



# **TESIS DOCTORAL**

**MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO E  
HÍBRIDO PARALELO POR MEDIO DE  
MATLAB/SIMULINK Y PLANIFICACIÓN DE  
ESTACIONES DE CARGA MEDIANTE SISTEMAS  
DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y  
ALGORITMOS GENÉTICOS**

**MARÍA SUSANA ALEGRE BUJ**

**INGENIERA INDUSTRIAL**

**Director: Dr. D. JOSÉ CARPIO IBÁÑEZ**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
CONTROL, TELEMÁTICA Y QUÍMICA APLICADA A LA INGENIERÍA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA**

**2017**





# **TESIS DOCTORAL**

**MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO E  
HÍBRIDO PARALELO POR MEDIO DE  
MATLAB/SIMULINK Y PLANIFICACIÓN DE  
ESTACIONES DE CARGA MEDIANTE SISTEMAS  
DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y  
ALGORITMOS GENÉTICOS**

**MARÍA SUSANA ALEGRE BUJ**

**INGENIERA INDUSTRIAL**

**Director: Dr. D. JOSÉ CARPIO IBÁÑEZ**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
CONTROL, TELEMÁTICA Y QUÍMICA APLICADA A LA INGENIERÍA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA**

**2017**



## AGRADECIMIENTOS

---

Es difícil entender la importancia de los agradecimientos de una tesis doctoral hasta que no se ha terminado. En ese momento te das cuenta de cuánto tienes que agradecer a tanta gente. Intentaré resumir en unas líneas la gratitud que siento a todas las personas que han estado presentes durante esa etapa, haciendo posible que hoy deje de ser un sueño para pasar a ser una realidad.

A mis padres, María y César, por haberme forjado como soy en la actualidad y por su apoyo, su ayuda y su paciencia, sin la cual no hubiera conseguido mi sueño.

Al profesor D. José Carpio por su dirección y al Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Control, Telemática y Química Aplicada a la Ingeniería de la UNED por la oportunidad de haber podido realizar esta tesis

Quiero agradecer también a los amigos que han contribuido a la realización de este trabajo por su constante apoyo moral. Y así como a cuantos me han escuchado y aconsejado, pese a que no constan sus nombres, en este reducidísimo espacio.



## ÍNDICE

---

Glosario y/o lista de símbolos utilizados.....	VII
Lista de figuras .....	XIII
Lista de tablas .....	XXII
Resumen.....	XXIV
Abstract.....	XXV
Capítulo 1 Introducción .....	1
1.1.- Objetivos.....	1
1.2.- Historia del automóvil eléctrico.....	2
1.2.1.- En el Siglo XXI el coche eléctrico viene para quedarse.....	3
1.2.2.- Viabilidad y evolución previsible .....	4
1.3.- El vehículo eléctrico y el medio ambiente.....	4
1.3.1.- Situación energética actual .....	5
1.3.2.- Impacto medioambiental de los vehículos .....	7
1.3.3.- Vehículos De Emisión Cero.....	19
1.4.- Estructura.....	23
Capítulo 2 Conceptos básicos.....	25
2.1.- Introducción .....	25
2.2.- Sistemas de propulsión.....	26
2.3.- Alternativas a los sistemas de propulsión tradicionales para vehículos de carretera .....	27
2.3.1.- Vehículos de emisión cero.....	27

2.3.2.- Vehículos híbridos .....	32
2.3.3.- Vehículos propulsados con combustibles alternativos .....	33
2.3.4.- Comparativa entre tecnologías de tracción alternativas .....	41
2.4.- Clasificación de los coches eléctricos.....	44
2.4.1.- Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV) .....	44
2.4.2.- Vehículos Híbridos Eléctrico Enchufables (PHEV) .....	53
2.4.3.- Vehículos Totalmente Eléctricos (EV) .....	56
2.4.4.- Comparación entre los diferentes tipos .....	56
2.5.- Modelado dinámico de un vehículo .....	59
2.5.1.- Resistencia por rozamiento .....	59
2.5.2.- Resistencia aerodinámica .....	60
2.5.3.- Fuerza de ascensión .....	60
2.5.4.- Fuerza de aceleración .....	61
2.5.5.- Fuerza total de tracción.....	62
2.6.- Modelado de la batería .....	63
2.6.1.- Introducción .....	63
2.6.2.- Circuito equivalente .....	70
2.7.- Influencia de la temperatura en la batería.....	75
2.8.- Sistemas de información geográfica .....	77
2.8.1.- Aspectos Generales de los SIG.....	78
2.8.2.- Modelos de datos espaciales: vectorial y ráster.....	98
2.8.3.- Aplicaciones de los SIG vectoriales .....	103



2.8.4.- Principales programas informáticos sobre SIG .....	106
2.9.- Estaciones de recarga de vehículos eléctricos .....	106
2.9.1.- Modos y tipos de carga.....	107
2.9.2.- Infraestructuras de recarga.....	111
Capítulo 3 Estado del Arte.....	119
3.1.- Introducción .....	119
3.2.- Claves tecnológicas del vehículo eléctrico.....	119
3.2.1.- Propulsión del motor.....	120
3.2.2.- Convertidores .....	121
3.2.3.- Tecnología control híbrida .....	121
3.2.4.- Batería y supercondensadores .....	121
3.3.- Desarrollo de modelos de consumo .....	122
3.4.- Modelado dinámico y simulaciones.....	123
3.4.1.- Vehículos híbridos eléctricos.....	123
3.4.2.- Vehículos híbridos eléctricos enfufables .....	127
3.4.3.- Vehículos totalmente eléctricos .....	128
3.5.- Localización de las estaciones de carga de los vehículos eléctricos.....	132
3.6.- Impacto sobre la red.....	135
Capítulo 4 Modelado de un vehículo eléctrico.....	139
4.1.- Introducción .....	139
4.2.- Simulación de un vehículo eléctrico.....	140
4.3.- Comparativa de los diferentes tipos de batería.....	148

4.3.1.- Influencia de la temperatura .....	148
4.3.2.- Influencia de la conducción.....	149
4.3.3.- Influencia de los accesorios .....	150
4.3.4.- Influencia de la masa .....	151
Capítulo 5 Modelado de un vehículo eléctrico híbrido en paralelo .....	153
5.1.- Introducción .....	153
5.2.- Simulación de un vehículo eléctrico híbrido en paralelo.....	154
5.3.- Comparativa de los diferentes tipos de batería.....	163
Capítulo 6 Planificación de las Estaciones de Carga .....	171
6.1.- Introducción .....	171
6.2.- Simulación de la planificación de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos .....	172
6.2.1.- Algoritmos genéticos .....	172
6.2.2.- Programa de algoritmos genéticos.....	180
6.3.- Validación del programa desarrollado.....	183
6.3.1.- Representación gráfica de los costes .....	184
6.3.2.- Mapa temático .....	186
Capítulo 7 Conclusiones.....	189
Capítulo 8 Anexos .....	197
8.1.- Introducción .....	197
8.2.- Ciclos de conducción.....	198
8.2.1.- Ciclos de conducción reglados.....	198

8.2.2.- Ciclos de conducción experimentales .....	202
8.3.- Datos de entrada .....	204
8.3.1.- Simulación del vehículo eléctrico en Matlab/Simulink .....	204
8.3.2.- Planificación de estaciones de carga.....	207
8.4.- Modelado Vehículo Eléctrico en Matlab/Simulink .....	210
8.4.1.- Dinámica del vehículo .....	215
8.4.2.- Eficacia de la transmisión .....	216
8.4.3.- Batería eléctrica.....	217
8.5.- Modelado Vehículo Eléctrico híbrido en paralelo en Matlab/Simulink.....	219
8.5.1.- Bloques comunes en la simulación.....	220
8.5.2.- Dinámica del vehículo .....	224
8.5.3.- Cadena rueda-acoplador.....	228
8.5.4.- Selector de marchas .....	228
8.5.5.- Caja de cambios.....	229
8.5.6.- Detector conducción .....	234
8.5.7.- Unidad de control de acoplamiento híbrido paralelo (UCAH-P).....	235
8.5.8.- Pérdidas eléctricas .....	246
8.5.9.- Consumo instantáneo.....	247
8.5.10.- Consumo a los 100 km.....	248
8.5.11.- Contador de ciclos .....	249
8.5.12.- Análisis de los rendimientos .....	250
8.5.13.- Análisis económico .....	254

8.5.14.- Análisis de potencia .....	255
8.6.- Programación de la Planificación de Estaciones de Carga.....	256
8.6.1.- Módulo1 .....	256
8.6.2.- Módulo2 .....	277
Capítulo 9 Referencias .....	281

## GLOSARIO Y/O LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS

---

$\alpha$	Aceleración angular
$\delta t$	Paso del tiempo utilizado en el cálculo [seg]
$\eta_b$	Rendimiento de la batería
$\eta_g$	Rendimiento de la transmisión
$\eta_m$	Rendimiento del motor
$\mu_{rr}$	Coefficiente de resistencia de rozamiento
$\rho$	Densidad del aire
$\omega$	Velocidad angular
$\psi$	Inclinación del terreno
a	Aceleración lineal
A	Peso de la función F1 dentro de la función objeto F
$\mathcal{A}$	Área frontal del vehículo
ABS	Sistema antibloqueo de ruedas o frenos antibloqueo, del alemán Antilockiersystem
AC	Corriente continua (Direct Current)
AER	Toda la energía proveniente de la batería (All-Electric Range)
AG	Algoritmos genéticos
AGM	Material de Vidrio Absorbente (Absorbed Glass Mat)
$a_i$	Coste de inversión para construir la estación de carga i
B	Peso de la función F2 dentro de la función objeto F

C	Constante de pérdidas que se aplica a cualquier velocidad
CARB	Junta de Recursos del Aire de California (California's Air Resources Board)
CD	Batería de carga-agotamiento (Battery Charge-Depletion)
$C_d$	Coefficiente aerodinámico
$C_{dl}$	Doble capa electroquímica capacitiva
$C_p$	Capacidad de Peukert [Ah]
CR	Carga total eliminada de la batería (Charge Removed)[Ah]
CS	Carga suministrada por la batería (Charge Supplied)[Ah]
$C_3$	Capacidad amperios-hora en el rango de 3 horas [Ah]
$C_{10}$	Capacidad amperios-hora en el rango de 10 horas [Ah]
$c_{ij}$	Costo de transporte de cliente j hacia la estación de carga i
D	Difusión
DC	Corriente continua (Direct Current)
$d_{ij}$	Distancia entre la demanda i y la estación de carga j
$d_j$	Demanda del cliente j
DoD	Profundidad de descarga de la batería
EMC	Ordenador de gestión de la energía (Energy Management Computer)
EPA	Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency)
EV	Vehículo eléctrico (Electric Vehicle)
EVT	Transmisión eléctrica variable (Electric Variable Transmission)
F1	Función objeto que reduce al mínimo el coste de la inversión
F2	Función objeto que minimiza el coste del transporte

$F_{ad}$	Resistencia aerodinámica
$F_b$	Resultante de la fuerza de frenado sobre el vehículo
$F_{bf}$	Resultante de la fuerza de frenado en las ruedas delanteras
FCV	Vehículos de pila de combustible (Fuel Cell Vehicles)
$F_{hc}$	Fuerza de ascensión
$F_{rr}$	Fuerza de rozamiento
$F_{ta}$	Fuerza de aceleración
$F_{te}$	Fuerza de tracción
$F_{wa}$	Fuerza de aceleración angular en las ruedas
$G$	Ratio de reducción
$g$	Aceleración de la gravedad
$g$	kilometraje por kWh [km/kWh]
GLP	Gas licuado del petróleo
GNC	Gas Natural Comprimido
GNL	Gas Natural Licuado
$H_{min}$	Función objetivo para la localización de estaciones de carga según Shaoyun Ge
$h_1$	Coste de la pérdida de potencia
$h_2$	Coste indirecto de las pérdidas
HEV	Vehículo híbrido eléctrico (Hybrid Electric Vehicle)
$hg$	Distancia desde el centro de la gravedad del vehículo hasta el suelo
HPDI	Inyección Directa de Alta Presión (High Pressure Direct Injection)
HWFET	Programación de ahorro del combustible de la conducción en la autopista

(Highway Fuel Economy Driving Schedule)

I	Momento de inercia del rotor del motor
ICE	Motor convencional de combustión interna (Internal Combustion Engine)
$I_{cell}$	Intensidad de la célula de la batería
$k$	Constante de Peukert
k	coste de tiempo de los usuarios [€/h]
$k_c$	Coefficiente de pérdidas en el cobre
$k_i$	Coefficiente de pérdidas en el hierro
$k_w$	Coefficiente de pérdida por fricción con el aire
l	Longitud de difusión
L	Distancia entre las ruedas
$L_b$	Distancia desde el centro de la gravedad del vehículo hasta las ruedas traseras
$\sum L_j$	Suma de las distancias desde la estación de carga j hasta la demanda
m	Masa del vehículo
M	Número máximo de estaciones de carga
n	Número de celdas de la batería
N	Número de cliente
NMHC	Hidrocarburos no metánicos (Non-methane hydrocarbons)
P	Precio de carga [€/kWh]
$P_{ac}$	Potencia para los accesorios
$P_{bat}$	Potencia de la batería
$P_{bat_c}$	Potencia de recarga de la batería
$P_{bat_d}$	Potencia de descarga de la batería



PC	Pila de combustible
$P_e$	Potencia del motor
PHEV	Vehículo híbrido eléctrico enchufable (Plug-in HEV)
$P_L$	Potencia que demanda el conductor por medio del pedal del acelerador
$P_m$	Potencia de salida del motor eléctrico
$P_{mb}$	Potencia de frenado
$P_{mf}$	Potencia de frenado mecánico
$P_{mot\_in}$	Potencia eléctrica requerida por el motor
$P_{mot\_out}$	Potencia mecánica requerida por el motor
PSAT	Caja de herramientas para el análisis (Powertrain System Analysis Toolkit)
$P_{te}$	Potencia total de tracción para mover el vehículo
$q$	Resistencia de frenado
$q_i$	Carga de demanda del nodo $i$
$r$	Radio de la rueda
$R$	Resistencia interna de la batería [ $\Omega$ ]
$R_{ct}$	Resistencia de transferencia de carga
$R_0$	Resistencia adicional de la célula de la batería
RFID	Identificación por radiofrecuencia (Radio Frequency Identification)
SIG	Sistema de información geográfica
SOC	Estado de carga (State of Charge)
$T$	Par motor
$t$	Tiempo [h]
TCS	Sistema de Control de Tracción (Traction Control System)

$U_0$	Tensión en vacío
UCAH-P	Unidad de control de acoplamiento híbrido en paralelo
$U_{\text{cell}}$	Tensión de la célula de la batería
UDDS	Programación del horario de conducción urbana dinamométrica (Urban Dynamometer Driving Schedule)
UTS	Universidad Tecnológica de Sídney
$v$	Velocidad lineal
VCI	Vehículo de combustión interna
VGN	Vehículos a gas natural
VRLA	Batería de ácido – plomo regulada por válvula (Valve-Regulated Lead-Acid)
$w$	Frecuencia angular
$W_i$	Capacidad de la estación de carga $i^{\text{th}}$
$W_f$	Carga vertical en las ruedas delanteras
$x_{ij}$	Variable de decisión binaria de afectar al cliente $j$ para cargar en la estación $i$
$y_i$	Variable de decisión de abrir o no la estación de carga $i$
ZEV	Vehículo de emisión cero (Zero Emission Vehicle)
$Z_w$	Impedancia de Warburg

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1. Hitos históricos del vehículo eléctrico durante los siglos XIX y XX.....	3
Figura 2. Curva de producción del petróleo, como sugirió originalmente M. King Hubbert en 1956 .....	6
Figura 3. Consumo de energía final en España en 2013.....	6
Figura 4. Distribución de contaminantes en las fuentes de producción y durante el transporte de energía .....	9
Figura 5: Composición de los gases de escape (%) .....	13
Figura 6: Distribución de los contaminantes en los gases de escape .....	14
Figura 7: Distribución relativa de las emisiones según los tipos de contaminantes y combustible utilizado.....	17
Figura 8. Balance eléctrico peninsular, septiembre 2014 .....	29
Figura 9. Funcionamiento básico de los vehículos de aire comprimido .....	31
Figura 10. Comparativa de la autonomía media proporcionada por las diferentes tecnologías (2009) .....	42
Figura 11. Comparativa de la autonomía específica proporcionada por las diferentes tecnologías (2009) .....	43
Figura 12. Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV).....	46
Figura 13. Arquitectura de las cuatro configuraciones de HEV .....	47
Figura 14. Vehículos Híbridos configuración serie .....	48
Figura 15. Vehículos Híbridos configuración paralelo.....	50
Figura 16. Vehículos Híbridos configuración mixta.....	53
Figura 17. Vehículos Híbridos Eléctrico Enchufable (PHEV).....	54
Figura 18. Vehículos Híbridos Eléctrico Enchufable (PHEV) configuración serie	55

Figura 19. Vehículo totalmente eléctrico (EV).....	56
Figura 20. Comparativa de eficiencia energética entre el vehículo eléctrico y el convencional.....	57
Figura 21. Fuerzas que actúan en un vehículo ascendiendo una cuesta.....	59
Figura 22. Zonas de presión en un vehículo.....	60
Figura 23. Esquema tracción de transmisión directa.....	61
Figura 24. Estructura de la batería.....	64
Figura 25. Funcionamiento de batería durante la descarga.....	65
Figura 26. Circuito equivalente de la batería.....	70
Figura 27. Voltaje vs estado de carga en las baterías de ión-litio.....	71
Figura 28. Tipos de carga de una batería.....	74
Figura 29. Influencia de la temperatura sobre la capacidad en una batería de plomo-ácido.....	76
Figura 30. Influencia de la temperatura sobre la capacidad en una batería de níquel-cadmio.....	76
Figura 31. Influencia de la temperatura sobre la capacidad en una batería de ión-litio.....	76
Figura 32. Influencia de la temperatura sobre la capacidad.....	77
Figura 33. Elementos de los SIG.....	80
Figura 34. Las funciones de un Sistema de Información Geográfico.....	82
Figura 35. Búsqueda temática por especificación simbólica o nominal.....	84
Figura 36. Búsqueda espacial por especificación de dominio geométrico.....	85
Figura 37. Búsqueda espacial mediante condiciones geométricas.....	86

Figura 38. Búsqueda espacial empleando dos estratos mediante condición geométrica.....	87
Figura 39. Interpolación areal.....	93
Figura 40. Polígonos ficticios en la superposición de polígonos.....	93
Figura 41. Área de influencia de un punto.....	95
Figura 42. Área de influencia de una línea.....	95
Figura 43. Capas temáticas de un SIG.....	96
Figura 44. Tipos de objetos espaciales en los SIG.....	97
Figura 45. Representación ráster y vectorial de la información del mundo real.....	99
Figura 46. Gráfico resumen de los 4 modos de carga según IEC 61851.....	110
Figura 47. Comparativa de las recargas en función de la autonomía y tiempo de recarga.....	110
Figura 48. Tiempos de recarga en función de la tensión y la distribución.....	111
Figura 49. Tipos de tomas de corriente.....	112
Figura 50. Compatibilidad de los diferentes tipos de tomas de corriente.....	114
Figura 51. Tipos de tomas de corriente ChadeMo.....	115
Figura 52. Arquitecturas de recarga.....	115
Figura 53. Circuito simple equivalente del modelo de la batería.....	122
Figura 54. El diagrama de bloques funcional de la parte eléctrica del HEV propuesto por Habib Ullah.....	124
Figura 55. Vehículo híbrido eléctrico usando un divisor EVT.....	125
Figura 56. Diagrama de bloques de la simulación.....	126
Figura 57. Diagrama de bloques de la simulación del PHEV.....	128

Figura 58. Coche experimental de tres ruedas.....	129
Figura 59. Estructura típica de un vehículo eléctrico con accionamiento de las cuatro ruedas independientes .....	131
Figura 60. Diagrama de bloques del diseño Smart Roadster eléctrico.....	131
Figura 61. Disposición del sistema para cargar coches eléctricos con alternador..	132
Figura 62. Localización óptima de las estaciones de carga realizado por Sara Mehar [46].....	133
Figura 63. Cobertura de las particiones y la capa de las estaciones de carga [49] ..	134
Figura 64. Método propuesto por Samaneh Pazouki.....	135
Figura 65. Esquema básico de la Red Eléctrica Inteligente.....	138
Figura 66. Mensajes en Matlab/Simulink para la elección del ciclo de conducción: Reglado o experimental.....	140
Figura 67. Mensajes en Matlab/Simulink para la elección del ciclo de conducción: Ciclos Reglados .....	141
Figura 68. Diagrama de flujo de la simulación de la autonomía.....	142
Figura 69. Mensajes en Matlab/Simulink para la elección del ciclo de conducción: Experimental.....	143
Figura 70. Mensajes en Matlab/Simulink para la elección de la batería .....	143
Figura 71. Flujo de energía en un sistema de tracción eléctrico con freno regenerativo.....	145
Figura 72. Autonomía del vehículo eléctrico en función del ciclo de conducción	150
Figura 73. Esquema de la arquitectura de la planta híbrida.....	154
Figura 74. Demostración de varios modos de operación basados en la potencia demandada .....	155

Figura 75. Diagrama del flujo de energía del modo sólo eléctrico .....	156
Figura 76. Diagrama del flujo de energía del modo híbrido.....	157
Figura 77. Diagrama del flujo de energía del modo recarga de baterías .....	158
Figura 78. Diagrama del flujo de energía del modo frenada regenerativa .....	159
Figura 79. Diagrama del flujo de energía del modo térmico puro .....	160
Figura 80. Organigrama de los modos de control del vehículo eléctrico híbrido en paralelo .....	161
Figura 81. Diagrama de bloques del modelo del vehículo eléctrico híbrido en paralelo .....	161
Figura 82. Distribución de modos: batería de ácido – plomo.....	164
Figura 83. Análisis del motor térmico: batería de ácido – plomo.....	165
Figura 84. Análisis del motor eléctrico: batería de ácido – plomo .....	165
Figura 85. Análisis de la frenada regenerativa: batería de ácido – plomo.....	166
Figura 86. Distribución de modos: batería de ión – litio .....	166
Figura 87. Análisis del motor térmico: batería de ión – litio .....	167
Figura 88. Análisis del motor eléctrico: batería de ión – litio.....	167
Figura 89. Análisis de la frenada regenerativa: batería de ión – litio .....	168
Figura 90. Distribución de modos: porcentaje de diferencia entre la batería de ácido – plomo y la batería de ión – litio .....	168
Figura 91. Comparativa DoD de la batería de ácido – plomo y la batería de ión – litio.....	169
Figura 92. Tradicional Algoritmo Genético.....	174
Figura 93. Un punto de cruzamiento.....	175

Figura 94. Punto de mutación .....	175
Figura 95. El problema 'hillclimbing' .....	177
Figura 96. Cromosoma visto como un lazo .....	178
Figura 97. Cruzamiento uniforme.....	179
Figura 98. Esquema del programa de planificación de estaciones de carga.....	181
Figura 99. Relación de las hojas del fichero de Excel .....	182
Figura 100. Ventana gráfica del programa de algoritmos genéticos donde da a elegir la manera de obtener la solución inicial del programa de optimización .....	182
Figura 101. Ventana gráfica del programa de algoritmos genéticos donde hay que especificar la longitud y número de cromosomas .....	183
Figura 102. Ventana gráfica del programa de algoritmos genéticos donde hay que especificar el número de iteraciones.....	183
Figura 103. Representación de los costes de las pérdidas frente al número de iteraciones (dos cruces) .....	185
Figura 104. Representación de los costes de las pérdidas frente al número de iteraciones (diez cruces) .....	186
Figura 105. Mapa temático donde se representa la zona que abarca cada estación de carga y la localización de las mismas .....	187
Figura 106. Ciclo de conducción FTP75.....	199
Figura 107. Ciclo de conducción UNECE Elementary Urban Cycle (Part 1) .....	200
Figura 108. Ciclo de conducción UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Part 2)...	201
Figura 109. Ciclo de conducción UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low-Powered Vehicles).....	202
Figura 110. Ciclo de conducción con tráfico fluido .....	203



Figura 111. Ciclo de conducción con tráfico no fluido .....	204
Figura 112. Tabla de datos obtenida del ArcGis.....	208
Figura 113. Entrada de datos por fichero .....	209
Figura 114. Vista general del modelo del vehículo eléctrico en Simulink .....	215
Figura 115. Detalle de la dinámica del vehículo eléctrico en Simulink .....	216
Figura 116. Detalle de los bloques de eficacia de la transmisión en Simulink.....	217
Figura 117. Detalle del bloques batería .....	217
Figura 118. Detalle del bloques variación capacidad.....	218
Figura 119. Modelo del vehículo híbrido en paralelo en Simulink.....	220
Figura 120. Bloque desmultiplicador .....	221
Figura 121. Regulación de velocidad a potencia constante y a par constante de un motor eléctrico .....	221
Figura 122. Bloque Motor Eléctrico .....	222
Figura 123. Bloque Rendimiento del Motor Eléctrico.....	222
Figura 124. Características de un motor térmico .....	223
Figura 125. Bloque Rendimiento del Motor Térmico.....	223
Figura 126. Bloque Velocidad Constante.....	224
Figura 127. Bloque Dinámica del vehículo .....	224
Figura 128. Distribución de las fuerzas de frenado en las ruedas delanteras y las traseras .....	225
Figura 129. Fuerzas que actúan en un vehículo durante el frenado en una superficie plana.....	226
Figura 130. Bloque Cadena rueda-acoplador.....	228

Figura 131. Bloque Selector de marchas .....	229
Figura 132. Bloque Caja de cambios.....	230
Figura 133. Bloque Comparador de consumos con diferentes marchas.....	231
Figura 134. Bloque Comparador de consumos en modo recarga.....	232
Figura 135. Bloque Rend_marcha+1.....	232
Figura 136. Línea de par de máxima eficiencia del motor térmico .....	233
Figura 137. Bloque comprobador potencia .....	233
Figura 138. Bloque detector conducción .....	235
Figura 139. Bloque UCAH-P.....	236
Figura 140. Bloque On-off.....	237
Figura 141. Bloque On .....	238
Figura 142. Bloque Recarga PPS.....	240
Figura 143. Bloque Propulsión híbrida.....	241
Figura 144. Bloque Eléctrico a baja velocidad .....	242
Figura 145. Bloque Modo Off.....	243
Figura 146. Bloque Potencia reservada .....	244
Figura 147. Bloque Térmico puro.....	245
Figura 148. Bloque Frenada regenerativa.....	246
Figura 149. Bloque Pérdidas eléctricas .....	247
Figura 150. Bloque consumo instantáneo.....	248
Figura 151. Bloque consumo a los 100 km.....	249
Figura 152. Bloque contador de ciclos .....	250

Figura 153. Bloque análisis de rendimientos .....	250
Figura 154. Bloque análisis frenada regenerativa .....	251
Figura 155. Bloque análisis motor térmico .....	252
Figura 156. Bloque análisis motor eléctrico.....	253
Figura 157. Bloque análisis distribución de modos .....	254
Figura 158. Bloque análisis económico .....	255
Figura 159. Bloque análisis potencia.....	256

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1: Principales contaminantes emitidos por fuentes móviles y fijas .....	9
Tabla 2: Emisiones de contaminantes en las fases de preparación de combustibles (gr/kWh) .....	12
Tabla 3: Niveles de emisión de las plantas de generación (gr/kWh) .....	15
Tabla 4: Distribución de contaminantes en un modo de generación típica de Europa .....	15
Tabla 5: Emisiones generales primarias de los distintos tipos de combustibles.....	16
Tabla 6: Campos de actuación para la mejora de la eficiencia de motores térmicos	21
Tabla 7: Resumen de la autonomía media obtenida con las diferentes tecnologías estudiadas [km] .....	42
Tabla 8: Autonomías específicas obtenidas con las diferentes tecnologías estudiadas [km/kg] .....	43
Tabla 9: Características de diferentes tipos de baterías .....	69
Tabla 10: Reacciones químicas de diferentes tipos de baterías .....	70
Tabla 11: Relaciones entre objetos espaciales en un SIG .....	98
Tabla 12: Ventajas y desventajas de los SIG vectoriales y los SIG ráster .....	102
Tabla 13: Resumen de las principales características según el modo de carga .....	109
Tabla 14: Tipos de toma de corriente.....	112
Tabla 15: Tipos de toma de corriente estándar según la norma IEC 62196.....	113
Tabla 16: Mejoras propuestas por Millner [40] para los PHEV .....	128
Tabla 17: Potencia de los accesorios en un vehículo.....	144
Tabla 18: Características técnicas de diferentes baterías .....	148

Tabla 19: Variación de la autonomía con respecto a la temperatura en un vehículo eléctrico .....	149
Tabla 20: Variación de la autonomía con respecto a la potencia de los accesorios en un vehículo eléctrico.....	151
Tabla 21: Variación de la autonomía con respecto a la carga del vehículo en un vehículo eléctrico .....	152
Tabla 22: Especificaciones técnicas de las baterías para los vehículos híbridos eléctricos.....	163
Tabla 23: Consumo de combustible en un HEV-P.....	164
Tabla 24: Parámetros básicos del ciclo FTP75.....	199
Tabla 25: Parámetros básicos del ciclo urbano elemental .....	200
Tabla 26: Parámetros básicos del ciclo extra-urbano .....	201
Tabla 27: Parámetros básicos del ciclo de conducción extra-urbano (Vehículos con baja potencia).....	202
Tabla 28: Parámetros básicos del ciclo tráfico fluido.....	203
Tabla 29: Parámetros básicos del ciclo tráfico no fluido .....	203
Tabla 30: Características de los combustibles .....	248
Tabla 31: Variables del módulo1 de los algoritmos genéticos .....	259

## RESUMEN

---

En las últimas décadas, el consumo de petróleo del sector del transporte ha crecido a un ritmo mayor que en cualquier otro sector. El transporte representa la cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero y el 36% del consumo de energía en España. A consecuencia de ello, se ha dictado una norma europea sobre emisiones, la cual regula los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión de los vehículos nuevos vendidos en los Estados Miembros de la Unión Europea.

El trabajo realizado versa sobre el vehículo eléctrico e híbrido para hacer frente a la creciente contaminación ambiental y reducir el consumo de energía. En este documento se presenta un modelado de los vehículos eléctricos y paralelos híbridos usando el entorno Matlab / Simulink, el cual nos permite investigar rápidamente aspectos del vehículo, como la potencia del motor, el tipo y tamaño de la batería, el peso, etc., y ver cómo los cambios pueden afectar al rendimiento y a la distancia recorrida. El modelo es simulado para obtener la autonomía del vehículo eléctrico. Mediante un sistema de información geográfica y el uso de un algoritmo matemático basado en los algoritmos genéticos se obtiene la planificación de las estaciones de carga minimizando el coste de la inversión de la instalación y proporcionando la mejor distribución geográfica de las mismas para incrementar la calidad de servicio al mejorar la fiabilidad.

## ABSTRACT

---

In the last decades, the consumption of petrol in the transport sector has increased at a higher pace than in any other sector.

Transport represents a quarter of the total amount of greenhouse gases and 36% of energy consumption in Spain. As a consequence, a new law regarding emissions has been approved. Such law regulates the acceptable emission levels of combustion gases for new vehicles sold in any of the European Union Member States. This work deals with parallel-hybrid electric vehicles in order to face the increasing environmental pollution and reduce energy consumption. The present paper shows a modelling of electric and parallel-hybrid electric vehicle using Matlab/Simulink environment which allows us to access different aspects of the vehicle such as engine power, type and size of the battery or weight and to observe how changes can affect the performance and the distance travelled. The model is simulated in order to obtain the electric vehicle's autonomy. Through the use of a Geographic Information System together with a mathematic algorithm based on genetic algorithms the planning of charging stations is obtained, where the installation investment cost was minimized and the geographic distribution is improved in order to increase the quality of the service by improving reliability.





# Capítulo 1

---

## *Introducción*

Este capítulo consta de cuatro partes. En primer lugar, se desarrollan los objetivos; a continuación, se analiza la evolución del vehículo eléctrico a lo largo de la historia; después se analiza el impacto de éste sobre el medio ambiente; y finalmente, se hace una breve presentación de los contenidos de la presente tesis doctoral.

### **1.1.- Objetivos**

El objetivo de esta tesis doctoral es realizar el modelado y simulación de los diferentes tipos de vehículos eléctricos dependiendo de la fuente de energía la cual proporciona la potencia para el movimiento del sistema motriz del mismo y la ubicación de las estaciones de carga, ‘electrolineras’.

Las fuentes de energía son una batería y/o un motor de combustión interna.

Para ello, se obtiene un modelo de cada tipo de vehículo eléctrico, es decir, un modelo para el vehículo eléctrico puro y otro para el vehículo eléctrico híbrido en paralelo. Obtenido el modelo, se procede a su validación y simulación en Matlab/Simulink.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se conoce la máxima distancia que puede recorrer el vehículo eléctrico puro con una recarga. Por ello, hay que planificar la ubicación de las estaciones de carga, de tal modo, que se cumplan estos tres objetivos: en primer lugar, la distancia entre los puntos de carga sea menor que la autonomía del vehículo; segundo, la estación de carga pueda satisfacer su propia demanda y cierta capacidad de otras estaciones próximas; y por último, que cubra todo el núcleo urbano o zona concreta de estudio.

El logro de este trabajo radica en el interés por el desarrollo de vehículos eléctricos puros e híbridos, tanto en serie como en paralelo y la red de estaciones de carga. A través de los programas Matlab/Simulink y ArcGis es posible simular los sistemas de propulsión de los vehículos eléctricos e híbridos de forma sencilla y realizar mapas temáticos donde se muestra la localización y la zona a la cual da suministro cada estación de carga. Además, aumenta la flexibilidad del conjunto al permitir simular un amplio abanico de tipos de vehículos, al modificar aspectos del mismo como la potencia del motor, tipo y tamaño de batería, peso, etc., y ver cómo estos cambios afectan al rendimiento, a la autonomía y a la ubicación de las estaciones de carga dependiendo de la autonomía del vehículo.

## **1.2.- Historia del automóvil eléctrico**

El coche eléctrico fue uno de los primeros automóviles que se desarrollaron, hasta el punto que existieron vehículos eléctricos anteriores al motor de cuatro tiempos sobre el que Diesel (motor diésel) y Otto (gasolina), basaron el automóvil actual. En la siguiente figura se muestran los principales hitos de la historia del vehículo eléctrico a lo largo de los siglos XIX y XX.

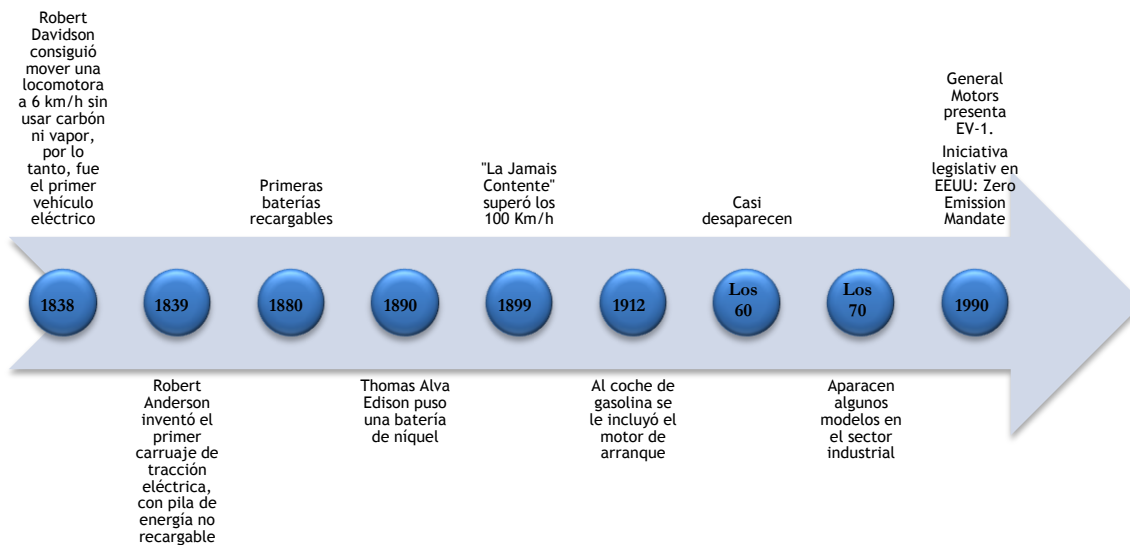


Figura 1. Hitos históricos del vehículo eléctrico durante los siglos XIX y XX

### 1.2.1.- En el Siglo XXI el coche eléctrico viene para quedarse

La evolución tecnológica de los componentes del vehículo eléctrico ha sido en los últimos años espectacular. El avance en la tecnología de los semiconductores ha permitido la aplicación de los motores de inducción, los cuales eliminan el problema de desgaste de los colectores y escobillas de los primeros motores de corriente continua. Éstos, también han mejorado con el motor de disco que utiliza un disco plano como rotor.

Otro aspecto importante en el vehículo eléctrico es el control de la velocidad, donde el primitivo sistema, que variaba la corriente por conexión y desconexión de resistencias en serie, fue sustituido por los rectificadores de silicio y los tiristores, que permiten un ajuste fino de la velocidad y de una forma más eficaz. Los transistores de potencia disminuyen aún más las pérdidas producidas en la conmutación con una circuitería más simple.

El sistema de control del vehículo eléctrico ha mejorado substancialmente gracias a los microprocesadores.

La mejora en la tecnología de las baterías está consiguiendo que sean una alternativa a considerar, pues la pila de combustible está todavía en una fase inicial que no interesa para el público masivo. El coche convencional comienza su decadencia ahora.

La principal esperanza eléctrica, tras los híbridos, es el híbrido enchufable, lo mejor de ambos mundos. [1].

