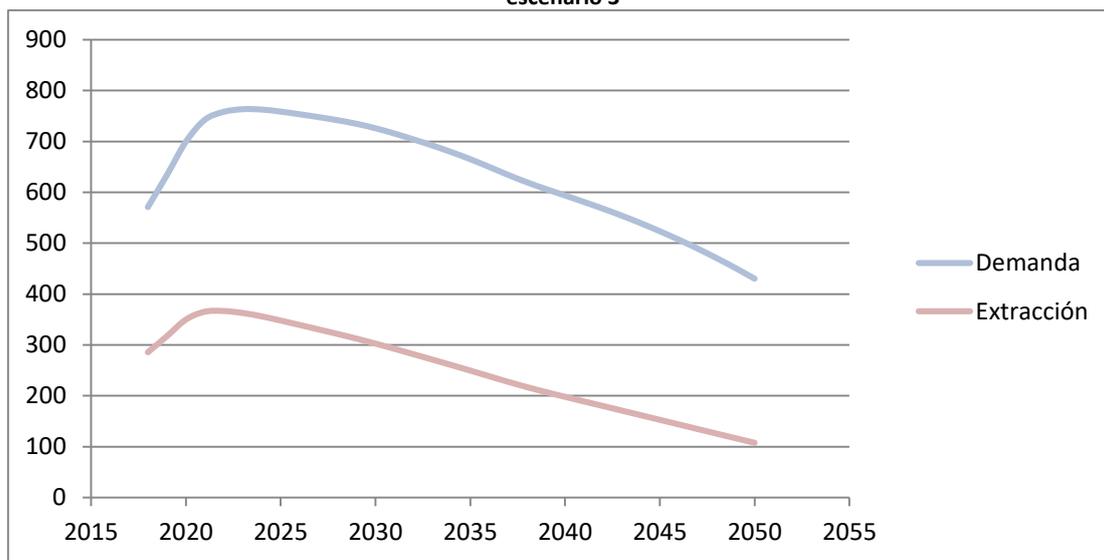
Fuente: Elaboración propia

Imagen 208: Evolución temporal del gasto de las reservas y recursos de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 2

Fuente: Elaboración propia

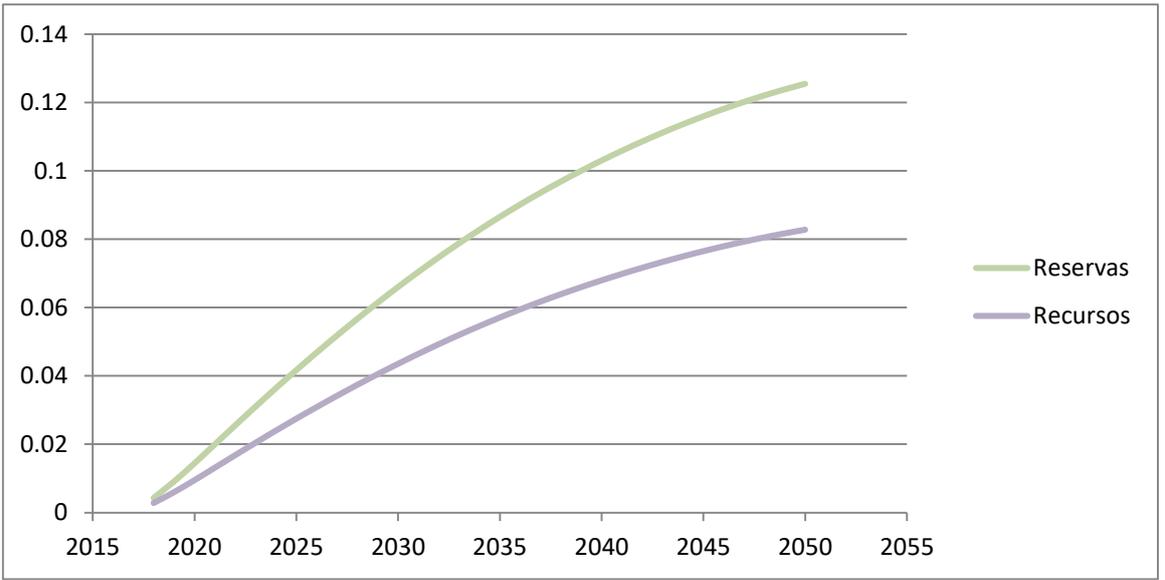
En este escenario observamos una reducción de la demanda de este tipo de vehículos hasta llegar a 0 en el año 2050. Esto, unido al aumento del porcentaje de reciclaje, provoca que el gasto de las reservas de platino sea más comedido que en el escenario anterior con un valor cercano al 10 % en el año 2050. Además podemos ver que la tendencia del gasto de las reservas y recursos se mantiene prácticamente paralela al eje x desde el año 2040, lo que nos indica que no se están demandando nuevos recursos durante estos años.

-Escenario 3

Imagen 209: Evolución temporal de la demanda y la extracción de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 3

Fuente: Elaboración propia

Imagen 210: Evolución temporal del gasto de las reservas y recursos de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 3

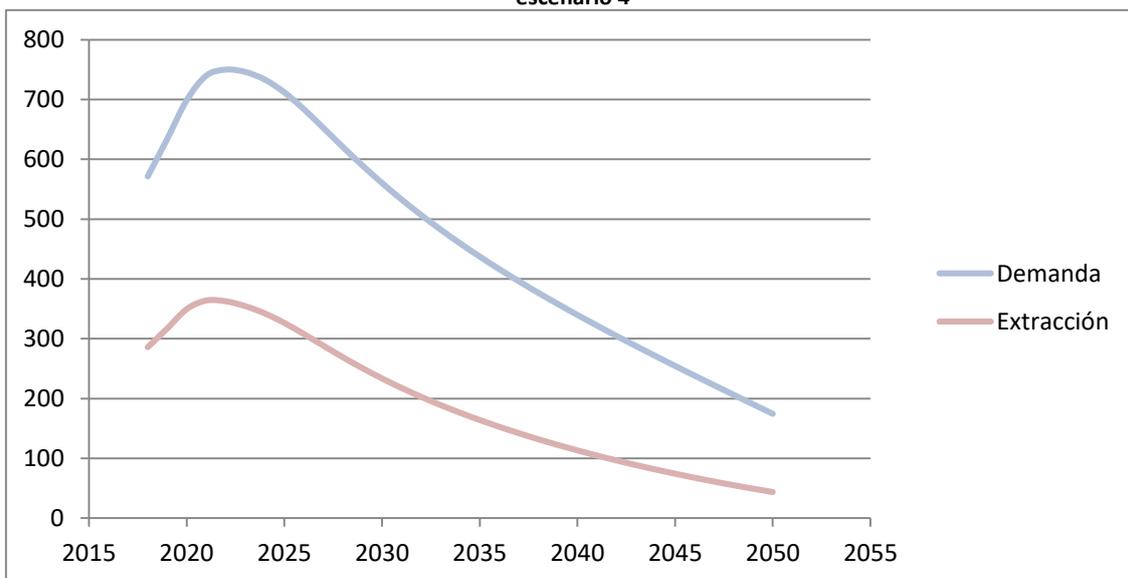


Fuente: Elaboración propia

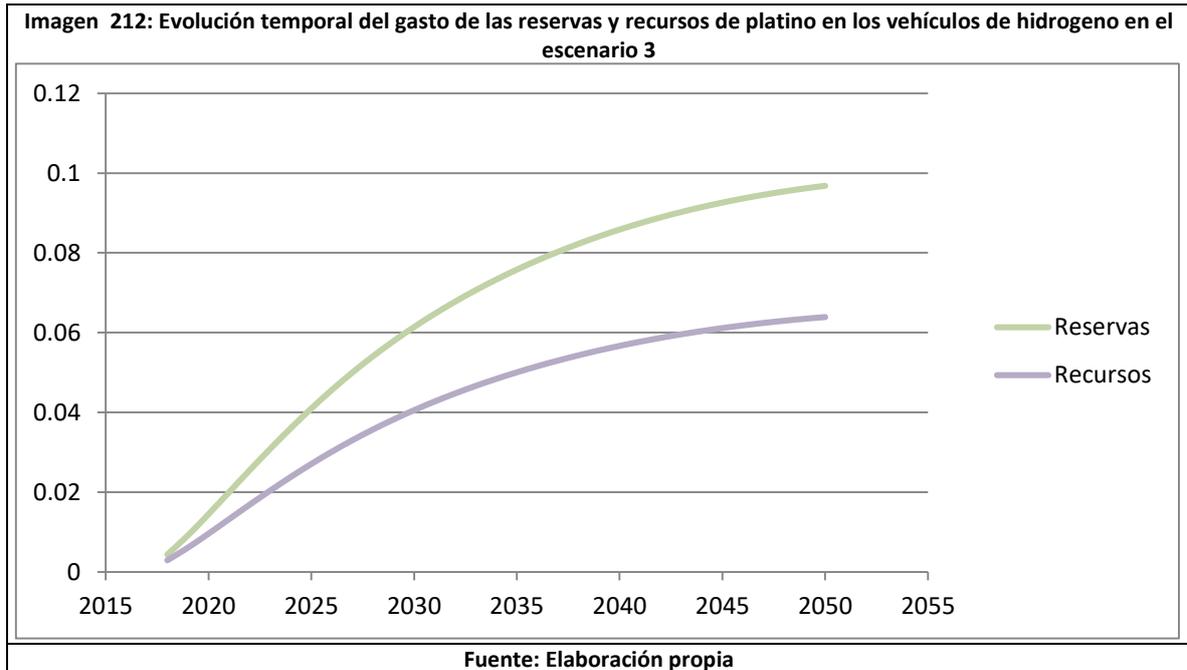
En este escenario observamos una reducción de la demanda de este tipo de vehículos hasta el año 2050. Esto, unido al aumento del porcentaje de reciclaje, provoca que el gasto de las reservas de platino sea similar que en el escenario anterior con un valor cercano al 13 % en el año 2050. Además podemos ver que la tendencia del gasto de las reservas y recursos se mantiene prácticamente paralela al eje x desde el año 2045, lo que nos indica que se están demandando pocos recursos durante estos años.