### ***1.2.2.- Viabilidad y evolución previsible***

A finales de la década de los años 70, la atención en los vehículos eléctricos se basaba en su capacidad para conseguir una cierta independencia del petróleo, materia prima que algunos países no poseen y cuyas reservas explotables, cada vez más limitadas, se encuentran en su mayoría en países políticamente inestables. Más recientemente, la creciente preocupación por la contaminación atmosférica y sus efectos nocivos, sobre todo en ámbitos urbanos, ha vuelto a despertar el interés en los vehículos eléctricos, como un medio para reducir las emisiones del sector transporte. La popularización del uso de vehículos eléctricos puede ayudar, por tanto, a la consecución de dos importantes objetivos de la sociedad actual:

- ✓ disminuir el consumo de combustibles
- ✓ cortar de manera notable las emisiones contaminantes.

Sin embargo, no todo son ventajas. A la hora de impulsar un creciente uso comercial de este tipo de vehículos, nos topamos aún con algunos problemas, entre los que pueden destacarse la, hasta ahora, limitada autonomía que ofrecen y la falta de infraestructura específica, sobre todo de recarga.

Es por ello por lo que, en un principio, la utilización supuesta del vehículo eléctrico es como vehículo de flota o como segundo vehículo para uso particular. Esto supone una pequeña parte del total de automóviles, debido a lo cual no puede esperarse un cambio radical de las condiciones medioambientales y energéticas.

Se debe pensar, eso sí, en el vehículo eléctrico como una opción de futuro, a largo plazo. Por esta razón, se encuentran en pleno desarrollo nuevas soluciones aplicables a vehículos de uso masivo y que actúen como “puente” hasta la consolidación del vehículo eléctrico en el parque automovilístico.

## **1.3.- El vehículo eléctrico y el medio ambiente**

Aunque los recursos de combustibles fósiles son limitados, la demanda de petróleo ha aumentado de manera significativa. En las últimas décadas, el consumo de petróleo del

sector del transporte ha crecido a un ritmo mayor que en cualquier otro sector. Este incremento se ha debido principalmente a las nuevas exigencias de los vehículos de uso personal con motores convencionales de combustión interna (ICE). Debido a que algunos problemas ambientales, como el efecto invernadero, están directamente relacionados con las emisiones de vehículos, agencias de gobierno y organizaciones han desarrollado normas más estrictas para el consumo de combustible y las emisiones.[2]

Movilidad sostenible es un concepto nacido de la preocupación por los problemas medioambientales y sociales ocasionados por la generalización del uso del vehículo particular como medio de transporte.

Los inconvenientes de este modelo, entre los que destacan la contaminación del aire, el consumo excesivo de energía, los efectos sobre la salud o la saturación de las vías de circulación, han generado una preocupación creciente por encontrar alternativas que ayuden a evitar o minimizar los efectos negativos de este modelo y encontrar uno nuevo.

Los coches eléctricos casi desaparecen pero los últimos acontecimientos económicos y la creciente mentalidad ecológica han conseguido evitar la presión de los grupos productores del petróleo. El coche híbrido consiguió emerger y el eléctrico está en ello.

### ***1.3.1.- Situación energética actual***

La situación energética, tanto mundial como nacional, está condicionada por el gradual consumo de las reservas de carburantes fósiles, la creciente concienciación medioambiental y la situación geopolítica.

En la Figura 2 se puede observar la evolución de extracción de petróleo anual. El máximo se obtiene en el año 2010, según la Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas (ASPO en inglés) reduciéndose a partir de entonces la producción de petróleo. El ritmo de reducción de la producción dependerá de la tecnología existente de extracción y las reservas disponibles.

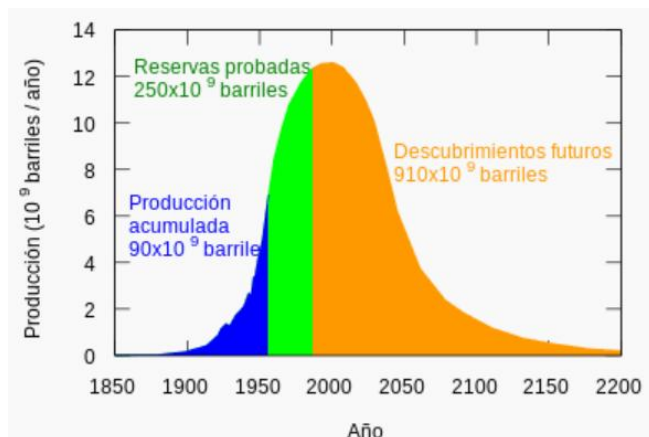


Figura 2. Curva de producción del petróleo, como sugirió originalmente M. King Hubbert en 1956

El crecimiento económico y la prosperidad que vive el primer mundo desde la revolución industrial son debidas, en gran parte, al uso de los combustibles fósiles. Estos recursos fósiles, inevitablemente, tienden a ir decayendo ya que se consumen a una velocidad muy superior a la que son reemplazados (escalas geológicas). Algunos creen que el decrecimiento de la producción de combustibles producirá un impacto drástico en la civilización tecnológica moderna ya que ésta es fuertemente dependiente del petróleo como combustible. Esta coyuntura energética afecta especialmente al sector transportes, que es el mayor consumidor de energía, con un 41%, por delante de otros sectores como la industria. Como puede verse en la Figura 3 el consumo de los productos petrolíferos, aunque descendió con respecto a los años anteriores, corresponde a un 50,8 % del consumo de energía final en España en 2013. [3]

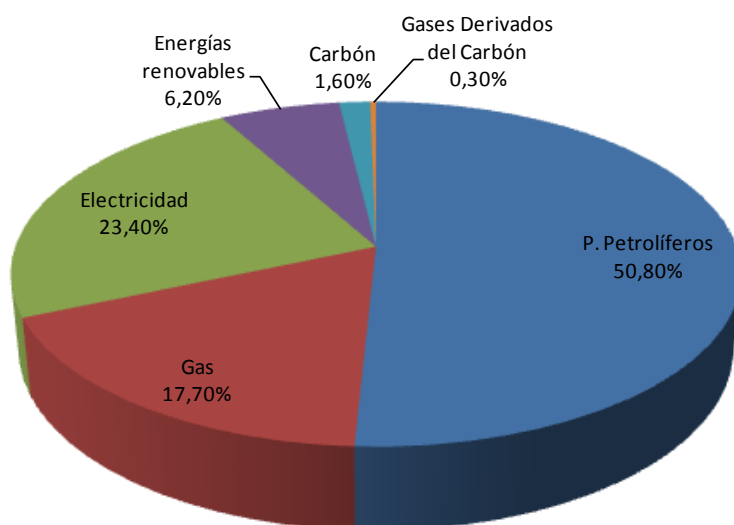


Figura 3. Consumo de energía final en España en 2013

El transporte representa la cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero y el 36% del consumo de energía en España [4]. Por todo ello, se ha definido una norma europea sobre emisiones, la cuales regulan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión de los vehículos nuevos vendidos en los Estados Miembros de la Unión Europea. Las normas de emisión se definen en una serie de directivas de la Unión Europea con implantación progresiva que son cada vez más restrictivas [5].

### ***1.3.2.- Impacto medioambiental de los vehículos***

La preocupación del ciudadano por el cuidado del medio ambiente y el hecho de que los productos derivados del petróleo no durarán toda la vida, está llevando a la industria del automóvil a investigar soluciones alternativas, esto es, a desarrollar vehículos capaces de consumir menos combustible y de contaminar menos. Las legislaciones, cada vez más estrictas, aprobadas para lograr una disminución progresiva del nivel de emisión de sustancias polucionantes, contribuyen, sin duda, a la consecución de estos objetivos. El vehículo eléctrico se perfila como la mejor opción, al reducir sus cotas de emisión a unos niveles mínimos y lograr una menor dependencia del petróleo.

#### **1.3.2.1.- Contaminantes y sus efectos**

Las acciones contaminantes que tienen su origen en la actividad humana presentan como principales fuentes de contaminación el transporte, con el 50 por 100 de las emisiones, y las llamadas fuentes fijas de combustión (donde se incluyen las centrales eléctricas), que emiten el 16 por 100 del total.

No hay duda de que los distintos contaminantes afectan de forma perjudicial a nuestro entorno. Pero además, y a pesar de que aún perduran ciertas dudas sobre la relación entre la exposición al aire contaminado y el desarrollo de ciertas enfermedades, parece comprobado que inciden también de manera negativa sobre nuestra salud. Por este motivo, las leyes que regulan las emisiones nocivas son cada vez más severas.

##### ***1.3.2.1.1.- Contaminantes***

El petróleo y sus derivados son composiciones de hidrocarburos. Están, pues, formados por carbono e hidrógeno, cuerpos que se combinan fácilmente con el oxígeno

del aire produciéndose una oxidación rápida, que es como químicamente se conoce a la combustión.

Si los elementos de la reacción y el proceso de la combustión fueran perfectos, los únicos productos resultantes serían CO<sub>2</sub> y agua. Sin embargo, ninguna de las dos condiciones se cumple y la combustión genera muchos más compuestos, algunos de los cuales pueden resultar perjudiciales para el organismo o la atmósfera.

Los principales contaminantes emitidos, tanto por fuentes móviles como fijas, son:

Contaminantes	Causante de:	Emisiones
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	Efecto invernadero	78% del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, etc.) y resto, el 22 % de la deforestación.
<b>Compuestos orgánicos</b>	Problemas de salud por su toxicidad	Las provenientes de vehículos con motor de combustión interna constituyen, aproximadamente, un 40 %, el almacenamiento y distribución del petróleo un 5 %, y el abastecimiento de los coches en las estaciones de servicio un 2 %. El porcentaje restante es de origen industrial.
<b>Monóxido de carbono (CO)</b>	Problemas de salud ya que son tóxicos	Generado, fundamentalmente, por el tráfico rodado
<b>Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	Ataca, de forma especial, al aparato respiratorio. Además, es el principal responsable de la lluvia ácida	La principal fuente de emisión en la CE proviene de la combustión de energía fósil: las centrales térmicas y las instalaciones de calefacción doméstica son responsables del 66 % de las emisiones totales. Le siguen, la industria (25 %), después las refinerías (6,6 %) y los transportes terrestres (2,4 %)



Contaminantes	Causante de:	Emisiones
<b>Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)</b>	NO <sub>x</sub> : originan las lluvias ácidas y la niebla de las ciudades.	Un 54 % de las emisiones en la CE provienen de los transportes terrestres, un 17 % de las centrales térmicas y un 14 % de los hogares domésticos.
	N <sub>2</sub> O: participa en el efecto invernadero.	
	NO <sub>2</sub> : puede conllevar enfermedades respiratorias.	
<b>Partículas sólidas</b>	Formación de las nieblas típicas de la ciudad: "smog" fotoquímico  Sustancias nocivas para la salud	Son producidas sobre todo por la combustión del carbón, pero también por el resto de los combustibles fósiles, los automóviles y ciertas actividades industriales.

Tabla 1: Principales contaminantes emitidos por fuentes móviles y fijas

La distribución de los contaminantes emitidos por las distintas fuentes puede quedar resumida en la Figura 4.

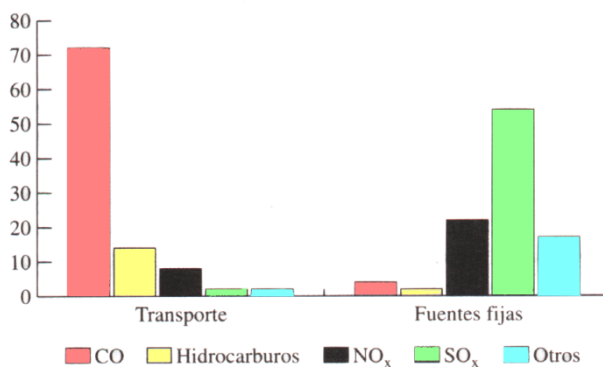


Figura 4. Distribución de contaminantes en las fuentes de producción y durante el transporte de energía

### 1.3.2.1.2. - Efectos medioambientales

Los principales efectos negativos que los contaminantes mencionados producen en nuestro entorno medioambiental son:

- Efecto invernadero
- Lluvia ácida
- “Smog” fotoquímico

#### Efecto invernadero

Proviene de la capacidad que poseen determinados gases, habitualmente presentes en ínfima cantidad en la atmósfera ( $\text{CO}_2$ , metano, ozono troposférico,  $\text{N}_2\text{O}$ , los CFC, etc.), de interceptar la irradiación solar (infrarrojo) reflejada por la superficie de los continentes y océanos y de provocar, de este modo, un recalentamiento de la atmósfera.

La responsabilidad de los diferentes gases y de los diferentes sectores de actividad en el progresivo recalentamiento del planeta es extremadamente variable. El  $\text{CO}_2$ , interviene en un 55 por 100 (incluso un 61 por 100 según determinadas estimaciones) en el efecto invernadero, aunque los demás gases absorben mejor los rayos infrarrojos y se acumulan más rápidamente en el aire.

Consecuencias del efecto invernadero:

- ✓ Aumento estimado de la temperatura media del planeta del orden de 2 a 3 °C, para mediados del próximo siglo.
- ✓ Elevación del nivel de los mares de 17 a 32 cm, en el mismo plazo.
- ✓ Modificación de la circulación atmosférica y del ciclo del agua.
- ✓ Redistribución geográfica de los grandes ecosistemas terrestres.

#### Lluvia ácida

Al reaccionar con el vapor de agua, el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) se convierten, respectivamente, en ácido sulfúrico y ácido nítrico. Estas sustancias ácidas se incorporan al agua de lluvia.

Efectos de la lluvia ácida:

- ✓ Posible alteración de la química del suelo, lo que puede inhibir el crecimiento de las plantas.
- ✓ Disminuye el pH del agua, lo que acarrea serios problemas de subsistencia a los organismos acuáticos.
- ✓ La vegetación, sobre todo a elevada altitud, puede quedar sometida directamente a un elevado grado de acidez. En este caso, las gotas ácidas actúan extrayendo los nutrientes de las plantas a un ritmo superior del que son reemplazados por las raíces.

Afecta a la integridad de los materiales, por ejemplo, la piedra.

#### El 'smog' fotoquímico

La contaminación urbana viene determinada no sólo por las sustancias polucionantes que se emiten, sino también por el microclima urbano, que favorece la retención de contaminantes en la propia atmósfera urbana. Todo ello contribuye a la formación del "smog" o niebla.

Esta situación adquiere gran importancia, si se tiene en cuenta que, en la actualidad, prácticamente el 80 por 100 de la población humana vive en grandes urbes, y se prevé que en el futuro este porcentaje todavía aumente.

La mayor parte de los contaminantes que intervienen en la formación de este fenómeno provienen de la combustión de carburantes fósiles. El tráfico y las combustiones fijas, en mayor medida las calefacciones domésticas, son las principales fuentes de emisión de contaminantes, que contribuyen con un 70 por 100 a la contaminación total que se genera en un centro urbano. El 30 por 100 restante corresponde a focos más concretos, tales como determinados procesos industriales y procesos biogénicos.

Efectos de la contaminación urbana:

- ✓ Irritaciones en las distintas partes del sistema respiratorio y en los ojos, alteraciones en el estado de la sangre, propensión a contraer ciertos tipos de cáncer, etc.

- ✓ Efectos nocivos sobre la vegetación en general.
- ✓ Efectos nocivos sobre los materiales: degradación de las pinturas, el papel y, sobre todo, de los metales.

**1.3.2.2.- Emisiones del vehículo de combustión interna**

Debido al incremento constante del número de vehículos con motor, el sector transporte se ha convertido en el mayor contribuyente en la polución del aire. Esta situación adquiere especial importancia en zonas urbanas donde se estima que el transporte es el responsable del 74 por 100 de las emisiones de CO, el 53 por 100 de los hidrocarburos y el 47 por 100 de los NO<sub>x</sub>.

Para conocer la influencia de los vehículos de combustión interna en la contaminación ambiental, debemos tener en cuenta:

- Las emisiones producidas en la preparación del combustible.
- Las emisiones propias del vehículo de combustión interna.

La tabla siguiente resume las emisiones contaminantes producidas en las diferentes fases de preparación de los combustibles:

Fase	Partículas de polvo	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HC	CO	CO <sub>2</sub>
<b>Extracción</b>	0,18	0,52	3,60	0,90	0,75	0,29
<b>Transporte del petróleo</b>	0,18	0,52	0,36	0,90	0,75	0,29
<b>Producción del combustible</b>	0,03	0,41	0,26	0,018	0,018	0,24
<b>Transporte del combustible</b>	0,55	0,25	6,00	1,00	0,90	0,28

Tabla 2: Emisiones de contaminantes en las fases de preparación de combustibles (gr/kWh)

A estos valores deberemos añadir otra fuente de emisiones importante, sobre todo en los vehículos de gasolina, y es la evaporación que se produce al repostar, tanto en el interior del depósito (ya solucionado en los automóviles modernos) como en el surtidor. Otro factor determinante para el grado de emisiones es la calidad del combustible.

Los niveles de emisión debidos al proceso de combustión que tiene lugar en el motor térmico son difíciles de precisar puesto que varían dependiendo de cómo se conduce el vehículo y de las reacciones químicas que tienen lugar en el propio motor y en el catalizador.

En los motores de gasolina alimentados con una mezcla rica tienden a aparecer hidrocarburos (HC) y CO, mientras que, si la mezcla es pobre, existe más tendencia a producir  $\text{NO}_x$ . Al aumentar la temperatura de la reacción, la emisión de este último compuesto crece.

Un motor diesel, en cambio, funciona siempre con más aire del que necesita para quemar el gasóleo, lo que significa que hay oxígeno de sobra. Esto produce un escaso índice de CO, pero eleva la proporción de  $\text{NO}_x$ , debido a la elevada temperatura del proceso. Estos motores emiten, además, una gran cantidad de partículas sólidas, responsables de los humos negros.

El término VCI (Vehículo de Combustión Interna) incluye ambos tipos de motorización.

Se puede considerar que la composición de los gases de escape en un VCI es la presentada en la Figura 5.

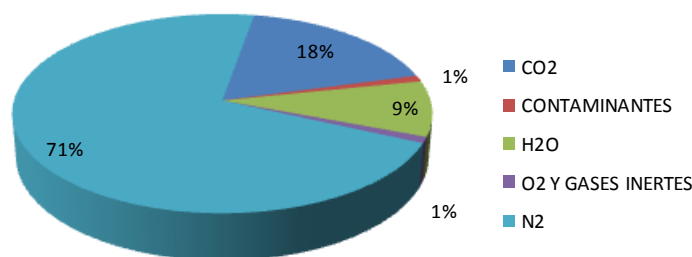


Figura 5: Composición de los gases de escape (%)

Como se puede observar, la proporción de los gases considerados contaminantes es, en realidad, bastante limitada, pues asciende a un 1 por 100 del total de las emisiones (en coches sin ningún tratamiento anticontaminación).

Dentro de ese 1 por 100 de contaminantes, originado en parte por la combustión incompleta en el cilindro, el monóxido de carbono (CO) es el que se da en mayor proporción.

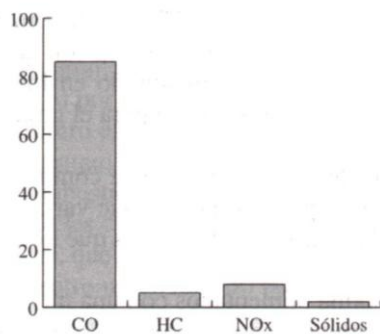


Figura 6: Distribución de los contaminantes en los gases de escape

El aparato catalizador (obligatorio en la CE, a partir de 1993, para todos los vehículos nuevos de cilindrada superior a 2000 cc) se concibió como una medida de reducción de las emisiones nocivas originadas por los VCI. Este aparato disminuye las emisiones de ciertas sustancias nocivas, al actuar sobre el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos transformándolos en  $\text{CO}_2$ , nitrógeno y agua.

Los niveles de emisión dependen del ratio de aceleración y deceleración, así como del tiempo que se pase a bajas velocidades y en paradas con el motor en ralentí. Podemos añadir que, en condiciones de tráfico que obliguen a una marcha muy lenta, el consumo de combustible puede llegar a incrementarse hasta un 50 por 100, lo que ocasionará un mayor ratio de emisiones. Por todo ello, se concluye que, en entornos urbanos, precisamente donde el nivel de contaminación empieza a resultar preocupante, las características del tráfico contribuyen a que la aportación polutiva del VCI, independientemente de que incorpore o no aparato catalizador, sea mayor que en un régimen de conducción menos abrupto.

### 1.3.2.3.- Emisiones de las centrales de generación eléctrica

El vehículo eléctrico, al igual que cualquier aplicación de la electricidad, no produce emisiones en el lugar de utilización. Sin embargo, la producción de la electricidad que utiliza sí conlleva la generación de emisiones contaminantes, sobre todo si se utiliza energía primaria fósil.

Así, a la hora de estudiar el impacto ambiental que supone el uso de vehículos eléctricos, deberemos fijarnos en las emisiones que se producen en el ciclo de generación de la electricidad.

En la Tabla 3 se recogen los niveles de emisiones provocados por distintos tipos de centrales eléctricas:

Planta	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>2</sub>	CO	NMHC	SO <sub>2</sub>
<b>Carbón (no controladas)</b>	955	2,92	0,03	4,34	0,14	0,02	11,82
<b>Carbón (controladas)</b>	987	4,14	0,03	2,93	0,14	0,02	1,49
<b>Petróleo</b>	818	0,17	0,01	3,99	0,18	0,71	14,16
<b>Nuclear</b>	4	0,01	0	0,02	0	0	0,05
<b>Renovables</b>	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3: Niveles de emisión de las plantas de generación (gr/kWh)

Estos valores incluyen todas las emisiones a lo largo de la cadena energética, a saber:

- ❖ Extracción y transporte de la energía primaria.
- ❖ Producción de la electricidad en centrales y su distribución.

Como puede suponerse a la vista de los datos de la Tabla 3, la contaminación producida en las centrales eléctricas varía mucho dependiendo del porcentaje que ocupe cada tipo de central dentro del total de la energía generada en un país (lo que comúnmente se conoce como *mix*). Si consideramos un *mix* medio, representativo de la actual situación europea, llegaremos a los resultados recogidos en la Tabla 4.

	Partículas de polvo	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HC	CO	CO <sub>2</sub>
<b>Total</b>	0,092	2,242	0,986	0,057	0,095	451

Tabla 4: Distribución de contaminantes en un modo de generación típica de Europa

Los niveles de emisión de los vehículos eléctricos, al contrario de los de otros vehículos propulsados por combustibles tradicionales o alternativos, no cambian bajo distintas condiciones de operación, puesto que las únicas emisiones identificables que

pueden atribuirse a los vehículos eléctricos son las asociadas con la generación de la energía necesaria para cargar las baterías del vehículo.

Precisamente las baterías son un punto negro al que se hace referencia cada vez que se considera al vehículo eléctrico como una alternativa limpia. Una batería es un elemento altamente contaminante si no se tiene el debido cuidado con ella. Los ácidos y metales pesados que contiene son tóxicos (plomo, cadmio, níquel, cinc, litio, ácido sulfúrico, azufre, etc.) y en el proceso de carga se desprenden gases que son contaminantes y peligrosos. Se hace, pues, necesario un proceso de reciclaje que, si es bueno, puede lograr la reutilización del 90 por 100 de una batería en desuso.

**1.3.2.4.- Comparación de la generación eléctrica y del vehículo de combustión interna en los impactos medioambientales**

Según un estudio realizado por Citelec (Asociación Europea de Ciudades Interesadas en el Uso de los Vehículos Eléctricos), las emisiones generales primarias (o sea, calculadas desde el proceso de producción), bajo la hipótesis de que los vehículos cumplen las exigencias generales en vigor, aparecen en la Tabla 5.

	Gasolina	Gasóleo	Electricidad
<b>CO</b>	6,320	1,050	0,020
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,820	1,120	0,200
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,085	0,215	0,450
<b>NMVOG</b>	0,865	0,220	0,010
<b>Polvo</b>	0,014	0,127	0,013
<b>CO<sub>2</sub></b>	222	209	100

Tabla 5: Emisiones generales primarias de los distintos tipos de combustibles

NMVOG: Compuestos orgánicos volátiles, sin incluir el metano. Datos en gr/km.

En forma gráfica, Figura 7, tomando como referencia las emisiones de los vehículos a gasolina se obtiene:



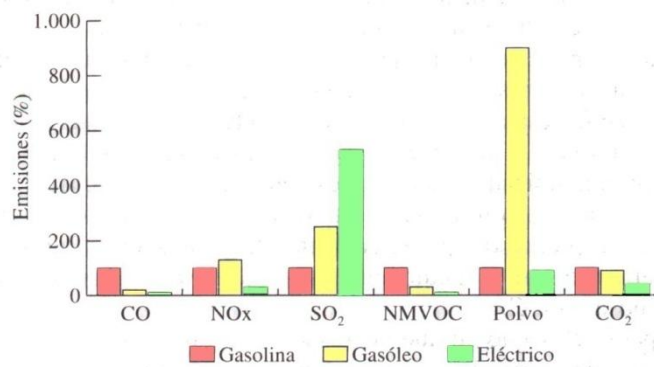


Figura 7: Distribución relativa de las emisiones según los tipos de contaminantes y combustible utilizado

Como se puede observar en Tabla 5 y en la Figura 7, la mayoría de las emisiones se verían reducidas con el uso del vehículo eléctrico en lugar de los vehículos de combustión interna. Sin embargo, el grado de reducción de la contaminación conseguido varía según se trate de un contaminante u otro.

En el caso de los vehículos eléctricos, los niveles de emisión dependen fundamentalmente del tipo de combustible usado en las centrales, así como de la eficiencia lograda tanto a la hora de generar la electricidad como en la obtención del combustible. Aun así, parece seguro que la mayoría de los contaminantes emitidos sufrirían una reducción, en algunos casos más notable que en otros.

El monóxido de carbono (CO) desaparecería casi completamente, y también los compuestos orgánicos (entre los que se incluyen los HC), principales responsables del “smog” urbano. Estas sustancias sufrirían una rebaja del orden de un 99 por 100 en cualquier país.

Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se considera que pueden llegar a reducirse hasta la mitad.

En cuanto a las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), parece comprobado que el uso de vehículos eléctricos las haría bajar en la mayoría de los países.

Las únicas sustancias cuya concentración, probablemente, aumentaría serían los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), excepto en países con muy pocas o ninguna central alimentada con carbón, o con centrales eficientes y controles muy severos de SO<sub>x</sub>.

El cambio en las emisiones de partículas no sería muy notable (considerando que las centrales cumplen las normativas); se debe tener en cuenta que los vehículos de combustión interna son una fuente minoritaria de  $\text{SO}_x$  y emiten partículas en proporción a ello.

Estas estimaciones son válidas para ciclos de conducción estándares, tanto para los vehículos de combustión interna como vehículos eléctricos. Sin embargo, cualquiera de los dos tipos puede ser conducido bajo cualquier otro ciclo. Se ha demostrado que, a bajas velocidades, las emisiones de los vehículos de combustión interna aumentan de manera notable (respecto a la media de emisiones por kilómetro), mientras que las de los vehículos eléctricos no cambian. Como consecuencia de esto, cuando los vehículos eléctricos se conducen a velocidades bajas, como en uso urbano, las reducciones conseguidas en las emisiones pueden ser más notables que las mencionadas aquí, y menos si se conducen a velocidades relativamente altas.

Por lo tanto, se puede concluir que el uso de vehículos eléctricos facilitaría una disminución de la contaminación, al menos localmente. Parece lógico pensar que lo que se lograría, en cierto modo, sería desplazar el foco contaminante desde la ciudad, donde las emisiones serían mínimas, si no nulas, a zonas más alejadas del ambiente urbano, donde se encuentran ubicadas las centrales generadoras de electricidad. Que la reducción de la contaminación se manifieste también globalmente, depende por tanto de las emisiones producidas por esas plantas de generación, e, indiscutiblemente, será más beneficioso para el medio ambiente, que el *mix* de centrales incluya más plantas respetuosas con él.

Por otra parte, el hecho de que las responsables de las emisiones sean únicamente las plantas de generación eléctrica (en el caso de vehículos eléctricos), trae consigo la ventaja de un mejor control de las emisiones, al tratarse de instalaciones grandes y estacionarias cuya localización es conocida, al contrario que la gran cantidad de coches que circulan por las carreteras, que constituye una fuente móvil difícil de vigilar. Además, debemos tener en cuenta que, a pesar de que las emisiones de los vehículos de combustión interna estén reguladas, con el paso del tiempo, los ingenios que las controlan pierden precisión y no pueden garantizar el cumplir los estándares. No obstante, el aumento progresivo del uso de vehículos eléctricos conlleva una cantidad cada vez mayor de baterías gastadas, por lo que se hace necesario el desarrollo de tecnologías para su tratamiento y reciclaje, con el fin de evitar problemas medioambientales.

En cuanto al consumo de energía, se puede decir que, de seguir utilizándose el transporte privado como hasta ahora, el paso del vehículo de combustión interna al vehículo eléctrico no supondría una reducción drástica de él, pero si un cambio en la obtención de esa energía, disminuyendo la dependencia del petróleo en muchos de los casos.

Dentro del ciclo global para la puesta en marcha de un vehículo de combustión interna, el petróleo es utilizado por el propio vehículo y en varios puntos en el proceso de preparación de los combustibles. Es cierto que el uso de vehículos eléctricos también puede llevar asociada la necesidad de petróleo u otros combustibles derivados de él durante el proceso de generación de la electricidad; sin embargo, se considera que la sustitución de los vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos puede llegar a reducir el consumo de petróleo hasta un 90 por 100 en muchos países. Este dato es, sin duda, relevante si tenemos en cuenta que el petróleo es una materia prima que algunos países no poseen y cuyas reservas explotables, cada vez menos numerosas, quedarán limitadas en algunas décadas al Golfo Pérsico, a territorios inestables políticamente.

En resumen, las ventajas medioambientales asociadas al uso de vehículos eléctricos serían:

- Disminuye de forma general la emisión de sustancias contaminantes. Podemos incluir, además, su contribución mínima a la polución acústica (ausencia de ruido).
- Facilita el control de los niveles de emisión.
- Disminuye la dependencia del petróleo.

### ***1.3.3.- Vehículos De Emisión Cero***

Actualmente, el aumento espectacular del parque automovilístico ha supuesto unas consecuencias medioambientales y energéticas que han obligado a plantear una serie de objetivos para conseguir un cierto bienestar tanto a nivel económico como humano. Estos objetivos se centran, principalmente, en lograr el control de emisiones contaminantes y ruidos, ahorro energético y seguridad en el tráfico.

Sin duda, las legislaciones actuales referentes a la disminución de emisiones (como la ley CARB), las medidas para el ahorro energético (como subir el precio de los carburantes) e incluso los límites de velocidad, cada vez más estrictos, impuestos en algunas carreteras, conducen hacia filosofías cercanas a la de vehículos de emisión cero.

Los vehículos eléctricos son los únicos vehículos prácticos que, por ahora, no producen emisiones mientras funcionan, es decir, son los únicos que pueden considerarse como vehículos de emisión cero, ZEV.

La CARB ha hecho una apuesta fuerte por ellos, ocupando una parte importante de su normativa.

Sin embargo, el futuro de los vehículos eléctricos no parece tan cercano como se quisiera y el motor térmico, al que todavía se le augura una larga vida, debe ser estudiado y acondicionado para cumplir con las exigencias sociales de la actualidad.

#### **1.3.3.1.- Legislación de California**

Manteniéndose firmes en el propósito de reducir al máximo posible las emisiones de los vehículos de motor en California, la CARB incluyó el requerimiento de ZEV como parte de las regulaciones sobre vehículos de baja emisión.

La ley aprobada establece que el 2 por 100 de los vehículos con peso menor de 3750 lb (1700 kg) vendidos por cada fabricante en el estado de California en 1998 deben ser de emisión cero (ZEV); y esta proporción debe incrementarse al 5 por 100 para el 2001, y al 10 por 100 para el 2003.

#### **1.3.3.2.- Mejora de la eficiencia de los motores térmicos**

La creciente inquietud en favor de la protección del entorno y el ahorro energético, además de la obligación de cumplir con las restricciones legales, cada vez más severas, sobre emisiones contaminantes, ha obligado a los fabricantes de automóviles a trazar distintas estrategias operativas, con el fin de limitar el efecto negativo de éstos sobre el medio ambiente:

- Apoyo a investigaciones y proyectos para desarrollar el vehículo eléctrico y potenciar su utilización.

- Programas para facilitar el reciclaje de la totalidad de componentes del vehículo.
- Mejora de las tecnologías ya conocidas.

El vehículo eléctrico constituye, ciertamente, una opción que podría gozar de gran aceptación popular en un futuro. Si se logra equiparar sus prestaciones a las de un vehículo de combustión interna, su casi total inocuidad para con el medio ambiente, acompañada de las esperadas ayudas legales, conseguirá sin duda desbancar al automóvil térmico. Sin embargo, no parece, al menos por el momento, que ese futuro esté muy cercano, por lo que los fabricantes dedican la mayor parte de sus esfuerzos a la mejora de las tecnologías de combustión existentes. El objetivo básico que se persigue es el mejor aprovechamiento de la energía térmica, o sea, la reducción significativa del consumo en los motores, lo que conlleva, a su vez, una reducción de las emisiones.

Los campos de actuación a los que se debe prestar atención para aprovechar mejor la energía térmica están señalados en la Tabla 6.

Campos de actuación	Objetivos perseguidos
<b>Carrocería</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mejorar la aerodinámica</li> <li>- disminuir el peso</li> <li>- aumentar la seguridad</li> </ul>
<b>Rodadura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- menores pérdidas</li> <li>- menor nivel de ruidos</li> </ul>
<b>Tracción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mejora del rendimiento de los motores</li> <li>- combustibles alternativos</li> </ul>

Tabla 6: Campos de actuación para la mejora de la eficiencia de motores térmicos

### 1.3.3.2.1.- *Combustibles alternativos*

Las mejoras planteadas sobre los motores de combustión actualmente en uso pueden lograr, ciertamente, un ahorro energético y una reducción considerable de las

emisiones. Sin embargo, siguen utilizando los mismos combustibles, por lo tanto, lo único que consiguen es retrasar, en el tiempo, y amortiguar los efectos negativos. Los combustibles alternativos se presentan como una posible solución. Los más viables son:

#### Gas natural

Reduce de forma aparente ciertas emisiones ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y otros) pero requiere la incorporación de depósitos especiales. Además de su alto precio, presenta el inconveniente de ofrecer una cuarta parte del contenido energético del petróleo, lo cual puede reducir las prestaciones. Actualmente, se utiliza casi exclusivamente en vehículos de flota, con acceso a estaciones centrales de recarga.

#### Gasolina reformulada (RFG)

Consiste en cambiar la composición de la gasolina, de forma que se reduzcan drásticamente las emisiones. Aunque los resultados obtenidos, individualmente, son más modestos que con otras alternativas, al no requerir de nuevos motores se pueden lograr bajas reducciones a gran escala.

#### Etanol (Biomasa)

Su producción es muy cara y consume casi tanto combustible como el que puede generar. Se debe utilizar mezclado con otros combustibles. La ventaja principal es que resulta, hasta cierto punto, abundante (se pueden utilizar tierras en desuso) y no es petróleo.

#### Metanol

Se consigue, principalmente, del gas natural y ofrece un alto índice de octano, que permite aumentar el rendimiento del motor. Sin embargo, emite ciertos ácidos perjudiciales para la atmósfera y el motor. Produce menor energía que el petróleo, por lo que requiere depósitos mayores y, además, algunas modificaciones en el motor.

#### Gases licuados del petróleo (GLP)

Se incluyen el butano y el propano. Es la opción más barata y las modificaciones a realizar en el motor resultan simples. Presenta, sin embargo, problemas de abastecimiento.

### Hidrógeno

Como ventajas ofrece una gran energía y una combustión relativamente limpia. Además, es abundante y no tiene nada que ver con el petróleo. Sin embargo, resulta caro (requiere mucha energía para su producción), es altamente inflamable, poco denso y su transporte y utilización resultan complicados.

## **1.4.- Estructura**

Para llevar a cabo este proyecto se ha buscado información en revistas, congresos, libros, instituciones y organismos, etc. con la finalidad de tener unos antecedentes y poder desarrollar un modelo de vehículo eléctrico y planificar la localización de las estaciones de carga para la recarga de los mismos. Para ello, el presente trabajo se ha dividido en los siguientes apartados: Capítulo 1 Introducción en el que se muestra una introducción del trabajo; Capítulo 2 Conceptos básicos en el cual se explican los sistemas de propulsión, las alternativas a los sistemas de propulsión tradicionales, los diferentes tipos de vehículos eléctricos, el modelado de su dinámica, el modelado de la batería, los sistemas de información geográfica y las estaciones de recarga de los vehículos eléctricos; en el siguiente Capítulo 3 Estado del Arte se realiza un análisis de los estudios científicos a partir de los cuales se desarrolla este trabajo, seguidamente en el Capítulo 4 Modelado de un vehículo eléctrico se explica la realización del modelo de un vehículo eléctrico, posteriormente en el Capítulo 5 Modelado de un vehículo eléctrico híbrido en paralelo se desarrolla el modelado de un vehículo eléctrico híbrido en paralelo. A continuación, en el Capítulo 6 Planificación de las Estaciones de Carga, se desarrolla el programa para planificar la localización de las estaciones de carga con la ayuda de un método de optimización basado en los algoritmos genéticos. Finalmente, se concluye con el Capítulo 7 Conclusiones en el que se analizan las conclusiones obtenidas a partir de este trabajo.





# Capítulo 2

---

## *Conceptos básicos*

### **2.1.- Introducción**

En el capítulo anterior se han expuesto las razones que justifican el interés en el desarrollo de nuevos vectores energéticos, especialmente en el sector transporte. Por lo que en este capítulo, se estudiará la aplicación de sistemas alternativos de energía en vehículos, las diferentes configuraciones desarrolladas y se establecerá el estado del arte del modelado, simulación y desarrollo de un modelo de ensayo de sistemas híbridos. Además, se realizará la planificación de la infraestructura de recarga de las baterías de los vehículos eléctricos mediante la simulación y desarrollo de mapas temáticos para localizar y mostrar la zona de abastecimiento de cada estación de carga.

El trabajo desarrollado en esta tesis de doctorado se centra en la dinámica del vehículo, el sistema de propulsión y la localización de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos. Dependiendo del tipo de vehículo eléctrico, el sistema de propulsión puede estar formado únicamente por la batería o ir integrado un motor térmico, el cual puede estar en serie o en paralelo.

## 2.2.- Sistemas de propulsión

La transmisión es el conjunto de mecanismos que permiten transmitir el par motor a las ruedas, aumentándolo hasta el valor necesario para el arranque y el desplazamiento a cualquier velocidad, mediante una serie de desmultiplicaciones. Asimismo, permite arrancar el vehículo desde parado, mantener el motor en marcha estando el vehículo inmóvil, y permitir su movimiento hacia atrás, por ejemplo, para aparcar.

Las tecnologías de transmisión se pueden dividir en tres grupos principales, dependiendo de la naturaleza de la fuente de energía utilizada para proporcionar la potencia. Así, nos encontraremos con la propulsión térmica, la propulsión eléctrica y la propulsión híbrida:

- ☞ Propulsión térmica: el movimiento del automóvil se produce gracias a un motor térmico que transforma la energía térmica del combustible utilizado, en energía mecánica que se transmite al eje. Como combustible se puede utilizar, bien un combustible fósil, ya sea líquido o gaseoso: gasolina, diesel, gas natural o GLP, un biocombustible: biodiésel, biogás o bioetanol u otros combustibles como el hidrógeno.
- ☞ Propulsión eléctrica: el movimiento del automóvil se produce gracias a un motor eléctrico que transforma energía eléctrica en energía mecánica mediante interacciones electromagnéticas. La energía eléctrica puede provenir de baterías, pilas de combustibles o placas solares que estén montadas en el vehículo.
- ☞ Propulsión híbrida: el movimiento del automóvil se consigue por medio de una combinación de sistemas térmicos y eléctricos.

## **2.3.- Alternativas a los sistemas de propulsión tradicionales para vehículos de carretera**

La utilización de vehículos que se propulsan con combustibles alternativos radica principalmente en dos factores: la degradación del medio ambiente producida por la contaminación, y el deseo de los gobiernos de los países no productores de reducir su dependencia del petróleo.

Un vehículo de combustible alternativo es un vehículo de motor fabricado con capacidad de operar con combustibles alternativos, que son aquellos que suministran energía al motor sin depender exclusivamente de los combustibles derivados del petróleo, como la gasolina y el diésel. Entre los vehículos de combustible alternativo se incluyen los vehículos eléctricos, vehículos híbridos, vehículos flex, vehículos de gas natural (almacenado como gas comprimido (GNC) ó licuado (GNL)), vehículos solares, vehículos a biodiésel (biodiésel, metanol, bioetanol ó biogás) y vehículos de hidrógeno.

### ***2.3.1.- Vehículos de emisión cero***

Un vehículo de cero emisiones (VCE), también popularmente conocido por su siglas en inglés como ZEV (Inglés: "Zero-emissions vehicle"), es un vehículo que no emite sustancias contaminantes a través del tubo de escape generadas por la fuente de propulsión a bordo del vehículo. Contaminantes dañinos para la salud y el ambiente incluyen partículas finas (hollín), hidrocarburos, monóxido de carbono, ozono, plomo y varios óxidos de nitrógeno.

Aunque no son considerados como emisiones contaminantes por las definiciones originales de la Junta de Recursos del Aire de California (CARB por sus siglas en inglés) ni de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el uso más reciente del término también incluye compuestos orgánicos volátiles, varios tóxicos del aire, y contaminantes globales como el dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero.

Ejemplos de vehículo de cero emisiones incluyen vehículos de propulsión humana como las bicicletas; vehículos eléctricos, los cuales no tienen tubo de escape porque no producen emisiones; vehículos de hidrógeno impulsados por pila de combustible, los cuales solamente emiten agua por el tubo de escape; y los vehículos de aire comprimido.

Si se tiene en cuenta su ciclo energético completo, la electricidad que se requiere para generar la potencia para recargar las baterías o los tanques de aire comprimido, en el caso de los vehículos eléctricos o los vehículos de aire comprimido, respectivamente; o generar el hidrógeno, en el caso de los vehículos de hidrógeno, tiene que provenir de fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica.

En todo caso, para considerar un vehículo como ‘emisión cero’, no se considerarán las emisiones asociadas a la fabricación, tanto del vehículo como de sus componentes, ni las emisiones asociadas a la reutilización, reciclado o desmantelamiento de los componentes del vehículo obligatorios al final del ciclo de vida del mismo.

Por ejemplo, la California's Air Resources Board (CARB), define a los vehículo de emisión cero como aquellos que no emiten contaminantes por su tubo de escape, no emiten contaminantes por evaporación, no cuentan con sistemas de control de emisiones que se deterioran con el tiempo y no conllevan emisiones provenientes del refinado de gasolina.

#### **2.3.1.1.- Vehículo eléctrico**

Los vehículos eléctricos puros obtienen su capacidad de movimiento por la energía eléctrica liberada por unas baterías. El sistema de generación y acumulación de la energía eléctrica constituye el sistema básico para mover un vehículo eléctrico. Generalmente, para ello, se utilizan los acumuladores electroquímicos, formados por dos sustancias conductoras bañadas en un líquido también conductor. El intercambio de cargas positivas y negativas entre ambos componentes mantiene una corriente eléctrica que puede ser utilizada para el funcionamiento del motor del vehículo eléctrico.

Las baterías han tenido altos costes de fabricación, peso, tiempo de recarga, y escasa vida útil y autonomía, lo que ha limitado la adopción masiva de vehículos eléctricos de batería. Los adelantos tecnológicos actuales en baterías han resuelto algunos de estos problemas.

En el vehículo eléctrico, el 46% de la energía liberada por las baterías sirve para mover el vehículo, lo que indica una eficiencia entre 10 – 30% superior de éste, respecto al vehículo convencional con motor de combustión.

En un vehículo eléctrico puede haber un solo motor de tracción o varios, adosados a las ruedas. Su función es transformar la energía eléctrica que llega de las baterías en movimiento. Esta energía puede ser aprovechada tal cual llega, o sea, en forma de corriente continua o bien en forma de corriente alterna gracias a un transformador.

La energía eléctrica se produce en centrales que, concretamente en nuestro país en más de un 50% queman combustibles fósiles y energía nuclear. Por este motivo, la electricidad sólo puede sumarse como forma ecológica si se produce con fuentes renovables tales como energía solar, eólica, hidráulica o biomasa. [6]

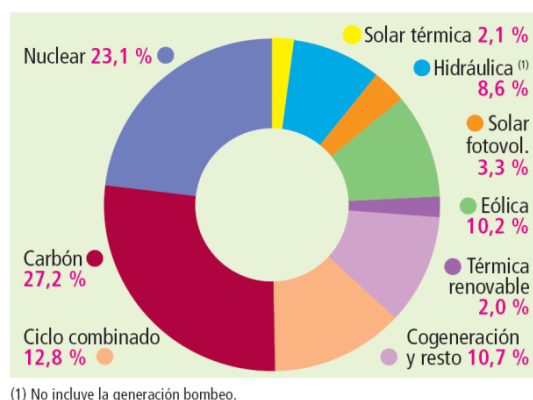


Figura 8. Balance eléctrico peninsular, septiembre 2014

### 2.3.1.2.- Vehículo con pila de combustible de hidrógeno

Un vehículo de hidrógeno o vehículo impulsado por hidrógeno es un vehículo de combustible alternativo que utiliza hidrógeno diatómico como su fuente primaria de energía para propulsarse.

Estos vehículos utilizan generalmente el hidrógeno en uno de estos dos métodos: combustión o conversión de pila de combustible. En la combustión, el hidrógeno se quema en un motor de explosión, de la misma forma que la gasolina. En la conversión de pila de combustible, el hidrógeno se oxida y los electrones que este pierde es la corriente eléctrica que circulara a través de pilas de combustible que mueven motores eléctricos, de esta manera, la pila de combustible funciona como una especie de batería. La pila de combustible no mantiene la carga, por lo que se necesita un flujo constante de hidrógeno para impulsar la transmisión del vehículo, algo parecido a la combustión interna pero con electricidad.

Actualmente, las pilas de combustibles han conseguido un buen nivel de eficiencia y compacidad que permiten 2 kW por litro y por kilo con presiones variables de 1,5 y 2,7 bar. Eso se consigue conectando en serie hasta alrededor de 200 celdas simples. Un motor de 60kW (82 CV) permite alcanzar las velocidades de los vehículos con sistema de tracción tradicional modernos.

### 2.3.1.3.- Vehículo solar

Un automóvil solar es un automóvil propulsado por un motor eléctrico alimentado mediante energía solar, la cual es obtenida por medio de paneles solares ubicados en la superficie del automóvil. Las celdas fotovoltaicas convierten la energía del sol directamente a energía eléctrica. Esta energía puede ser almacenada en baterías eléctricas o ser utilizada directamente por el motor.

Los automóviles solares no son actualmente una forma de transporte práctico. Aunque pueden operar por distancias limitadas sin el sol, las celdas son generalmente muy frágiles. Además, los equipos de desarrollo han enfocado sus esfuerzos hacia la optimización de la funcionalidad del vehículo, preocupándose poco por la comodidad del pasajero. La mayoría de automóviles solares sólo tienen espacio para una o dos personas.

El vehículo debe ser extremadamente eficiente. La utilización de materiales ligeros para la estructura, como el aluminio o algunos composites ligeros mejoran el rendimiento. Generalmente, estos vehículos están concebidos para transportar poco peso y poseen una aerodinámica muy estudiada, ya que la resistencia con el aire representa grandes pérdidas. Para aumentar más aún la eficiencia, los motores pueden actuar como generadores cuando el vehículo está frenando, acumulando energía en las baterías. Los automóviles solares usan diversas tecnologías de baterías, incluyendo plomo, níquel – cadmio, y litio.

Existen varios motivos por los que este tipo de vehículos no son viables para su comercialización: no pueden operar por un tiempo prolongado en ausencia de luz solar y tienen un precio muy elevado, pero pese a estas limitaciones, la tecnología solar podría contribuir al desarrollo de coches eléctricos de batería o incluso híbridos que utilicen en parte energía eléctrica y en parte gasolina dependiendo de las circunstancias. En estos casos, los paneles solares ocuparían mucho menor espacio y ayudarían a alargar la autonomía de la batería, respetando el diseño y la habitabilidad interior del vehículo.

### 2.3.1.4.- Vehículo de aire comprimido

Un vehículo de aire comprimido es un vehículo de transporte propulsado por un motor de aire, que utiliza aire comprimido, el cual, normalmente, es almacenado previamente en tanques de fibra de carbono. En vez de mezclar combustible con aire y quemarlo en el motor para accionar los pistones mediante la expansión de gases calientes, en los vehículos de aire comprimido el aire empuja los pistones que son estimulados por un quemador de combustible encargado de calentar el aire para conseguir mayor presión. Estos vehículos son capaces de alcanzar un 90 % de eficiencia. Este tipo de motor basa su funcionamiento en el siguiente fenómeno: el aire es comprimido aumentando su temperatura y posteriormente al introducirse aire a temperatura ambiente provoca un enfriamiento que a su vez hace que exista un aumento de presión moviendo el pistón.

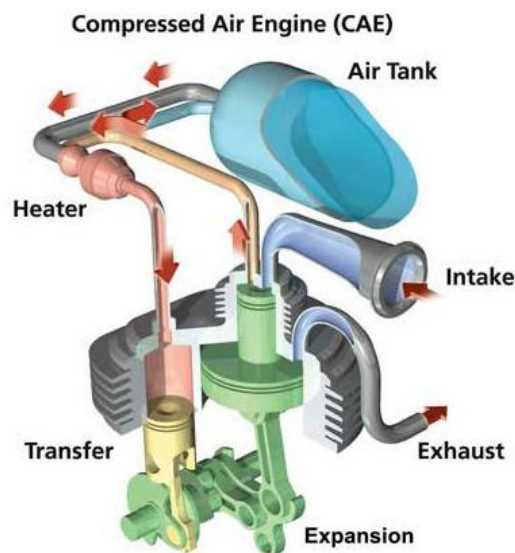


Figura 9. Funcionamiento básico de los vehículos de aire comprimido

Existen algunas buenas características de estos motores, como un gasto de mantenimiento muy bajo, ninguna emisión contaminante tras el proceso y el posible reaprovechamiento del aire frío en el sistema de aire acondicionado, ya que recordemos que tras los ciclos de trabajo, la temperatura del aire baja considerablemente hasta una temperatura de entre  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [7]

La tecnología de aire comprimido reduce el costo de producción de vehículos en un 20 %, porque no hay necesidad de construir un sistema de refrigeración, el depósito de combustible, bujías o silenciadores.

Existen importantes inconvenientes, como son: la de uso de bombonas pesadas para el almacenaje del aire comprimido que aumentan el peso total del vehículo mermando la autonomía, la pérdida de potencia e influencia del clima o humedad de manera muy negativa o que la energía necesaria para comprimir el aire es más elevada que la de los motores eléctricos, entre otras. Estas son algunas mermas que en principio, limitan mucho las posibilidades reales de funcionamiento óptimo.

Los sistemas de propulsión de aire comprimido, también pueden ser incorporados en sistemas híbridos, como por ejemplo, para recargar las baterías de los vehículos eléctricos. Este sistema se denomina propulsión híbrida eléctrica – neumática.

Al no existir combustión, no existe contaminación. El aire que toma del exterior (para después mezclar con aire comprimido en el cilindro) se filtra previamente.

La recarga del coche se hará, una vez esté el mercado desarrollado, en gasolineras adaptadas para suministrar aire comprimido. En 2 ó 3 minutos el coche estará listo.

Como alternativa, el vehículo lleva incorporado un pequeño compresor que permite conectarlo a la red eléctrica (220 V) y cargar completamente el depósito en 3 ó 4 horas.

### ***2.3.2.- Vehículos híbridos***

La hibridación de un vehículo se puede contemplar desde dos puntos de vista, ambos compartiendo como principio básico la existencia de sistemas eléctricos y térmicos que se complementarán para dar lugar al movimiento del vehículo, y que se diferenciarán porque en una será únicamente el motor eléctrico el encargado de dar tracción al vehículo, y en la otra, serán el motor eléctrico y el motor térmico los que, conjuntamente, puedan propulsar al vehículo. De este modo tenemos:

- ❖ Hibridación del sistema de propulsión: vehículos que cuentan al mismo tiempo con un sistema de tracción eléctrico y otro basado en un motor térmico, y ambos tienen la capacidad, bien independientemente, bien de forma combinada, de propulsar al vehículo.
- ❖ Hibridación del sistema de alimentación de energía: vehículos que cuentan con más de un tipo de sistema de energía, ya sea éste de producción o de



almacenamiento, siendo al menos uno de ellos eléctrico. Para simplificar el caso, la tracción será proporcionada en todo caso por un motor eléctrico.

En los vehículos que cumplen la primera condición, la hibridación se utiliza para aprovechar mejor el carburante (aumentar las prestaciones, disminuir el consumo o ambas cosas), siendo el caso, por ejemplo, de aquellos vehículos híbridos que cuentan con motor térmico y eléctrico, pero sólo utilizan éste último para el arranque y mantener el vehículo a muy baja velocidad durante distancias muy cortas. En los del segundo tipo, la combinación de un sistema eléctrico y un combustible sirve para aumentar la autonomía, y sería el caso, por ejemplo de un vehículo híbrido que cuente con motor térmico y eléctrico, pero que como sistema tractor sólo utilice éste último, siendo la función del motor térmico la de recargar las baterías cuando éstas se estén agotando. Este modelo es el utilizado con las pilas de combustible.

Los vehículos híbridos eléctricos se clasifican en tres tipos diferentes, atendiendo a su principio de funcionamiento: serie, paralelo y mixto. En el apartado 2.4.1.-Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV) se desarrollan estos tipos de vehículos híbridos.

### ***2.3.3.- Vehículos propulsados con combustibles alternativos***

Este grupo de vehículos engloban la utilización en motores de combustión interna (MCI) de los siguientes combustibles [8]:

#### **2.3.3.1.- Biocombustibles**

Los biocombustibles son aquellos combustibles producidos a partir de la biomasa y que son considerados, por tanto, una energía renovable. Los biocombustibles se pueden presentar tanto en forma sólida (residuos vegetales, fracción biodegradable de los residuos urbanos o industriales), como líquida (bioalcoholes, biodiésel) y gaseosa (biogás, hidrógeno).

Dentro de los biocombustibles, los biocarburantes abarcan al subgrupo caracterizado por la posibilidad de su aplicación a los actuales motores de combustión interna (motores diesel y otto). Son, en general, de naturaleza líquida. Los biocarburantes, en uso, proceden de materias primas vegetales, a través de reacciones físico-químicas.

Los biocarburantes principales son el biodiésel y el bioetanol. El biodiésel es una alternativa al gasóleo, mientras que el bioetanol es un aditivo o sustituto de la gasolina. Los biocarburantes pueden usarse en todo tipo de vehículos, bien sean coches, furgonetas, autobuses, camiones o vehículos agrícolas.

#### **2.3.3.1.1.- Biodiésel**

Biodiésel es el nombre común por el que se conoce a los ésteres metílicos. Se obtiene a partir de aceites vegetales vírgenes, pero también de aceites vegetales usados y de grasas animales mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiésel o gasóleo obtenido del petróleo.

El biodiésel puede utilizarse como combustible único o mezclarse con gasóleo procedente del refinado del petróleo en diferentes cantidades, siendo la mezcla más habitual de 5 % de biodiésel y 95 % de gasóleo, que supone una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> que oscila del 2 % al 2,5 %.

Los motores diésel convencionales pueden funcionar perfectamente con mezclas al 5 % sin necesidad de modificaciones en el motor. La mayoría de los motores diésel podrían funcionar con mezclas de hasta el 30 %, pero sin garantías por parte de los fabricantes. A partir del 30 % se presentan problemas por degradación de las juntas y la obturación de los inyectores. El biodiésel está regulado por la norma europea para el gasóleo EN 590, que permite hasta un 5 % de biodiésel, el cual además debe cumplir la norma de calidad europea EN 14214.

#### **2.3.3.1.2.- Bioetanol**

El bioetanol se produce por la fermentación del azúcar, del almidón o de la celulosa contenida en la materia orgánica de las plantas. En este proceso se obtiene el alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5 % de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como combustible.

El bioetanol mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina pero con una importante reducción de las emisiones contaminantes en los motores tradicionales de combustión. Se suele emplear mezclado con gasolina en una proporción de 5 % de bioetanol y 95 % de

gasolina, según la norma de calidad europea EN 228, sin necesidad de modificación alguna del motor. Algunos fabricantes establecen el máximo de bioetanol en el 5 %, mientras otros garantizan el buen funcionamiento del motor hasta el 10 %. Dos mezclas comunes son E10 y E85, que contienen el etanol al 10 % y al 85 %, respectivamente. Si se emplea al 100 % en motores de encendido provocado, se deben realizar ciertas modificaciones en los motores, además de que sus filtros deben ser cambiados con más frecuencia, ya que el bioetanol favorece la liberación de los depósitos de partículas del tanque y de los conductos del combustible.

El uso de la mezcla con bioetanol al 5 %, supone un 3,4 % del contenido energético de la mezcla porque el bioetanol tiene un poder calorífico equivalente a dos tercios del de la gasolina y una reducción en las emisiones que va del 2,5 % al 3 %, calculado sobre la base de su ciclo de vida útil. Si se utiliza el bioetanol puro supone una reducción, también sobre su ciclo de vida útil, del 50 % al 70 %, dependiendo de las materias primas empleadas.

#### **2.3.3.1.3.- Biometano (Biogás)**

Se produce a partir de un proceso metabólico de descomposición de materia orgánica mediante la acción de bacterias metanogénicas en ausencia de oxígeno, es decir, en ambiente anaeróbico. A nivel industrial, este gas se genera en digestores de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) y vertederos de residuos sólidos urbanos.

El biogás es una mezcla de varios gases de composición variable, aunque principalmente está compuesto por metano (50 % – 80 %) y  $\text{CO}_2$  (20 % – 50 %) y otros gases como hidrógeno, CO y ácido sulfhídrico, en proporciones mucho menores. Si se eliminan el  $\text{CO}_2$  y el sulfhídrico aumentando la concentración de metano, se puede usar en automoción como sustituto del gas natural.

Las emisiones que produce son muy similares a las del gas natural, pero si tenemos en cuenta el ciclo de vida completo son inferiores, ya que es un combustible renovable, que además hace que el  $\text{CH}_4$  (un potente gas de efecto invernadero) de los vertederos y plantas depuradoras de aguas residuales no escape a la atmósfera.

### 2.3.3.2.- Combustibles sintéticos

La nueva generación de combustibles obtenidos mediante procesos termoquímicos del gas natural, carbón y biomasa son los combustibles sintéticos. Atendiendo a su materia prima de origen se han desarrollado tres tipos:

- Gas a líquido (GtL)
- Carbón a líquido (CtL)
- Biomasa a líquido (BtL)

Los procesos de obtención principales de estos combustibles son los siguientes:

- Licuefacción directa del carbón.
- Producción de gas de síntesis ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) seguida de síntesis Fischer-Tropsch.
- Producción de gas de síntesis seguida de síntesis de metanol y a continuación transformación del metanol en gasolina y/o gasóleo.

Los combustibles sintéticos obtenidos de la biomasa suelen llamarse también biocombustibles, si bien, este término se presta a confusión porque incluye tanto al BtL como al bioetanol y el biodiésel, los cuales son obtenidos mediante fermentación, un proceso sustancialmente diferente de la transformación termoquímica utilizada para el BtL.

Las emisiones del GtL son similares a las de la gasolina, mientras que las que presenta el BtL son inferiores.

Estos carburantes cuentan con cuatro ventajas respecto al gas licuado de petróleo (LPG) y el gas natural comprimido (CNG):

- Despiden menos azufre a la atmósfera.
- Generan menos gases y, por tanto, ayudan a limitar el efecto invernadero.
- Su uso no requiere ninguna modificación en los motores actuales.

- Su distribución puede realizarse a través de las estaciones de servicio existentes.

### 2.3.3.3.- Biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles de segunda generación pueden producirse a partir de fuentes no alimentarias como residuos agrícolas (paja) y desechos de maderas, reduciendo así las grandes extensiones de cultivo de la materia prima exigidas por los biocombustibles de primera generación.

Los biocombustibles de segunda generación son los siguientes combustibles: BtL, principalmente diésel sintético Fischer-Tropsch, bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica y biogás.

Entre los biocombustibles de segunda generación que se obtienen a partir de biomasa utilizando la tecnología del BtL, se encuentran en desarrollo:

- Bio-hidrógeno
- Bio-dimetil-eter (bio-DME)
- Biometanol
- Diesel mejorado de alta temperatura (HTU)
- Diésel sintético Fischer-Tropsch
- Mezcla de alcoholes: por ejemplo, mezcla de etanol, propanol y butanol con pequeñas proporciones de pentanol, hexanol, heptanol y octanol.

Estos biocombustibles proporcionan una mayor seguridad de abastecimiento gracias al uso de nuevas materias primas como materiales de desechos y celulósicas, una menor emisión de gases de efecto invernadero y un impacto medioambiental inferior. Estos combustibles dejarán una huella de carbono mucho menor que la de otros biocombustibles.

### 2.3.3.4.- Gas natural

El gas natural es una mezcla combustible rica en gases, su principal componente es el metano ( $\text{CH}_4$ ) entre 83 y 98 % según la procedencia y etano, propano y butano,

principalmente. Se encuentra en estado natural, ya sea solo o en presencia del petróleo, es incoloro e inodoro y es más liviano que el aire, característica que contribuye a la seguridad, pues en caso de una fuga sube rápidamente a la atmósfera dispersándose. Por encontrarse en estado gaseoso, se mezcla fácilmente con el aire permitiendo una buena combustión, es un combustible ecológico por su bajo contenido de carbono y la ausencia de azufre.

Los vehículos a gas natural (VGN), almacenado en forma de gas natural comprimido o licuado, utilizan motores de combustión interna adaptados a la utilización del gas natural con diversas configuraciones, pero todos ellos, pueden ser englobados dentro de una de las siguientes categorías, en función de si utilizan un solo combustible o varios:

- ✓ Dedicados, mono-combustible o monovalente (generalmente de encendido provocado): Sólo utilizan gas natural, por lo que cuenta con la ventaja de estar optimizado para operar con este combustible, pueden trabajar con relaciones de compresión superiores a las de la gasolina o el diésel, de manera que su eficiencia es máxima, permitiendo así mismo mantener un bajo nivel de emisiones. Puede tratarse de motores originariamente de gasolina o gasoil modificados para el nuevo combustible, o motores fabricados para tal fin. La mayoría de vehículos en Europa son de este tipo.
- ✓ Bicomcombustible, bi-fuel o bivalente: Pueden funcionar tanto con gas natural como con gasolina (u otro combustible líquido de encendido provocado, como el etanol), lo que aumenta su autonomía. Los bicomcombustibles normalmente dependen de la gasolina para el encendido cuando el motor es arrancado, por lo que una pequeña cantidad de este combustible es requerida siempre para su funcionamiento óptimo. Se usa sobre todo en vehículos de bajas potencias (turismos y furgonetas). Sus emisiones son superiores a las de los mono-combustibles.
- ✓ Dual-fuel: Utilizan una mezcla de gas natural y diésel o gasolina, cuyas proporciones van cambiando en función de la carga. Se benefician de la mayor eficiencia de los motores diésel a cargas parciales. A bajas cargas, trabajan mayoritariamente ó totalmente con gasóleo, mientras a altas cargas pueden llegar a trabajar hasta con el 95 % de gas natural. Generalmente, los motores dual-fuel son el resultado de la conversión de un motor diésel

tradicional, con la ventaja de no ser dependientes totalmente del gas natural, lo que le permite operar sólo con gasoil si el vehículo se encuentra lejos de un punto de abastecimiento de gas. Las motivaciones para la conversión de un motor van desde los beneficios medioambientales (reducción de  $\text{NO}_x$  y de partículas), hasta las ventajas económicas de utilizar un combustible como el gas natural que es más barato que el gasoil.

- ✓ Tri-fuel: Estos motores combinan un vehículo flexi-fuel con uno de gas natural. Un motor flexi-fuel es aquel que puede operar con gasolina o etanol, bien de manera combinada o de manera exclusiva. Así, un motor tri-fuel puede funcionar con gasolina, etanol o gas natural.
- ✓ Inyección Directa de Alta Presión (HPDI): La tecnología HPDI incluye la inyección tanto de gasoil como de gas directamente en la cámara de combustión a alta presión. De la misma manera que un motor dual, un HPDI depende del gasoil para la iniciación de la combustión. Este sistema difiere del uno dual en la manera en la que ambos combustibles son mezclados. Presenta rendimientos similares a las de un motor diésel convencional.

#### 2.3.3.4.1.- Gas Natural Comprimido (GNC)

El gas natural vehicular es el mismo gas que se utiliza en las casas, en las termoeléctricas, en la industria en general. Lo que lo diferencia de los otros usos, son las presiones, que en el caso del uso vehicular se comprime entre 200 y 250 bar, según la normativa de cada país, con el objetivo de almacenar la máxima cantidad de volumen en los cilindros dispuestos para tal fin, y de esta, forma brindar la mayor autonomía posible al vehículo. Este gas natural es principalmente metano, que al tener un alto índice de hidrógeno por carbono produce menos  $\text{CO}_2$  por unidad de energía entregada, en comparación con otros hidrocarburos más pesados (con más átomos de carbono y un menor ratio H/C).

Se puede utilizar en la mayoría de los tipos de vehículos, pero como requiere habitualmente de un repostaje frecuente, su utilización se suele limitar a vehículos pertenecientes a flotas cautivas con retorno a centros bases o con acceso fácil a estaciones de repostaje.

#### 2.3.3.4.2. - Gas Natural Licuado (GNL)

El GNL es un líquido formado por metano al 85 – 99,9 %, transparente, inodoro, no tóxico, no corrosivo y no cancerígeno. Ocupa un volumen 600 veces inferior al volumen del gas natural en su forma gaseosa. Se obtiene a través de un proceso de licuefacción del gas natural gaseoso.

En primer lugar, se somete al gas a un proceso de purificación en el que es refrigerado en distintas etapas bajo presión, de forma que se elimina el dióxido de carbono, el agua y otros componentes que podrían solidificar durante el proceso de licuefacción. Después, se lleva a cabo dicho proceso de criogenización y/o despresurización en el que se somete al gas a temperaturas de  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  y presiones que van desde 3,5 bar a 10,5 bar. Para poderlo almacenar se requieren depósitos criogénicos especiales con fuertes aislamientos térmicos que consigan mantener esta temperatura. Desde el punto de vista del motor, no hay diferencia entre utilizar GNC ó GNL. Puede utilizarse en cualquier clase de vehículos, aunque su uso principal es en vehículos pesados.

El GNL tiene una densidad energética menor que el diésel o que la gasolina. Se necesitan 1,7 litros (en promedio) de GNL para obtener la misma energía que se obtendría de 1 litro de diésel, y 1,55 litros de GNL para 1 litro de gasolina.

#### 2.3.3.5.- Gas licuado del petróleo

El gas licuado del petróleo (GLP) es una mezcla de propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y de butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), de distinta proporción en función del país y del tipo de vehículo. Se extrae a partir de procesos de refinado, y de los yacimientos de gas natural húmedo. En condiciones normales de presión, está en estado gaseoso, pero se licua al someterlo a una presión de unos 10 bar.

Los vehículos a GLP son muy similares a sus equivalentes de gasolina, radicando las diferencias fundamentales en los sistemas de almacenamiento (en estado líquido) y alimentación de combustible al motor (combustión en el motor en estado gaseoso).

Existen dos tipos de vehículos a GLP: los bi-combustibles y los mono-combustibles. Los bi-combustibles presentan la ventaja de poder cambiar de GLP a gasolina con una simple acción del conductor, salvando así el inconveniente que supone la



baja autonomía. Sin embargo, los vehículos mono-combustible presentan mejores rendimientos y menores emisiones contaminantes.

La capacidad de los depósitos instalados en los vehículos es de 40 – 70 litros para los turismos, y para furgonetas se llegan a superar los 80 litros. En el caso de los autobuses, los depósitos tienen mucha más capacidad y van alojados en el techo.

#### **2.3.3.6.- Hidrógeno como combustible para motor de combustión interna**

Un vehículo de hidrógeno es un vehículo de combustible alternativo que utiliza hidrógeno diatómico como su fuente primaria de energía para propulsarse.

Estos vehículos logran la fuerza motriz gracias a la ignición del hidrógeno dentro de la cámara de combustión. El motor de combustión interna de hidrógeno se parece mucho a los motores de gasolina, exceptuando que el combustible es gaseoso en lugar de líquido.

Un automóvil de hidrógeno no requiere el tratamiento de los gases de escape, cuando opera correctamente. La alta velocidad de combustión del hidrógeno ofrece la oportunidad de aumentar el rendimiento de potencia sin incrementar el tamaño del motor. Usando la inyección directa del hidrógeno, la densidad de potencia es aproximadamente un 117 % superior con respecto a un motor de gasolina equivalente, y los motores de combustión interna de hidrógeno pueden arrancar fácilmente aún con muy bajas temperaturas de ambiente. Sin embargo, a diferencia de los combustibles líquidos, el hidrógeno tiene una baja densidad de energía por unidad de volumen, lo que significa que el vehículo estará un poco limitado en su autonomía en comparación con los actuales.

#### **2.3.4.- Comparativa entre tecnologías de tracción alternativas**

A partir del análisis de las prestaciones de los vehículos que cuentan con estas tecnologías, es posible extraer algunas conclusiones. [9]

En primer lugar se ha realizado una comparación de la autonomía media alcanzada por los vehículos que montan las diferentes tecnologías, ver Tabla 7 y Figura 10, de la que es posible extraer las siguientes conclusiones:

- Los vehículos con sistemas propulsores alimentados con biocombustibles son los que mayor autonomía proporcionan, debido, sobre todo, a su mayor

madurez tecnológica, asociada a su similitud con los sistemas propulsores tradicionales.

- Los sistemas que utilizan hidrógeno, ya sea en pilas de combustible o en motores de combustión interna, empiezan a lograr valores competitivos, en especial cuando esta tecnología se emplea en autobuses, pero aún se encuentra por debajo de los niveles de los biocombustibles o el GLP.

	Eléctrico	PC	Híbrido	Biodiésel	Bioetanol	Biometano	GN	GLP	H <sub>2</sub> -MCI
<b>Turismos</b>	86,67	422,58	636,6	960	888,86	1000	337,5	546,67	255
<b>Autobuses</b>	100	274,72	300		450		327,5	600	325
<b>Vehículos industriales</b>	75						450		

Tabla 7: Resumen de la autonomía media obtenida con las diferentes tecnologías estudiadas [km]

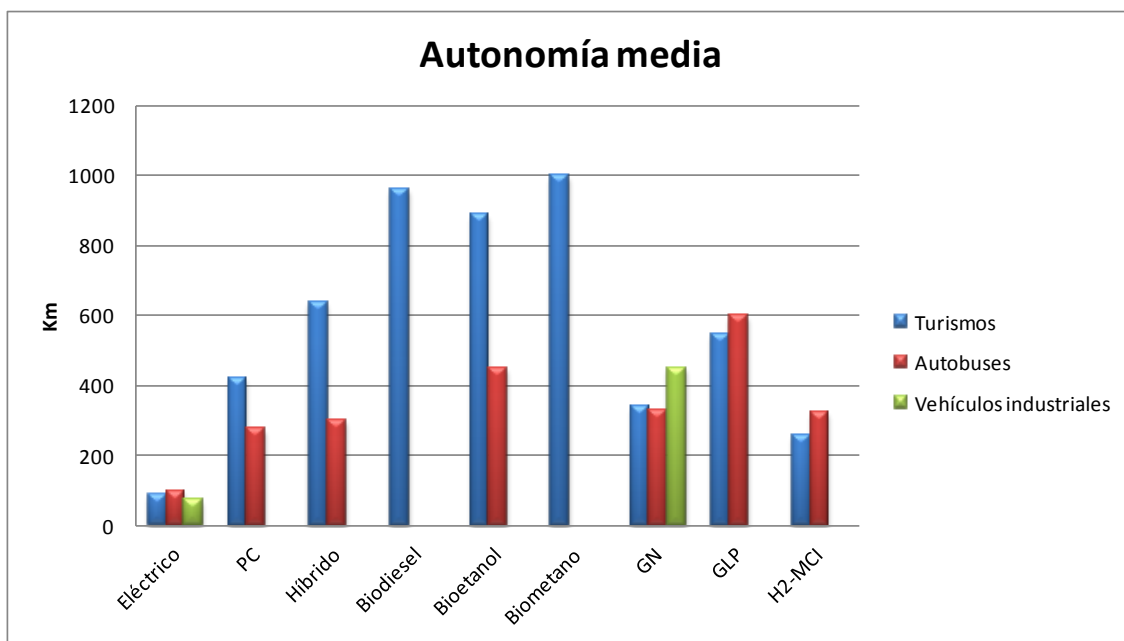


Figura 10. Comparativa de la autonomía media proporcionada por las diferentes tecnologías (2009)

Realizando para las mismas tecnologías y mismos casos la comparación de la autonomía específica, es decir, los kilómetros que pueden recorrer los vehículos, por cada kilogramo de combustible que almacenen a bordo, ver Tabla 8 y Figura 11 siguientes, se obtienen las siguientes conclusiones:

- ❖ Los datos de autonomía específica ratifican las mayores prestaciones de los biocombustibles y que los vehículos con tecnología de pila de combustible empiezan a ser competitivos.
- ❖ Los vehículos eléctricos, debido a su baja autonomía, tanto media como específica, hace que su utilización se reduzca a aplicaciones donde las distancias a recorrer no sean muy elevadas. Una aplicación apropiada sería para flotas cautivas, con un radio de actividad acotado.

	Eléctrico	PC	Híbrido	Biodiésel	Bioetanol	Biometano	GN	GLP	H <sub>2</sub> -MCI
<b>Turismos</b>	0,085	0,273	0,435	0,647	0,565	0,833	0,248	0,397	0,153
<b>Autobuses</b>	0,035	0,018			0,037	0,0128	0,02		0,02
<b>Vehículos industriales</b>	0,096						0,22		

Tabla 8: Autonomías específicas obtenidas con las diferentes tecnologías estudiadas [km/kg]

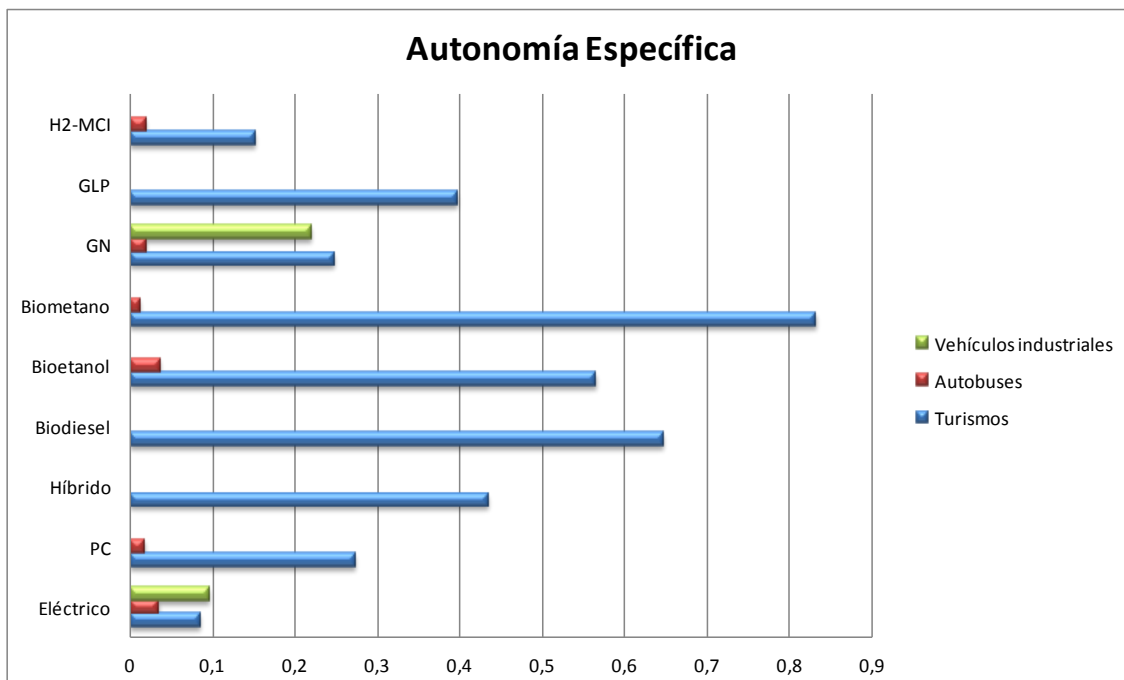


Figura 11. Comparativa de la autonomía específica proporcionada por las diferentes tecnologías (2009)

## 2.4.- Clasificación de los coches eléctricos

Durante más de cien años, la fuente de energía utilizada en los coches ha sido el motor de combustión interna.