-Escenario 4

Imagen 211: Evolución temporal de la demanda y la extracción de platino en los vehículos de hidrogeno en el escenario 4



Fuente: Elaboración propia



En este escenario observamos una reducción de la demanda de este tipo de vehículos hasta el año 2050. Esto, unido al aumento del porcentaje de reciclaje, provoca que el gasto de las reservas de platino sea similar que en el escenario anterior con un valor cercano al 10 % en el año 2050. Además podemos ver que la tendencia del gasto de las reservas y recursos se mantiene prácticamente paralela al eje x desde el año 2040, lo que nos indica que se están demandando pocos recursos durante estos años.

6.7 Análisis de sensibilidad

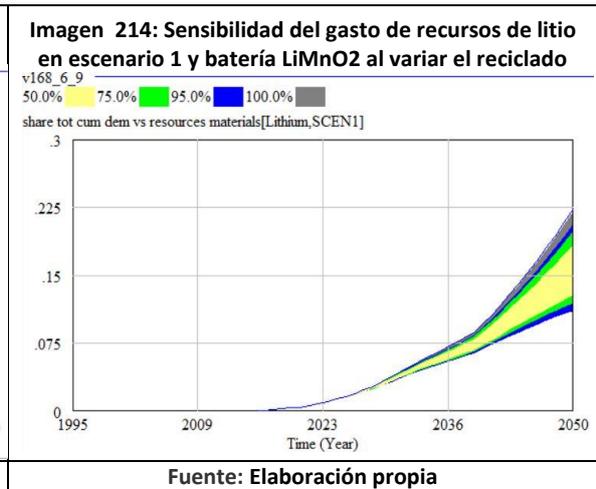
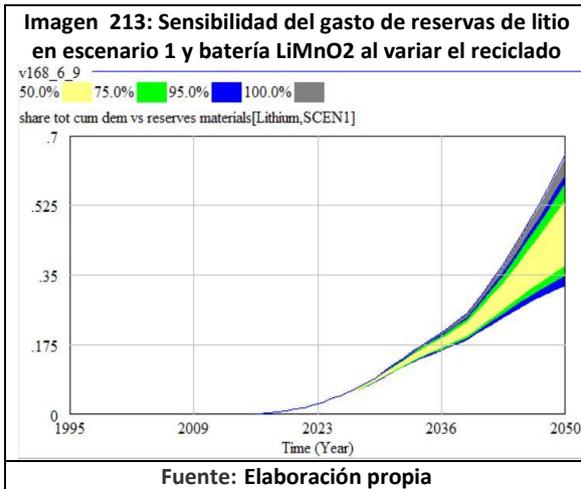
Una vez obtenidos los resultados ejecutaremos un análisis de sensibilidad con el fin de obtener más información. Un análisis de sensibilidad nos permite conocer un los resultados que hubiésemos obtenido variando ciertos inputs o ver la fortaleza de las diferentes hipótesis que hemos tomado.

En primer lugar, ejecutaremos un análisis de sensibilidad al litio para ver cómo afecta la subida del ratio de reciclaje del litio empleado en la electrificación y como podrían ser los resultados en caso de un índice de reciclaje altísimo (en torno al 95 %).

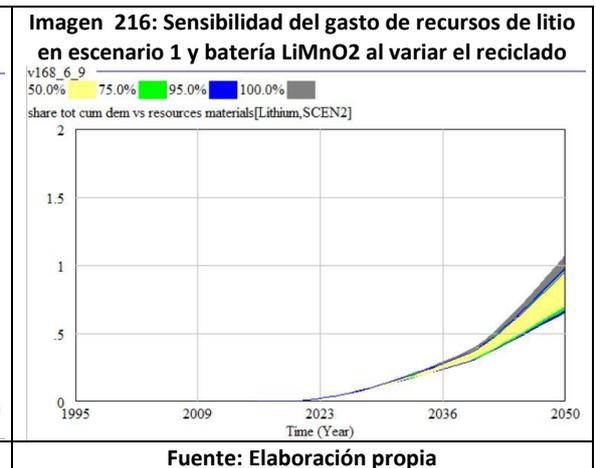
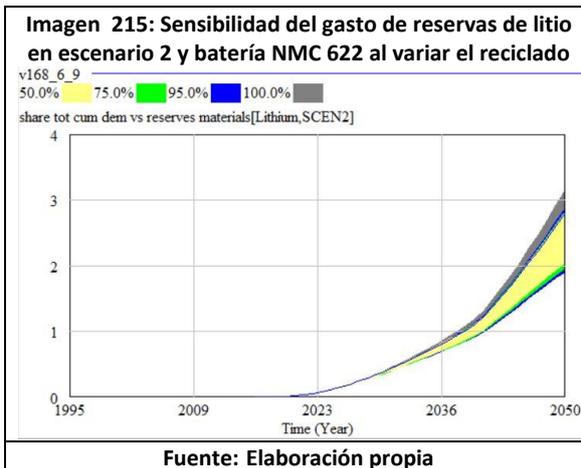
Hacemos este análisis sobre este material porque es usado por todas las baterías y además es un elemento poco usado por el resto de la economía por lo que puede ser muy interesante ver cómo le afecta la variación del ratio de reciclaje de este elemento al emplearse en la electrificación.

Para el análisis se mostraran varios ejemplos con diferentes escenarios y baterías (variando el ratio de reciclado del litio entre el 30% y el 95%):

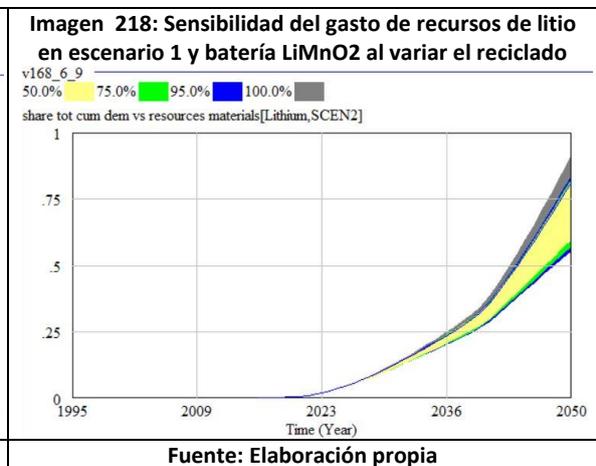
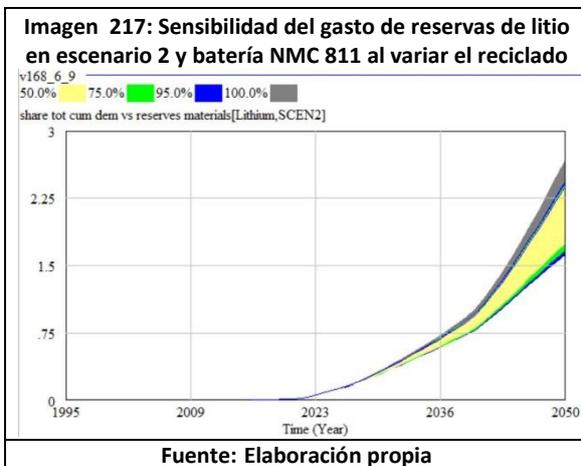
-Escenario 1, batería LiMnO2.

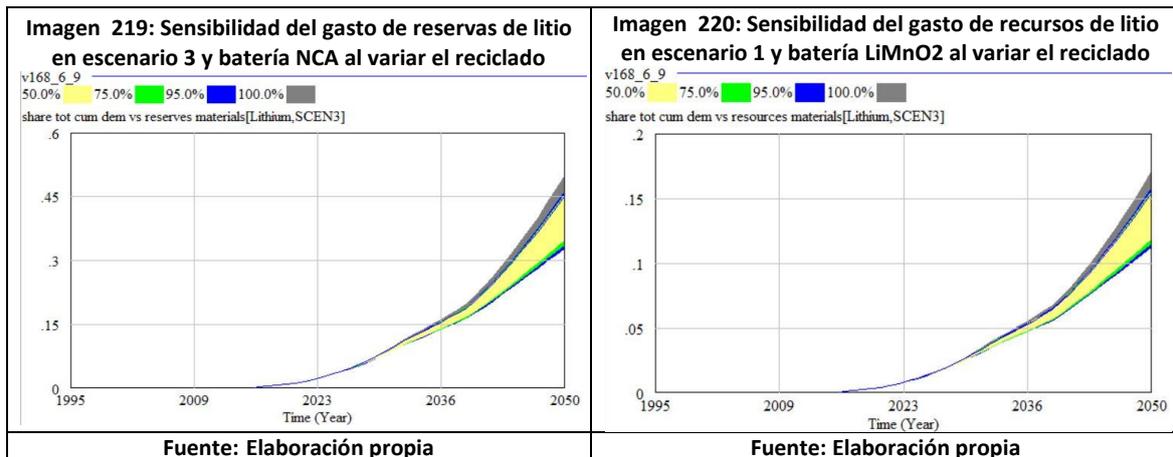
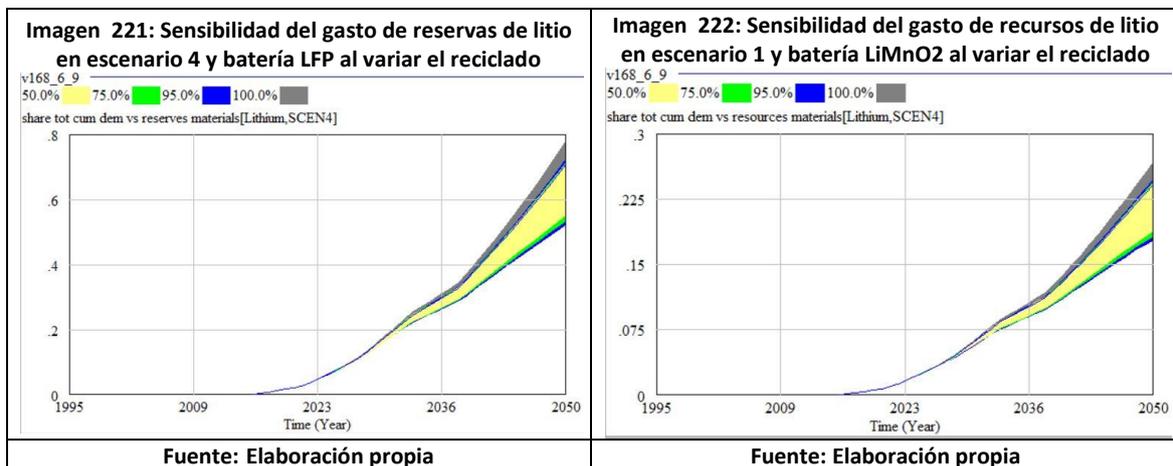


-Escenario 2, batería NMC 622.