Los diseños actuales del vehículo eléctrico están encaminados a reducir parcial o totalmente la participación del motor de combustión como fuente de energía en los coches.

Entre los componentes de los coches híbridos y de los coches eléctricos figuran una batería que almacena la energía, un motor eléctrico de propulsión, un generador, una transmisión mecánica y un sistema de control.

Las baterías se recargan de la red eléctrica y de la recuperación de energía de frenado, y también, potencialmente, de paneles solares fotovoltaicos en los centros de recarga.

A continuación, se exponen los tipos de vehículos eléctricos con sus principales características [10]. En la referencia [2], Chan nos compara en la tabla 1 de su artículo las características de los diferentes tipos de coches eléctricos.

### 2.4.1.- Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV)

El funcionamiento de un vehículo híbrido se basa en la combinación de dos tipos de motores, uno eléctrico y otro convencional o de combustión interna, a través de un sofisticado sistema de control híbrido y de un paquete de baterías.

En general, un vehículo híbrido funciona como uno convencional al que se le ha unido un motor eléctrico cuya misión es bien ayudar al motor de combustión cuando se precise una mayor potencia o bien impulsar él solo al vehículo, con el motor de combustión desconectado, cuando la potencia requerida sea pequeña, por ejemplo, en condiciones favorables de conducción. [11]

Estos vehículos se equipan de un motor de combustión interna, un motor eléctrico de imán permanente, batería y super-condensadores los cuales se utilizan como unidad de almacenamiento eléctrico. La batería y el super-condensador usado hacen posible la transferencia de energía de forma bidireccional entre las ruedas, baterías, o súper condensadores en la proporción deseada. También cuenta con EMC (Ordenador de gestión de la energía) instalado en el vehículo que controla todo el sistema para determinar

lo que cada unidad debe hacer. Usando una batería de condensadores en lugar de únicamente una batería se reduce significativamente la potencia y los ciclos de energía requeridos, lo que aumenta la vida de la batería. Sin embargo, la eficiencia se reduce a medida que el EMC realiza la mayor parte de la transferencia de energía entre las baterías y los súper condensadores. El EMC se comunica con los controladores del condensador y la batería, el motor de combustión interna, y los controles de conducción para decidir el par requerido de los motores de la batería y los condensadores.

La clave para llevar un buen sistema de gestión de la batería, y con ello, alargar la vida útil de la misma consiste en controlar y cargar las baterías de forma individual. Por ello, las baterías en los vehículos híbridos deben poseer un sistema inteligente para mantener y prolongar los ciclos de vida de las mismas ya que en estos vehículos tienen muchos ciclos de carga y descarga.

Las principales características son:

- En marcha constante: el ICE impulsa tanto al tren motor como al motor eléctrico, hay una variación electrónica de la multiplicación y regula un régimen óptimo para ambos motores.
- En los adelantamientos, se obtiene potencia adicional del motor eléctrico, alimentado por las baterías. En la frenada, el motor eléctrico actúa como generador, recuperando parte de la energía cinética.
- A bajas velocidades, sólo el motor eléctrico impulsa el vehículo, con cero emisiones. Al parar, el motor de combustión se apaga, no consumiendo combustible. Al arrancar, el motor eléctrico suministra un par no alcanzable a bajas revoluciones por el de gasolina.

En la Figura 12 se observa los componentes del sistema:

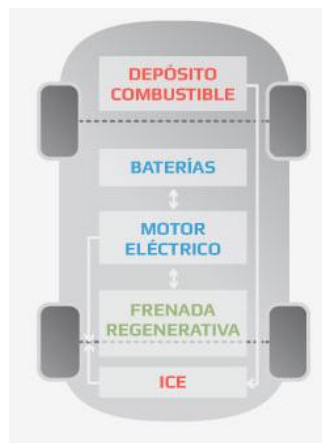


Figura 12. Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV)

Dentro de este tipo de vehículos se puede incluir los vehículos de pila de combustible (FCV). La celda de combustible produce electricidad a bordo, que, o bien se utiliza para proporcionar energía al motor de propulsión, o bien, se almacena en la batería de a bordo para un futuro uso. La filosofía de la ingeniería FCV es la integración de la ingeniería de automoción, ingeniería eléctrica e ingeniería de células de combustible. Dado que la pila de combustible es un nuevo tipo de dispositivo de energía que es bastante diferente a la gasolina y las baterías, todos los esfuerzos deben asegurar que el sistema global de la pila de combustible es eficiente, fiable, óptima, y de larga duración a un costo razonable. Otros dispositivos de alta densidad de energía, como una batería de iones de litio o ultracondensadores se pueden utilizar en conjunción con la célula de combustible para mejorar el rendimiento del arranque del vehículo. El sistema de propulsión eléctrica y el sistema de pila de combustible deben hacer, muy bien, frente para lograr la facilidad de conducción requerida con la eficiencia de máxima energía y mínima emisión. [12]

Tradicionalmente, hay dos categorías básicas de HEV, es decir, híbridos en serie e híbridos en paralelo.

Recientemente, los HEV en serie-paralelo y complejos han sido desarrollados para mejorar el rendimiento de potencia y economía de combustible. Aunque los HEV en series-paralelo poseen las ventajas de ambas configuraciones es más complicada y más costosa.

En la Figura 13 se muestra la arquitectura de las cuatro configuraciones.

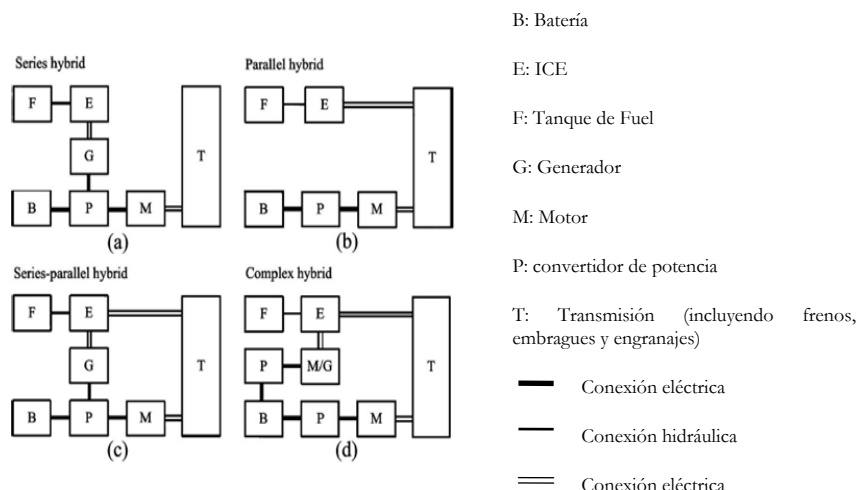


Figura 13. Arquitectura de las cuatro configuraciones de HEV

### 2.4.1.1.- Vehículos Híbridos Eléctricos: configuración Serie

En los híbridos en serie, el vehículo es impulsado enteramente por el motor eléctrico gracias a la electricidad suministrada por el motor de combustión, el cual arrastra a su vez un generador eléctrico. La batería actúa, por lo tanto, como acumulador de la electricidad (energía) sobrante y, cuando está cargada, permite la desconexión temporal del motor de combustión, de forma que el vehículo puede impulsarse momentáneamente de manera totalmente eléctrica.

En los vehículos híbridos eléctricos en serie, la salida mecánica del motor de combustión interna se convierte primero en electricidad mediante un generador. La energía eléctrica convertida cargará la batería o propulsará las ruedas a través del motor eléctrico el cual, también, captura la energía durante el frenado.

Debido a la disociación entre el motor y las ruedas motrices, tiene la clara ventaja de la flexibilidad para localizar el conjunto generador del ICE. Aunque tiene una ventaja añadida, la simplicidad de su transmisión, necesita tres dispositivos de propulsión, el ICE, el generador y el motor eléctrico. Por lo tanto, la eficiencia del vehículo híbrido eléctrico en serie es generalmente más baja. Otra desventaja es que todos estos dispositivos de propulsión deben poseer un tamaño para dar la máxima potencia sostenida, por ejemplo, si el vehículo está diseñado para subir por una pendiente larga hace que el HEV en serie sea caro. Por otra parte, si se utiliza para viajes cortos el generador del ICE puede adoptar una calificación más baja.

Los flujos energéticos característicos de la configuración en serie son los siguientes:

- a) El motor de combustión, a través del generador, puede alimentar al motor eléctrico y también cargar la batería.
- b) La batería puede alimentar al motor eléctrico pero también, gracias a la capacidad de éste de actuar como freno regenerativo, el motor eléctrico puede, a su vez, recargar la batería. El frenado regenerativo consiste en decelerar el vehículo no del modo convencional basado en el rozamiento de las pastillas contra los discos de freno, sino invirtiendo el funcionamiento del motor eléctrico y haciéndolo funcionar como un generador de electricidad.

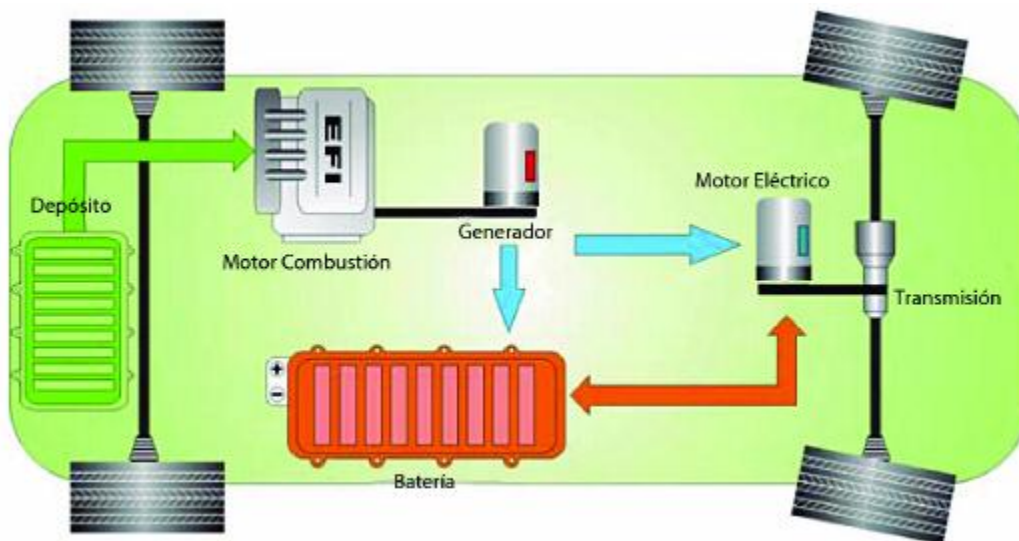


Figura 14. Vehículos Híbridos configuración serie

Hay seis diferentes modos posibles de funcionamiento en un HEV serie:

1. Modo solo batería: el motor está apagado, el vehículo es propulsado únicamente por la batería
2. Modo motor independiente: la potencia es dada por el ICE / Generador
3. Modo mixto: tanto ICE / Generador conjunto y la batería proporciona energía al motor de tracción
4. Modo de reparto de potencia: ICE / Generador puede dividirse para conducir el vehículo y cargar la batería



5. Modo de carga estacionaria
6. Modo de frenado regenerativo

Las ventajas que posee este tipo de vehículos son las siguientes:

- ✓ Bajas emisiones en la mayoría de las veces
- ✓ El motor puede funcionar de manera más eficiente, ya que no está conectado directamente a la cadena cinemática
- ✓ Flexibilidad de ubicación del conjunto motor combustión interna – motor eléctrico (motor/generador)
- ✓ Idoneidad para viajes cortos

Sin embargo, también posee las siguientes desventajas:

- ✓ El vehículo necesita un motor eléctrico de tamaño real, un generador eléctrico y un motor de combustión interna, cada uno de los cuales puede suministrar la energía requerida por el vehículo.
- ✓ El vehículo sólo es impulsado por el motor eléctrico, el cual coloca grandes limitaciones en la batería y, en particular, con grandes capacidades.
- ✓ Los tres componentes del tren de mando deben estar dimensionados para la potencia máxima de distancias largas, sostenido y conducción a alta velocidad. Esto es debido a que las baterías se agotan rápidamente, dejando al motor de combustión interna que suministre toda la potencia.

#### **2.4.1.2.- Vehículos Híbridos Eléctricos: configuración Paralelo**

En los híbridos con arquitectura paralela tanto el motor de combustión como el motor eléctrico trabajan simultáneamente para impulsar las ruedas del vehículo. El sistema de tracción no es excesivamente complejo mecánicamente en esta arquitectura, puesto que el motor eléctrico simplemente trabaja en paralelo con el motor de combustión. Esto, supone, una notable simplificación a la hora de desarrollar una hibridación por parte de cualquier fabricante.

Un HEV paralelo tiene el motor de combustión interna y el motor eléctrico acoplado al eje de accionamiento final de las ruedas a través de embragues. Esta configuración permite que el motor térmico y el motor eléctrico suministren la energía para conducir las ruedas en modo combinado, o solo ICE, o solo motor eléctrico. El motor eléctrico también se utiliza para el frenado regenerativo, y para capturar el exceso de energía del motor de combustión interna durante el estado en punto muerto.

Los flujos energéticos característicos de la configuración en paralelo son los siguientes:

- a) El motor de combustión, a través del motor eléctrico, puede también impulsar al vehículo y, también, cargar la batería funcionando éste último como un alternador.
- b) La batería puede alimentar al motor eléctrico y, gracias a la capacidad del freno regenerativo, el motor eléctrico puede también recargar la batería.

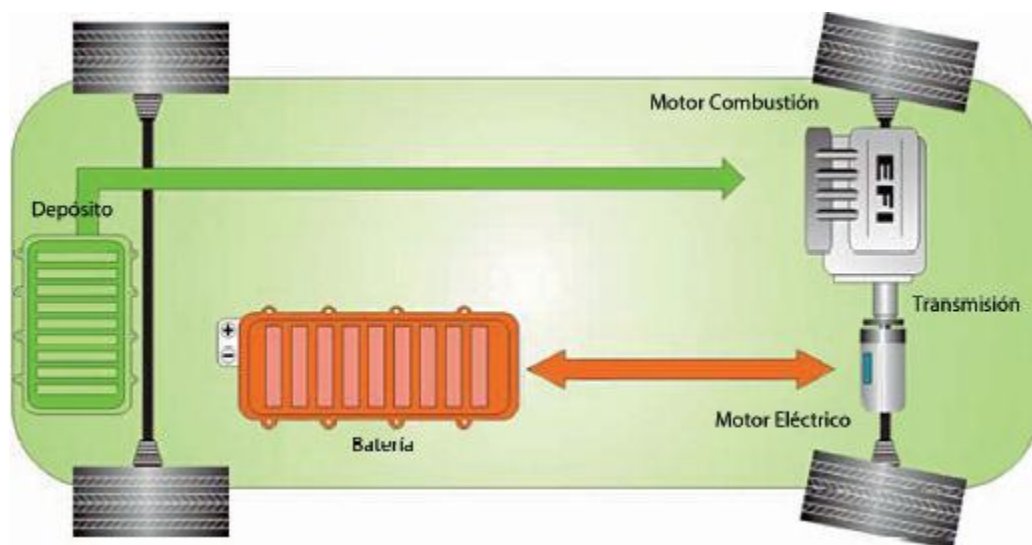


Figura 15. Vehículos Híbridos configuración paralelo

Una ventaja del híbrido paralelo frente al serie es que el híbrido paralelo sólo necesita dos dispositivos de propulsión, la ICE y el motor eléctrico. Otra ventaja es que el ICE es más pequeño y el motor eléctrico es también más pequeño y se utiliza para conseguir mejor rendimiento hasta que la batería se agote. Incluso para operaciones a largo viaje, sólo el ICE tiene que ser clasificado para la máxima potencia sostenida, mientras que el motor eléctrico puede ser de media potencia. A continuación, se muestran los diferentes modos posibles de operación del híbrido en paralelo:

1. Modo solo motor eléctrico: el motor de combustión interna está apagado, el vehículo es impulsado solamente por el motor eléctrico
2. Modo de solo motor de combustión interna: vehículo es propulsado por el motor de combustión interna, únicamente
3. Modo mixto: tanto el ICE y el motor eléctrico proporciona alimentación a la unidad del vehículo
4. Modo de reparto de potencia: potencia ICE se divide para conducir el vehículo y cargar la batería (el motor eléctrico se convierte en generador)
5. Modo de carga estacionaria
6. Modo de frenado regenerativo (incluye el modo de frenado híbrido)

A continuación, se muestran las ventajas de este tipo de vehículos:

- ✓ En esta configuración, el tamaño de la batería puede ser pequeña, ya que tanto el motor de combustión interna como y el motor eléctrico están conectados al tren de accionamiento.
- ✓ El rendimiento es muy comparable a los vehículos convencionales, debido a fuentes de alimentación duales.
- ✓ Las restricciones sobre la batería y el motor eléctrico se relajan en esta configuración.

Las desventajas que posee son las siguientes:

- ✓ El vehículo no puede obtener soporte para la aceleración completa del motor eléctrico cuando la carga de la batería es baja.
- ✓ La complejidad de control aumenta significativamente, debido a que el flujo de energía tiene que ser regulado y mezclado a partir de dos fuentes paralelas.
- ✓ La mezcla de alimentación de la ICE y el motor requiere un dispositivo mecánico complejo.

### 2.4.1.3.- Vehículos Híbridos Eléctricos: configuración mixta

Esta configuración proporciona la posibilidad de propulsar al vehículo enteramente mediante el motor de combustión, enteramente mediante el motor eléctrico o mediante una combinación de ambos motores.

El concepto de un vehículo mixto es el de un vehículo híbrido con arquitectura serie en el que se ha conectado el motor de combustión directamente a las ruedas. Así, tanto el motor de combustión como el generador y el motor eléctrico están todos ellos interconectados a través de un sistema de engranajes diferencial el cual, a su vez, está conectado a la transmisión del vehículo.

El flujo de la energía en los vehículos con arquitectura mixta sería el siguiente:

- a) El motor de combustión impulsa al vehículo a través del conjunto diferencial.
- b) El generador, que está también conectado a ese conjunto diferencial, es impulsado por el motor de combustión produciendo así electricidad. Esa electricidad es usada unas veces para recargar las baterías y otras para alimentar al motor eléctrico, según las necesidades.
- c) El motor eléctrico es alimentado por las baterías y a su vez éste es capaz de recargar las baterías en los momentos que funcione a modo de freno regenerativo.
- d) El motor eléctrico impulsa las ruedas a través del conjunto diferencial.

Las ventajas del sistema híbrido mixto con respecto a los demás sistemas son las siguientes:

- Gracias al conjunto diferencial, el motor de combustión puede ser conectado a las ruedas en aquellos momentos en los que opere en el rango óptimo de revoluciones (rango de máximo rendimiento y mínimo consumo)
- Al trabajar el motor de combustión en dichas condiciones y al disponer del refuerzo del motor eléctrico, ya no es necesario dotar a estos vehículos de complicadas, y caras, cajas de cambios. El sistema de control de ambos

motores consigue que el funcionamiento del conjunto esté siempre optimizado.

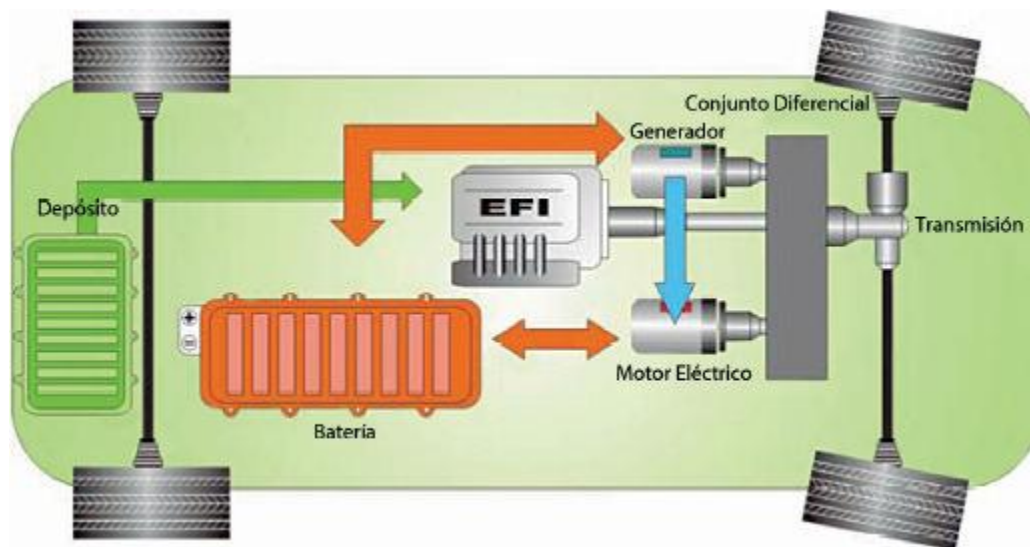


Figura 16. Vehículos Híbridos configuración mixta

Las desventajas incluyen el incremento de la complejidad mecánica en general, con el correspondiente aumento del costo tanto en la parte mecánica como en la relativa al sistema de control del conjunto.

Por otro lado, un vehículo híbrido se puede también clasificar en función de su nivel de electrificación. Según esta clasificación, existen dos grados de hibridación: total o parcial. Cuando el vehículo es capaz de funcionar tanto con cada motor de modo totalmente independiente como de hacerlo con ambos motores simultáneamente, se denomina “full hybrid” o híbrido total. La hibridación total admite todas las combinaciones posibles de funcionamiento y es, por lo tanto, la más completa y compleja de gestionar, además, de por supuesto, la más eficiente. En segundo lugar, cuando el vehículo es capaz de hacer funcionar a los dos motores a la vez pero sólo al motor de combustión de forma independiente se dice que es del tipo “mild hybrid”, híbrido parcial, híbrido suave o vehículo con asistencia eléctrica. A este grado de hibridación se le considera parcial o incompleto al carecer de la capacidad de funcionar de modo exclusivamente eléctrico.

#### **2.4.2.- Vehículos Híbridos Eléctrico Enchufables (PHEV)**

La evolución de los sistemas de baterías híbridas permite la conexión de los Vehículos Híbridos Eléctrico Enchufables (PHEV) a la red, para recorrer las primeras decenas de kilómetros de un viaje, a partir de energía obtenida de la red eléctrica.

En la Figura 17 se observa los componentes del sistema:

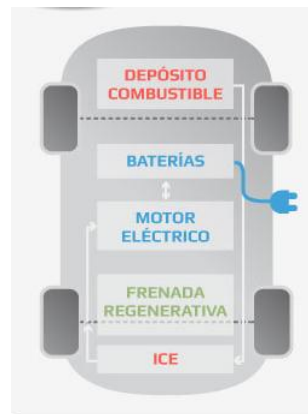


Figura 17. Vehículos Híbridos Eléctrico Enchufable (PHEV)

La definición de vehículo híbrido eléctrico enchufable según Li-Qiang Jin, Xia-Hua Zeng y Wei Wang [13] es: un vehículo híbrido que puede obtener la energía para el equipo la cual no pertenece al vehículo, sino que la obtiene externamente de la red eléctrica. Las principales peculiaridades del vehículo híbrido eléctrico enchufable son las siguientes:

- El uso de la energía desde el sistema de batería no es menos de 4 kWh
- La batería del vehículo se puede cargar desde la red eléctrica
- El vehículo se puede conducir en poco menos de 10 millas (aproximadamente 16 km) mediante la energía eléctrica producida por la batería.

Hay diferentes configuraciones para la construcción de los PHEV: paralelos, serie y múltiple-series. La configuración en serie de PHEV se muestra en la Figura 18.

En la mayoría de los casos, el vehículo PHEV es para distancias cortas. La función de la batería es la de almacenamiento de energía y la del amortiguador es las fluctuaciones de energía. La tecnología clave para diseñar este tipo de vehículos está en el compromiso entre el coste original y el del coste de los kilómetros realizados diariamente ya que el coste se disminuye al utilizar la energía eléctrica proveniente de la batería. También, se puede mejorar la eficiencia del generador de potencia si se recarga en la estación de carga por la noche.

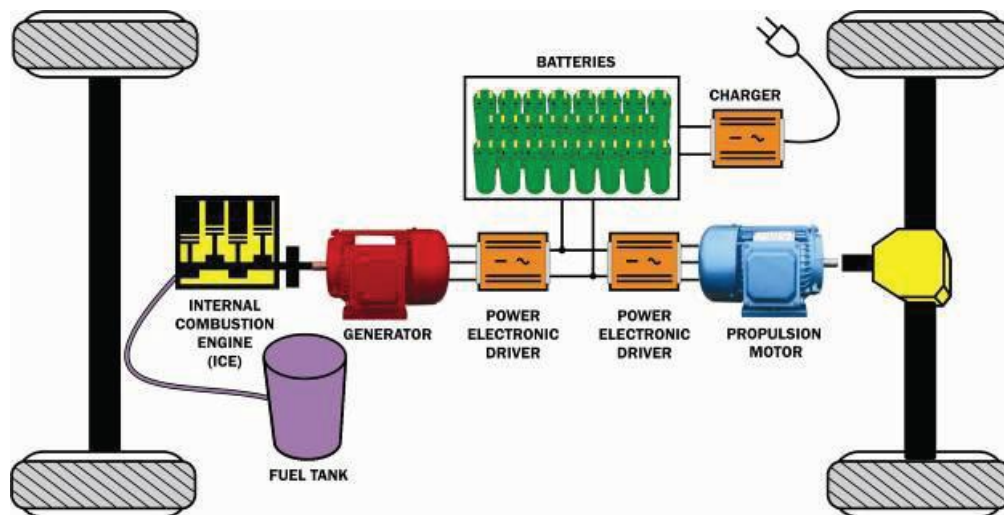


Figura 18. Vehículos Híbridos Eléctrico Enchufable (PHEV) configuración serie

La energía de la batería cambia de ser la energía principal en los PHEV a la energía asistida en la HEV. La mayor estrategia de control y el mayor objetivo de los enchufables dentro de los vehículos híbridos eléctricos es la carga de la batería desde la red eléctrica con los precios más bajos. El funcionamiento de la batería se puede dividir en dos etapas: con el agotamiento de carga y sostenimiento de carga, mientras que la estrategia de control puede clasificarse tres tipos:

1. La estrategia de control en la que el vehículo está impulsado principalmente por la energía de la batería (AER). El vehículo tiene un gran rango de conducción únicamente con la batería. El motor debe satisfacer el requisito de la potencia para conducir el vehículo de forma individual. La configuración adecuada para este tipo de estrategia de control es la configuración serie.
2. La estrategia de control combinada en la que el vehículo está impulsado principalmente por el motor de combustión interna y la energía de la batería y el electromotor es auxiliar. El vehículo recorre pocos kilómetros con la energía proveniente únicamente de la batería ya que ésta procede de la combustión y del motor de combustión interna. La configuración adecuada para este tipo de estrategia de control es la configuración paralelo.
3. La estrategia de control combinada en la que el vehículo es conducido principalmente por electricidad. El rango eléctrico puro es pequeño para este vehículo con esta estrategia de control pero el vehículo es conducido por la

energía de la batería. El motor es auxiliar en esta configuración. La configuración más adecuada es el vehículo híbrido en paralelo.

### 2.4.3.- Vehículos Totalmente Eléctricos (EV)

Las actuales capacidades de las baterías hacen que los Vehículos Totalmente Eléctricos (EV) se perciban como de limitada utilidad por su autonomía y tiempos de recarga necesarios.

En un escenario de alta penetración de EVs, con alta fosilización del mix eléctrico, se podrían ahorrar un 46 % de emisiones de CO<sub>2</sub> en 2050.

Se considera el posible uso de los EVs como almacén energético o como una importante sinergia con las renovables.

En la Figura 19 se puede observar el esquema de este vehículo.

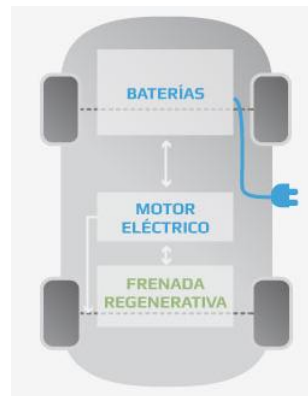


Figura 19. Vehículo totalmente eléctrico (EV)

### 2.4.4.- Comparación entre los diferentes tipos

En comparación con el vehículo de motor de combustión interna tradicional, el vehículo eléctrico tiene las siguientes ventajas [14]:

- 1) La generación de par de un motor eléctrico es muy rápida y precisa. El tiempo de respuesta del motor es de sólo unos pocos milisegundos, 10 ~ 100 veces más rápido que el del motor de combustión interna y el sistema de frenado hidráulico, lo que puede mejorar el rendimiento del ABS y TCS.



- 2) Un motor puede estar unido a cada rueda, que proporciona un control de estabilidad del vehículo con gran espacio técnico.
- 3) El motor es más simple y fiable que el motor de combustión interna, y también el control y la medición del par de salida es relativamente fácil.

Ha sido bien reconocido que los vehículos eléctricos híbridos (HEV) son mucho más eficientes y menos contaminantes que los vehículos impulsados por gasolina o diésel. En la Figura 20 se muestra la comparativa de eficiencia energética entre el vehículo eléctrico y el convencional. También se ha reconocido que los HEV tienen mayor rendimiento y la aceptabilidad del usuario es mayor frente a los vehículos eléctricos puros alimentados con baterías (EVs). Sin embargo, toda la energía utilizada en los HEV con la estrategia de funcionamiento de la batería de carga continua (CS) proviene de la quema de combustibles fósiles.

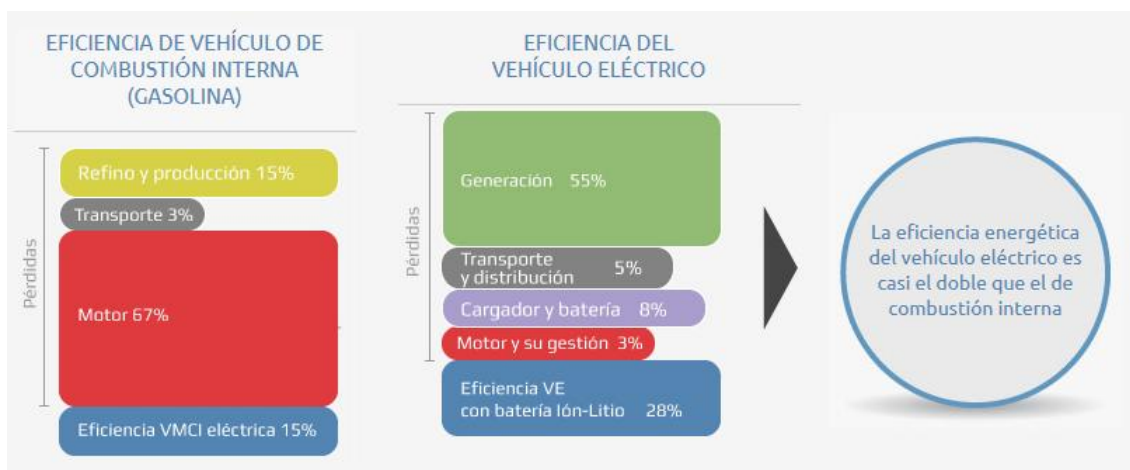


Figura 20. Comparativa de eficiencia energética entre el vehículo eléctrico y el convencional

Desde el punto de vista del medio ambiente y de la oferta de energía, los vehículos eléctricos tienen ciertas ventajas sobre los HEV: en su mayoría cero emisiones dispersas, independencia de los combustibles fósiles y bajo costo de operación. Por el contrario, las principales desventajas de los EV son la carga de la batería y el tiempo de carga de la misma.

PHEVs son un tipo de HVE, que está diseñado y controlado para hacer pleno uso de la energía de la batería para cierta distancia de EV puros, o la operación de carga-agotamiento (CD). PHEV tiene las ventajas de ambos, del EV puro y del CS HEV. Cuando la batería se encuentra en estado de alta energía después de cargar durante toda la noche, el

vehículo puede funcionar en el modo EV puro, la energía proviene de la batería, o el modo de CD, la energía proviene de la batería y únicamente una pequeña parte del motor. Cuando la energía de la batería alcanza un nivel bajo determinado, el cual depende de las características de la batería, se arranca el motor y el vehículo pasa al modo de CS, durante el cual, la energía de la batería se mantiene en torno a este nivel hasta el final del viaje. A continuación, la batería se carga a su estado completo a través de la red pública.

Las ventajas típicas de los vehículos eléctricos puros sobre los híbridos en modo CS son las siguientes:

- 1) No se desplazan grandes cantidades de combustibles fósiles ya que la energía eléctrica proviene de la red de suministro eléctrico
- 2) No hay necesidad de cargar la batería desde la red durante el viaje
- 3) No hay consumo de combustible y emisiones durante modo EV puro y bajo consumo de combustible y emisiones durante el modo de CS.

La mayoría de las diferencias de PHEV de CS HEV son la estrategia de control de tracción y la capacidad de diseño de energía de la batería.

Yimin Gao y Merhrdad Ehsani en la referencia [15] nos muestran las estrategias de control en toda la gama de vehículos eléctricos y los agotamientos de la carga en las baterías. La simulación realizada se llevó a cabo en un turismo. Los resultados obtenidos indican que una cantidad significativa de combustible puede ser desplazado por la energía eléctrica en la conducción urbana típica.

Rahman [16] realizó un estudio comparativo sobre el consumo de combustible y las emisiones de un vehículo eléctrico híbrido convencional (HEV) y la UTS plug-in HEV (PHEV). La interacción entre los componentes, tales como el sistema de almacenamiento de energía, el motor eléctrico, la unidad de control de potencia y el motor de combustión interna de la UTS PHEV son complejos con el fin de optimizar la economía de combustible y las emisiones presentadas por el vehículo. Los resultados obtenidos en función de la economía de combustible y emisiones comparando los HEV en serie y paralelo y los UTS PHEV mediante el Simulador Avanzado del Vehículo (ADVISOR) y los test HWFET y UDDS muestran una mejora significativa con la configuración UTS PHEV.

Los dos tipos de test realizados consisten en [17]:

- ✓ Urban Dynamometer Driving Schedule o UDDS: consiste en partir con el motor frío y haciendo 23 paradas durante un período de 31 minutos a una velocidad media de 20 mph (32 km/h) y con una velocidad máxima de 56 mph (90 km/h).
- ✓ Highway Fuel Economy Driving Schedule (HWFET): utiliza un motor caliente y no hace paradas, promediando 48 mph (77 km/h) con una velocidad máxima de 60 mph (97 km/h) en una distancia de 10 millas (16 km).

## 2.5.- Modelado dinámico de un vehículo

Para modelar la dinámica del vehículo se recurre a las expresiones de la física que rigen los principales fenómenos a los que están sometidos cualquier vehículo de ruedas. Estos fenómenos son: el rozamiento de las ruedas, la resistencia aerodinámica, las inercias y la resistencia a la ascensión debida al peso.

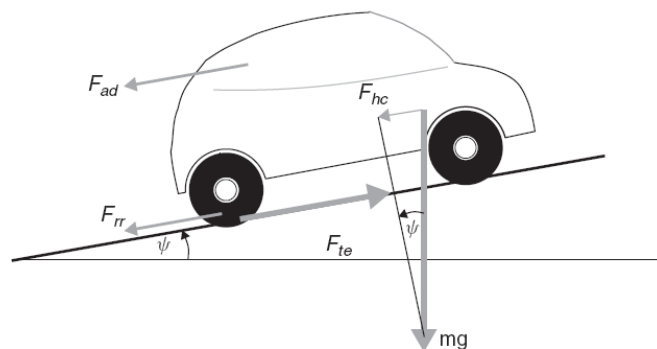


Figura 21. Fuerzas que actúan en un vehículo ascendiendo una cuesta

### 2.5.1.- Resistencia por rozamiento

La resistencia al rozamiento se debe principalmente a la fricción de las ruedas del vehículo con la carretera, además, de una parte debida a rodamientos y conexiones mecánicas. La resistencia por rozamiento es prácticamente constante y depende sobre todo de la velocidad del vehículo. Esta resistencia es proporcional al peso del vehículo:

$$F_{rr} = \mu_{rr} mg$$

donde  $\mu_{rr}$  es el coeficiente de resistencia de rozamiento, dependiendo, principalmente, del tipo de rueda, así como de su presión.

### 2.5.2.- Resistencia aerodinámica

Esta parte de la fuerza es debido a la fricción del cuerpo del vehículo por moverse a través del aire. Esencialmente, es debido a dos componentes: la forma del vehículo y el coeficiente aerodinámico.

En el movimiento del vehículo, se generan dos zonas de presión: una que se opone al movimiento por empuje (alta presión en el frente) y otra que tira de él hacia atrás (baja presión en la parte trasera) como se muestra en la Figura 22.

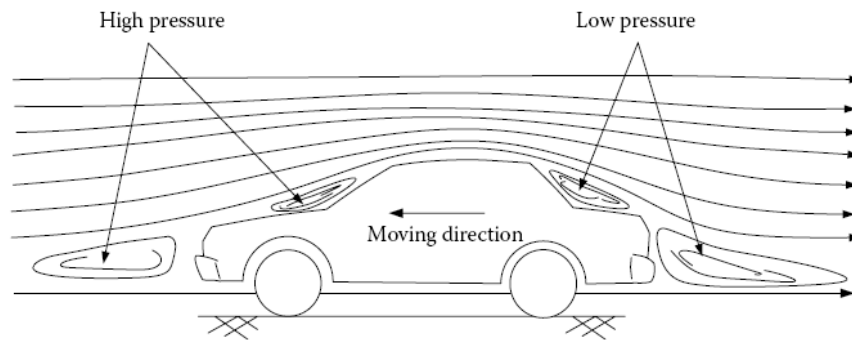


Figura 22. Zonas de presión en un vehículo

La resistencia aerodinámica es función de: el área frontal, la forma, los elementos salientes como los espejos, las entradas de aire y algunos otros factores. La fórmula para esta resistencia es la siguiente:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire, típicamente  $1,25 \text{ kg/m}^3$ ,  $A$  es el área frontal,  $v$  es la velocidad y  $C_d$  el coeficiente aerodinámico.