-Escenario 2, Batería NMC 811.



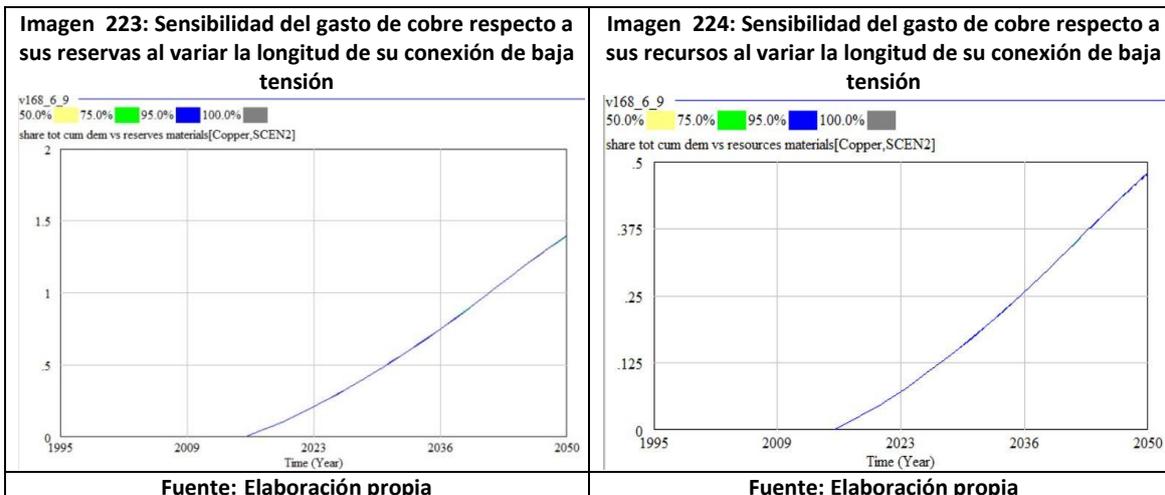
-Escenario 3, batería NCA.**-Escenario 4, batería LFP.**

Una vez ejecutado el análisis en las diferentes combinaciones mostradas podemos enunciar que el ratio del reciclaje del litio en la electrificación toma gran importancia en su evolución temporal, por lo que este será un factor decisivo en la evolución del agotamiento de este mineral.

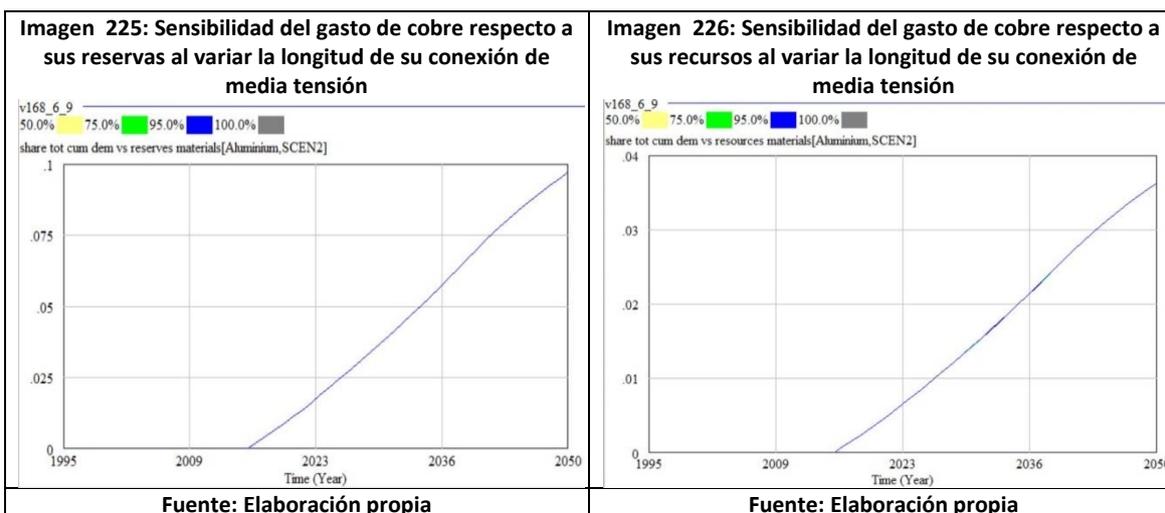
En segundo lugar ejecutaremos otro análisis para medir la fortaleza de varias de las hipótesis que hemos tomado. En este caso mediremos la fortaleza de las hipótesis tomadas en lo respectivo a la longitud de las conexiones de los cargadores y también al número de estos.

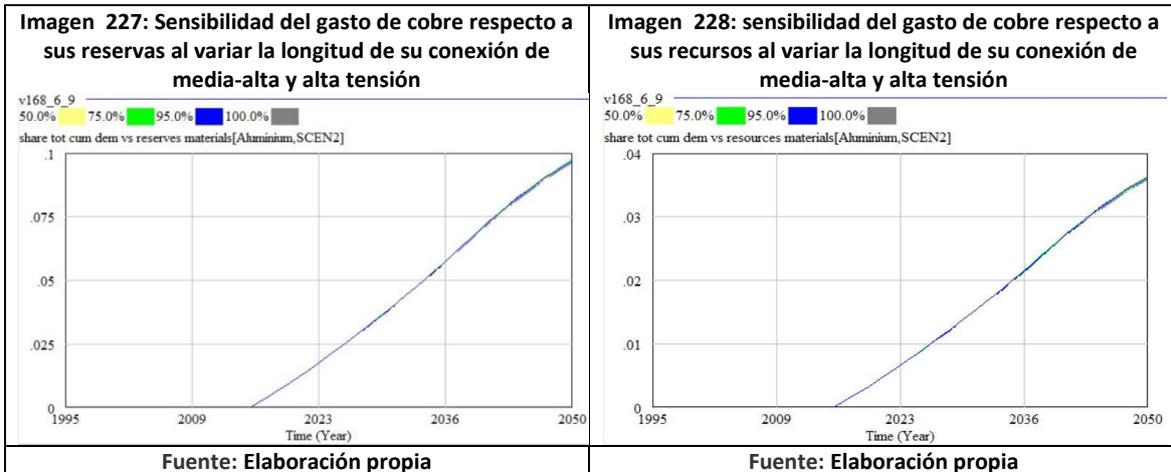
Empezaremos haciendo el análisis haciendo variar la longitud de las diferentes conexiones para poder observar cómo influyen en el resultado final:

-Cargador casero, conexión de bajo voltaje (se ha variado su distancia entre los 10 y los 80 metros):



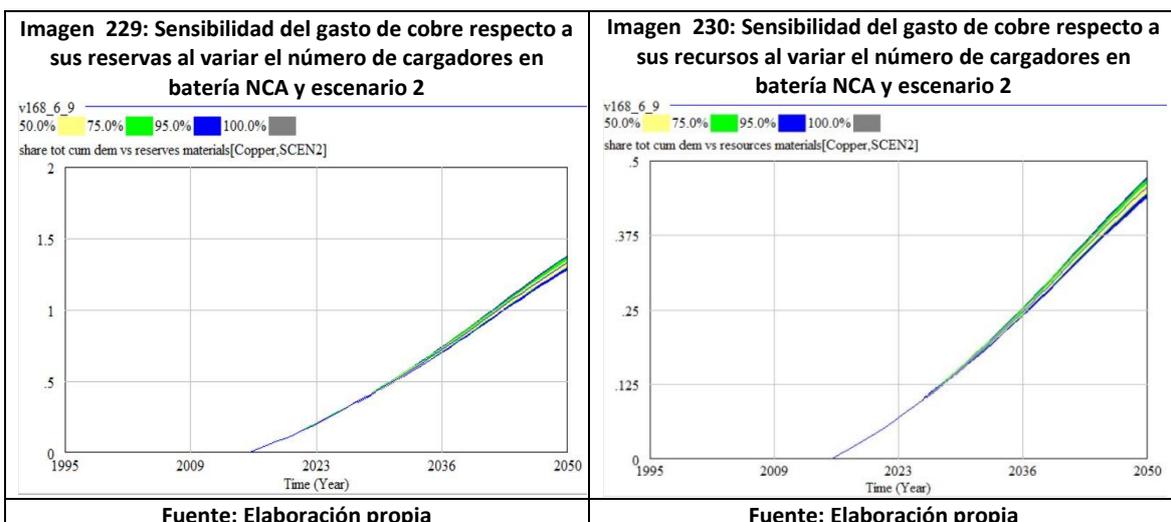
-Cargador normal, conexión de medio voltaje (se ha variado su distancia entre los 10 y los 90 metros):