### 2.5.3.- Fuerza de ascensión

La fuerza de ascensión es la fuerza necesaria para ascender un desnivel siendo proporcional a la masa del vehículo. Se calcula a través de siguiente fórmula:

$$F_{hc} = mg \sin \psi$$

donde,  $\psi$  es el ángulo de la inclinación del terreno sobre la horizontal

### 2.5.4.- Fuerza de aceleración

Esta fuerza es la resultante de los cambios de velocidad del vehículo. Es una aceleración lineal y la fórmula es la segunda ley de Newton:

$$F_{ta} = ma$$

A pesar de todo, es necesario considerar las fuerzas necesarias para acelerar las piezas mecánicas que rotan. Esta es una aceleración rotacional debido no especialmente al momento de inercia del motor, sino a sus altas velocidades angulares.

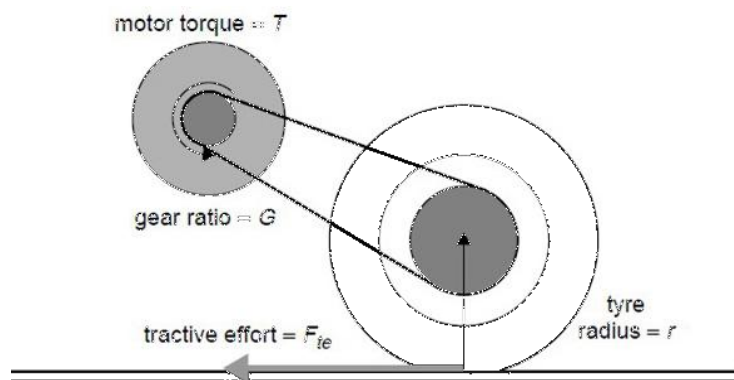


Figura 23. Esquema tracción de transmisión directa

A la vista de la Figura 23, la fórmula para el par de accionamiento en el motor resulta:

$$T = \eta_g \frac{F_{te} r}{G}$$

Y, por lo tanto,

$$F_{te} = \frac{G}{\eta_g r} T$$

donde  $G$  es el ratio de reducción,  $r$  el radio de la rueda y  $\eta_g$  es el rendimiento de la transmisión. Esta ecuación se empleará para desarrollar el rendimiento del vehículo. La velocidad angular del motor es:

$$\omega = G \frac{v}{r}$$

y similarmente, la aceleración angular:

$$\alpha = G \frac{a}{r}$$

El par necesario para esta aceleración angular es:

$$T = IG \frac{a}{r}$$

donde I es el momento de inercia del rotor del motor. Combinando estas ecuaciones obtenemos la fuerza en las ruedas necesaria para realizar esta aceleración angular ( $F_{wa}$ ):

$$F_{wa} = I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a$$

donde hemos añadido  $\eta_g$  que es el rendimiento del sistema mecánico de transmisión.

A menudo el valor del momento de inercia del motor no es conocido. En estos casos, una aproximación razonable es incrementar la masa en un 5 % e ignorar el valor la fuerza de aceleración angular de las ruedas ( $F_{wa}=0$ ). [19]

$$F_{ta} = 1,05ma$$

### ***2.5.5.- Fuerza total de tracción***

La fuerza total de tracción es la suma de todas estas fuerzas:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{ta} + F_{wa}$$

$F_{ta}$  y  $F_{wa}$  serán negativas si el vehículo decelera y  $F_{hc}$  será negativa si se desciende una cuesta. Por lo tanto, la fuerza total puede llegar a ser negativa o de sentido opuesto, si alguna o varias de estas fuerzas prevalece en sentido contrario a todas las demás.

La potencia necesaria para mover el vehículo es igual a la fuerza de tracción por la velocidad en cada instante.

$$P_{te} = F_{te}v$$

## 2.6.- Modelado de la batería

La batería es el elemento más importante de un vehículo eléctrico, debido a que, actualmente, la implementación de estos vehículos viene determinada por las prestaciones que se obtengan de ésta.

El rendimiento de la batería depende de unos parámetros fácilmente medibles, los cuales son la temperatura y el voltaje. Sin embargo, también depende de otros factores los cuales son imprecisos de cuantificar como son la edad y la manera de uso o no uso de la batería en el pasado. Otro gran impacto en el rendimiento puede llegar a ser las tolerancias de fabricación y la variación entre las diferentes celdas de la batería.

### 2.6.1.- Introducción

La estructura de una batería es la que se muestra en la Figura 24 y que se detalla a continuación.

Las láminas bipolares están formadas por un ánodo y un cátodo. Durante el funcionamiento de la batería se producen reacciones electroquímicas diferentes en cada uno de los electrodos. La estructura más compacta y con mejor contacto eléctrico se obtiene mediante las láminas bipolares.

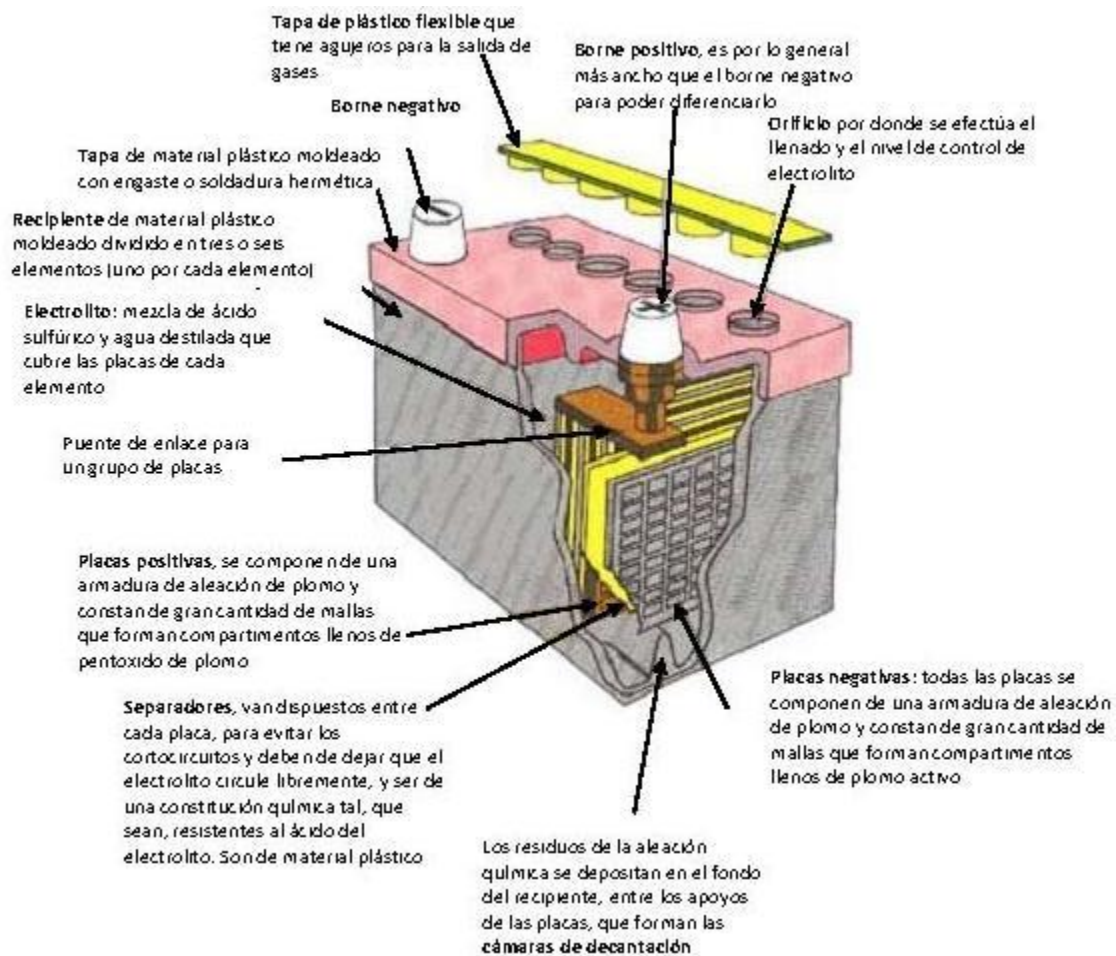


Figura 24. Estructura de la batería

El electrolito se encuentra situado entre los dos electrodos y su función es el transporte de iones de un electrodo a otro. Los tipos de electrolito son variados, desde soluciones acuosas hasta geles. La disolución acuosa tiene una aplicación reducida o inexistente en el caso de vehículos híbridos, siendo las baterías VRLA (Valve Regulated Lead Acid) o AGM (Absorbed Glass Matt) las más utilizadas. En ambos casos, el objetivo es evitar la pérdida de electrolito, que afectaría negativamente al funcionamiento de la batería. Las baterías AGM presentan una matriz de fibra muy porosa que contiene al electrolito y que evita el cortocircuito entre electrodos. La válvula puede estar fabricada de neopreno y es unidireccional. Su función es aliviar la presión en el interior de la batería cuando se forman gases durante la carga de la batería, especialmente cuando el estado de carga es elevado.

Los pasos que se siguen en el funcionamiento de la batería se muestran en la Figura 25. Se ha representado el funcionamiento durante el proceso de descarga, en el que el transporte de cationes es de ánodo a cátodo, el transporte de aniones es de cátodo a ánodo



y la circulación de electrones es de ánodo a cátodo. En el proceso de carga las reacciones se invierten, y por tanto, también el transporte de iones: los cationes van de cátodo a ánodo, los aniones de ánodo a cátodo y los electrones de cátodo a ánodo.

Durante el funcionamiento de una batería, si por ejemplo, el proceso de carga se mantiene durante el tiempo suficiente, la batería agota las especies necesarias para su funcionamiento. En ese momento es necesario proceder a la carga de la batería invirtiendo las reacciones.

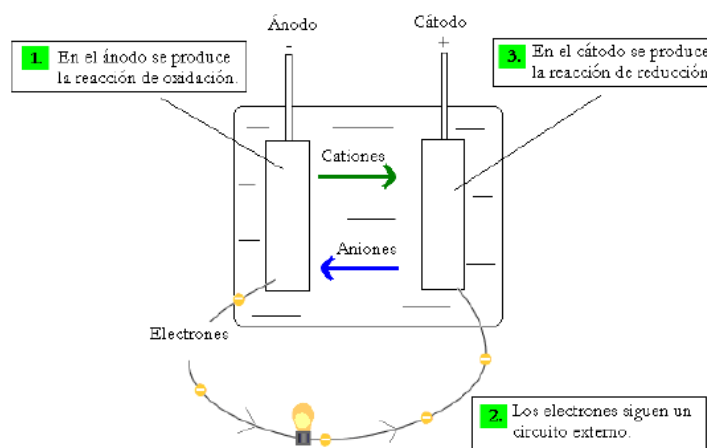


Figura 25. Funcionamiento de batería durante la descarga

Las tres características que definen una batería son:

- La cantidad de energía que puede almacenar.
- La máxima corriente que puede entregar (descarga).
- La profundidad de descarga que puede sostener.

La decisión en cuanto a qué tipo de batería se use en una aplicación de HEV depende de que las características de esa batería coincidan con las necesidades del diseño de HEV. Las características de la batería que afectan al diseñador HEV son:

- **CAPACIDAD:** La capacidad de la batería es una medida de la cantidad de energía que la batería puede almacenar. Las baterías no se limitan a servir como un recipiente en el que se vuelca la electricidad y luego se extrae. La cantidad de energía que se puede extraer de una batería completamente cargada, por ejemplo, depende de la temperatura, la velocidad de descarga, la edad de la

batería, y el tipo de batería. En consecuencia, es difícil especificar la capacidad de una batería con un solo número. Existen principalmente tres calificaciones que se utilizan para especificar la capacidad de una batería:

- Amperios – hora: El Amperio – hora (Ah) denota la corriente a la que una batería puede descargarse a una velocidad constante durante un período de tiempo especificado. Las baterías que se utilizan comúnmente en los automóviles para arranque – iluminación – ignición (SLI: starting-lighting-ignition), se especifica, según la norma, los Amperios- hora para una descarga de 20 horas. Esta norma se denota con la nomenclatura de C/20. Una batería de 60 Ah C/20 producirá 60 Ah para una descarga de 20 horas. Esto significa que la batería nueva y completamente cargada producirá 3 amperios durante 20 horas, esto no significa que la batería puede producir 6 amperios durante 10 horas (que estaría representado por una calificación C/10 60 Ah).
- Capacidad de reserva: La capacidad de reserva indica la cantidad de tiempo, en minutos, que una batería puede producir un nivel determinado de descarga. Un valor de 35 minutos a 25 amperios de la capacidad de reserva de la batería significa que la batería completamente cargada puede producir 25 amperios durante 35 minutos.
- kWh Capacidad: La capacidad métrica kWh es una medida de la energía (Voltios \* Amperios \* Tiempo) necesario para cargar completamente una batería agotada. Por lo general, una batería agotada no es una batería totalmente descargada, una batería de coche a 12 V se considera agotado cuando su tensión es de 10,5 V o inferior a éste. Del mismo modo, una batería de 6V se suele considerar agotada cuando su tensión baja de 5,25 V.

Ninguna de estas clasificaciones de capacidad puede describir completamente la capacidad de una batería. Cada una es una medida de la capacidad en condiciones específicas. El rendimiento de una batería en una situación real puede variar sustancialmente debido a diferentes

tasas de descarga/recarga, la edad de la batería, la historia del ciclo, y / o temperatura.

- **VOLTAJE:** Por definición, una batería se compone de dos o más celdas con cables. Una célula de tipo plomo – ácido produce aproximadamente 2,1 voltios. Por lo tanto, una batería de plomo – ácido de tres celdas produce 6,3 V ( $6,3 = 2,1 * 3$ ). Para una batería con tapones de llenado, el número de células puede determinarse contando el número de vasos de relleno. La tensión nominal es la de una batería completamente cargada, y su tensión disminuirá a medida que la batería se descargue.
- **PROFUNDIDAD DE CICLO:** Descargar completamente la batería a menudo destruye la batería o, por lo menos, acorta drásticamente su vida. En las baterías de plomo – ácido, la profundidad de ciclo pueden ser descargas de manera rutinaria hasta el 15 – 20 % de su capacidad, esto representa una profundidad de descarga (DoD) del 85 al 80 %. Estas baterías de ciclo profundo están construidas con placas gruesas en los cátodos y ánodos para resistir la deformación, mientras que en una batería de plomo convencional las placas son finas como el papel. Independientemente de si la batería es de ciclo profundo o no, las descargas profundas reducen la vida de una batería. Una batería de ciclo profundo puede durar 300 ciclos de descarga y recarga de 80 % DoD (profundidad de descarga) y puede durar 600 ciclos a 50 % DoD.
- **PESO / VOLUMEN:** El diseñador debe tener en cuenta el peso y el volumen de la batería durante el proceso de diseño de los vehículos. Diferentes tipos de baterías proporcionarán al diseñador diferentes capacidades de energía y potencia por un peso o volumen dado. Las ratios clave a considerar son la energía específica / energía, y las densidades de potencia/energía. Estos valores revelan la cantidad de energía o la energía de la batería que proporcionará con un determinado peso o volumen.
- **La DENSIDAD DE ENERGÍA/ENERGÍA ESPECÍFICA:** La densidad de energía es una medida de cuánta energía se puede extraer de una batería por unidad de peso de la misma o el volumen. Por defecto, las baterías de ciclo profundo proporcionan el potencial para densidades de energía más elevado que

las variedades de ciclo no profundo, ya que se puede extraer más energía de la batería (por ejemplo, DoD más aceptable).

- **DENSIDAD DE POTENCIA / ENERGÍA ESPECÍFICA:** La densidad de potencia es una medida de cuánta potencia se puede extraer de una batería por unidad de peso de la batería o el volumen. En una analogía al sistema de combustible de un coche, la densidad de energía es análoga a la del tamaño del depósito de combustible y la densidad de potencia es análoga a la de octano del combustible.
- **TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO:** Las baterías funcionan mejor dentro de un rango de temperaturas limitado. La mayoría de las baterías de plomo – ácido de células húmedas desempeñan mejor su funcionamiento en torno a 85 – 95 F (29 – 35 °C). A temperaturas superiores a 125 F (52 °C), las baterías de plomo – ácido se dañan y, en consecuencia, su vida se acorta. El rendimiento de las baterías de plomo-ácido sufre a temperaturas inferiores a 72 F (22 °C), a más frío, mayor es la degradación en el rendimiento. A medida que la temperatura desciende por debajo de cero grados centígrados (32 F), las baterías de plomo – ácido actuarán lento, la batería no ha perdido su energía, su química restringe la entrega de la energía. Las baterías también se pueden congelar. Una batería de plomo – ácido completamente cargada puede sobrevivir de 40 a 50 grados bajo cero, pero una batería con un bajo estado de carga (SOC) puede congelarse a temperaturas de -1 °C. Cuando el agua en una batería se congela se expande y puede causar daños irreparables en las células.
- **SULFATACIÓN:** Un bajo estado de carga (SOC) de una batería de ácido de plomo puede provocar sulfatación que puede dañar seriamente la batería. En un estado SOC bajo, los cristales de plomo que se forman durante la descarga puede llegar a ser tan grandes que se resistan a disolverse durante el proceso de recarga. Esto evita que la batería se recargue. La sulfatación se puede producir cuando se deja la batería en un SOC baja durante un largo período de tiempo.
- **AUTO-DESCARGA:** Una batería que no se usa, con el tiempo se descargará. Esto es particularmente cierto para las baterías secundarias (recargables) en comparación con las baterías primarias (no recargables).

Hay muchos tipos de baterías que se utilizan actualmente, o se están desarrollando para su uso, en los HEV. En la siguiente tabla, Tabla 9, se puede observar los diferentes tipos de baterías, junto con sus características más comunes. Los tipos se enumeran en orden de popularidad descendente para su uso en los HEV, con las opciones más populares en la parte superior de la tabla. Normalmente, la densidad de energía, a veces llamada energía específica, tiene una potencia de la tasa C/3 (es decir, la descarga de 3 horas). Las condiciones típicas para la densidad de potencia específica o potencia nominal es de 20 segundos de descarga al 80 % DoD. El ciclo de vida se mide, por lo general, en el 80 % DoD.

Tipo de batería	Energía/peso (Wh/kg)	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Auto-descarga por mes (% del total)
<b>Plomo – ácido</b>	30 – 50	2	1000	8 – 16	5
<b>Ni – Cd</b>	48 – 80	1,25	500	10 – 14	30
<b>Ni – Mh</b>	60 – 120	1,25	1000	2 – 4	20
<b>Li – ión</b>	110 – 160	3,16	4000	2 – 4	25

Tabla 9: Características de diferentes tipos de baterías

Las reacciones que se producen en el ánodo y el cátodo son diferentes dependiendo del tipo de batería. En la siguiente tabla, Tabla 10, se observan dichas reacciones.

Tipo de batería	Reacciones
<b>Batería plomo – ácido</b>	$\text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{PbSO}_4 + \text{SO}_4^{2-}$ $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$
<b>Batería níquel – cadmio</b>	$\text{Cd} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$ $2\text{Ni}(\text{OH})_3 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^-$

Tipo de batería	Reacciones
<b>Batería ión litio</b>	$\text{LiCoO}_2 \rightarrow \text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + x\text{Li}^+ + xe^-$ $x\text{Li}^+ + xe^- + x\text{C}_6 \rightarrow x\text{LiC}_6$

Tabla 10: Reacciones químicas de diferentes tipos de baterías

### 2.6.2.- Circuito equivalente

En la Figura 26 se muestra el circuito equivalente de una batería, el cual tiene en cuenta la conducta dinámica de la misma. Por ejemplo, si la carga es conectada a la batería, el voltaje cambiará inmediatamente a un nuevo valor, de hecho, esto no es verdad, ya que al voltaje le cuesta un tiempo antes de estabilizarse en un nuevo valor.

El propósito de esta simulación es que sea capaz de predecir el rendimiento del vehículo eléctrico en función del rango, aceleración, velocidad, etc. ya que la velocidad del vehículo cambia lentamente y sin embargo, la conducta de la batería lo hace diferente.

Los valores de los parámetros del circuito equivalente no son constantes. El voltaje del circuito abierto es el primer parámetro que hay que estabilizar ya que éste cambia con el estado de carga de la batería.

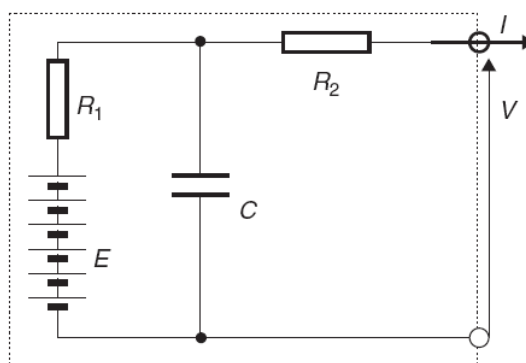


Figura 26. Circuito equivalente de la batería

En el caso de baterías de plomo – ácido, el voltaje a circuito abierto se puede parametrizar con la siguiente formula, la cual está en función de la profundidad de descarga de la batería (DoD) [18]:

$$E = n(2,15 - DoD(2,15 - 2))$$

Donde  $n$  es el número de celdas de la batería.

En el caso de baterías níquel – cadmio, la relación entre el voltaje y el estado de carga no es lineal, dando lugar una ecuación polinómica la cual se aproxima bastante bien obteniendo unos buenos resultados,

$$E = n(-8,2816DoD^7 + 23,5749DoD^6 - 30DoD^5 + 23,7053DoD^4 - 12,5877DoD^3 + 4,1315DoD^2 - 0,8658DoD + 1,37)$$

La variación del voltaje en función del estado de carga de la batería en el caso de las baterías ión-litio se muestra en la siguiente figura, Figura 27. [19]

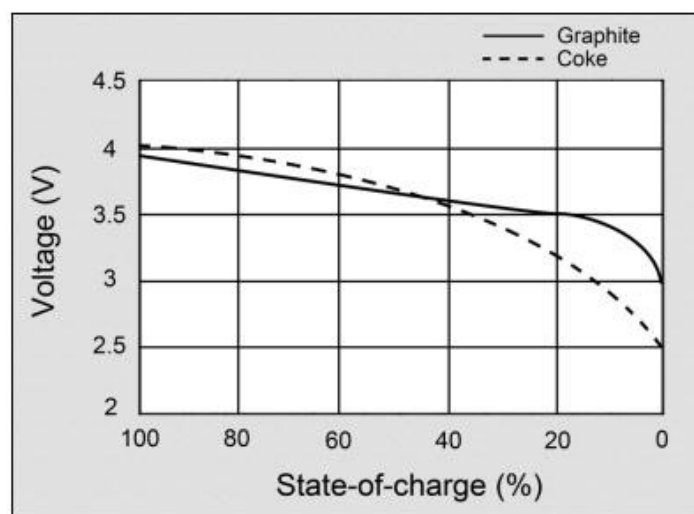


Figura 27. Voltaje vs estado de carga en las baterías de ión-litio

Además del voltaje a circuito abierto, también es necesario calcular el valor de la resistencia interna, el cual es aproximadamente constante para una batería, sin embargo, está afectado por el estado de carga y la temperatura. En el caso de las baterías de plomo – ácido, también está influenciado el mal uso de las mismas.

Una de las características más notables de una batería de plomo-ácido es el valor de la resistencia interna, el cual es extremadamente bajo. Esto quiere decir que la caída de tensión que traza la corriente es muy pequeña, probablemente menor que la de cualquiera de las baterías de los vehículos candidatos. La capacidad de una celda es aproximadamente proporcional al área de las láminas, y la resistencia interna es aproximadamente inversamente proporcional al área de las láminas. Por lo tanto, se puede aproximar que la resistencia interna es inversamente proporcional a la capacidad. Una buena aproximación de la resistencia de una batería de plomo – ácido es:

$$R = \text{numero de celdas} \frac{0,022}{C_{10}}$$

El número de celdas es el voltaje nominal de la batería dividido por 2.  $C_{10}$  es la capacidad amperios – hora en el rango de 10 horas.

En el caso de baterías Níquel – Cadmio, la resistencia interna se aproxima por la siguiente ecuación:

$$R = \text{numero de celdas} \frac{0,06}{C_3}$$

$C_3$  es la capacidad amperios – hora en el rango de 3 horas.

La capacidad de la batería se reduce si la intensidad circula más rápidamente, es decir, no es lo mismo que la batería se cargue durante diez horas con una intensidad de un amperio que la batería se cargue durante una hora con una intensidad de 10 amperios.

Por ello, este fenómeno es particularmente importante en los vehículos eléctricos, porque la intensidad generalmente es alta, con el resultado que la capacidad puede ser menos que la esperada. Esto es importante para predecir el efecto de la intensidad en la capacidad, en el diseño del vehículo y cuando se realizan los instrumentos que miden la carga que queda en la batería. Conociendo la profundidad de descarga, se puede calcular el voltaje a circuito abierto.

La mejor manera de hacer esto es utilizando el modelo de Peukert sobre la conducta de la batería. El principio de este modelo es que existe una capacidad denominada capacidad de Peukert la cual es constante y está dada por la siguiente ecuación:

$$C_p = I^k t$$

Donde  $k$  es la constante de Peukert. Esta ecuación asume que la batería se descarga completamente en una intensidad constante durante  $t$  horas.

La carga eliminada de una batería se calcula con la siguiente ecuación:

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t \cdot I^k}{3600}$$



Donde CR es la carga total eliminada de la batería,  $\delta t$  es el paso del tiempo utilizado en el cálculo en segundos y  $n$  es el paso enésimo de la simulación.

Hay que tener en mente que ésta es la carga que se elimina de los platos de la batería y no la carga que realmente es suministrada por la batería al vehículo eléctrico. La carga que es suministrada es dada por la siguiente fórmula:

$$CS_{n+1} = CS_n + \frac{\delta t \cdot I}{3600}$$

La profundidad de descarga de la batería es la relación entre la carga eliminada y la capacidad original, es decir,

$$DoD = \frac{CR}{C_p}$$

Al realizar las baterías ciclos de carga/descarga y teniendo en cuenta su naturaleza electroquímica, están sujetas a sufrir distintos fenómenos perjudiciales para su funcionamiento.

Uno de estos fenómenos es la sobrecarga, que se define como la corriente de carga que no se invierte en transformar activos. Se produce cuando los amperios hora (Ah) suministrados a la batería alcanzan el 90 % de la capacidad, y durante todo el tiempo que a partir de entonces se prolongue la carga. Los efectos negativos que provoca son: corrosión en los electrodos (disminuyendo la sección eficaz del electrodo), generación de gases (provoca la descomposición electrolítica del agua) y embalamiento (al aumentar la corriente, aumenta la temperatura, la cual reduce la resistencia interna, provocando un aumento de la corriente).

Otra de las situaciones a las que están sujetas es la autodescarga, que consiste en la pérdida de características de la batería cuando se encuentra en circuito abierto (fuera de uso o almacenada). Las causas que afectan a la autodescarga son: el diseño de la celda, el sistema electroquímico, la temperatura (a mayor temperatura, mayor autodescarga), el tiempo de almacenamiento y las impurezas.

Los dos fenómenos anteriores están más o menos presentes en otras tecnologías de baterías, pero un fenómeno específico de las baterías de plomo – ácido es la carga superficial. Esta carga superficial es debida a que las reacciones que producen o almacenan

energía tienen lugar en la interfaz entre el electrodo y el electrolito. Por ello, durante la carga, ésta se acumula en la superficie de los electrodos y debe difundir dentro de ellos, pero este proceso de difusión es lento.

Al realizar la batería ciclos de carga/descarga, puede verse reducida la capacidad que entrega si se han realizado descargas parciales durante un largo tiempo. El efecto memoria está producido por la creación de cristales cuando la batería se recarga a baja corriente y por la presencia de impurezas en el electrodo negativo.

Por ello, es importante realizar una carga adecuada de las baterías. Se pueden cargar de diferentes formas: a tensión constante, a corriente constante o con un sistema de regulación automática. En la Figura 28 se muestra la evolución de corriente y tensión para cada tipo.

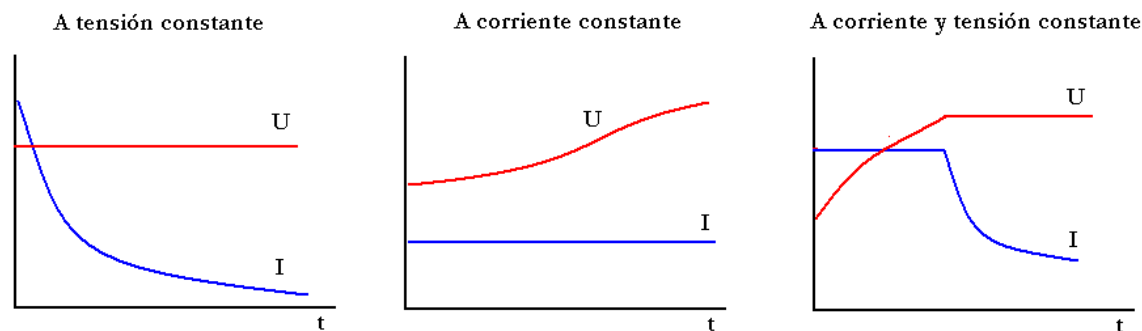


Figura 28. Tipos de carga de una batería

En la carga a tensión constante, la tensión se mantiene constante, lo que implica un elevado nivel de corriente al comienzo de la carga. La corriente va disminuyendo a medida que se alcanza el nivel máximo de carga. Si la tensión de carga es elevada, también lo será el nivel de corriente inicial, aumentando las pérdidas por efecto Joule y reduciendo la vida de la batería.

En la carga a corriente constante, el sistema de control de este tipo de carga es más sencillo que en el caso de carga a tensión constante. Al ser la corriente constante, la tensión irá aumentando a lo largo de la carga.

También hay sistemas de carga que combinan los dos métodos anteriores. Uno de los más extendidos es cargar a corriente constante hasta alcanzar la tensión de gasificación. A partir de ese momento, la carga pasa a ser a tensión constante [20].

## 2.7.- Influencia de la temperatura en la batería

La batería se ve afectada por la temperatura ya que si la temperatura es alta, ésta acelera la corrosión de las rejillas y la degradación de los materiales activos. Sin embargo, a bajas temperaturas, la capacidad de entregar corriente disminuye pero la vida útil aumenta. Esto se debe a que todos los procesos de corrosión interna se hacen más lentos. A la inversa, si bien durarán menos tiempo, el rendimiento de las baterías se incrementa con las altas temperaturas.

Como regla general para la vida de las baterías, podemos decir que por cada 10 °C de aumento de la temperatura ambiente por encima de la de referencia, la vida útil se reduce a la mitad. Por ejemplo, una batería de cinco años de duración a 25°C, solo durará 30 meses si la temperatura en el ambiente es de 35°C. Por ejemplo, en el caso de las baterías de plomo – ácido, si se utilizan con inferiores a 27 °C (80 °F), su capacidad promedio será menor. En el caso de utilizarlas a -18 °C (0 °F) la batería tendrá el 50 % de su capacidad y a 27 °C (80 °F) tendrá el 100 % de su capacidad. Cuando las baterías se utilicen en temperaturas superiores a 27 °C (80 °F), su capacidad promedio será superior a la estimada pero su vida útil será más corta, siendo ésta difícil de predecir, ya que puede variar según la aplicación, la frecuencia de uso y el nivel de mantenimiento.

En la Figura 29, Figura 30 y Figura 31 se muestra la variación de la capacidad con respecto a la temperatura, en las baterías de plomo – ácido [21], níquel – cadmio [22], e ión litio [23], respectivamente. En la Figura 32 se expone la comparación entre las tres baterías, donde se observa que la batería de Ión Litio posee menor capacidad a bajas temperaturas que las baterías de plomo – ácido y níquel – cadmio. Una característica común a los tres tipos de baterías es que el punto óptimo de trabajo está en el intervalo de temperaturas comprendido entre los 25 °C y 30 °C.

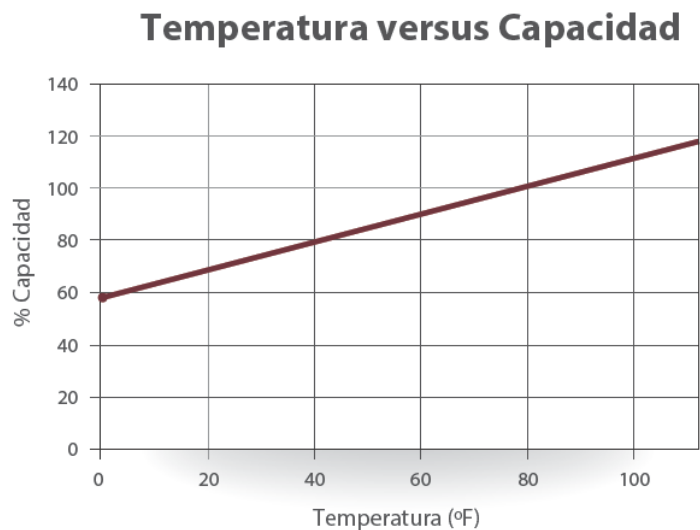


Figura 29. Influencia de la temperatura sobre la capacidad en una batería de plomo-ácido

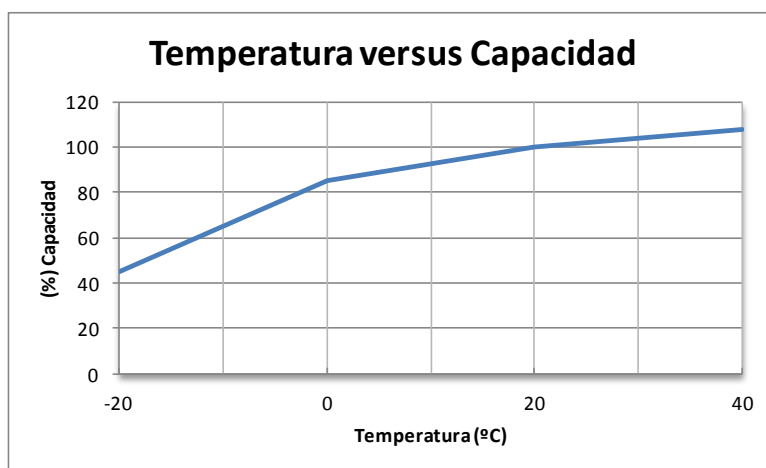


Figura 30. Influencia de la temperatura sobre la capacidad en una batería de níquel-cadmio

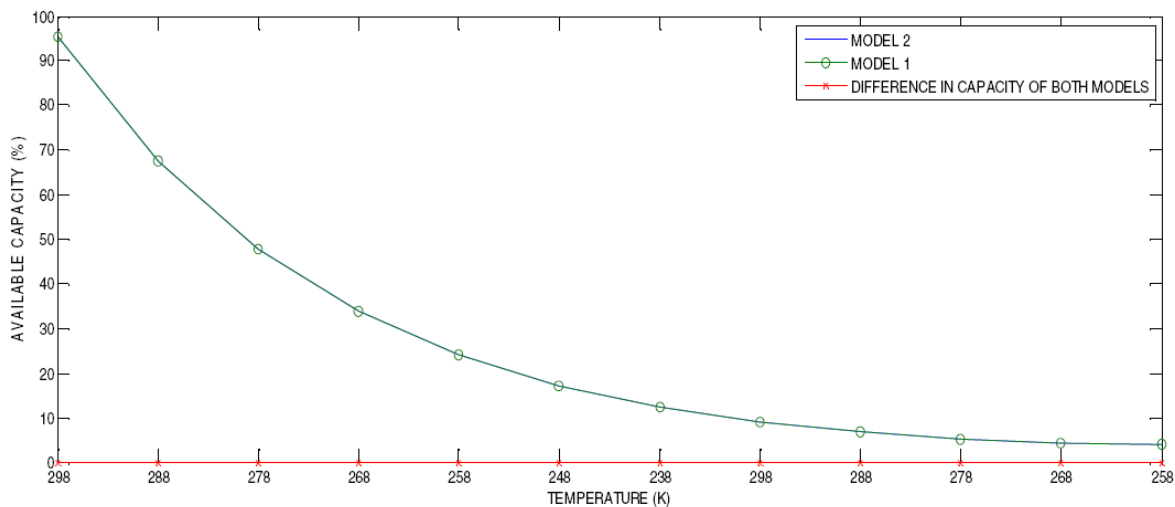


Figura 31. Influencia de la temperatura sobre la capacidad en una batería de ión-litio

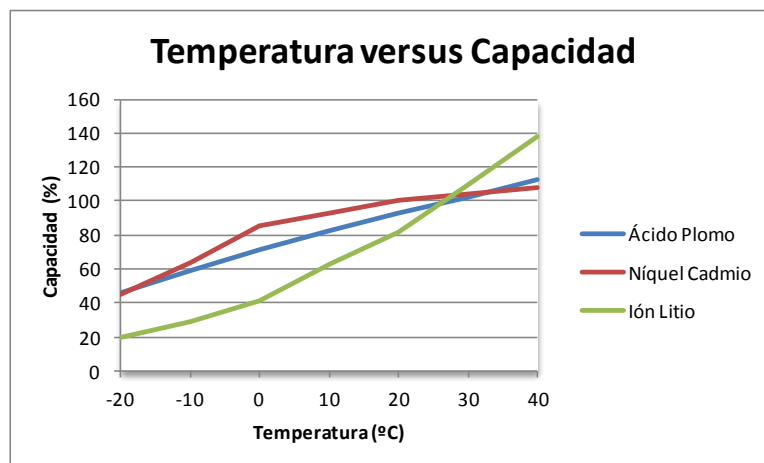


Figura 32. Influencia de la temperatura sobre la capacidad

## 2.8.- Sistemas de información geográfica

Desde la aparición del primer Sistema de Información Geográfica (SIG) en los años sesenta, esta técnica ha pasado por diversas fases de desarrollo, alcanzando hoy en día áreas tan diversas como el geomarketing o la navegación por redes de transporte asistida por satélite. Sin embargo, actualmente se establece un objetivo fundamental para los SIG: la solución de problemas espaciales complejos, de igual manera que en el entorno general de los Sistemas de Información (SI) se persigue resolver problemas, por lo general, de índole no espacial, o bien contestar rápidamente a las preguntas planteadas al sistema.

A través de las distintas etapas en la evolución de los SIG, se han alcanzado varios logros que hacen de estos sistemas una potente herramienta y, más aún, una creciente tecnología para todos aquellos sectores que requieren la gestión de información espacial de manera rápida y eficaz. Si bien los actuales SIG son capaces de gestionar, almacenar, representar e incluso desempeñar papeles fundamentales en aplicaciones avanzadas como las antes citadas, ciertas cuestiones referentes al análisis espacial aún no se encuentran resueltas por completo en su ámbito.

Los SIG pueden entenderse como una caja de experimentación lo que permite al analista o al gestor territorial trabajar o plantearse diferentes escenarios virtuales de una determinada región: por una parte, los que se producirían con la ejecución de ciertas políticas, o los que ocurrirían siguiendo determinadas tendencias. Todo esto hace de los SIG sean una potente herramienta de planificación cuando se dispone de una base de datos suficiente amplia para los fines que se plantean.

### ***2.8.1.- Aspectos Generales de los SIG***

Los Sistemas de Información Geográficos o SIG han sido definidos de diversas formas, dependiendo del punto de vista que asuma el autor en este campo; sin embargo, cuando comparamos las definiciones, vemos que muestran ciertos elementos en común, los cuales podemos considerar como los constituyentes de la base esencial de los SIG.

Desde que la idea de los SIG fue concebida hace unos cuarenta años, han evolucionado de igual manera que su conceptualización. Así, tenemos que definiciones como base de datos georreferenciados o base de datos espaciales, hoy son obsoletas. Actualmente, son frecuentes definiciones que resaltan la operatividad de los SIG, tales como:

- Base de datos computerizada que contiene información espacial
- Conjunto de herramientas para reunir, almacenar (en la computadora), recuperar, transformar y representar datos espaciales del mundo real para un grupo particular de propósitos
- Tecnología informática para gestionar y analizar información espacial
- Sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de la planificación y gestión
- Sistema computerizado que provee los siguientes cuatro conjuntos de operaciones para tratar datos georreferenciados:
  1. Entrada de datos
  2. Uso de datos (almacenamiento y recuperación)
  3. Manipulación y análisis
  4. Salida

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son el resultado de la aplicación de las llamadas Tecnologías de la Información (TI) a la gestión de la Información Geográfica (IG).

El término Sistema de Información Geográfica (SIG) tiene tres acepciones: el SIG como disciplina; el SIG como proyecto, cada una de las realizaciones prácticas, de las implementaciones existentes; y el SIG como software, es decir, los programas y aplicaciones de un proyecto SIG.

La acepción principal es la de SIG como proyecto, Sistema de Información que gestiona Información Geográfica, es decir información georreferenciada. La definición más extendida de SIG, con pequeñas variaciones, es la establecida por el Departamento de Medio Ambiente (DoE), Burrough, Goodchild, Rhin y otros. La cual podemos sintetizar diciendo que un SIG es un: *“Conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos a la Tierra.”* [24]

Sin embargo creemos que, tal y como sostienen Burrough y Bouillé, un SIG debe verse también como un modelo del mundo real, por lo que se podría definir como: *“Modelo informatizado del mundo real, en un sistema de referencia ligado a la Tierra para satisfacer unas necesidades de información concretas”*.

En cualquier caso, se compone de datos, hardware, software, recursos humanos y un esquema organizativo.

#### **2.8.1.1.- Elementos de los SIG**

Básicamente, un SIG está estructurado por cinco elementos fundamentales, los cuales permiten realizar sus operaciones posibles considerando la complejidad del tratamiento del dato espacial y su componente espacial y temática.

Un SIG está integrado por cinco componentes principales: hardware del ordenador (parte física del sistema), software del ordenador (programas de aplicación), datos, usuarios y métodos.

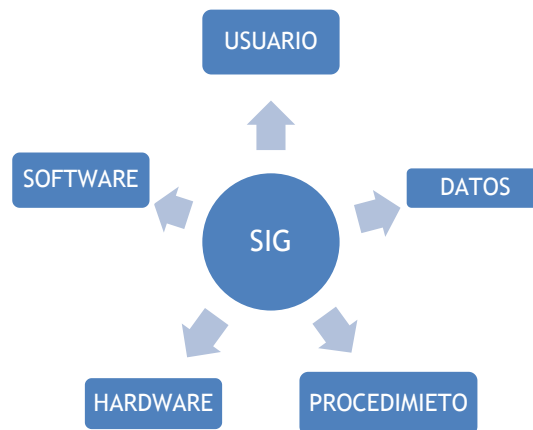


Figura 33. Elementos de los SIG

El primer elemento representa la parte física donde se asienta el SIG, y suele estar representado por alguna plataforma de la computadora, que pueden variar desde servidores (computador central) a computadores desktop (escritorio) o Laptop (portátil) que se utilizan en las configuraciones de red o desconectado. Asimismo, es requerido un conjunto de periféricos, como tabletas digitalizadoras, plotters, lectores ráster (scanner), así como unidades de almacenamiento y procesamiento de datos, para poder desarrollar la potencia operativa de los SIG.

El segundo elemento, el software, es el encargado de realizar las operaciones y la manipulación de los datos: almacenar, analizar y desplegar información geográfica. Con este elemento, el usuario establece una estrecha relación de comunicación acerca de las operaciones realizadas. Los componentes más importantes son:

- ☞ Herramientas para la entrada y manipulación de la información geográfica.
- ☞ Un sistema de administración de base de datos (DBMS)
- ☞ Herramientas que permitan búsquedas geográficas, análisis y visualización.
- ☞ Interface gráfica para el usuario (GUI) para acceder fácilmente a las herramientas.

El tercer elemento de un SIG es el dato; posiblemente en muchos casos éste es el elemento crucial, ya que sobre él son realizadas todas las operaciones posibles de



desarrollar en un SIG, además de ser el aspecto que requiere un mayor esfuerzo para su implementación en un proyecto SIG.

En referencia a lo anterior, cuando se plantea un proyecto de ordenación territorial o de planificación en una región, un elemento a tener muy en cuenta es la disponibilidad de información, así como la proporción de la misma en formato digital, es decir, ya procesada para poder ser gestionada y analizada en un SIG. Siendo el aspecto de la disponibilidad de los datos el talón de Aquiles del sector de los SIG, que puede condicionar enormemente las posibilidades de un SIG en relación con su aporte como herramienta para asistir a procesos de planificación.

En este sentido, los usuarios de estos sistemas pueden optar por alguna de estas dos soluciones ante la carencia de datos espaciales:

- a. realizar de manera autónoma el proceso de digitalización de la información, o
- b. adquirirla ya disponible en el mercado

A pesar de estas dos posibilidades, los inconvenientes para lograr una base de datos capaz de alimentar un proyecto de planificación territorial son múltiples, e incluso insalvables a costes bajos o medios.

El cuarto elemento, el recurso humano, podemos considerarlo como el elemento más importante de un SIG, siendo representado por las personas encargadas del diseño, implementación y uso del SIG; estas personas son las que deben gestionar y desarrollar las posibilidades que ofrecen estos sistemas, para así producir resultados, soluciones, selecciones, análisis, etc. Entre los usuarios de SIG se encuentran los especialistas técnicos, que diseñan y mantienen el sistema para aquellos que los utilizan diariamente en su trabajo.

El quinto y último elemento es la metodología y los procedimientos. Para que un SIG tenga éxito, este debe operar de acuerdo a un plan bien diseñado y estructurado y acorde con las reglas de la empresa o institución, que son los modelos y prácticas operativas características de cada organización.

A partir de las bases de datos espaciales; el usuario ocasionalmente puede ser un puente entre los cuatro elementos antes citados y un equipo planificador u otros entes centrados en el uso de información espacial.

**2.8.1.2.- Funciones de los SIG, clasificación**

Las funciones de los SIG se pueden agrupar en cuatro conjuntos fundamentales:

- a) entrada de información
- b) gestión de datos
- c) transformación y análisis de datos
- d) salida de datos

Con estos cuatro conjuntos de funciones se puede representar todas las operaciones posibles en un SIG.

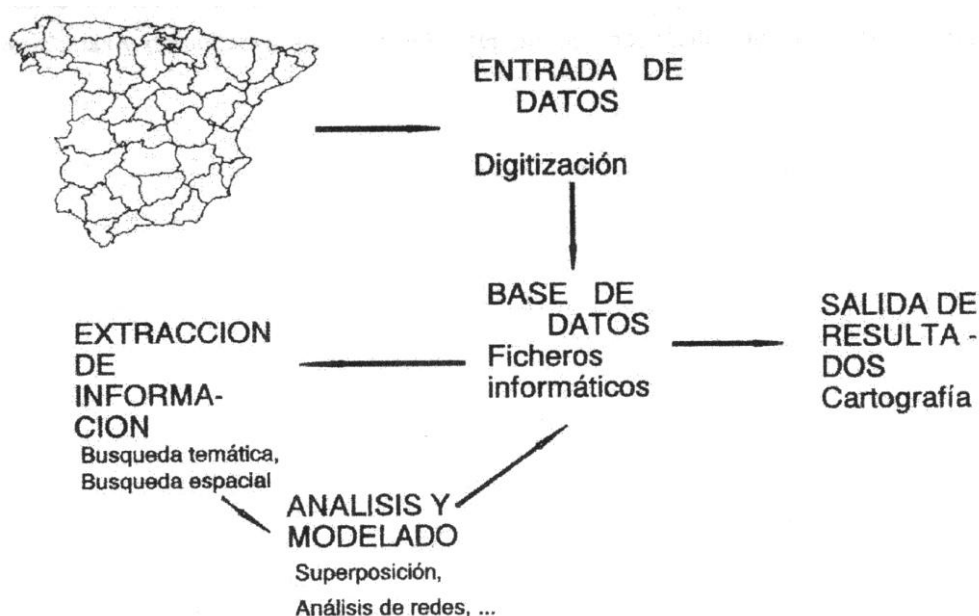


Figura 34. Las funciones de un Sistema de Información Geográfico

**2.8.1.2.1.- Entrada de Información**

Esta etapa es fundamental para disponer de una base de datos potente, operativa, libre de errores y versátil, lo que permite posteriormente un adecuado funcionamiento del SIG.

Los datos espaciales y sus características temáticas asociadas provienen, por lo general, de diversas fuentes y en distintos formatos. Sus fuentes de información frecuentes en los SIG son: mapas analógicos, imágenes de sensores espaciales y fotografías aéreas, lo

que implica que esta información debe ser homogeneizada y corregida para poder ser introducida en el sistema.

Actualmente, el proceso a seguir para la introducción de información espacial en formato analógico es la lectura a través de barreadores ráster (scanner) de los documentos a digitalizar, para posteriormente, con programas de vectorización, obtener las capas de datos en formato vectorial; otros procedimientos, como la digitalización manual, son considerados actualmente más costosos y lentos.

La integración de datos ante la teledetección y los SIG es otro aspecto a tener en cuenta para la obtención de los datos espaciales; de esta manera, las capas de uso y ocupación del suelo, entre otras, pueden ser eficazmente obtenidas a partir de imágenes de satélite y posteriormente introducidas en un SIG vectorial o ráster.

Otra técnica de altas prestaciones en cuanto a la obtención de información es el GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Con este sistema se puede obtener información del terreno en formato digital (datos espaciales) con precisión de centímetros, la cual puede ser introducida posteriormente como una capa de datos en su SIG, siendo ésta una información relativamente fácil de integrarla en un SIG a bajo coste, disponiendo de un equipo medio de GPS.

En la etapa de entrada de datos se incluye también los procedimientos de corrección de errores, así como la generación de topología de los datos espaciales y su caracterización o identificación temática (introducción de atributos).

#### **2.8.1.2.2.- Gestión de datos**

Esta función de los SIG abarca las operaciones de almacenamiento y recuperación de los datos de la base de datos, es decir, los aspectos concernientes a la forma en que se organizan los datos espaciales y temáticos en la base de datos.

Las operaciones de extracción de información de un SIG vectorial se utilizan para buscar y extraer objetos/entidades espaciales de la base de datos, seleccionando aquellos que cumplan la condición establecida por el usuario. De este modo, el usuario conoce tanto los atributos temáticos como las características espaciales de los objetos recuperados. El objetivo, por lo tanto, es la obtención de un mapa, y/o una tabla de valores, que contenga

todos los objetos geográficos con un conjunto particular de atributos, ya bien sea una localización (espaciales) o bien el valor de una variable (temáticos).

Esta operación es más adecuada para un SIG vectorial, en el cual los objetos/entidades espaciales están descritos explícitamente, mientras que en el SIG de tipo ráster no están de forma explícita, por lo tanto, la búsqueda y extracción de datos presenta dificultades.

Hay dos formas diferentes para la realización de la búsqueda y la obtención de datos: la búsqueda y recuperación de tipo espacial y la búsqueda temática.

2.8.1.2.2.1.- Búsqueda temática

Consiste en determinar la localización de unos objetos geográficos concretos, los cuales poseen valores temáticos especificados por el usuario.

A) Recuperación de información mediante especificación simbólica o nominal

Dado el nombre(s) de uno o varios objetos espaciales se obtiene una tabla y/o un mapa que muestren dichos objetos espaciales y sus características temáticas y/o espaciales (Figura 35). Este ejemplo muestra dicha búsqueda. Se quiere obtener todos los objetos geográficos (secciones censales de una ciudad) cuyo nombre empiece por el número 1, porque todos pertenecen al distrito 1. La búsqueda proporciona dos resultados: un mapa, donde se puede observar la localización y una tabla en la cual da los valores de las variables temáticas asociadas a cada sección censal.

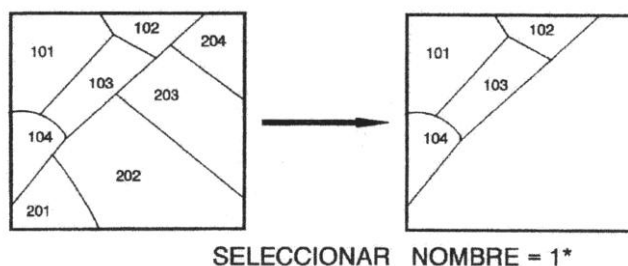


Figura 35. Búsqueda temática por especificación simbólica o nominal

## 2.8.1.2.2.2.- Búsqueda espacial

Este tipo de búsqueda consiste en determinar qué valor temático aparece en una localización, en el caso de un SIG vectorial, en uno o varios objetos geográficos localizados en el mapa. También existen varias formas distintas de búsqueda espacial.

a) **RECUPERACIÓN DE INFORMACIÓN MEDIANTE ESPECIFICACIÓN DE UN DOMINIO ESPACIAL**

Se establece un ‘dominio’ espacial, señalando un par de coordenadas (dominio puntual) o varios pares de coordenadas (dominio lineal o poligonal), y se extraen todos los objetos espaciales que estén dentro completamente o parcialmente de dicho ámbito espacial. La información extraída se refiere, tanto a los valores de los atributos temáticos, como a las características espaciales (longitud, superficie, topología, etc.) de los objetos seleccionados (Figura 36). En este ejemplo, el dominio o ámbito espacial de búsqueda consiste en el recuadro punteado del mapa de las secciones censales, esta zona delimita los terrenos donde se está considerando instalar una nueva fábrica, con esta extracción de datos se conoce la población (y la extensión del paro obrero en dicha zona) más directamente afectada por la nueva instalación).

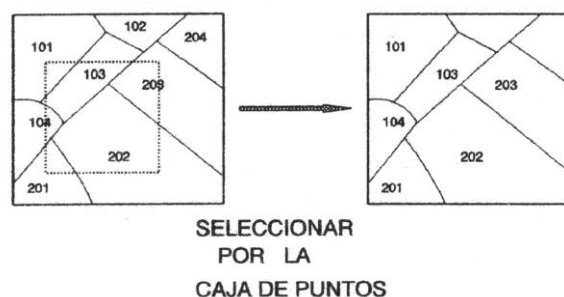


Figura 36. Búsqueda espacial por especificación de dominio geométrico

b) **RECUPERACIÓN DE INFORMACIÓN MEDIANTE CONDICIÓN GEOMÉTRICA**

Se establece el dominio espacial de interés especificando una condición de tipo geométrica. Por ejemplo, todas las entidades espaciales cuyas coordenadas X sean mayores que una cierta cantidad determinada y su coordenada Y menores que otra cantidad. Todos los objetos espaciales que están dentro de esos dominios se extraen y se representan mediante tablas y/o mapas (Figura 37). En esta ocasión, se han extraído de la base de datos

todas las secciones censales que tienen alguna extensión de terreno dentro de dicho dominio, cumpliendo las dos condiciones aritméticas simultáneamente.

En este tipo de operación es posible emplear operadores aritméticos o lógicos para que actúen sobre los valores de las coordenadas como la distancia, de este modo es factible establecer condiciones como la siguiente: recuperar todos los objetos que se encuentren a una distancia menor que 50 km. del objeto A.

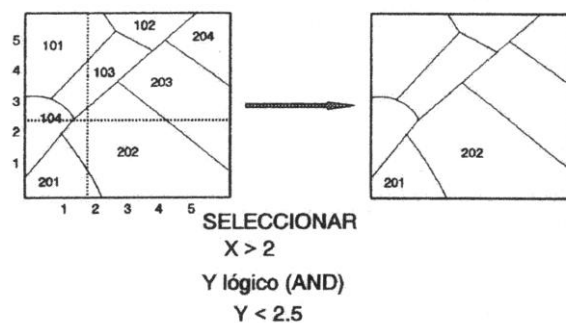


Figura 37. Búsqueda espacial mediante condiciones geométricas

### c) OPERACIONES DE BÚSQUEDA ESPACIAL ENTRE VARIOS ESTRATOS TEMÁTICOS

Todas las operaciones de búsqueda planteadas sólo afectan a un único estrato temático a la vez, pero indudablemente otra posibilidad muy interesante es llevar a cabo búsquedas selectivas de información que tenga en cuenta la existencia en la base de datos de un SIG de varios niveles o estratos temáticos diferentes. Esta posibilidad es espacialmente relevante para realizar búsquedas espaciales de objetos (en el estrato temático B) que se encuentren a distancias establecidas de objetos situados en el estrato temático A. Con el mismo papel que la distancia puede actuar otras funciones espaciales, tales como: ‘en el interior de’, ‘en contacto espacial con’,...

La Figura 38 contiene un ejemplo de lo anteriormente explicado. Consiste en localizar las casas rurales que se encuentren a menos de un kilómetro de los ríos de tercer orden que existen en la región de estudio. Los ríos y las casa pertenecen a dos estratos diferentes, uno en el de ‘hidrografía’ y el otro en el de ‘edificaciones aisladas’. El proceso es el siguiente, mediante una búsqueda temática de especificación simbólica o nominal se seleccionan (en el estrato ‘hidrografía’) los ríos que son de tercer orden, a continuación, mediante una búsqueda espacial de condición geométrica, se extraen de la base de datos las

casas que, en el estrato ‘edificaciones aisladas’, están a menos de un kilómetro de los ríos del tipo seleccionado anteriormente.

Estas combinaciones ofrecen un amplio abanico de posibilidades de búsqueda y extracción selectiva de información y forman una de las herramientas más potentes para la resolución de problemas prácticos.

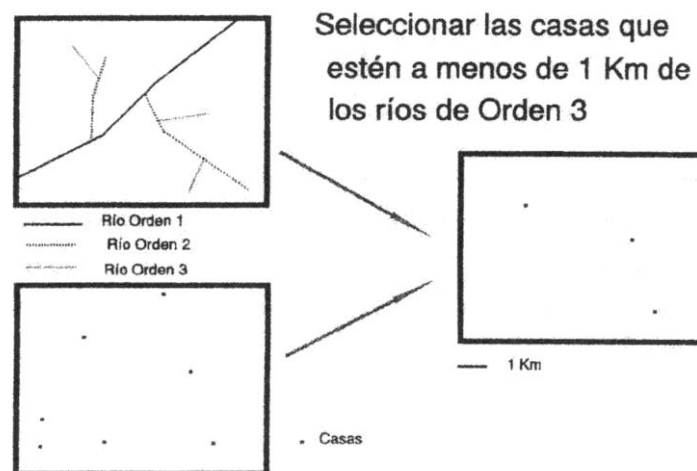


Figura 38. Búsqueda espacial empleando dos estratos mediante condición geométrica

### 2.8.1.2.3. - Transformación y análisis de datos

Esta función es el aspecto fundamental de los SIG, donde radica todo su potencial operativo. Las funciones de transformación y análisis de datos son las que proveen nuevos datos a partir de los existentes originalmente. Es aquí donde el usuario define los datos que utilizará y cómo para resolver problemas espaciales determinados, estableciéndose así soluciones a través del SIG con las operaciones que utilizan los datos espaciales de diferentes maneras.

La combinación, reclasificación, superposición y otras aplicaciones sobre las capas de datos espaciales que permiten desarrollar e implementar el modelado espacial son realizadas aquí, produciendo las posibles soluciones a los problemas planteados inicialmente. A continuación, se exponen las principales operaciones de modelado cartográfico:

- El ‘análisis de coincidencia de puntos’ trata de determinar en qué posiciones coinciden los objetos situados en las dos capas de información originales.

- El ‘análisis de puntos en línea’ intenta determinar la coincidencia espacial de objetos puntuales y objetos lineales.
- El análisis de ‘punto en polígono’ determina la existencia/inexistencia de puntos de uno de los mapas dentro de los polígonos trazados en el otro.
- El estudio de la ‘intersección de líneas’ busca hallar los lugares donde dos redes o sistemas de objetos lineales se cruzan y, al mismo tiempo, generar el conjunto de nuevas aristas y nudos creados por dicha intersección.
- El análisis de ‘línea en polígono’ trata de determinar la existencia de objetos lineales cuyo recorrido se produzca por el interior de un polígono, delimitado en el otro mapa.
- Por último, la ‘superposición de polígonos’ es la operación de modelo cartográfico más útil, más compleja y la que engloba mayor número de variantes. En este caso, se generan nuevos polígonos, producto de la intersección de los preexistentes. Gran número de operaciones usuales en un SIG requieren llevar a cabo la intersección de polígonos: delimitación de una ventana geométrica en un mapa, establecimiento de un corredor en torno a una línea, el llamado análisis de vecindad, etc. Debido a su importancia, este tipo de operaciones de modelado cartográfico se analiza detalladamente a continuación.

#### 2.8.1.2.3.1.- Superposición de polígonos

La operación de superposición de polígonos tiene dos fases. En primer lugar, la ‘geométrica - topología’, en la cual se determinan los nuevos polígonos generados por la intersección de los existentes en los dos mapas que se superponen. Igualmente, es esta fase, se debe asignar un identificador a cada nuevo polígono, el cual en alguna medida puede responder a los identificadores de los polígonos que lo han generado. Finalmente, también se debe reconstruir la topología del nuevo polígono.

La segunda fase es la de carácter temático, y en ella, se atribuyen los valores pertinentes a las variables temáticas asociadas al nuevo polígono. Por supuesto, estos nuevos valores dependen, de algún modo, de las cifras que estas variables adoptan en los polígonos ‘padres’.



**a) Fase geométrica de la superposición de polígonos**

Los problemas a resolver y las operaciones a realizar son las siguientes:

1. Dado un polígono del mapa A, encontrar el o los polígonos de mapa B que pueden intersecar con el primero.
2. Determinar los valores de las intersecciones existentes entre cada dos polígonos. Se trata de obtener las coordenadas X e Y de los puntos en que se produce el cruce de dos segmentos lineales, cada uno perteneciente a un polígono diferente. Esto tiene fácil resolución geometría, pues como ya se ha indicado, las ecuaciones de las rectas de los dos segmentos se obtienen mediante geometría elemental. Por su parte, una intersección tiene una coordenadas X e Y tales, que cumplen, simultáneamente, las dos ecuaciones.
3. Una vez encontradas las intersecciones, es preciso reconocer cuándo se ha generado un nuevo polígono.
4. Identificar los polígonos padres del recién formado.
5. Elaborar la topología de cada polígono y, simultáneamente, otorgar un identificador, a cada uno de ellos, identificador que en muchos casos se puede formar por la unión o concatenación de los identificadores de los polígonos de origen.

El resultado de esta fase geométrica – topología es el establecimiento de nuevos objetos geográficos poligonales, cada uno con un identificador unívoco. Pero todavía los valores de los atributos temáticos no están definidos en ellos; para obtenerlos se debe realizar la siguiente fase del proceso de superposición de polígonos.

**b) Fase temática de la superposición de polígonos**

Una vez generados los nuevos polígonos con su topología y sus identificadores, es preciso otorgar valores en cada uno de ellos a la o a las variables temáticas que tienen asociadas. El método es diferente de acuerdo con el tipo de las variables relacionadas con los polígonos de origen.

1. Las variables iniciales son, las dos, de tipo nominal/ordinal: en este caso es posible obtener los valores de la variable temática de los nuevos polígonos de acuerdo con los siguientes procedimientos:
  - ✓ Operaciones lógicas con dos variables 'booleanas' (únicamente presentan valores 1 y 0): se usan los operadores lógicos: Y lógico (AND), O lógico (OR), NO lógico (NOT), NI lógico (NOR) para calcular el valor que le corresponde a la nueva variable temática en función de los valores de las variables iniciales.
  - ✓ Intersección de variables nominales/ordinales: las dos variables iniciales presentan un conjunto de modalidades cada una de ellas (n y m por ejemplo), la nueva variable puede presentar un total de  $n*m$  modalidades, en cada nuevo polígono se dará una de ellas, de acuerdo con las modalidades que existían en los dos polígonos padres. Es una operación análoga a la tabulación cruzada de dos variables nominales/ordinales en el análisis estadístico. Normalmente, la intersección de polígonos está precedida de la simple 'tabulación cruzada' de los dos mapas, en este caso se sitúan las diferentes modalidades adoptadas por las dos variables temáticas iniciales, y en el cruce de cada fila y columna, la superficie que ocupa en el nuevo mapa es la combinación específica. A partir de este resultado, es posible realizar la intersección de los dos mapas, pero indicando previamente los valores que adoptará la nueva variable como resultado de la intersección, eliminando así muchas combinaciones posibles que en este caso concreto no aparecen.
  - ✓ Enmascarado de mapas: en este tipo de superposición de polígonos, uno de los dos mapas iniciales (el que se coloca encima del otro) actúa como una máscara que barre los valores temáticos del mapa inferior, a excepción de los polígonos del mapa superior que tienen un valor concreto elegido por el usuario, normalmente el valor nulo. De este modo, el nuevo mapa generado presenta en todos los nuevos polígonos los valores temáticos existentes en el mapa superior, a excepción de donde éste tenía valor nulo; allí aparecen los valores existentes en el mapa inferior.

## 2. Las dos variables iniciales son cuantitativas

En este caso son posibles dos tipos diferentes de operaciones: álgebra de mapas y enmascarado.

Por un lado, la operación denominada ‘álgebra de mapas’, en la cual se define una ecuación algebraica que relaciona la nueva variable temática (definida en el mapa de polígonos recientemente creado) en función de las dos variables temáticas iniciales.

En segundo lugar, también es posible realizar el ya conocido enmascarado de mapas, pues es fácil atribuir a un valor concreto, de entre todos los que puede adoptar una variable cuantitativa, el carácter de valor nulo, el cual dejará ver los valores que adopte la variable situada en el plano inferior.

## 3. Una de las variables es nominal/ordinal y la otra es cuantitativa

En este caso se pueden definir dos tipos de operaciones de superposición: composición y enmascarado de mapas.

Composición de mapas: también se puede denominar análisis de regiones y, por otra parte, es muy semejante a la denominada interpolación areal que se estudia en el apartado siguiente. Se considera que el mapa que está asociado a la variable nominal/ordinal define un mapa máscara, que se sitúa por encima del mapa relacionado con la variable cuantitativa. Se considera el mapa máscara determina en una serie de zonas, tantas como variables tenga la variable cualitativa asociada al mapa. De este modo, los nuevos polígonos obtenidos por la superposición, se agrupan por tales zonas, es decir, por poseer en el mapa máscara un valor concreto. A continuación, con los valores de la variable cuantitativa que existe en el otro mapa origen, se lleva a cabo algún tipo de operación estadística (media, suma,...) cuyo resultado se otorga como el valor que adopta la nueva variable temática en cada polígono. Las operaciones posibles son muy diversas:

- Cálculo de un valor central o más representativo de entre todos los valores cuantitativos que se dan en la zona: media aritmética, mediana, moda, etc.
- Cálculo de un valor que mide la variabilidad de los valores cuantitativos de la zona: desviación típica, varianza, recorrido intercuartílico, etc.

Enmascarado de mapas: en este caso, se elige a uno cualquiera de los dos como mapa máscara que cubre los valores del mapa inferior, a excepción de los polígonos dotados del valor nulo en el mapa superior.

### c) Interpolación areal

Se trata de una operación de superposición de polígonos algo especial. En este caso, uno de los mapas iniciales sólo contiene una partición del espacio en polígonos (mapa destino), y se desea conocer qué valores adopta en esta organización poligonal la variable cuantitativa asociada al otro mapa (mapa origen). Por ejemplo, se conoce la población existente en cada una de las secciones censales de una ciudad (mapa de polígonos asociado a una variable cuantitativa) y es preciso calcular la población que habrá en otra división del espacio de la ciudad (por ejemplo las áreas de servicio de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos), la cual no coincide en absoluto con las secciones censales. La operación se realiza de la siguiente manera:

1. Se calcula la superficie que ocupa cada nuevo polígono creado por la superposición geométrica de los mapas iniciales (el denominado origen y destino respectivamente).
2. En caso de que la variable cuantitativa esté formada por cifras absolutas (número de habitantes, tamaño de la renta total de cada polígono inicial,...), se obtiene la proporción que la superficie de cada nuevo polígono representa sobre el total del polígono inicial del mapa cuantitativo (mapa origen) que lo ha generado.
3. Si la variable cuantitativa está formada por valores relativos, es decir, un porcentaje o una proporción, se calcula la proporción de la superficie de cada nuevo polígono con respecto al área total del polígono inicial en el otro mapa, el que se ha denominado destino.
4. Una vez obtenidas las proporciones de superficie del modo más conveniente en cada caso, se debe estimar el valor de la variable cuantitativa en los polígonos del mapa destino: para ello, se multiplica el valor inicial por las proporciones calculadas y se suman los valores de todos los polígonos nuevos que integran cada uno de los polígonos del mapa destino (ver Figura 39).

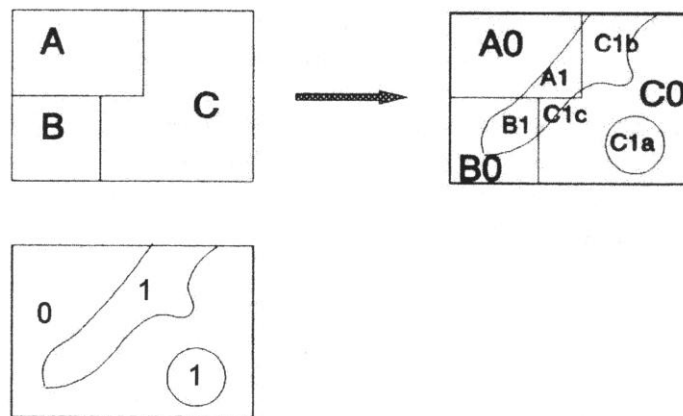


Figura 39. Interpolación areal

Actualmente, se están desarrollando modelos estadísticos más refinados que pueden mejorar los resultados de la interpolación areal y ampliar su campo de aplicación.

**d) Problemas de la superposición de polígonos**

La operación de superposición de mapas poligonales está dificultada en muchas ocasiones, por la aparición de los denominados polígonos ficticios (slivers). Esto ocurre cuando se superponen dos mapas cuyos polígonos tienen límites que sean en la realidad semejantes o, incluso, iguales. En esos casos, el número de nuevos polígonos generados puede ser muy grande y muchos de ellos tienen una extensión superficial muy reducida y una forma bastante definida y repetida en todos ellos (Ver Figura 40).

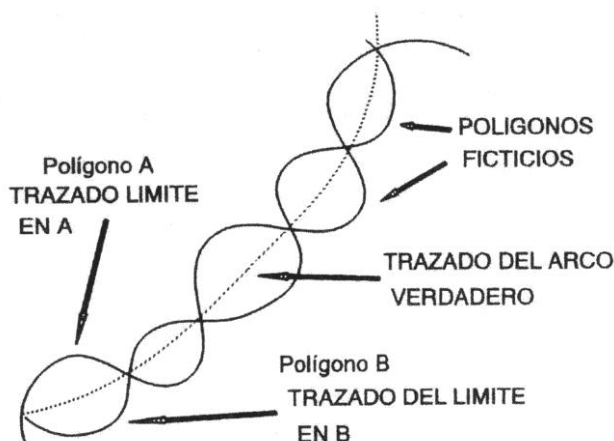


Figura 40. Polígonos ficticios en la superposición de polígonos

La causa de esto reside en los problemas de digitalización de polígonos, pues es muy fácil que la digitalización del mismo mapa realizada dos veces genere contornos que no coinciden exactamente. Al superponer estos contornos semejantes, pero no

exactamente iguales, se producen numerosos polígonos que no existen y que sólo son el producto de los errores de la digitalización (ver Figura 40). Evidentemente, la operación de superposición requiere disponer de métodos que eviten su aparición en el resultado final. Las posibles soluciones para ello son de tres tipos.

En primer lugar, realizar la digitalización de modo que se eviten los errores citados. Para ello, es imprescindible que cualquier nuevo mapa que se incluya en la base de datos utilice como elementos espaciales propios los que existen en otros mapas previamente incluidos en el SIG. Con lo cual, se debe contar con programas que busquen en la base de datos espaciales los elementos que se van a incorporar y que tomen sus coordenadas (sí ya han sido digitalizados) de las ya existentes. En muchas ocasiones, esta solución no es posible, por ejemplo, si se añade a una base de datos mapas tomados de otras fuentes de información digital no será posible evitar las diferencias en la digitalización.

Una segunda posibilidad es eliminar los polígonos ficticios al producirse la fase de superposición geométrica – topológica, para ello, se define un margen de tolerancia en torno a cada línea que se está intersecando, de modo que dos líneas que se encuentran dentro del margen de tolerancia se consideran que son una sola; así se evitan muchos de estos polígonos ficticios.

Finalmente, una tercera posibilidad es eliminar los polígonos ficticios una vez terminada la fase geométrica – topológica de la superposición, aprovechando para ello su forma muy específica que los identifica claramente. También ayuda a su eliminación la circunstancia habitual de que sean de su tamaño muy reducido. Por ello, basta con buscar polígonos menores de una extensión superficial prefijada y con la forma característica (redondeada), se les detecta y a continuación, se les elimina, incluyéndolos en los dos polígonos contiguos, dividiéndolos por la mitad.

Este problema es sólo uno, aunque muy importante, de los errores que pueden afectar a las operaciones de superposición y en general a todas las tareas desarrolladas por un SIG.

#### 2.8.1.2.3.2.- Generación de áreas de influencia o análisis de vecindad (buffers)

Este procedimiento consiste en la definición, alrededor de un objeto geográfico (de tipo puntual, lineal o poligonal), de un entorno con una anchura prefijada. Un ejemplo

usual es el área de influencia de una línea eléctrica, es decir, la anchura que hay que dejar al lado de dicha línea para que no se produzcan averías.



Figura 41. Área de influencia de un punto

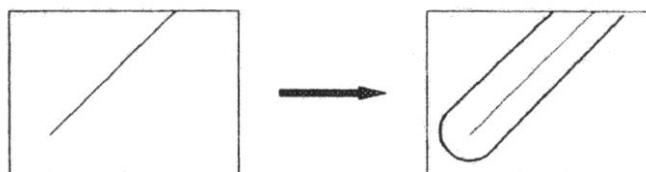


Figura 42. Área de influencia de una línea

#### 2.8.1.2.4.- Salida de datos

En un SIG existen diversas formas de salida de datos, las cuales dependen de los requerimientos del usuario, las más frecuentes son: mapas analógicos, tablas de valores, gráficos, representaciones tridimensionales, simulaciones de vuelo sobre ciertas zonas, etc.; con estas salidas podemos representar la información contenida en la base de datos o bien mostrar el resultado de determinadas aplicaciones.

La presentación puede obtenerse en formato analógico a través de impresoras, plotters o conversores fotográficos, o simplemente ser dispuesta en un monitor gráfico.

#### 2.8.1.3.- Estructura de los SIG y capas temáticas

Los datos espaciales contenidos en un SIG pueden concebirse como un conjunto de mapas de una porción específica de la superficie, representando cada uno de ellos una variable temática, como red vial, hidrografía, ocupación del suelo, pozos, etc. Una vez que una variable temática ha sido introducida en el SIG, recibe el nombre de capa temática, en la cual se representa una tipología específica de elementos del mundo real. Las capas se pueden definir como un conjunto de elementos geográficos lógicamente relacionado y sus atributos temáticos; también puede entenderse como la separación lógica de los datos

espaciales de un mapa de acuerdo con un tema determinado; así, cada capa almacena un tipo particular y homogéneo de objetos espaciales.