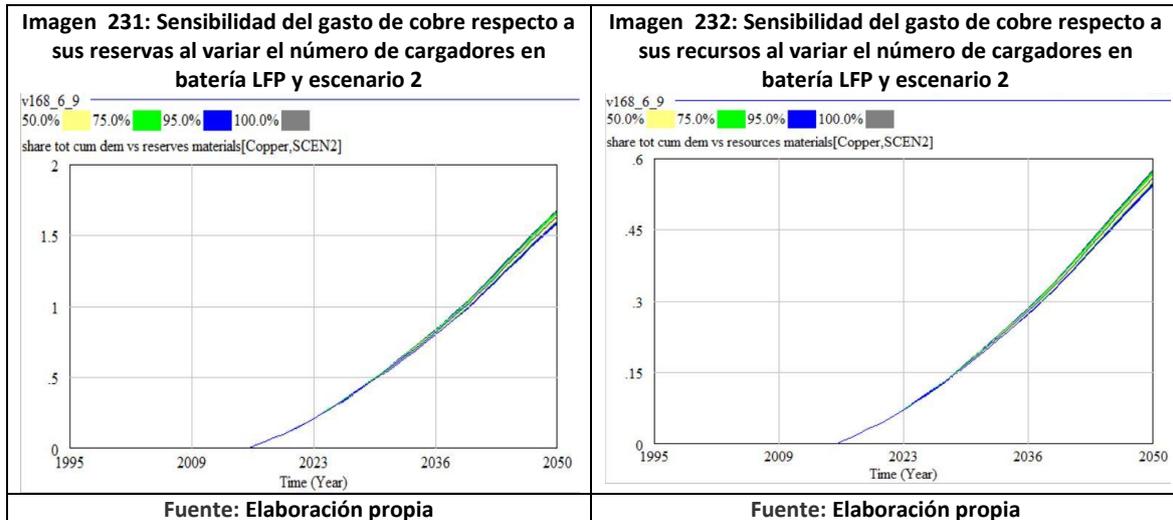


-Cargador rápido, conexión de medio-alto y alto voltaje (se ha variado su distancia entre los 10 y los 90 metros):

Como podemos observar al ser el cobre y el aluminio minerales tan abundantes y emplear cantidades relativamente pequeñas en las conexiones de los cargadores, el variar los metros supuestos de conexión apenas tiene influencia en la demanda global frente a las reservas y recursos por lo que nuestra hipótesis tiene bastante fortaleza.

En último lugar evaluaremos como podría cambiar el cobre empleado si variamos el número de cargadores rápidos, con el fin de poder observar la fortaleza de las hipótesis usadas en lo relativo a los cargadores. Usaremos el escenario 2, puesto que es el escenario con mayor número de vehículos eléctricos y las baterías NCA y LFP, pues son las que menos y más cobre emplean.

-Batería NCA, escenario 2 (variando los cargadores rápidos entre 0 y 0.45 por vehículo particular eléctrico de 4 ruedas):

-Batería LFP, escenario 2 (variando los cargadores rápidos entre 0 y 0.45 por vehículo particular eléctrico de 4 ruedas):

Como podemos observar en el escenario que cuenta con más vehículos eléctricos obtenemos una variación relativamente baja del gasto de las reservas y recursos de cobre, teniendo en cuenta además que se ha introducido una variación de los cargadores muy elevada llegando a los 0,45 cargadores por vehículo particular de 4 ruedas.

Esto nos permite saber que las hipótesis que hemos empleado en este apartado tienen una reducida incertidumbre, pues aunque hagamos un gran cambio en los inputs se traduce en un pequeño cambio en el resultado final del análisis. Por lo que podemos concluir enunciando que nuestras hipótesis tienen una buena fortaleza.

6.8 Evaluación global de los resultados

Una vez presentados los resultados de cada apartado nos dispondremos a evaluar estos globalmente.

En las tablas siguientes (Tabla 45 y Tabla 46) se enunciará de forma resumida el porcentaje de gasto de los diferentes minerales respecto a sus reservas y recursos en los distintos ámbitos de la tecnología de electrificación y en el resto de la economía.

Cabe recordar que en la simulación se elige una única batería empleada a partir de 2015 por lo que cada valor de las diferentes baterías de la tabla es independiente, reflejando el requerimiento de materiales en el caso de que a partir de 2015 solo se emplee esa batería. Además se expresarán en las tablas los datos del platino empleado en los vehículos de hidrógeno, pero no del resto de la economía, ya que el platino no se encuentra introducido en el modelo MEDEAS.

Tabla 45: Requerimientos de materiales en relación a las reservas en los 4 escenarios

En azul se encuentran los resultados que han podido ser hallados gracias a las nuevas inclusiones en el modelo y que no podían ser obtenidos en el modelo original		Tendencias EV esperadas	EV Alto	E-bike	Decrecimiento	
Gasto de materiales con relación a las reservas						
Aluminio en 2050 para la electrificación	Cargadores EV	0%	0%	0%	0%	
	Conexión de los cargadores EV	0,08%	0,12%	0,08%	0,04%	
	catenarias	0%	0%	0%	0%	
	EV baterías	LiMnO2	0,3%	0,5%	0,17%	0,10%
		NMC 622	0,4%	0,68%	0,23%	0,13%
		NMC 811	0,4%	0,68%	0,23%	0,13%
		NCA	0,2%	0,38%	0,12%	0,07%
LFP	0,89%	1,45%	0,49%	0,28%		
Aluminio en 2050 del resto de la economía		11,8%	9,10%	9,05%	7,45%	
Cobre en 2050 para la electrificación	Cargadores EV	2,29%	5,3%	0,76%	0,42%	
	Conexión de los cargadores EV	0,36%	0,58%	0,43%	0,23%	
	Catenarias	1,31%	3,5%	6,3%	3,03%	
	Vehículos electrificados respecto a ICE	4,63%	8,5%	2,4%	1,35%	
	EV baterías	LiMnO2	7,8%	14,76%	4,92%	2,74%
		NMC 622	11,53%	21,64%	7,21%	4,02%
		NMC 811	11,53%	21,64%	7,21%	4,02%
NCA		6,19%	11,79%	3,93%	2,19%	
LFP	22,8%	42,47%	14,19%	7,94%		
Cobre en 2050 del resto de la economía		123%	103,8%	103,3%	86,53%	
Cobalto en 2050 para la electrificación	Cargadores EV	0%	0%	0%	0%	
	Conexión de los cargadores EV	0%	0%	0%	0%	
	Catenarias	0%	0%	0%	0%	
	EV baterías	LiMnO2	0%	0%	0%	0%
		NMC 622	281,63%	487,71%	162,04%	91,39%
		NMC 811	140,81%	243,91%	80,99%	45,69%
		NCA	102,76%	178,63%	58,99%	33,22%
LFP	0%	0%	0%	0%		
Cobalto en 2050 del resto de la economía		80,86%	66,59%	67,06%	51,03%	

Litio en 2050 para la electrificación	Cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Conexión de los cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Catenarias		0%	0%	0%	0%
	EV baterías	LiMnO2	58,88%	132,83%	43,55%	23,78%
		NMC 622	122,08%	274,27%	90,43%	49,43%
		NMC 811	103,33%	232,25%	76,63%	41,82%
NCA		52,61%	118,72%	38,90%	21,24%	
LFP		162,66%	363,65%	120,77%	66,09%	
Litio en 2050 del resto de la economía			6,55%	6,35%	6,4%	4,86%
Manganeso en 2050 para la electrificación	Cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Conexión de los cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Catenarias		0%	0%	0%	0%
	EV baterías	LiMnO2	15,62%	23,92%	7,9%	4,46%
		NMC 622	3,5%	5,30%	1,75%	0,97%
		NMC 811	1,87%	2,81%	0,91%	0,48%
NCA		0%	0%	0%	0%	
LFP		0%	0%	0%	0%	
Manganeso en 2050 del resto de la economía			127,62%	96,69%	97,47%	79,79%
Níquel en 2050 para la electrificación	Cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Conexión de los cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Catenarias		0%	0%	0%	0%
	EV baterías	LiMnO2	0%	0%	0%	0%
		NMC 622	72,87%	117,62%	39,16%	22,33%
		NMC 811	89,67%	144,81%	48,17%	27,45%
NCA		41,87%	67,80%	22,44%	12,76%	
LFP		0%	0%	0%	0%	
Níquel en 2050 del resto de la economía			129,73%	101,37%	101,63%	81,99%
Platino empleado en 2050 para los vehículos de hidrogeno			44,61%	10%	12,38%	9,68%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46: Requerimientos de materiales en relación a los recursos en los 4 escenarios

En azul se encuentran los resultados que han podido ser hallados gracias a las nuevas inclusiones en el modelo y que no podían ser obtenidos en el modelo original		Tendencias EV esperadas	EV Alto	E-bike	Decrecimiento	
Gasto de reservas con relación a los recursos						
Aluminio en 2050 para la electrificación	Cargadores EV	0%	0%	0%	0%	
	Conexión de los cargadores EV	0,03%	0,06%	0,04%	0,02%	
	catenarias	0%	0%	0%	0%	
	EV baterías	LiMnO2	0,11%	0,19%	0,06%	0,04%
		NMC 622	0,15%	0,25%	0,09%	0,05%
		NMC 811	0,15%	0,25%	0,9%	0,05%
		NCA	0,07%	0,14%	0,04%	0,03%
LFP	0,33%	0,54%	0,18%	0,10%		
Aluminio en 2050 del resto de la economía		4,4%	3,4%	3,38%	2,78%	
Cobre en 2050 para la electrificación	Cargadores EV	0,77%	1,77%	0,25%	0,14%	
	Conexión de los cargadores EV	0,12%	0,2%	0,15%	0,08%	
	Catenarias	0,45%	1,17%	2,16%	1,05%	
	Vehículos electrificados respecto a ICE		1,59%	2,91%	0,82%	0,46%
	EV baterías	LiMnO2	2,74%	5,06%	1,69%	0,94%
		NMC 622	4,02%	7,42%	2,47%	1,38%
		NMC 811	4,02%	7,42%	2,47%	1,38%
NCA		2,19%	4,04%	1,35%	0,75%	
LFP	7,89%	14,56%	4,87%	2,72%		
Cobre en 2050 del resto de la economía		42,1%	35,55%	35,38%	29,67%	
Cobalto en 2050 para la electrificación	Cargadores EV	0%	0%	0%	0%	
	Conexión de los cargadores EV	0%	0%	0%	0%	
	Catenarias	0%	0%	0%	0%	
	EV baterías	LiMnO2	0%	0%	0%	0%
		NMC 622	13,98%	24,22%	8,05%	4,54%
		NMC 811	6,99%	12,11%	4,02%	2,27%
		NCA	5,10%	8,87%	2,92%	1,65%
LFP	0%	0%	0%	0%		
Cobalto en 2050 del resto de la economía		4,02%	3,31%	3,33%	2,53%	
Litio en 2050 para la electrificación	Cargadores EV	0%	0%	0%	0%	
	Conexión de los cargadores EV	0%	0%	0%	0%	
	Catenarias	0%	0%	0%	0%	
	EV baterías	LiMnO2	20,12%	45,39%	14,88%	8,13%
		NMC 622	41,72%	93,74%	30,91%	16,89%