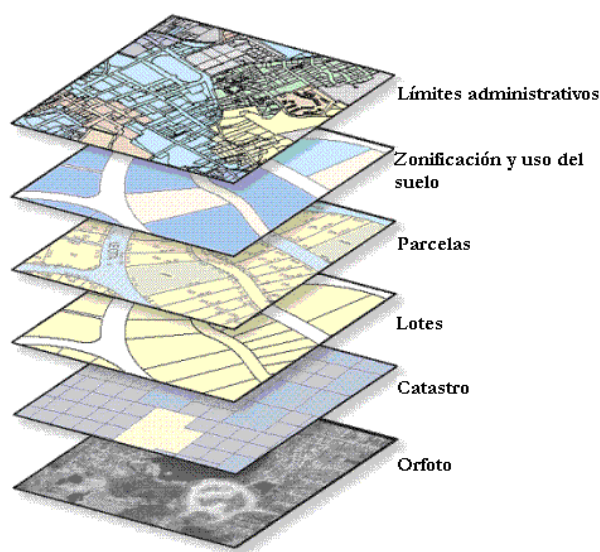


Figura 43. Capas temáticas de un SIG

Según la estructuración de los datos espaciales en un SIG, éste se puede entender como una representación abstracta y estratificada de la realidad, en la cual cada estrato o capa constituye un tema específico representado por ciertos objetos espaciales que lo definen, tales como puntos, líneas (arcos), áreas (polígonos) o bien celdas (píxeles). Al concebir la estructura de los SIG como una representación de la realidad, surge el concepto de modelo, en este caso circunscrito al modelo de datos espaciales a través del cual la información del mundo real puede ser representada en un SIG.

La estructuración de la información del mundo real en capas con lleva cierto nivel de dificultad para la representación de los datos espaciales como objetos espaciales pertenecientes a una capa, ya que cada objeto espacial está representado por información acerca de su posición (localización absoluta X, Y), relaciones topológicas (localización relativa en función de otros objetos espaciales y en sus relaciones) y atributos de los objetos (características temáticas de cada uno). Siendo los aspectos topológicos y espaciales relacionados con cada objeto espacial lo que diferencia a los SIG de otros sistemas de información.

En este sentido, Bosque [25] indica que un SIG debe de estar en condiciones de manejar tanto las características espaciales de los objetos geográficos (la geometría o localización absoluta y la topología o relaciones cualitativas entre ellos) como los aspectos



temáticos asociados a los objetos o unidades de observación. Pudiendo así establecer con los tres tipos de información que caracterizan a cada objeto espacial las posteriores capacidades de análisis espacial que puede desarrollar un SIG.

#### 2.8.1.4.- Objetos espaciales en los SIG

Los objetos espaciales pueden entenderse como la representación de los hechos espaciales en una capa temática, dichos objetos se representan en función de los distintos tipos de unidades de observación que se pueden distinguir en la realidad [25]; así, tenemos que a partir de las propiedades geométricas de un hecho espacial real, éste puede representarse en una capa por medio de alguno de los tres objetos espaciales establecidos: puntos (0-dimensionales), líneas (1-dimensionales) y áreas (2-dimensionales) en el modelo de datos vectoriales, o celda en el modelo raster.

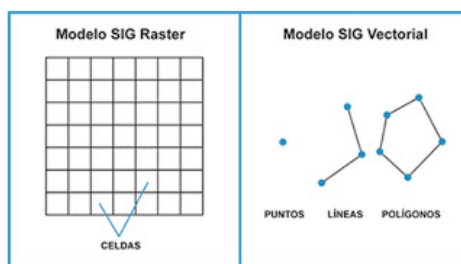


Figura 44. Tipos de objetos espaciales en los SIG

Con relación a la representación de los hechos del mundo real en los SIG, la escala desempeña un papel fundamental en la selección de los objetos espaciales, ya que elementos espaciales de la realidad que en una escala pueden representarse por áreas o líneas, en una menos detallada pueden representarse por puntos, y viceversa. De esta manera, la representación de los elementos del mundo real en objetos espaciales se realiza como una abstracción de cada elemento espacial del mundo real.

Se ha comentado anteriormente que un SIG se puede entender como una visión abstracta de la realidad, haciendo este hecho más patente si cabe, la forma de representar los datos espaciales dentro del sistema, basados siempre en la fuente de información original; es decir, la información geográfica.

A partir de la información geográfica proveniente del mundo real, obtenemos en un principio los datos geográficos contenidos en ella, con lo cual llevamos a cabo un proceso de abstracción y discretización de una información originalmente continua. Pudiendo

luego, dependiendo del modelo de datos que utilicemos, representarla a través de puntos, líneas, áreas o celdas.

Las relaciones que se pueden establecer entre los tres objetos espaciales básicos fueron definidas por Gatrell entre pares de objetos.

Objetos	Puntos	Líneas	Áreas
<b>Puntos</b>	- Es vecino de	- Está cerca de	- Es centroide de
	- Es asignado a	- Está en	- Está en
<b>Líneas</b>		- Cruza	- Interseca
		- Une	- Es límite
<b>Áreas</b>			- Superpuesto por
			- Es adyacente a

Tabla 11: Relaciones entre objetos espaciales en un SIG

En la tabla anterior, Tabla 11, podemos ver las relaciones posibles de establecer entre cada par de objetos espaciales del modelo vectorial; sin embargo, en caso de disponer de un SIG ráster, es posible llevar a cabo operaciones de superposición a partir de las celdas de cada capa temática que produzcan un resultado similar, desde un punto de vista operativo, al del modelo vectorial aquí comentado.

### 2.8.2.- Modelos de datos espaciales: vectorial y ráster

El mapa tradicional es una representación analógica o continua de la realidad, por lo tanto, no está adaptado para ser procesado por un ordenador que utiliza datos en formato digital o discreto. Por lo tanto, el primer paso a realizar es la conversión de los datos a formato digital para la introducción de éstos a un SIG.

La correcta representación digital de los datos espaciales necesita la resolución de dos cuestiones: la geocodificación de los datos y la descripción en términos digitales de las características espaciales. La primera consiste en un procedimiento mediante el cual un objeto geográfico (un edificio, una parcela de terreno, una carretera, líneas eléctricas,...) recibe directa o indirectamente una etiqueta que identifica su posición espacial con respecto a algún punto común o marco de referencia.

En un segundo lugar, se debe realizar una descripción de la posición geométrica de cada objeto y de las relaciones espaciales (topología) que mantiene con los restantes objetos geográficos existentes en la realidad a estudiar. Para ello, se lleva a cabo una abstracción y simplificación de los elementos existentes.

El componente espacial de los datos espaciales puede ser representado digitalmente en un SIG a través de dos modelos de datos espaciales: vectoriales y ráster. En el modelo vectorial, la información del mundo real está representada por los puntos y líneas que definen sus límites o fronteras, estableciendo un sistema de coordenada (X, Y) para localizar cada objeto espacial en una capa. En dicho modelo de datos, el espacio geográfico tiene un carácter continuo que cumple los postulados de la geometría euclídea. Siendo representados los elementos por sus fronteras, las cuales se definen explícitamente.

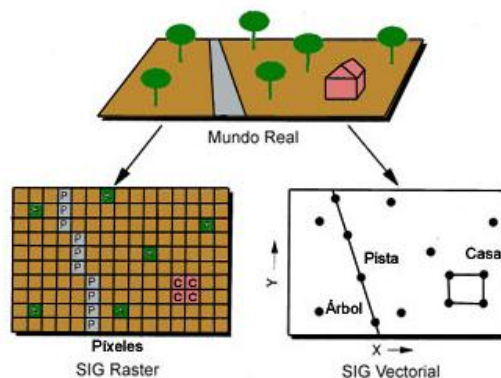


Figura 45. Representación ráster y vectorial de la información del mundo real

En el modelo de datos vectoriales, las áreas están descritas por el conjunto de líneas de frontera que las delimitan; dichas líneas se representan por un conjunto de coordenadas correspondientes a sus vértices, mientras que los puntos se representan por una coordenada (X, Y).

En el modelo de datos ráster, el espacio está representado por un conjunto de unidades espaciales llamadas celdas (píxeles), las cuales representan unidades homogéneas de información espacial, éstas establecen su localización por un sistema de referencia en filas y columnas.

En este modelo de datos, los elementos del mundo real están representados por un conjunto de celdas adyacentes, pero que en realidad no mantienen una relación mutua entre ellas, ya que las fronteras de las regiones o áreas están definidas implícitamente, y no se

reconocen a menos que se aplique un algoritmo de detección de fronteras, a diferencia del modelo vectorial, en el que cada objeto espacial (en el caso de las áreas) representa una unidad homogénea de información, con una topología que define sus relaciones con los demás objetos espaciales de la capa temática.

En el modelo ráster, cada celda tiene un valor o código asignado, correspondiente al tipo de información temática que representa cada celda, así en la aproximación ráster, el espacio está poblado por un largo número de celdas regularmente distribuidas, cada una de las cuales pueden tener diferentes valores.

La asignación de atributos en el modelo vectorial se realiza a través de una tabla de atributos asociada a cada capa de datos espaciales, en la cual una etiqueta identifica cada objeto espacial, con cuya identificación se asignan los atributos temáticos a los objetos en dicha tabla de atributos.

Ambos modelos de datos presentan una serie de ventajas y desventajas en función de la utilidad que se le pretenda dar al SIG. En el modelo ráster, la idea de un espacio representado por un conjunto de celdas adyacentes sin relaciones establecidas hace que este espacio sea incompatible con la presencia de puntos o líneas per se, lo que puede dificultar ciertas operaciones con estos objetos espaciales.

### **2.8.2.1.- Comparación entre los SIG vectoriales y los SIG ráster**

La comparación entre los dos modelos de SIG se refiere sobre todo al volumen de almacenamiento, calidad de la representación gráfica, exhaustividad de la representación y facilidad del proceso.

La representación vectorial es más adecuada para la realización de gráficos y mapas precisos y, sobre todo, está más de acuerdo con la cartografía tradicional y, por ello, resulta más intuitiva. Es más compacta en cuanto al volumen de almacenamiento que necesita y más exhaustiva la información disponible, ya que la topología está descrita más completa y explícitamente. Ciertas operaciones de análisis espacial son más sencillas y rápidas de realizar con la organización vectorial de tipo 'arco/nodo' pero estas ventajas se consiguen a partir de una organización de los datos muy compleja y que determina cálculos largos y complicados, muy laborioso de realizar para actualizar la base de datos, cualquier cambio determina la necesidad de modificar muchos elementos. Por otro lado, la realización de buenos gráficos exige disponer de aparatos complejos y caros; trazadores de curvas, etc.

El modelo ráster tiene, por su parte, una organización muy simple de los datos, que permite realizar con gran facilidad procesos de análisis. Por ejemplo, la superposición de mapas es muy sencilla y fácil de programar mediante operaciones con matrices. Sus gráficos, aunque deficientes, se pueden realizar con dispositivos baratos, como una impresora matricial. Su principal inconveniente es el gran volumen de almacenamiento que requiere, en especial si es necesario disponer de una representación muy precisa, lo que exige disminuir el tamaño del 'pixel' y, en consecuencia, aumentar el número de filas y columnas del mapa. Por este tipo de cuestiones resulta muy importante el desarrollo de procedimientos con el 'run-length'; el cual disminuye el volumen de almacenamiento necesario. Por último, este modelo no reconoce explícitamente la existencia de objetos geográficos, y por tanto, en las aplicaciones en que sea esencial su empleo, este modelo tiene pocas posibilidades de ser utilizado.

	Modelo Ráster	Modelo vectorial
<b>Ventajas</b>	<p>Utiliza una estructura de datos muy simple.</p> <p>Las superposiciones de las diferentes coberturas se implementan de forma rápida y eficiente.</p> <p>Permite una forma más eficiente de representación cuando la variación espacial es muy alta. El modelo ráster es muy apropiado para el tratamiento de imágenes de satélite.</p> <p>Da la posibilidad de generar modelos de elevación del terreno.</p>	<p>Posee una estructura de datos muy compacta.</p> <p>Codifica eficientemente la tipología.</p> <p>La salida en papel presenta muy buenos productos</p>
<b>Desventajas</b>	<p>La estructura de datos es menos compacta</p> <p>Algunas relaciones topológicas son difíciles de representar</p> <p>La información original se generaliza una vez que se traspasa al sistema, tanto cuanto más grande sea la dimensión de las celdas.</p> <p>La mayoría de estos SIGs se ven limitados por la cantidad de filas y columnas que pueden manejar, por tanto la resolución dependerá de estas.</p> <p>Es inexacto, debido a que depende de la resolución de los datos y, por lo tanto, requiere una gran cantidad de espacio para el almacenamiento de los mismos</p>	<p>La estructura de datos es más compleja</p> <p>Las sobreposiciones son más complejas de realizar</p> <p>Si la variación espacial es baja, resulta poco eficiente la aplicación.</p> <p>El procesamiento de imágenes digitales no puede ser realizado eficientemente en este tipo de formato.</p>

Tabla 12: Ventajas y desventajas de los SIG vectoriales y los SIG ráster

### ***2.8.3.- Aplicaciones de los SIG vectoriales***

Las aplicaciones de un SIG se puede clasificar de acuerdo con varios criterios. Por un lado, las tecnologías de diverso tipo que interactúan con los SIG y a las cuales éstos aportan procedimientos e ideas, como son, por ejemplo:

- Cartografía, en especial la asistida por ordenador
- Teledetección
- Topografía y geodesia
- Ingeniería de obras públicas

Las más importantes son la clasificación por las áreas o temas donde estos dispositivos han encontrado un campo de uso práctico y cotidiano, que serían los siguientes, ordenados de mayor a menor desarrollo:

1. Gestión de instalaciones
2. Catastro
3. Planificación urbana
4. Transporte
5. Marketing geográfico
6. Inventario y gestión de recursos naturales

#### **A. GESTIÓN DE INSTALACIONES**

Se trata de un campo de aplicación muy desarrollado. Depende de los intereses de las empresas de infraestructuras: abastecimiento de aguas, distribución de electricidad, telefonía,...

El objetivo fundamental es el mantenimiento y reparación de las grandes infraestructuras gestionadas por estas empresas. El SIG debe facilitar la operación diaria de mantenimiento y reparación de las instalaciones gestionadas, produciendo ordenes de trabajo

y cartografía a escalas grandes (Ej, 1:500) y en la que se incluyen las líneas de la topografía, los edificios, y, sobre todo, las redes de distribución a mantener.

## **B. CATASTROS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN CATASTRAL**

El catastro urbano y rural es el registro oficial de las propiedades, extensiones y valores del suelo en una región.

La información catastral se recoge en forma de un mapa que muestra los límites administrativos y las líneas de separación de las propiedades y parcelas. Normalmente se emplea una escala espacial de representación muy detallada. La elaboración de dicha cartografía se basa, habitualmente, en el trabajo de topógrafos que miden las distancias y posiciones de los límites y separaciones respecto a una serie fija de puntos de referencia; este procedimiento se ha automatizado e incorporado a los Sistemas de Información Geográfica con el desarrollo de los métodos llamados COGO, que se incluyen en bastantes programas comerciales de SIG.

Esta automatización ha dado origen a un tipo espacial de SIG, especializado en esta aplicación: los denominados Sistemas de Información de Terrenos o Parcelas (LIS).

## **C. PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN URBANA**

La finalidad práctica de este tipo de aplicaciones es facilitar el funcionamiento diario de un Ayuntamiento. En tres tipos de actividades municipales, un SIG puede jugar un papel significativo: en los departamentos dedicados al mantenimiento de las infraestructuras (calles, mobiliario urbano, etc.) que deben resolver tareas semejantes a las tratadas en el apartado A); en las secciones del Ayuntamiento dedicadas a las tareas de recaudación de impuestos, padrón de población, etc., aquí se deben manejar grandes bases de datos, en parte de modo parejo a lo ocurrido en los aspectos catastrales y se producen mapas a una escala aproximada de 1:2000; finalmente, los departamentos de planeamiento necesitan usar información geográfica más elaborada, agregada e, incluso, abstracta, generada a partir de complejas operaciones de análisis; su producción cartográfica se suele realizarse a escalas en torno a 1:10000 y a 1:25000.

## **D. ELABORACIÓN DE RUTAS PARA VEHICULOS**

Son aplicaciones que permiten la cartografía del lugar donde está el automóvil y la determinación de la ruta óptima al punto de destino. A partir de un SIG que incluya la



descripción de la red de comunicaciones (calles, sentido del tráfico en ellas, velocidad media,...), se pueden generar rutas óptimas para el funcionamiento de vehículos de reparto, o rutas de recogida de usuarios para los autobuses de transporte público, etc. Igualmente es posible el cálculo de las rutas óptimas (mínimo tiempo de llegada) para los vehículos de emergencia: bomberos, ambulancias, etc.

### **E. GEODEMOGRAFÍA Y MARKETING**

La finalidad de esta aplicación es estudiar las características demográficas, sociales, económicas que existen en un área geográfica (vecindario, barrio, sección censal, etc.) para alcanzar los siguientes objetivos:

- Localizar comercios
- Determinar las zonas más propicias para llevar a cabo propaganda y publicidad comercial
- Creación de distritos geográficos homogéneos en cuanto a alguna característica
- Análisis de penetración en el mercado de productos comerciales

Para ello, se usan divisiones del espacio muy precisas, por ejemplo, bloques de edificios o manzanas urbanas, o al menos secciones censales. En ellas se recoge información (procedente habitualmente del Censo o Padrón) de las personas que allí residen, aspectos demográficos (edades, sexo), económicos (profesiones y niveles de ingreso), sociales (costumbres y nivel cultural, etc.)

### **F. EL SIG COMO ARCHIVO ESPACIAL**

El papel de un SIG como mero archivo de información es muy relevante; en varios de los campos de aplicación es ésta la principal función utilizada; por ello, las operaciones analíticas relacionadas con la gestión de información, en especial la búsqueda selectiva, tienen mucha importancia, y se puede considerar que son las de uso más habitual y extendido hasta el momento.

### ***2.8.4.- Principales programas informáticos sobre SIG***

En la actualidad existe una gran oferta de programas sobre SIG, que cubre cualquier posibilidad de trabajo.

El conjunto de programas disponibles para SIG se puede dividir en tres tipos: comerciales, de dominio público y de enseñanza. Los comerciales han sido elaborados y son vendidos por empresas que los mantienen y desarrollan continuamente, entre ellos se pueden mencionar: ARCINFO, de ESRI (USA); TIGRIS y MICROSTATION, de INTERGRAPH (USA); SICAD, de SIEMENS (Alemania); TYDAC, de TYDAC (Gran Bretaña); ARGIS de ESRI (USA); ERDAS, de ERDAS (USA); MAPINFO, de MAPINFO Co. (USA); PROSCAN, de XEROX (USA), etc.. La existencia de esta gran variedad de programas SIG comerciales está ligada al uso de muy distintas plataformas de hardware para su desarrollo; main frame, estaciones de trabajo basadas en el sistema operativo UNIX y microordenadores, tanto WINDOWS como Macintosh de APPLE y Linux.

Los programas de dominio público son elaborados por instituciones estatales, en especial en los Estados Unidos, y están disponibles de forma gratuita a un precio muy reducido para cualquier usuario. Entre ellos se pueden destacar los siguientes, todos procedentes de los Estado Unidos: GRASS, del Cuerpo de Ingenieros del ejército americano; MOSS, de la Oficina de gestión de tierras; SAGA GIS, del Servicio de parques; ODYSSEY del Laboratorio de análisis espacial de la Universidad de Harvard, etc.

Por último, también existen algunos programas de uso más habitual en la enseñanza de los SIG, aquí destaca con claridad el programa IDRISI, de la Universidad Clark (USA), por su facilidad de uso, coste reducido, puesta al día anual, etc..

## **2.9.- Estaciones de recarga de vehículos eléctricos**

Una estación de carga, o estación de carga eléctrica, estación de recarga de vehículos eléctricos, estación de servicio ecológico o punto/poste de recarga, también llamada electrolinera, es un lugar que provee electricidad para la recarga rápida de las baterías de los vehículos eléctricos, incluyendo los vehículos híbridos enchufables, mediante procedimientos que no llevan más de diez minutos mediante dispensadores rápidos de electricidad o estación de recambio de baterías.

El valor nominal de la tensión de alimentación en corriente alterna del vehículo, según UNE-EN 61851-1:2001, es de hasta 690V. Los equipos deben funcionar correctamente dentro del  $\pm 10\%$  de la tensión nominal normalizada (según la Norma CEI 60038). El valor nominal de la frecuencia es de  $50\text{ Hz} \pm 1\%$  o  $60\text{ Hz} \pm 1\%$ .

### ***2.9.1.- Modos y tipos de carga***

Atendiendo a las distintas potencias, corrientes de circulación y tiempos de carga podemos hablar de: [10]

#### ❖ Carga lenta o convencional:

La recarga convencional aplica niveles de potencia que implican una carga con una duración de unas 8 horas aproximadamente.

La carga convencional monofásica emplea la intensidad y voltaje eléctricos del mismo nivel que la propia vivienda, es decir, 16 amperios y 230 voltios. Esto implica que, la potencia eléctrica que puede entregar el punto para este tipo de cargas es de aproximadamente 3,7 kW.

Con este nivel de potencia, el proceso de carga de la batería tarda unas 8 horas. Esta solución es óptima, fundamentalmente, para recargar el vehículo eléctrico durante la noche en un garaje de una vivienda unifamiliar o garaje comunitario.

Para conseguir que el vehículo eléctrico sea una realidad y teniendo en cuenta el sistema eléctrico actual, la recarga óptima desde el punto de vista de eficiencia energética, es realizar este tipo de recarga durante el período nocturno, que es cuando menos demanda energética existe.

#### ❖ Carga semi-rápida

La recarga semi-rápida aplica niveles de potencia que implican una carga con una duración de unas 4 horas aproximadamente.

La carga semi-rápida emplea 32 amperios de intensidad y 230 VAC de voltaje eléctrico. Esto implica que, la potencia eléctrica que puede entregar el punto para este tipo de cargas es de aproximadamente 7,3 kW.

Con este nivel de potencia, el proceso de carga de la batería tarda unas 4 horas. Esta solución es óptima, fundamentalmente, para recargar el vehículo eléctrico durante la noche en un garaje de una vivienda unifamiliar o garaje comunitario.

#### ❖ Carga rápida

El tipo de carga más adecuada es la recarga rápida, que supone que en 15 minutos se puede cargar el 65 % de la batería.

La carga rápida emplea una mayor intensidad eléctrica y, además, entrega la energía en corriente continua, obteniéndose una potencia de salida del orden de 50 kW.

Esta solución es la que, desde el punto de vista del cliente, se asemeja a sus hábitos actuales de repostaje con un vehículo de combustión.

Estas cargas deben ser concebidas como extensión de autonomía o cargas de conveniencia.

Las exigencias a nivel eléctrico son mayores que en la recarga convencional. Lo que puede implicar la necesidad de adecuación de la red eléctrica existente. Por poner una referencia, la potencia requerida para este tipo de instalaciones es comparable a la de un edificio de 15 viviendas.

Los modos de carga tienen que ver con el nivel de comunicación entre el vehículo eléctrico y la infraestructura de recarga (y por consiguiente, la red eléctrica), y el control que se puede tener del proceso de carga, para programarla, ver el estado, pararla, reanudarla, o incluso volcar electricidad a la red.

- Modo 1, sin comunicación con la red. Sería el que se aplica a una toma de corriente convencional con conector schuko.
- Modo 2, grado bajo de comunicación con la red. El cable cuenta con un dispositivo intermedio de control piloto que sirve para verificar la correcta conexión del vehículo a la red de recarga. Podría seguir usándose un conector schuko.

- Modo 3, grado elevado de comunicación con la red. Los dispositivos de control y protecciones se encuentran dentro del propio punto de recarga, y el cable incluye hilo piloto de comunicación integrado (por ejemplo los conectores SAE J1772, Mennekes, Combinado o Scame).
- Modo 4, grado elevado de comunicación con la red. Hay un conversor a corriente continua y solo se aplica a recarga rápida (por ejemplo conector CHAdeMO).

Modo	Corriente (A)	Potencia monofasica/trifasica (kw)	Carga	Recarga en	Recarga controlada	Ambientes públicos o privados abiertos a terceros
<b>Modo 1</b>	Max. 16 A por fase	3,7 /11	Lenta	AC	No	No
<b>Modo 2</b>	Max. 32 A por fase	7/ 22	Lenta	AC	Si	No
<b>Modo 3</b>	Max. 64 A por fase	3,7/ 44	Semi-rápida	AC	Si	Si
<b>Modo 4</b>	Hasta 400 A	50	Rápida	DC	Si	Si

Tabla 13: Resumen de las principales características según el modo de carga

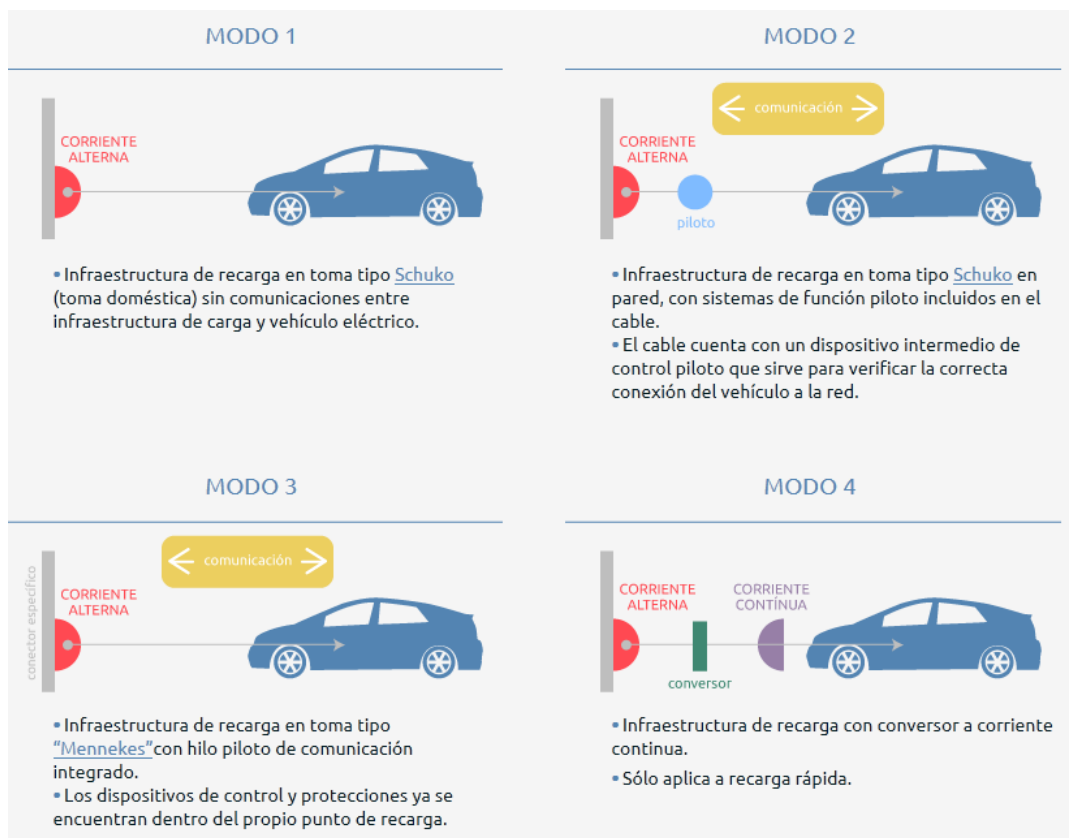


Figura 46. Gráfico resumen de los 4 modos de carga según IEC 61851

En la siguiente gráfica, Figura 47, se muestra una comparativa de tiempos y la autonomía en función del modo de recarga. Como se puede observar, con una recarga rápida, Modo 4, se obtiene mayor autonomía [26].

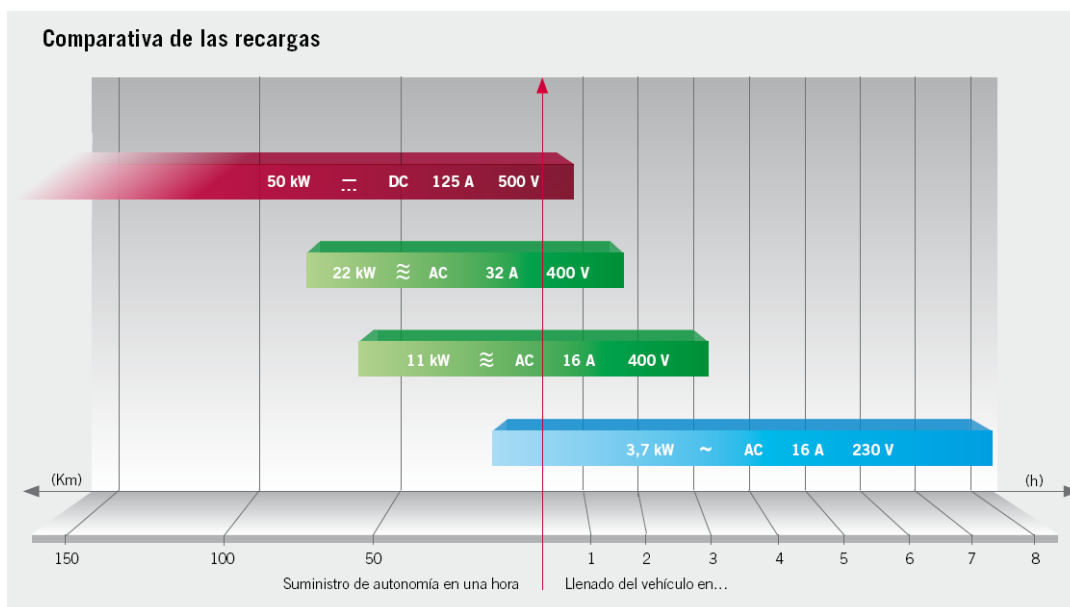


Figura 47. Comparativa de las recargas en función de la autonomía y tiempo de recarga

En la siguiente figura, Figura 48, se muestra la comparativa de tiempos de recarga en función de la tensión y la distribución de la red: monofásica, trifásica, en el caso de corriente alterna, y corriente continua.

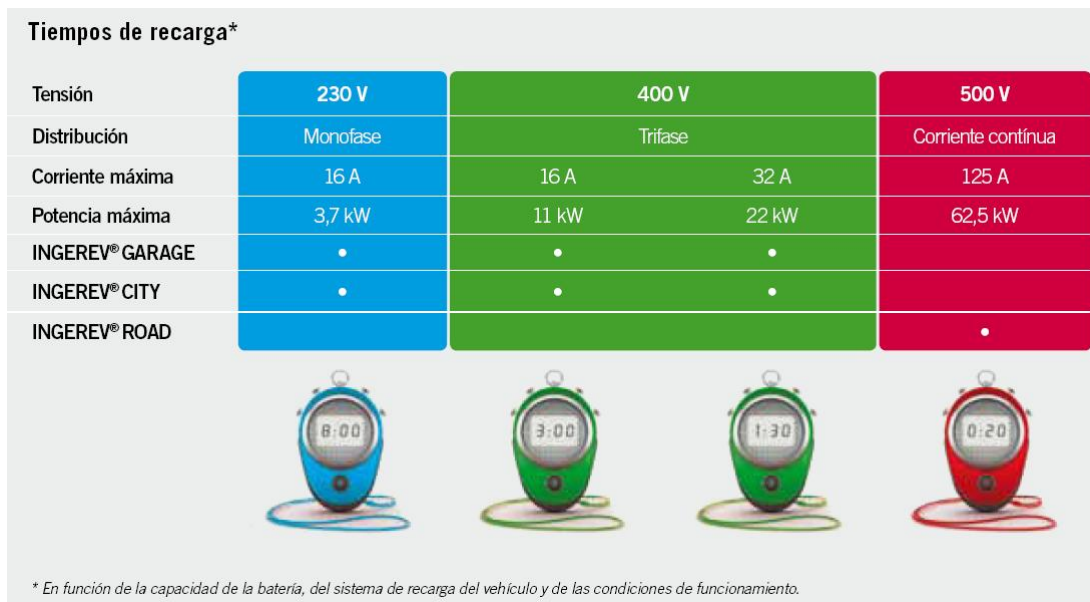


Figura 48. Tiempos de recarga en función de la tensión y la distribución

### 2.9.2.- Infraestructuras de recarga

Hoy día existen distintos tipos de infraestructuras de recarga, según se realicen la instalación en la vía pública, en superficie en un entorno controlado o en el interior de garajes.

Con el fin de solucionar el problema de autonomía que tienen los VE, y permitir que los usuarios puedan utilizar estos con la mayor libertad posible, nacen los distintos tipos de infraestructuras de recarga del VE, para poner al alcance de todos los usuarios una energía accesible y en cualquier lugar y momento.

#### 2.9.2.1.- Tipos de toma de corriente

Existen tres tipos de toma de corriente. En la siguiente tabla, Tabla 14, se muestran las características [27]:

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
<b>Conexión</b>	Monofásica (sin obturador)	Monofásica/Trifásica (sin obturador)	Monofásica/Trifásica (con obturadores)
<b>Intensidad máxima (A)</b>	32	70 A (monofásica) 63 A (trifásica)	32
<b>Tensión máxima (V)</b>	250	500	500
<b>Número de patillas</b>	5	7	5 o 7

Tabla 14: Tipos de toma de corriente

La toma de corriente Tipo 3 posee obturadores que evitan el contacto directo con las partes en tensión, bajo un grado de protección IPXXD, denominada ‘child protection’.

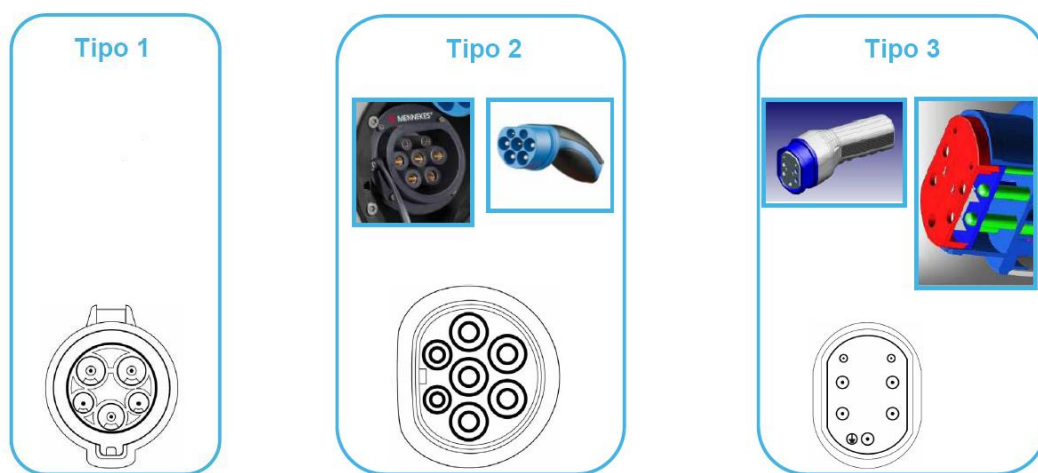


Figura 49. Tipos de tomas de corriente

En la norma ‘IEC 62196-2: Bases, clavijas, acopladores de vehículo y entradas de vehículo. Carga conductiva de vehículos eléctricos’, establece las diferentes tomas de corriente para realizar la carga de los vehículos eléctricos. En la siguiente tabla se muestran las principales características:



<p>Yazaki (JP)</p>	<p>5 pines (L1, L2 / N, PE, CP, CS)</p> <p>Aprobado por la SAE en la norma J1772</p> <p>110V-230 V / 32 A / 7,2 kW máx.</p> <p>Grado IP: IPXXB</p>	
<p>Mennekes (DE)</p>	<p>Elegido “de-facto” para conector en VE por OEMs</p> <p>7 pines (L1, L2, L3, N, PE, CP, PP)</p> <p>Mono o trifásica con el mismo conector</p> <p>100 - 500 V / 62 A / 43 kW máx.</p> <p>Grado IP: IPXXB</p>	
<p>Scame-Schneider-Legrand (IT/FR)</p>	<p>7 pines (L1, L2, L3, N, PE, CP, PP)</p> <p>Mono o trifásica con el mismo conector</p> <p>100 - 500 V / 32 A / 22 kW máx.</p> <p>Grado IP: IPXXD</p>	

Tabla 15: Tipos de toma de corriente estándar según la norma IEC 62196

Donde, L1: Línea 1; L2: Línea 2; L3: Línea 3; N: Neutro; PE: Puesta a tierra; CP: protección de control; CS: control de seguridad; y PP: proximidad.

El estándar IEC 62196-3 adoptado por la Comisión Europea tiene dos conectores posibles:

1. El conector combinado compuesto por uno DC (corriente continua) y otro AC (corriente alterna).

## 2. El conector de AC (corriente alterna).

Los dos conectores son compatibles con la base de enchufe instalada en el vehículo.

El interface es conocido como Combined AC/DC charging system type 2 (Sistema de carga AC/DC tipo 2), el cual cumple los requisitos de compatibilidad y de intercambiabilidad dimensional para acopladores pin y el contacto del tubo con tensiones de trabajo de hasta 1000 Vcc y corriente hasta 400 A nominal y tensión nominal hasta de funcionamiento 690 Vac y corriente nominal de hasta 250 A, para combinado de carga AC/DC.

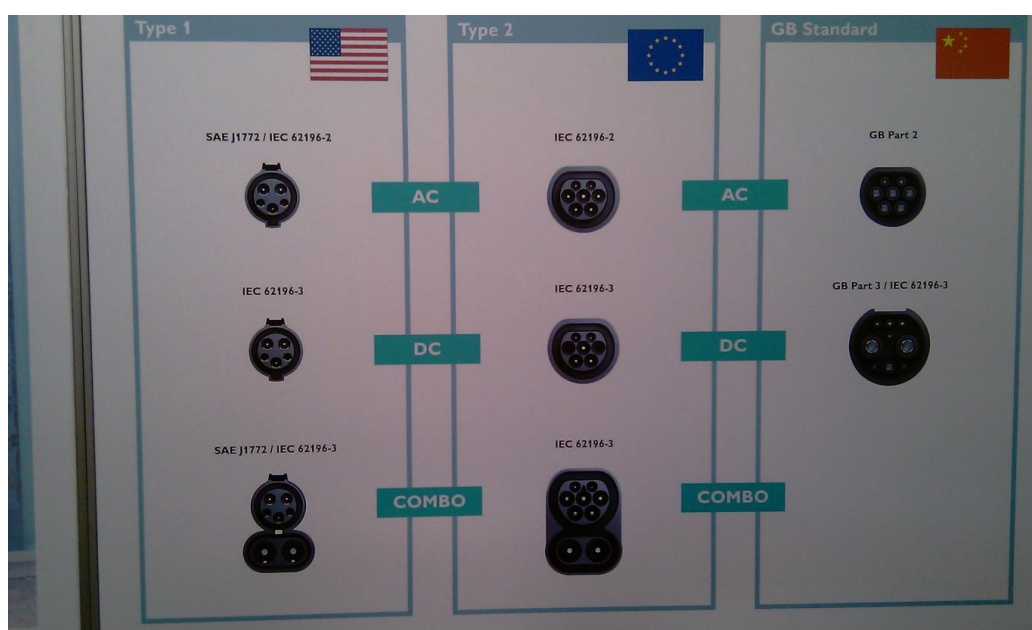


Figura 50. Compatibilidad de los diferentes tipos de tomas de corriente

CHAdEMO es el nombre registrado de un método de carga rápida para vehículos eléctricos que se ha propuesto globalmente como estándar por la asociación que lleva el mismo nombre. CHAdEMO es una abreviatura de “CHArge de MOve”, equivalente a “carga para movimiento”.