		NMC 811	35,32%	79,38%	26,19%	14,29%
		NCA	17,98%	40,58%	13,29%	7,26%
		LFP	55,59%	124,29%	41,28%	22,59%
Litio en 2050 del resto de la economía			2,24%	2,17%	2,19%	1,66%
Manganeso en 2050 para la electrificación	Cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Conexión de los cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Catenarias		0%	0%	0%	0%
	EV baterías	LiMnO2	8,64%	13,24%	4,37%	2,47%
		NMC 622	1,94%	2,93%	0,97%	0,54%
		NMC 811	1,03%	1,56%	0,54%	0,27%
		NCA	0%	0%	0%	0%
LFP		0%	0%	0%	0%	
Manganeso en 2050 del resto de la economía			70,62%	53,51%	53,94%	44,16%
Níquel en 2050 para la electrificación	Cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Conexión de los cargadores EV		0%	0%	0%	0%
	Catenarias		0%	0%	0%	0%
	EV baterías	LiMnO2	0%	0%	0%	0%
		NMC 622	45,41%	73,29%	24,40%	13,91%
		NMC 811	55,87%	90,23%	30,02%	17,10%
		NCA	26,09%	42,25%	13,98%	7,94%
LFP		0%	0%	0%	0%	
Níquel en 2050 del resto de la economía			80,83%	63,16%	63,32%	51,09%
Platino empleado en 2050 para los vehículos de hidrogeno			29,44%	6,6%	8,28%	6,39%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados expresados en la tabla son importantes y en muchos casos esclarecedores, pero, como dijimos cuando presentamos el programa Vensim, un programa de dinámica de sistemas no tiene como función principal revelar el futuro, su utilidad se centra en evaluar las tendencias comparando unos escenarios con otros. Por lo que evaluar las tendencias que podemos observar en las gráficas es de gran importancia además de valorar los resultados numéricos.

En este apartado ejecutaremos esta evaluación, presentando cuales pueden ser las baterías y escenarios más respetuosos con nuestro planeta y nuestro futuro, y por lo tanto encontrando combinaciones que puedan hacer que adoptar los vehículos electrificados no sea tan perjudicial para nuestros recursos. Dividiremos la evaluación en baterías, infraestructuras, ferrocarril y cobre empleado en los vehículos electrificados, vehículos de hidrogeno, análisis de sensibilidad y escenarios:

Baterías

En primer lugar podemos enunciar las baterías que necesitan menos minerales según los resultados de la simulación. En este caso destacan las baterías NCA, LFP y LiMnO₂, siendo las baterías con el gasto de minerales más comedido.

La batería NCA es la batería que menos aluminio, cobre y litio emplea de todas las evaluadas. Esta batería requiere entre el 0,07% y el 0,38% de las reservas de aluminio, entre el 2% y el 12% de las reservas de cobre y entre el 21% y el 119% de las reservas de litio. Aunque posee además cobalto (su demanda se sitúa entre el 33% y el 180%) y níquel (su demanda se sitúa entre el 12% y el 68%), también es la que menor cantidad demanda de estos materiales entre las baterías que los requieren.

La batería LFP tiene la gran ventaja de no requerir níquel, cobalto o manganeso, en cambio, es la batería que más cobre, aluminio y litio demanda. En el caso del cobre su demanda se sitúa entre el 8% y el 43% de las reservas. En el caso del aluminio su demanda se sitúa entre el 0,3% y el 1,45% de las reservas y en el caso del litio entre el 66% y el 364%.

La batería LiMnO₂ es la batería que menos aluminio, cobre y litio emplea tras la NCA (con valores de demanda muy próximos a esta última) y no requiere ni cobalto ni níquel. Sin embargo demanda una gran cantidad de manganeso (su demanda se sitúa entre el 4% y el 24% de las reservas) y sus características técnicas son las más deficientes de todas las baterías evaluadas en este análisis.

Todas estas baterías aun siendo las menos perjudiciales siguen sufriendo problemas de agotamiento en los recursos que emplean.

En segundo lugar podemos enunciar las baterías que mayor cantidad de minerales requieren. En este caso destacan la batería NMC en sus dos variantes.

Las baterías NMC requieren de una gran cantidad de níquel, manganeso y cobalto para su funcionamiento, por lo que quedan en clara desventaja frente a las baterías NCA que no emplean manganeso y emplean menor cantidad de aluminio, cobre, níquel, cobalto y litio. Además, las baterías NCA tienen unas características técnicas ligeramente superiores a las NMC.

En ambos casos los datos nos indican que nos encontramos con unas baterías que demandan demasiados materiales y que, ante la falta de un reciclaje de los materiales con valores muy elevados y el empleo de la economía circular, pueden acabar por provocar(o en el mejor de los escenarios colaborar de forma significativa) el agotamiento prematuro de los minerales.



Infraestructura, ferrocarril y cobre empleado en los vehículos electrificados.

En este caso agruparemos las infraestructuras, el ferrocarril y el cobre de los vehículos electrificados porque emplean prácticamente en su totalidad el mismo material, el cobre. La infraestructura de los cargadores además emplea aluminio, pero, como se observa en los datos de la tabla, de forma no significativa.

En el ámbito de la infraestructura de carga podemos enunciar que la demanda de cobre de la conexión de los cargadores a la red tienen un bajo impacto sobre el total de las reservas, inferior al 0,6% en el caso más desfavorable y tomando valores cercanos en todos los escenarios.

En el caso de los cargadores si podemos ver una demanda más diferenciada entre los diferentes escenarios, pero con un impacto también reducido que toma valores de demanda de cobre entre el 0,4% y el 2,3% respecto a las reservas.

El cobre empleado en los vehículos si toma bastante importancia según el escenario adoptado pues su demanda se sitúa entre el 1,3% y el 8,5% de las reservas. Hay que recordar que en este cálculo solo se tiene en cuenta el cobre respecto a los vehículos de combustión, por lo que si analizásemos el cobre total que hay en este tipo de vehículos, el valor demanda sería aún mayor.

La electrificación del ferrocarril requiere entre el 6,3% y el 1,3% de las reservas de cobre. Estos valores son importantes, pero hay que recordar que se quiere abordar la electrificación completa de las vías férreas para el año 2050.

En estas 3 facetas de la electrificación encontramos una gran dependencia del escenario escogido, pudiendo llegar a sumar las 3 más de un 17 % del requerimiento de las reservas de cobre en el escenario más desfavorable. Esto nos indica que aunque no son el aspecto más determinante, (pues el resto de la economía agota los recursos de cobre por si solo en todos los escenarios menos en el de decrecimiento) si son muy importantes en el uso de este mineral, o al menos, igual de decisivas que el cobre empleado en las baterías, llegando a emplear casi una quinta parte de las reservas totales de cobre.

Vehículos de hidrogeno

Los resultados obtenidos para este tipo de vehículos son bastantes esclarecedores, hemos supuesto que sustituyen a los vehículos de gas convencional, cuyo número respecto al total de vehículos es pequeño, y solo hemos tenido en cuenta el platino empleado en los vehículos y aun así, en el mejor de los casos, hemos obtenido que demandamos cerca de un 10% de las reservas y en el peor de los casos un 45%. Si tuviésemos en cuenta los vehículos de gasolina que también emplean platino, la infraestructura de producción del hidrogeno, la joyería y todos los demás ámbitos

donde se emplea este material, estaríamos hablando con total seguridad de un material que sufriría un agotamiento significativo de sus reservas antes de 2050 en casi todos los escenarios, conclusión sobre la que han escrito diversos autores [94], [95].

Análisis de sensibilidad

A lo largo de este trabajo se ha ejecutado un análisis de sensibilidad con varios objetivos. En primer lugar, para observar cómo afectaría a los requerimientos de extracción de algún mineral un cambio en su ratio de reciclaje, pudiendo observar la importancia de tener un alto ratio de reciclaje.

En el análisis se ha observado la gran importancia del ratio de reciclado de los minerales, pues se ha variado su ratio entre el 30% y el 95%, llegando a una variación en la demanda de litio en el año 2050 de más de un 100% respecto a sus reservas en el escenario de alta electrificación (EV alto). Esta variación nos indica que si queremos intentar reducir nuestro requerimiento de minerales, una de las soluciones que debemos adoptar es la de un reciclaje exhaustivo.

En segundo lugar, para ver la magnitud de la incertidumbre de algunas hipótesis tomadas con el fin de tener información suficiente para ejecutar las simulaciones. Este análisis nos ha indicado que las hipótesis tomadas en lo referente al número de cargadores rápidos y a la longitud de las conexiones de los diferentes tipos de cargadores tienen una reducida incertidumbre, por lo tanto nuestras hipótesis poseen una fortaleza adecuada para garantizar la precisión de las simulaciones.

En el escenario EV alto (es el escenario con más vehículos eléctricos) obtenemos una variación menor al 10 % de las reservas de cobre en el año 2050 variando los cargadores rápidos entre 0 y 0,45 por vehículo particular eléctrico de 4 ruedas. Que esta gran variación en el número de cargadores, en el escenario que cuenta con mayor número de vehículos eléctricos, se traduzca en una variación tan reducida de la demanda del cobre (teniendo en cuenta que si no contabilizamos los cargadores ya se demandan más de un 120% de las reservas de cobre en el caso más favorable), nos indica la buena fortaleza de nuestra hipótesis.

En el caso de la longitud de las conexiones, los datos son todavía más claros que en el caso anterior. En este caso, también empleando una gran variación de las longitudes de conexión, obtenemos una variación en la demanda de los minerales menor al 2% de las reservas del aluminio o del cobre dependiendo del caso. Podemos concluir con que estas hipótesis también tienen una gran fortaleza.

Aunque hemos establecido más hipótesis que las mencionadas con anterioridad en este apartado, no se han realizado análisis de sensibilidad de todas ellas, ya que excedería el alcance de este TFG. Otra limitación de este trabajo además de las hipótesis establecidas puede ser la estimación de las reservas y recursos, ya que



pueden aparecer nuevos recursos en el futuro o ciertos recursos se pueden convertir en reservas a lo largo del tiempo.

Escenarios

En último lugar observamos que escenarios serían aceptables desde el punto de vista del consumo de materiales. En este caso la única tendencia aceptable sería la del escenario de decrecimiento, ya que este escenario demanda muchos menos materiales que los otros (Tabla 45 y Tabla 46), tanto en el ámbito de la electrificación (alrededor de un 40% de media), como en la demanda del resto de la economía (alrededor de un 20% de media) y mantiene una tendencia mucho más paralela al eje x de las gráficas, aumentando el gasto de forma paulatina en algunos casos o manteniendo estable e incluso reduciendo la demanda anual de minerales en otros.

Los demás escenarios intentan proyectar las tendencias de la electrificación del transporte o sustituir en mayor o menor medida el transporte tradicional por el electrificado sin reducir la demanda del transporte ni modificar la economía, lo cual, se traduce finalmente en el aumento exponencial de los requerimientos de determinados materiales necesarios en la electrificación del transporte.

5. Conclusiones

Se conformó este TFG con el fin de observar cómo afectaría el cambio de movilidad hacia la electrificación a los recursos minerales del planeta y tomar conciencia de la viabilidad de este cambio. Hemos obtenido una gran cantidad de información sobre las tecnologías empleadas en la electrificación del transporte, tanto de los propios vehículos como en las infraestructuras necesarias para hacerlos funcionar. Esta información nos ha proporcionado los datos que nos muestran cuantos recursos emplean estas tecnologías. Estos datos introducidos después en el modelo MEDEAS-W modificado nos han permitido conocer cuál es el posible futuro de los minerales empleados en la electrificación y cómo influyen la imposición de diferentes escenarios o políticas. Como consecuencia de todo esto podemos llegar a ciertas conclusiones.

Las baterías que menos perjuicio provocarían a los recursos de nuestro planeta poseen ciertos problemas, muchas de las patentes de la batería NCA son propiedad de Tesla y Panasonic, por lo tanto su fabricación está controlada por estas marcas, y lo mismo ocurre con la batería LFP con marcas como BYD y CATL. La batería LiMnO₂ posee un rendimiento muy pobre, siendo la batería con peores características técnicas de las evaluadas en este trabajo, por eso se ha visto avocada al desuso en la automoción eléctrica en el presente. Por si todo lo anterior no fuera suficiente, la batería LFP, que es la única que no emplea materiales críticos en el cátodo (aparte del litio), tiene un rendimiento también pobre, necesitando baterías muy grandes (en tamaño y peso) para igualar la capacidad y potencia de las baterías que emplean cobalto.

La infraestructura requerida para poner en funcionamiento los vehículos eléctricos (Puntos de carga y las conexiones a la red) puede demandar casi un 3% de las reservas totales de cobre. Esto unido a la demanda de la electrificación del ferrocarril que puede alcanzar un 6,3% respecto a las reservas de este mismo mineral y el cobre presente en los vehículos electrificados respecto a los tradicionales de combustión cuya demanda también puede alcanzar una demanda del 8,5% de cobre respecto a sus reservas suman una gran cantidad demandada de este mineral. En este aspecto destaca el cobre presente en los vehículos electrificados, como se ha indicado anteriormente, en este cálculo solo se tiene en cuenta el cobre respecto a los vehículos de combustión, por lo que si analizásemos el cobre total que hay en este tipo de vehículos, el valor demanda sería aún mayor, tomando ya valores muy notables.

En el caso de los vehículos de hidrogeno, que son una posible alternativa en la movilidad de futuro, observamos tras el análisis que presentan varios problemas en cuanto la disponibilidad de materiales se refiere, poseen una cantidad de cobre similar a la de un vehículo eléctrico, una batería de iones de litio de pequeña capacidad similar a la de los vehículos híbridos y una pila de hidrogeno relativamente rica en platino en



comparación con el platino que emplean el resto de tipos de automóviles. En la simulación estática que hemos llevado a cabo en este TFG, centrada en la cantidad de platino que emplea este tipo de vehículos, hemos observado el gran gasto de platino que provocaría la popularización de estos vehículos, obteniendo en función del escenario unos requerimientos de platino que se encuentran entre el 45% y el 10% respecto a sus reservas.

Se ha podido comprobar la reducida incertidumbre de algunas de las hipótesis tomadas, como la longitud de las conexiones a la red o el número de cargadores rápidos por vehículo, mediante un análisis de sensibilidad, obteniendo unos valores muy reducidos en la variación de la demanda de minerales en ambos casos, menor al 10% respecto a las reservas de cobre en el caso de los cargadores y menor al 2% respecto a las reservas de cobre o aluminio en el caso de las conexiones. Sin embargo no se han realizado análisis de sensibilidad de todas las hipótesis establecidas, ya que excedería el alcance de este TFG, por lo que esto puede ser una posible limitación de este trabajo. Otro limitante de este trabajo podrían ser las estimaciones de reservas y recursos pues pueden variar ambos a lo largo del tiempo y este aspecto no se ha tenido en cuenta.

Se ha evaluado también mediante un análisis de sensibilidad como podría cambiar la demanda de algún mineral, en este caso, del litio, al variar su ratio de reciclaje llegando a la conclusión de lo importante que puede ser el reciclado, pues variando su ratio entre el 30% y el 95%, llegamos a observar una variación en la demanda de litio en el año 2050 de más de un 100% respecto a sus reservas en el escenario EV alto.

Otra deducción a la que podemos llegar es que el escenario 4, Decrecimiento, nos muestra cual puede ser el camino a trazar para lograr seguir avanzando sin hacer peligrar la satisfacción de las demandas de los minerales y además, reduciendo en gran medida las emisiones de CO₂.

Este escenario de decrecimiento nos muestra que podemos reducir nuestras emisiones y además controlar el gasto de ciertos minerales en el ámbito del transporte, pero para ello, debemos cambiar muchas de nuestras costumbres. Cambios como el empleo masivo del tren eléctrico en el transporte de mercancías, el aumento del transporte en vehículos unipersonales, el cambio de la economía a un modelo que no necesite del crecimiento económico continuo, el aumento sustancial del reciclaje de los minerales o la reducción de la demanda del transporte. Estos cambios pueden parecer extremos pero las simulaciones lo muestran claramente, es el único escenario cuyas tendencias de gasto de minerales no suben exponencialmente, además, de ser un escenario que reduce en un 80% las emisiones de gases de efecto invernadero en 2050 en el ámbito del transporte.



Observando los resultados de las simulaciones llegamos a la conclusión que un cambio de movilidad sin cambiar nuestros hábitos y costumbres no serviría para reducir nuestros problemas con el medio ambiente y con nuestro planeta, sino más bien para agravarlos (Imagen 72).

Debemos cambiar nuestras costumbres y la manera en la que vivimos hasta que, en el caso de que ocurra, la tecnología nos permita tener tecnologías de movilidad para vehículos más respetuosas con el medio ambiente, muy duraderas y con un reducido gasto de materiales y energía en su fabricación.

Debemos promover también ciertas soluciones, que ya hemos enunciado en la introducción, como la economía circular, la promoción del aumento de eficiencia de instalaciones o el reciclaje masivo, buscando que el empleo de estos materiales se traduzca en los menores requerimientos de extracción de minerales posibles. Todas estas medidas unidas a los diferentes aspectos presentes en el escenario de Decrecimiento pueden hacer que nuestros recursos y reservas minerales duren siglos haciendo que podamos desarrollar nuestras vidas en una sociedad sostenible.

De nada sirve cambiar nuestra tecnología de movilidad para reducir las emisiones de CO₂ si en el camino agotamos nuestros recursos, con esas políticas lo único que estamos logrando es cambiar un problema por otro aún más grave, porque ¿Qué haríamos si se agotasen estos recursos?, ¿Qué pasaría con todos los elementos tecnológicos que los emplean?, ¿tendríamos que retroceder a fabricar otra vez vehículos de combustión, sujetos también a limitaciones geológicas, como el empleo de combustibles fósiles [116]?

Nos tenemos que hacer todas estas preguntas y actuar en consecuencia, sino volveremos al punto de partida habiendo gastado nuestros minerales en el camino, reduciendo nuestras alternativas y no habiendo resuelto nada.



Bibliografía

- [1] IPCC, «Summary for policymakers». [En línea]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policy-makers.pdf.
- [2] K. Feng, S. J. Davis, L. Sun, y K. Hubacek, «Drivers of the US CO₂ emissions 1997–2013», *Nat. Commun.*, vol. 6, n.º 1, p. 7714, nov. 2015, doi: 10.1038/ncomms8714.
- [3] T. Parrique *et al.*, «Decoupling debunked - Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability». [En línea]. Disponible en: <https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>.
- [4] European Commission, «Next steps for a sustainable European future». [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2016%3A739%3AFIN>.
- [5] European Commission, «La UE apuesta fuerte por la economía circular», *Web de la Unión Europea*. https://ec.europa.eu/spain/news/20190218_%20The-EU-is-strongly-committed-to-circular-economy_es.
- [6] European Union, «Eficiencia energética de los edificios», *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aen0021>.
- [7] European Commission, «Etiquetado de electrodomésticos: Clave para la eficiencia energética», *Web oficial de la Unión Europea*. https://ec.europa.eu/spain/news/20191111_%20appliance-labeling-key-to-energy-efficiency_es.
- [8] European Union, «Reducción de las emisiones contaminantes de los vehículos ligeros», *EUR-Lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM%3AI28186>.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change y O. Edenhofer, Eds., *Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY: Cambridge University Press, 2014.
- [10] GOV UK, «Future of mobility». [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/future-of-mobility>.
- [11] «El Transporte Urbano y Metropolitano en España», p. 399.
- [12] T. Yoshida y K. Kojima, «Toyota MIRAI Fuel Cell Vehicle and Progress Toward a Future Hydrogen Society», *Interface Mag.*, vol. 24, n.º 2, pp. 45-49, ene. 2015, doi: 10.1149/2.F03152if.
- [13] A. Van Wijk y J. Chatzimarkakis, «Hydrogen europe 2x40 GW green H₂ initiative». [En línea]. Disponible en: https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Europe_2x40%20GW%20Green%20H2%20Initiative%20Paper.pdf.
- [14] Tsiropoulos, Nijs, Tarvydas, y Ruiz, «Towards net zero emissions in the eu energy system». [En línea]. Disponible en: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC118592/towards_net-zero_emissions_in_the_eu_energy_system_-_insights_from_scenarios_in_line_with_2030_and_2050_ambitions_of_the_european_green_deal_on.pdf.
- [15] J. I. Linares Hurtado, B. Y. Moratilla Soria, Instituto Católico de Artes e Industrias, Asociación Nacional de Ingenieros, y Universidad Pontificia de Comillas, *El hidrogeno y la energía: análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI : Universidad Pontificia Comillas, 2007.



- [16] I. Capellán *et al.*, «MEDEAS-World model- Deliverable 4.1». [En línea]. Disponible en: https://www.medeas.eu/system/files/documentation/files/Deliverable%204.1%20%28D13%29_Global%20Model.pdf.
- [17] P. A. Prieto, «100% DECARBONIZATION WITH 100% RENEWABLE ENERGY SYSTEMS THROUGH POWER TO GAS AND DIRECT ELECTRIFICATION», p. 58.
- [18] European Commission, «Critical raw materials». https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en.
- [19] A. Valero, A. Valero, G. Calvo, y A. Ortego, «Material bottlenecks in the future development of green technologies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, pp. 178-200, oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.041.
- [20] H. U. Sverdrup, K. V. Ragnarsdottir, y D. Koca, «An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity», *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 359-372, ene. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.085.
- [21] K. Tokimatsu *et al.*, «Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: A first look at metal requirements and the 2 °C target», *Appl. Energy*, vol. 207, pp. 494-509, dic. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.151.
- [22] T. Prior, D. Giurco, G. Mudd, L. Mason, y J. Behrisch, «Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management», *Glob. Environ. Change*, vol. 22, n.º 3, pp. 577-587, ago. 2012, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009.
- [23] A. García-Olivares, J. Ballabrera-Poy, E. García-Ladona, y A. Turiel, «A global renewable mix with proven technologies and common materials», *Energy Policy*, vol. 41, pp. 561-574, feb. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.018.
- [24] A. de Koning, R. Kleijn, G. Huppes, B. Sprecher, G. van Engelen, y A. Tukker, «Metal supply constraints for a low-carbon economy?», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 129, pp. 202-208, feb. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.040.
- [25] OICA, «Vehículos en uso», OICA. <http://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>.
- [26] M. Tuchschnid y W. Knörr, «Environmental Impact of railway infrastructure», p. 87.
- [27] UIC, «Railway handbook 2013». [En línea]. Disponible en: https://uic.org/IMG/pdf/2013_uic-iea_railway_handbook_web_high.pdf.
- [28] «UIC statistics», UIC. <https://uic.org/support-activities/statistics/>.
- [29] EPA, «Recycling Basics», EPA. <https://www.epa.gov/recycle/recycling-basics>.
- [30] «El 94% de los españoles reclama mejorar las infraestructuras de reciclaje en los espacios públicos», *iResiduo*. <https://iresiduo.com/noticias/espana/ball-corporation/19/11/05/94-espanoles-reclama-mejorar-infraestructuras-reciclaje>.
- [31] UNEP, Ed., *Metal recycling: opportunities, limits, infrastructure: this is report 2b of the Global Metal Flows Working Group of the International Resource Panel of UNEP*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2013.
- [32] I. De Blas, M. Mediavilla, I. Capellán, y C. Duce, «MEDEAS», *medeas.eu*. <https://www.medeas.eu/model/medeas-model>.
- [33] Uv. UVa, AEA, UOL, CRES, CARTIF, y EBB, «LOCOMOTION», *LOCOMOTION*. <https://www.locomotion-h2020.eu/>.
- [34] J. Martín García, *Dinámica de sistemas: ejercicios*. Barcelona: Juan Martín García, 2012.
- [35] J. W. Forrester, «Some Basic Concepts in System Dynamics», p. 17.
- [36] N. Ferreras, «TFM Análisis comparativo de modelos de cambio climático desarrollados en Dinámica de Sistemas». [En línea]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/27603>.
- [37] acción M. y A. F., «Nuevos sistemas de movilidad personal en ciudad y sus problemas asociados a la seguridad vial», p. 123.

- [38] Corporate Vehicle Observatory, «Estudios y tendencias de la movilidad corporativa 2018». [En línea]. Disponible en:
https://www.arval.es/sites/es/files/media/pdfs/arval_cvo_2018_interactivo.pdf.
- [39] «EV vehicles Datacenter», *ev-volumes*. <http://www.ev-volumes.com/datacenter/>.
- [40] PWC, «Five trends transforming automotive industry». [En línea]. Disponible en:
https://www.pwc.com/hu/hu/kiadvanyok/assets/pdf/five_trends_transforming_the_automotive_industry.pdf.
- [41] X. Fontdegòria, «China, el paraíso (y el caos) de la moto eléctrica», *El País*.
https://elpais.com/economia/2017/02/17/actualidad/1487327869_238684.html.
- [42] «España, líder en la implantación del motosharing en sus ciudades»,
nuevamovilidad.com. <https://www.nuevamovilidad.com/motosharing-en-espana-lider-mundial/>.
- [43] G. García, «El camión eléctrico de DAF con 170 kWh de batería y 100 kilómetros de autonomía». <https://movilidadelectrica.com/camion-electrico-daf/>.
- [44] *When Trucks Stop Running Energy and the Future of Transportation*. 2016.
- [45] FENERCOM., «Guía del vehículo eléctrico II». [En línea]. Disponible en:
<https://www.fenercom.com/publicacion/guia-del-vehiculo-electrico-ii-2015/>.
- [46] P. Díez, «PRINCIPIOS BASICOS DEL VEHÍCULO ELECTRICO». [En línea]. Disponible en:
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/36790>.
- [47] A. Lucas, C. Alexandra Silva, y R. Costa Neto, «Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles», *Energy Policy*, vol. 41, pp. 537-547, feb. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.015.
- [48] A. Laporte y R. Shook, «EESI fact sheet Fuel cells november 2015». [En línea]. Disponible en: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-fuel-cells>.
- [49] R. Galán, «ANÁLISIS DE VEHÍCULOS INDUSTRIALES HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS. NOVEDADES TÉCNICAS Y PERICIALES.» [En línea]. Disponible en:
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/38439>.
- [50] K. V. Dijck, «LA TECNOLOGÍA HÍBRIDA, LO MEJOR DE DOS MUNDOS», p. 8.
- [51] U. E. D. Ev, «Vehículos totalmente eléctricos, híbridos y enchufables», p. 4.
- [52] Área de gobierno de medio ambiente y movilidad, Madrid, «RELACIÓN ACTUALIZADA DE LA FLOTA DE VEHÍCULOS TAXI SEGÚN COMBUSTIBLE», p. 1.
- [53] I. H. Lahuerta, S. G. Domingo, y B. A. García, «ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE RECICLADO DE UNA BATERÍA DE LI-ÓN EN EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN», p. 93.
- [54] *ev-volumes*, «Europe BEV and PHEV Sales for Q3-2019 + October», *ev-volumes*.
<http://www.ev-volumes.com/country/total-euefta-plug-in-vehicle-volumes-2/>.
- [55] «España, uno de los principales mercados de autobuses híbridos para Volvo»,
revistaviajeros. <https://www.revistaviajeros.com/noticia/12139/espana-uno-de-principales-mercados-de-autobuses-hibridos-para-volvo->.
- [56] C. Noya, «Infografía: Los países que más y que menos puntos de recarga para coches eléctricos han instalado», *forococheselectricos*.
<https://forococheselectricos.com/2017/12/infografia-los-paises-que-mas-y-que-menos-puntos-de-recarga-para-coches-electricos-han-instalado.html>.
- [57] P. Hertzke, N. Müller, S. Schenck, y T. Wu, «The global electric-vehicle market is amped up and on the rise», *mckinsey*. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-global-electric-vehicle-market-is-amped-up-and-on-the-rise>.
- [58] N. López, «A partir de ahora si llamas a Telepizza, la cena llega en moto eléctrica». <https://movilidadelectrica.com/a-partir-de-ahora-si-llamas-a-telepizza-la-cena-llega-en-moto-electrica/>.
- [59] D. Gómez, «El “boom” del patinete eléctrico: la demanda aumenta más de un 1000% en un año», *elEconomista.es*.
<https://www.eleconomista.es/tecnologia/noticias/10350714/02/20/El-boom-del-patinete-electrico-la-demanda-aumenta-mas-de-un-1000-en-un-ano.html>.



- [60] «Los autobuses eléctricos se apoderarán de la mitad de la flota mundial para 2025», *Híbridos y eléctricos*.
<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/autobuses-electricos-apoderaran-mitad-flota-mundial-2025/20180202195029017272.html>.
- [61] C. P. Ordóñez y J. P. Guerra, «ESTUDIO DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.», p. 105.
- [62] S. Manzetti y F. Mariasiu, «Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1004-1012, nov. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.010.
- [63] «Types of Lithium-ion Batteries», *Battery University*.
https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- [64] M. Chen *et al.*, «Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries», *Joule*, vol. 3, n.º 11, pp. 2622-2646, nov. 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.09.014.
- [65] G. Harper *et al.*, «Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles», *Nature*, vol. 575, n.º 7781, pp. 75-86, nov. 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1682-5.
- [66] N. Lebedeva, F. D. Persio, y L. Boon-Brett, «Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe», p. 80.
- [67] «Ecofriendly recycling of lithium-ion batteries», *Duesenfeld*.
https://www.duesenfeld.com/recycling_en.html.
- [68] J. B. Dunn, L. Gaines, M. Barnes, J. L. Sullivan, y M. Wang, «Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle», *ANL/ESD/12--3 Rev.*, 1177517, ene. 2014. doi: 10.2172/1177517.
- [69] A. E. Rodríguez, «PROTAGONISMO DE LAS MATERIAS PRIMAS MINERALES EN EL DESARROLLO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO», p. 14.
- [70] L. Gaines y P. Nelson, «Lithium-Ion Batteries: Possible Materials Issues», p. 17.
- [71] C. Jones y G. Hammond, «Embodied energy and carbon - The ICE database». [En línea]. Disponible en: <https://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#XpWW4cgzPZ>.
- [72] A. Kwade y J. Diekmann, *Recycling of Lithium-Ion Batteries: the LithoRec Way*. 2018.
- [73] J. J. Schröder y D. Cordell, «Sustainable use of phosphorus». [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/natres/pdf/sustainable_use_phosphorus.pdf.
- [74] J. B. Dunn, L. Gaines, J. C. Kelly, C. James, y K. G. Gallagher, «The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction», *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, n.º 1, pp. 158-168, 2015, doi: 10.1039/C4EE03029J.
- [75] Geotab, «Geotab lanza una herramienta para analizar la degradación de las baterías en los vehículos eléctricos». <https://www.geotab.com/es/press-release/herramienta-degradacion-de-baterias/>.
- [76] F. Ni, «How Important are Electric Vehicles for Future Copper Demand», p. 22.
- [77] S. Bumby, E. Druzhinina, R. Feraldi, D. Werthmann, R. Geyer, y J. Sahl, «Life Cycle Assessment of Overhead and Underground Primary Power Distribution», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, n.º 14, pp. 5587-5593, jul. 2010, doi: 10.1021/es9037879.
- [78] L. Sebastian, «¿Que es un wall-box?», *recarga coches electricos.com*.
<https://www.recargacocheselectricos.com/que-es-un-wall-box/>.
- [79] HidroCantábrico distribución eléctrica S.A.U., «Especificación técnica de las canalizaciones subterráneas de baja y media tensión». [En línea]. Disponible en: https://www.hcenergia.com/recursos/doc/Colaboradores/Proveedores/Electricidad/Ingenieria/2116218461_2772011142751.pdf.
- [80] Ministerio de ciencia y tecnología, «Guía técnica de aplicación- Caídas de tensión». [En línea]. Disponible en: http://www.f2i2.net/documentos/lsi/rbt/guias/guia_bt_anexo_2_sep03r1.pdf.

- [81] ATS energia, «Vida útil de elementos de transmisión». [En línea]. Disponible en: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2018/04/informe-vida-util-ATS.pdf>.
- [82] M. Bustos, «La electrificación de los ferrocarriles», *trenvista*.
<https://www.trenvista.net/descubre/mundo-ferroviario/la-electrificacion-de-los-ferrocarriles/>.
- [83] ADIF, «Modelos de cantenaria de ADIF», *ADIF*.
http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualizada_00070.shtml.
- [84] ADIF, «Memoria descriptiva CA-160». [En línea]. Disponible en:
https://www.seguridadferroviaria.es/recursos_aesf/BEB847D-C66F-4E77-8A02-A1FAE0BEC669/144036/016CA1603kV_2012.pdf.
- [85] ADIF, «Memoria descriptiva CA-220». [En línea]. Disponible en:
https://www.seguridadferroviaria.es/recursos_aesf/1DAEAFAD-ADCO-4BFE-8958-4BC6AD3AC4F6/144042/017CA2203kV_2012.pdf.
- [86] BRONMETAL, «Cobre-ETP». [En línea]. Disponible en:
https://www.bronmetal.com/datos/noticias/archivo5/cobre_pletina.pdf.
- [87] ADIF, «TRANSFORMADORES DE POTENCIA SUMERGIDOS EN ACEITE PARA SUBESTACIONES DE TRACCIÓN DE 3,3 kV DE CORRIENTE CONTINUA». [En línea].
Disponible en:
[http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/113E77113517CD61C1257DAB00627F09/\\$FILE/ET%2003.359.101.7%20Trafos%20en%20aceite%20CC%20Difusi%C3%B3n.pdf?OpenElement](http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/113E77113517CD61C1257DAB00627F09/$FILE/ET%2003.359.101.7%20Trafos%20en%20aceite%20CC%20Difusi%C3%B3n.pdf?OpenElement).
- [88] «H2 stations map», *h2stations.org*. <https://www.h2stations.org/>.
- [89] CNAE, «Vehículos de hidrógeno: cómo funcionan, pros y contras», *CNAE*.
<https://www.cnae.com/blog/index.php/vehiculos-hidrogeno-funcionan-pros-contras/>.
- [90] R. Bhandari, C. A. Trudewind, y P. Zapp, «Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review», *J. Clean. Prod.*, vol. 85, pp. 151-163, dic. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.07.048.
- [91] J. Romero, «Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción». [En línea]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/31495>.
- [92] G. Chisholm y L. Cronin, «Hydrogen From Water Electrolysis», en *Storing Energy*, Elsevier, 2016, pp. 315-343.
- [93] O. Santiago, «¿Cómo funciona una pila de combustible de hidrógeno?», *Apilados*.
<http://apilados.com/blog/como-funciona-una-pila-de-combustible-de-hidrogeno/>.
- [94] K. D. Rasmussen, H. Wenzel, C. Bangs, E. Petavratzi, y G. Liu, «Platinum Demand and Potential Bottlenecks in the Global Green Transition: A Dynamic Material Flow Analysis», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, n.º 19, pp. 11541-11551, oct. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b01912.
- [95] H. Hao *et al.*, «Securing Platinum-Group Metals for Transport Low-Carbon Transition», *One Earth*, vol. 1, n.º 1, pp. 117-125, sep. 2019, doi: 10.1016/j.oneear.2019.08.012.
- [96] T. G. Gutowski, S. Sahni, J. M. Allwood, M. F. Ashby, y E. Worrell, «The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand», *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 371, n.º 1986, p. 20120003, mar. 2013, doi: 10.1098/rsta.2012.0003.
- [97] USGS, «Mineral Commodity Summaries», 2015.
- [98] A. Ortego, A. Valero, y G. Calvo, «MEDEAS Annex4:Task2.2.c.2.Exergy extraction curves considering non renewable resources and raw materials.» [En línea]. Disponible en: https://www.medeas.eu/system/files/documentation/files/Deliverable%202.2%20%28D7%29_Annex4_Task%202.2.c.2_Exergy%20extraction%20curves.pdf.
- [99] J. Trashorras Montecelos, *Desarrollo de redes eléctricas y centros de transformación*. Madrid: Paraninfo, 2014.



- [100] PLASSER ESPAÑOLA, «Rendimiento, precisión y fiabilidad en la construcción de catenaria». [En línea]. Disponible en:
https://www.plasser.es/pdf/publicaciones/via_libre-2008-004.pdf.
- [101] M. Maisch, «Lithium-ion recycling rates far higher than some statistics suggest», *pv magazine*. <https://www.pv-magazine.com/2019/07/12/lithium-ion-recycling-rates-far-higher-than-some-statistics-suggest/>.
- [102] USGS, «Cobalt Statistics and Information», *USGS*.
<https://www.usgs.gov/centers/nmic/cobalt-statistics-and-information>.
- [103] «The Contribution of Natural Gas Vehicles to Sustainable Transport», IEA Energy Papers 2010/11, nov. 2010. doi: 10.1787/5km4rm5c0pzp-en.
- [104] «Energy Technology Perspectives 2016», *Energy Technol.*, p. 16, 2016.
- [105] *Global EV Outlook 2017*. Place of publication not identified: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- [106] International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations*. OECD, 2017.
- [107] C. Façanha, «Global Transportation Energy and Climate Roadmap», p. 109.
- [108] IEA, *Global EV Outlook 2016: Beyond one million electric cars*. Paris: OECD Publishing, 2016.
- [109] NGV Global, «NGV Global Gas vehicle statistics», *NGV Global*.
<http://www.iangv.org/current-ngv-stats/>.
- [110] *Future of Rail*. Place of publication not identified: International Energy Agency, 2019.
- [111] A. García-Olivares, J. Solé, y O. Osychenko, «Transportation in a 100% renewable energy system», *Energy Convers. Manag.*, vol. 158, pp. 266-285, feb. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.053.
- [112] S. Alexander y P. Yacoumis, «Degrowth, energy descent, and ‘low-tech’ living: Potential pathways for increased resilience in times of crisis», *J. Clean. Prod.*, vol. 197, pp. 1840-1848, oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.100.
- [113] P. Moriarty y D. Honnery, «Low-mobility: The future of transport», *Futures*, vol. 40, n.º 10, pp. 865-872, dic. 2008, doi: 10.1016/j.futures.2008.07.021.
- [114] C. Kerschner, P. Wächter, L. Nierling, y M.-H. Ehlers, «Degrowth and Technology: Towards feasible, viable, appropriate and convivial imaginaries», *J. Clean. Prod.*, vol. 197, pp. 1619-1636, oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.147.
- [115] H. E. Melin, «State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries», p. 57.
- [116] I. Capellán-Pérez, M. Mediavilla, C. de Castro, Ó. Carpintero, y L. J. Miguel, «Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach», *Energy*, vol. 77, pp. 641-666, dic. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.063.