El protocolo CHAdEMO garantiza que las estaciones de recarga interoperen con cualquier tipo de batería que lleven los vehículos. La ECU (engine control unit o unidad de control del motor) a bordo del vehículo decide la corriente óptima de carga según el estado de la batería y transmite comandos a la estación de recarga, quien suministra corriente DC.

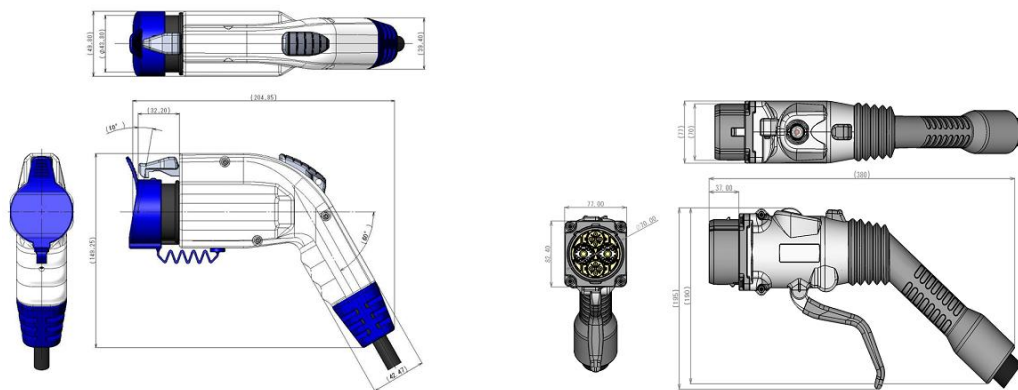


Figura 51. Tipos de tomas de corriente ChadeMo

### 2.9.2.2.- Arquitecturas de recarga

En la actualidad hay diferentes arquitecturas de recarga para incrementar la carga de la batería de los vehículos eléctricos, las cuales están resumidas en la Figura 52 [28].

	Arquitectura	Alimentación	Acceso a la carga
	<b>Autónoma</b>	<b>Individual</b>	<b>Acceso abierto</b>
Recomendada para:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso residencial</li> <li>• Aplicaciones comerciales como empresas, hoteles y aparcamientos de centros comerciales</li> </ul>			
	<b>Autónoma</b>	<b>Individual</b>	<b>Acceso restringido</b>
Recomendada para:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicaciones comerciales como empresas, hoteles y aparcamientos de centros comerciales</li> </ul>			
	<b>Multipunto</b>	<b>Colectiva</b>	<b>Acceso abierto</b>
Recomendada para:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicaciones comerciales como flotas de vehículos, empresas, hoteles y aparcamientos de centros comerciales</li> </ul>			
	<b>Multipunto</b>	<b>Colectiva</b>	<b>Acceso restringido</b>
Recomendada para:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicaciones de carga a ple de carretera</li> <li>• Garajes comerciales</li> <li>• Aplicaciones comerciales como flotas de vehículos, empresas, hoteles y aparcamientos de centros comerciales</li> </ul>			
	<b>Multipunto</b>	<b>Colectiva</b>	<b>Acceso restringido o pago por uso</b>
Recomendada para:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicaciones de carga a ple de carretera</li> </ul>			
	<b>Autónoma</b>	<b>Individual</b>	<b>Acceso restringido o pago por uso</b>
Recomendada para:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estaciones de recarga rápida</li> </ul>			

Figura 52. Arquitecturas de recarga

En función de la ubicación de la instalación de recarga existen varias topologías que podemos clasificar en:

➤ **Vía pública**

En este caso, el poste de recarga se situara en la acera con el fin de dar suministro a los vehículos eléctricos estacionados en las plazas de aparcamiento reservadas para esta actividad. Dentro de este grupo podemos encontrar dos modalidades:

1. Poste de recarga: el poste se fijará en la acera y lo más próximo a la calzada para así poder ayudar a mejorar la recarga.

El número de postes vendrá limitado por el número de tomas que tenga cada poste de recarga, y de la posición de aparcamiento del vehículo para efectuar la recarga, ya sea en batería o en línea.

2. Motocicletas: es un punto distinto que los postes de recarga, debido a que tiene forma de pórtico, formado por una barra que contiene las tomas de corriente y dos soportes.

Se fijaran a la acera y se buscara que estén lo más próximos posibles a la calzada, igual que en el caso anterior.

Suelen tener entre tres y seis tomas de corrientes, y debe disponer al igual que los postes de recarga, de un sistema de protección ante riesgos eléctricos y actos vandálicos que impida su acceso sin identificación.

➤ **Entorno controlado**

Este es el caso de aparcamientos de superficie en recintos con acceso restringido, a los que pueden tener acceso personal autorizado o no autorizado o las denominadas electrolinerías, en las que al igual que en una gasolinera convencional, la gente acude para poder recargar su vehículo eléctrico. Dentro de los sistemas de entorno controlado, podemos encontrar la configuración de sistemas multipunto.

Estos sistemas están formados por los siguientes equipos:

- N puntos de recarga.
- Cuadro de mando y operación de unidad de control que gestione los N puntos de recarga.

La autenticación de los usuarios que quieren hacer uso del sistema de recarga, viene dada por un sistema de lectura de tarjetas RFID. Una vez realizada la autenticación, se electrificará el punto de recarga elegido o asignado.

El cuadro de control estará fabricado en material metálico, y la pintura del punto de recarga será aislante eléctrica.

Si el sistema se encuentra a la intemperie, los grados de protección que deben tener son:

- ❖ IP 44, según Norma UNE 20324.
- ❖ IK 10, según Norma UNE-EN 50102.

El número de postes de recarga vendrá definido, por el responsable de la explotación de los puntos de recarga, o bien, por la potencia contratada en ese punto.

Se debe disponer de un sistema que genere históricos de recarga, gestione alarmas o cualquier tipo de incidencia, y pueda controlar la carga, mediante la conexión o desconexión de los puntos de recarga, así como mantener una comunicación con el sistema del centro de Gestión de Datos.

### ➤ Interior

Este tipo de sistemas de recarga, se instalarán en el interior de aparcamientos, viviendas, etc., o lo que es lo mismo, en un entorno controlado. En este tipo de arquitectura de recarga se pueden distinguir dos tipos, los cuales son:

#### 1. Monopunto

El punto se anclará en la pared, de forma que la parte inferior del conector quede entre una altura de 0,9 y 1,2 m por encima del nivel del suelo, según

recomendación de Naciones Unidas sobre accesibilidad para personas minusválidas.

A nivel constructivo, tendrá capacidad para albergar una toma de corriente para la recarga de vehículos eléctricos, y los grados de protección de la instalación serán:

- ❖ IP 21, según Norma UNE 20324.
- ❖ IK 08, según Norma UNE-EN 50102.

Para proteger frente a robos o riesgos eléctricos, se cortara la electrificación del punto de recarga si se produce la desconexión del conector, un fallo o si se completa la carga.

## 2. Sistemas multipunto

Las características son las mismas que en el caso un entorno controlado multipunto.

# Capítulo 3

---

## *Estado del Arte*

### **3.1.- Introducción**

En el modelado del vehículo eléctrico y la ubicación de las estaciones de carga de éste es necesario estudiar la interacción con el medio por el que circula, la batería, etc. Como se presenta en este capítulo de estado del arte, el modelado se puede realizar bajo distintas ópticas debido a su carácter multidisciplinar.

### **3.2.- Claves tecnológicas del vehículo eléctrico**

En la exposición que realiza Chan en la referencia [12], muestra que las principales claves tecnológicas del EVs, HEVs y FCVs son:

- 1) La propulsión del motor
- 2) Los convertidores de potencia
- 3) La tecnología del control híbrido
- 4) La batería y ultracondensadores

### ***3.2.1.- Propulsión del motor***

Hay tres tipos principales de motores eléctricos que son adecuados para aplicaciones de EV, HEV y FCV: motor síncrono o motores sin escobillas, los motores de inducción; y, los motores de reluctancia. Los requisitos típicos de motor son: alto par y potencia, amplia gama de velocidades incluyendo par constante y operaciones de potencia constante, alta eficiencia en todo el rango de velocidades, de alta fiabilidad y robustez, todo ello, a un costo razonable.

Prochazka [29] en su artículo nos define que la mejor opción es la del motor con transmisión ya que si se ubica el motor directamente en las ruedas sin transmisión, éste no posee ninguna ventaja. Por ello, se deja esta ubicación para las bicicletas eléctricas.

Si se comparan motores asíncronos frente los síncronos, los primeros poseen varias ventajas frente a los síncronos:

- Costo del motor será de al menos 4 veces menor
- Las pérdidas son más bajas para accionamiento con pequeño par y alta velocidad debido a la desexcitación del motor (al tener menor par, las pérdidas de hierro son inferiores)

Sin embargo, poseen varias desventajas, las cuales son:

- Con el mismo par, es aproximadamente dos veces mayor el peso
- El rendimiento es de aproximadamente 15 % más bajo a velocidades pequeñas o medias y a alto par (hay pérdidas adicionales en el devanado del estátor debido a la corriente magnética)



Aunque el motor asíncrono posee las desventajas comentadas anteriormente, Prochazka eligió éste para la realización de la simulación en un pequeño coche eléctrico debido a que puso especial atención en la solución para que tuviera exigencias mínimas en la potencia de salida y al mismo tiempo no debiera limitar el flujo del tráfico, tanto urbano como interurbano.

### ***3.2.2.- Convertidores***

Los circuitos electrónicos de potencia típicos utilizados en los HEV incluyen rectificadores, inversores y convertidores dc / dc. Los temas que deben abordarse en el diseño de circuitos de electrónica de potencia en los HEV incluyen: alimentación, algoritmo de control de diseño y diseño magnético, mecánico y térmico.

### ***3.2.3.- Tecnología control híbrida***

Existen básicamente dos controles típicos en los HEV. El primero es el control de gestión de la energía, con el objetivo de optimizar la eficiencia de energía y las emisiones. En segundo lugar está el control de conducción, con el objetivo de optimizar el rendimiento de la unidad, la comodidad y la seguridad.

### ***3.2.4.- Batería y supercondensadores***

Las baterías y supercondensadores almacenan energía que proviene o bien desde el frenado cinético o bien del motor durante el descenso por una cuesta y proporciona energía / potencia al sistema de propulsión.

Las unidades de almacenamiento de energía eléctrica deben ser de un tamaño de tal manera que almacenen la energía suficiente (en kilovatios – hora) y proporcionen la potencia pico adecuado (en kilovatios) para que el vehículo tenga un rendimiento de aceleración especificado y la capacidad de cumplir con los ciclos de conducción apropiados.

Para la realización del modelo de la batería, se debe cumplir con los siguientes requisitos:

- No es necesario predecir los efectos a largo plazo (por ejemplo, envejecimiento), ya que los ciclos de conducción que se utilizan para simular el comportamiento del vehículo están en el intervalo de veinte minutos a unas pocas horas. Sin embargo, es necesario que el modelo se pueda adaptar

mediante el cambio de parámetros apropiados los cuales representan una batería envejecida

- Una descripción precisa del comportamiento corriente – tensión de la batería, hasta altos niveles actuales, así como durante las condiciones transitorias es necesario obtener valores precisos de la pérdida de potencia. En combinación con un modelo de celda térmica requerida adicional, esta información se puede utilizar para controlar el intervalo de temperatura de la célula permisible. También sería necesario el modelo térmico para identificar los requisitos sobre el sistema de refrigeración y para optimizar la estrategia de refrigeración
- Todos los parámetros importantes que afectan el comportamiento de la batería deben tenerse en cuenta (temperatura de la célula, estado de carga,...)
- Integración del modelo en un hardware con el sistema de bucle, el cual tiene que ser capaz de realizarlo en tiempo real
- El esfuerzo para parametrizar el modelo debe ser bajo tanto para las mediciones, así como para el posterior análisis necesario
- El modelo debe ser fácilmente escalable con respecto a la capacidad de almacenamiento, con el fin de permitir los estudios de los parámetros

El circuito simple equivalente del modelo de la batería se muestra en la Figura 53 [30]:

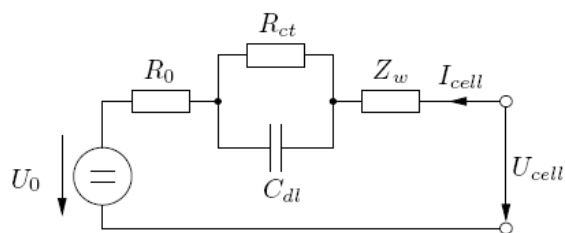


Figura 53. Circuito simple equivalente del modelo de la batería

### 3.3.- Desarrollo de modelos de consumo

El coche eléctrico, cada día, está más en auge con lo que va a conllevar tanto un cambio social como técnico – económico, por ello, las empresas eléctricas deben estar

preparadas para poder hacer frente a la carga masiva de vehículos eléctricos utilizando horas – valle, implementando nuevas políticas, ampliando las instalaciones, construyendo puntos de recarga, etc.

En la referencia [31], Mas nos muestra el desarrollo de un modelo de consumo con la ayuda de Matlab, el cual correlaciona los valores de las variables adquiridas, velocidad, pendiente de la calzada y potencia, con la finalidad de obtener el comportamiento del consumo del vehículo eléctrico en función de la velocidad y la pendiente.

### **3.4.- Modelado dinámico y simulaciones**

En el mercado hay diferentes programas para la realización del modelado de los vehículos eléctricos. Dichos programas son: MATLAB/Simulink, Advisor, Powertrain System Analysis Toolkit (PSAT),...

#### ***3.4.1.- Vehículos híbridos eléctricos***

Un vehículo híbrido se desarrolla con los problemas individuales asociados al motor de gasolina o diésel y al vehículo eléctrico. Sin embargo, disminuye la producción de emisiones y el uso de combustible. Por otra parte, el problema de las baterías del vehículo eléctrico se ha conquistado debido a que se recarga el mismo, y por lo tanto, nunca debe ser enchufado.

La única recarga necesaria es la recarga de combustible. Además, la batería no posee la misma demanda que en el caso de en un vehículo totalmente eléctrico ya que la batería debe almacenar toda la energía que necesita el coche. Estas baterías son más pequeñas, y sólo tienen que ser capaces de proveer para los usos de alta potencia. Del mismo modo, el motor para un HEV es más pequeño de lo que sería en un coche tradicional, ya que no tiene que proporcionar tanta potencia. Por todo ello, Habib Ullah [32] nos muestra un diseño de un vehículo eléctrico: diseño mecánico donde estudia el diseño del chasis, la elección del motor de gasolina y de corriente continua y el diseño eléctrico donde un microcontrolador controla las partes eléctricas del diseño (Ver Figura 54).

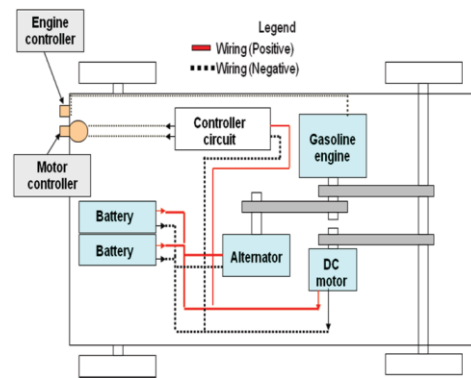


Figura 54. El diagrama de bloques funcional de la parte eléctrica del HEV propuesto por Habib Ullah

Hay muchos trabajos que proponen el diagnóstico y detección de faltas en los vehículos eléctricos híbridos. Sin embargo, sólo algunas de ellas tienen que ver en el fallo de cortocircuito. La batería HEV es uno de los pares más cruciales que puede fallar por un cortocircuito debido a varias causas: por el calor acumulado, picos de tensión que permiten el fallo del aislamiento, deformaciones parciales en los separadores de la batería los cuales crean puntos calientes, etc.

En la referencia [33], se muestra el trabajo realizado por Ibrahim el cual realiza una simulación en la cual analiza el fallo de cortocircuito en el vehículo eléctrico híbrido tipo – serie – paralelo con la finalidad de observar cómo influye en el rendimiento. Para la realización de la simulación utiliza los siguientes softwares: Matlab/Simulink, SimPowerSystems y SimDriveline. Demostró una posible reacción del vehículo a fallo de cortocircuito durante la aceleración y desaceleración.

En el caso de cortocircuito, la corriente de la batería es más pequeña durante la desaceleración que durante la aceleración. El cortocircuito también afecta al estado de carga (SOC) de la batería. Cuando el fallo de cortocircuito se aplica, la batería se descarga menos que en el caso normal. Dado que la velocidad del vehículo durante la falta es menor que en el caso normal, la energía de descargada de la batería es menor que el caso normal, debido a que la energía suministrada al sistema es menor que el caso normal. Por lo tanto, es claro que el cortocircuito hace que la velocidad del vehículo disminuya y también lo hace la oscilación en el flujo de potencia de propulsión. Como resultado, en el caso de fallo, el pico de velocidad disminuye relativamente durante la aceleración mientras el vehículo tiende a consumir más combustible durante la desaceleración.

Cheng nos muestra en la referencia [34] una manera de optimizar la operación del motor de combustión interna minimizando las emisiones y maximizando el ahorro

energético. Para ello, utiliza un convertidor electromecánico conocido como la transmisión eléctrica variable (EVT), Figura 55, que permite una transmisión continuamente variable, un motor de arranque, y un generador. Es especialmente adecuado para los vehículos eléctricos híbridos (HEV) como en la configuración serie, paralelo y sistema de transmisión dividida de la energía híbrida.

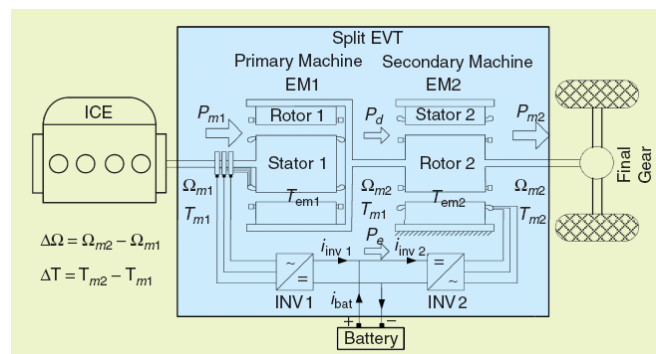


Figura 55. Vehículo híbrido eléctrico usando un divisor EVT

Los resultados obtenidos en la simulación demuestran que el divisor EVT no sólo satisface el rendimiento del vehículo, sino también optimiza la operación del ICE. Como resultado, el consumo de combustible se reduce en comparación con un vehículo convencional.

### 3.4.1.1.- Vehículos híbridos eléctricos en serie

Jalalifar en la referencia [35] nos muestra el uso de una técnica de linealización por realimentación de entrada – salida combinada con un observador backstepping de adaptación en el marco de referencia del estator del motor de inducción utilizando en los vehículos eléctricos híbridos en serie. Una de las mejores ventajas de este método de control es la eliminación del sensor de flujo y disminuye el costo de control, además, el sistema de control es robusto respecto a las variaciones de las resistencias y el par de carga externo.

Los resultados obtenidos por Jalalifar confirman la validez y ejecución de la estrategia de control del motor de inducción propuesto para la utilización en los vehículos eléctricos híbridos en serie. En la Figura 56 se muestra el diagrama de bloques utilizado en la simulación.



trabajo se encuentra lejos de la curva óptima. Por ello, proponen el uso de la batería para “suavizar” los transitorios debidos a que el punto de operación del motor se desliza en una estrecha banda a lo largo de la curva óptima de eficiencia. Para ello, implementan un algoritmo de control predictivo del modelo (MPC). Los resultados obtenidos al realizar el test UDDS es que se mejora la economía de combustible.

Razavian [38] muestra un sistema de supervisión en tiempo real, el cual determina la cantidad adecuada de energía que debe ser generada por las fuentes de a bordo. En su trabajo, Razavian utiliza ultra condensadores para el almacenaje de la energía en vehículos híbridos eléctricos en serie. Los ultra condensadores son ideales para las aplicaciones del vehículo híbrido porque tienen una mayor eficiencia y densidad de potencia, y la vida útil es mucho más larga en comparación con las baterías de NiMH y Li – ión. Por el contrario, su relativa baja densidad – energía y la disipación interna de la energía los hace inadecuados para aplicaciones de EV y PHEV. El resultado de dicho controlador muestra unos resultados óptimos.

En la referencia [39], Evangelou presenta modelos matemáticos para proporcionar una precisa predicción de la respuesta dinámica de los vehículos eléctricos híbridos. El modelo está calificado sobre todo para el equilibrio general de entrada y salida de la energía del HEV. Se demuestra que el uso de una transmisión continuamente variable ayuda a reducir la energía total requerida para completar el ciclo de accionamiento completo, lo que conduce a un ahorro de combustible.

### ***3.4.2.- Vehículos híbridos eléctricos enfufables***

Millner, en la referencia [40], propone tres mejoras en PHEV las cuales pueden mejorar la economía. (Ver Tabla 16)

En la Figura 57, se muestra el modelo de eficiencia energética como una función del nivel de energía a través de los componentes, las fuentes externas de energía y las condiciones de conducción.

En la referencia [41] se introduce en primer lugar el funcionamiento de la maquina eléctrica, ya sea como motor o generador.

Mejoras	Ventajas
Incorporación de la información de la ubicación en el algoritmo de gestión de la energía del coche	Reduce el consumo de combustible a través del conocimiento previo de la próxima ruta y la energía necesaria
Uso de la batería del vehículo mientras está estacionado	Compensa los picos cortos en planta a escala comercial, la demanda eléctrica para reducir los cargos por demanda, puede proporcionar ingresos adicionales para pagar la batería
El ciclo de vida de la batería debe ser maximizada para evitar los costos de reemplazo de ésta	Se presenta un modelo de batería para realizar las baterías de iones de litio y se utiliza para confirmar que las estrategias anteriores son compatibles con la larga duración de la misma

Tabla 16: Mejoras propuestas por Millner [40] para los PHEV

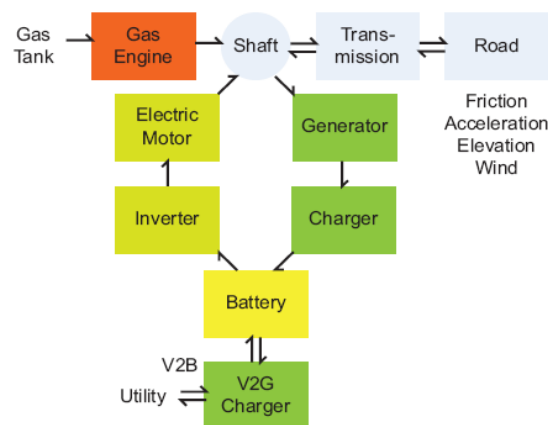


Figura 57. Diagrama de bloques de la simulación del PHEV

### 3.4.3.- Vehículos totalmente eléctricos

Para maximizar la eficiencia energética, y en consecuencia, el rango de los vehículos totalmente eléctricos, se logra, principalmente, mediante el control integrado y las estrategias de operación. Siendo el objetivo principal de estas estrategias de control, la cooperación entre la transmisión eléctrica y el sistema de frenado regenerativo. La amplia fuente de información con sensores de a bordo, incluyendo el sistema de navegación, información procedente de los satélites, coche a coche, la comunicación coche a



infraestructura y sistemas de radar y la cámara de a bordo; se utilizan, principalmente, para maximizar la eficiencia energética.

Knoedler nos muestra, en la referencia [42], las soluciones para lograr la máxima eficiencia energética y minimizar las pérdidas de energía en todas las condiciones de contorno de tráfico que varían dinámicamente. Además, muestra que las tecnologías desarrolladas se pueden adaptar a HEV y vehículos convencionales.

En las ciudades, con una concentración cada vez mayor de vehículos, el aire y la contaminación acústica, todos ellos representan un problema permanente. Un pequeño coche eléctrico no produce gases y disminuye el ruido, lo que le hace ideal para los centros de las ciudades. Además, al poseer un tamaño reducido, es más fácil encontrar una plaza de aparcamiento y maniobrar en espacios reducidos. Dado que la mayoría de las personas que trabajan en el centro de la ciudad, viven cerca de ésta, la carga de las baterías puede en muchos casos estar limitada con la finalidad de que los propietarios recarguen durante la noche. También, si el vehículo posee tres ruedas se reduce el coste de producción y mantenimiento. El único inconveniente es la estabilidad en las curvas si se compara con los vehículos de cuatro ruedas. A partir de todas estas hipótesis, Vasiljevic en la referencia [43] nos muestra el modelo dinámico y la simulación de un coche eléctrico de tres ruedas. En la Figura 58 se muestra el coche experimental.



Figura 58. Coche experimental de tres ruedas

Hay tres modos principales de modos de conducción: unidad central, unidad independiente de dos ruedas y de accionamiento independiente en las cuatro ruedas. Debido a las ventajas técnicas únicas y la buena perspectiva de aplicación del accionamiento independiente de las cuatro ruedas en los coches eléctricos han atraído la atención en todo el mundo. Las ventajas del vehículo eléctrico con accionamiento de las cuatro ruedas independientes son las siguientes:

- 1) El sistema de transmisión simplificado hace más ligero los vehículos y promueve la eficiencia de la transmisión
- 2) El sistema de frenado regenerativo se puede aplicar a cada rueda y mejorar la eficiencia de recuperación de energía
- 3) Es fácil implementar el chasis electrónico

En la referencia [14], se muestra el control dinámico de un vehículo eléctrico de propulsión independiente de las cuatro ruedas (Ver Figura 59). En el cual se establece un modelo de vehículo para la simulación dinámica comparando los resultados en una carretera en buen estado y otra con diferentes coeficientes de adhesión siendo la velocidad del vehículo de 60 km/h y un peralte de 15 deg/s. La aceleración lateral, el ángulo de deslizamiento y la velocidad de giro de los dos caminos diferentes se estudiaron comparativamente. La aceleración lateral, la velocidad de guiñada y el ángulo de deslizamiento pueden estar controlados perfectamente por el par independiente basado en las limitaciones de la asignación de par, lo que hace que sea posible para el vehículo que se mueva a lo largo de la trayectoria del objetivo. Sin embargo, los resultados de simulación muestran que es imposible controlar bien la actitud del vehículo por control de par igual en la carretera con un coeficiente de adherencia de división. Por el contrario, el control de la asignación de torsión independiente, tiene un gran potencial para la tecnología avanzada, especialmente para las prestaciones dinámicas y de seguridad.

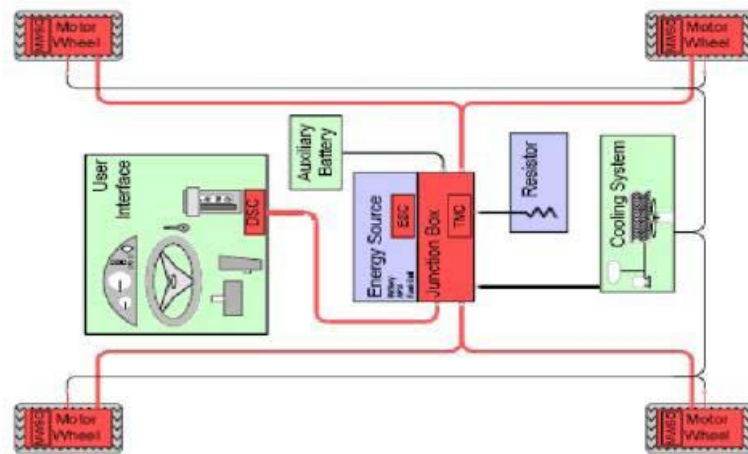


Figura 59. Estructura típica de un vehículo eléctrico con accionamiento de las cuatro ruedas independientes

La referencia [44], Cardelli presenta un análisis y modelado de simulación de un coche eléctrico modernizado. En la Figura 60 se muestra el diagrama de bloques del diseño Smart Roadster eléctrico. Las actuaciones de los vehículos, incluyendo el consumo de energía y el campo de prácticas y el estado de carga y la corriente suministrada por la batería, se han investigado sobre los perfiles de conducción urbana e interurbana.

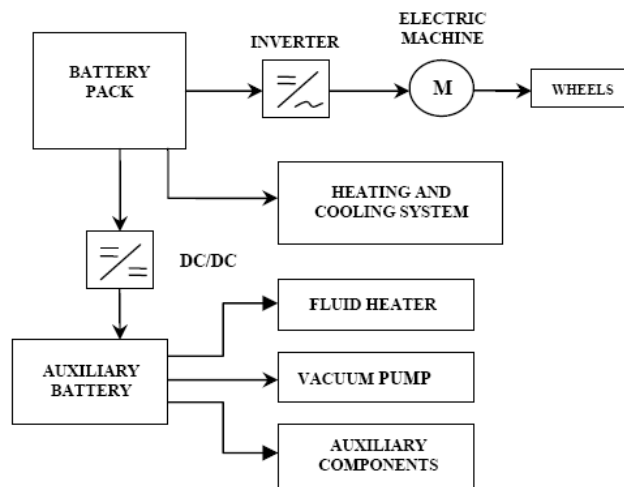


Figura 60. Diagrama de bloques del diseño Smart Roadster eléctrico

El coche eléctrico no es atractivo en estos momentos debido a tres razones: la primera, es el alto precio de los mismos; la segunda, la limitación de kilómetros realizados y por último, el tiempo de recarga de la batería. Sin embargo, Zarkesh [45] nos muestra que con el uso del alternador en el sistema de carga de baterías de los coches eléctricos puede resolverse dos de los tres problemas antes mencionados: la zona de avance y tiempo de carga.

El principio de esta idea es el uso de un alternador que está conectado al eje de las ruedas traseras. A medida que el eje de rotación del alternador genera la energía eléctrica, éste se utiliza para cargar las baterías. La disposición de los elementos se puede ver en la Figura 61.

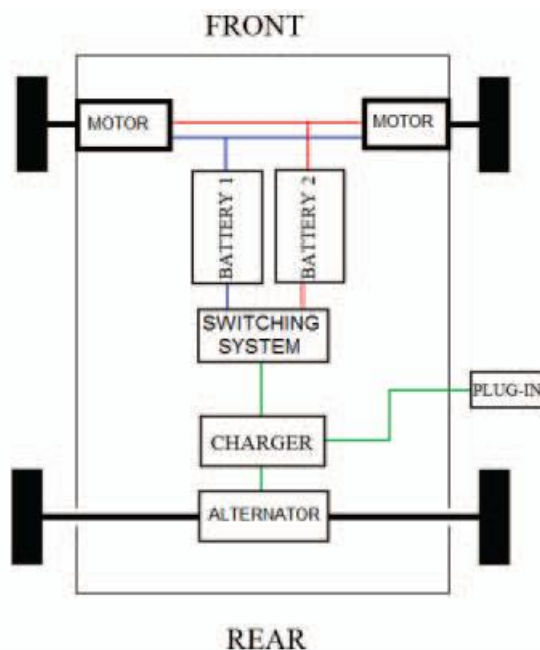


Figura 61. Disposición del sistema para cargar coches eléctricos con alternador

### 3.5.- Localización de las estaciones de carga de los vehículos eléctricos

Debido a los problemas medioambientales, la movilidad eléctrica es una de las alternativas que hoy en día está recibiendo una gran atención. De hecho, en los últimos años los vehículos eléctricos han entrado en el mercado mundial de los coches. Esta tecnología revolucionaria requiere un rápido desarrollo de las estaciones de carga ya que la cuestión clave en este sistema es la necesidad de recargar la batería de los vehículos eléctricos.

Sara Mehar y compañía [46] proponen un algoritmo optimizado para localizar las estaciones de carga de los vehículos eléctricos. En primer lugar, determinan las limitaciones, y a continuación, proponen un algoritmo de optimización, al cual denominan OLoCs (Optimized Location Scheme for electric charging stations), es decir, un algoritmo que permite la localización óptima de la estaciones de carga.

El objetivo que persiguen es reducir al mínimo los costos de implementación de las nuevas estaciones de carga con el fin de satisfacer las demandas de los clientes teniendo en cuenta muchos factores y limitaciones que puede tener un modelo real, los cuales se pueden utilizar en cualquier área o topología. Estos son:

- ❖ La densidad del tráfico en la zona (ayuda a deducir la demanda de energía),
- ❖ El coste del terreno, el costo de la infraestructura, costo de la inversión,
- ❖ El coste de transporte hacia la estación de carga,
- ❖ La capacidad de la estación de carga (capacidad),
- ❖ Capacidad de red eléctrica (Capacidad total).

El algoritmo para optimizar la función está basado en el de algoritmos genéticos. La única modificación realizada es la adición de un nuevo operador para el algoritmo genético clásico, así se evita la convergencia prematura y mejora la eficiencia del algoritmo. Por último, se representa los resultados de la ubicación de las estaciones de carga en el mapa estudiado.

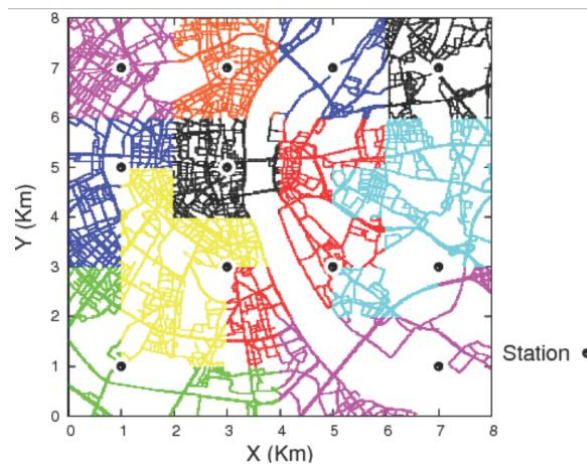


Figura 62. Localización óptima de las estaciones de carga realizado por Sara Mehar [46]

Jun He y compañía [47] proponen un algoritmo genético híbrido para la localización de estaciones de carga para los vehículos eléctricos. Este algoritmo combina el algoritmo genético estándar con localización alternativa y el algoritmo de asignación. De acuerdo con el multi – objetivo de la planificación de la estación de carga, utilizar el concepto de multigrupo hace la búsqueda de colaboración evolutiva. Basado en el Sistema de Información Geográfica, se considerará la influencia de la información geográfica en la

ubicación de la estación de carga. Se demostró que el modelo y el método tienen una gran corrección y eficacia con la ayuda de un ejemplo de planificación de una estación de carga para una ciudad.

En la referencia [48], Chun-Lien y compañía, presentan un algoritmo dedicado a la localización óptima de las estaciones de carga de los vehículos eléctricos en un sistema de distribución dado usando los algoritmos genéticos, donde las cargas diarias varían en función del tiempo, son consideradas junto con los patrones de carga de los vehículos eléctricos al azar, incluyendo la hora de inicio, duración y potencia de la carga. El problema se formula cómo un problema de optimización combinatoria no diferencial, donde las pérdidas del sistema son minimizadas para la capacidad y las limitaciones de operación del sistema. Para validar el algoritmo y demostrar su aplicabilidad a sistemas grandes, utilizaron un sistema de distribución de práctica compuesta por 20 autobuses.

Si la zona de estudio es muy grande, esto dificulta la obtención de la solución por ello Shaoyun Ge y compañía [49] proponen un método de localización y dimensionamiento de la estación de carga para vehículos eléctricos basados en la partición de rejilla. Este método está dirigido a: minimizar la pérdida de los usuarios durante el camino a la estación de carga; la zonificación del área de planificación con el método de partición de la red, y la elección de la mejor ubicación de cada partición mediante los algoritmos genéticos en la consideración de la densidad del tráfico y de las limitaciones de capacidad de la estación de carga.

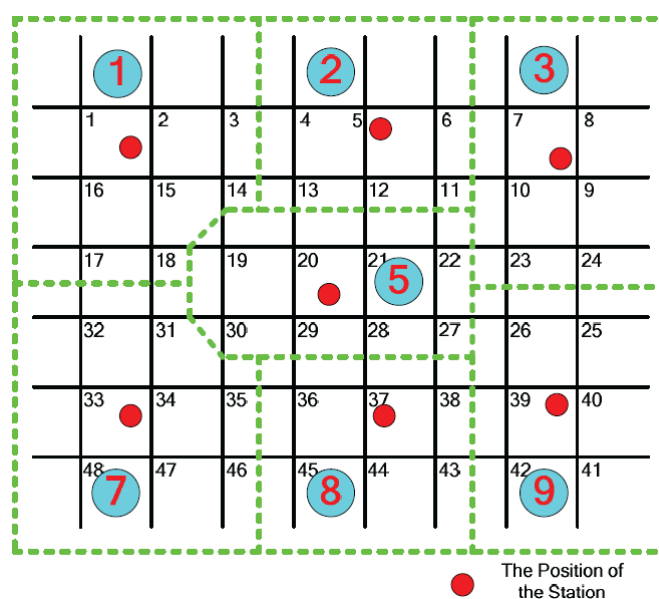


Figura 63. Cobertura de las particiones y la capa de las estaciones de carga [49]

En la planificación óptima de las estaciones de carga, Samaneh Pazouki y compañía [50] consideran las pérdidas y la tensión. Emplean programas basados en el tiempo de la respuesta de la demanda para mejorar las pérdidas y la tensión. El tiempo de uso, los precios críticos pico y los precios en tiempo real son aplicados en el problema. Para llevar a cabo la resolución del problema, utilizan algoritmos genéticos. En la siguiente figura, Figura 64, se muestra el método utilizado

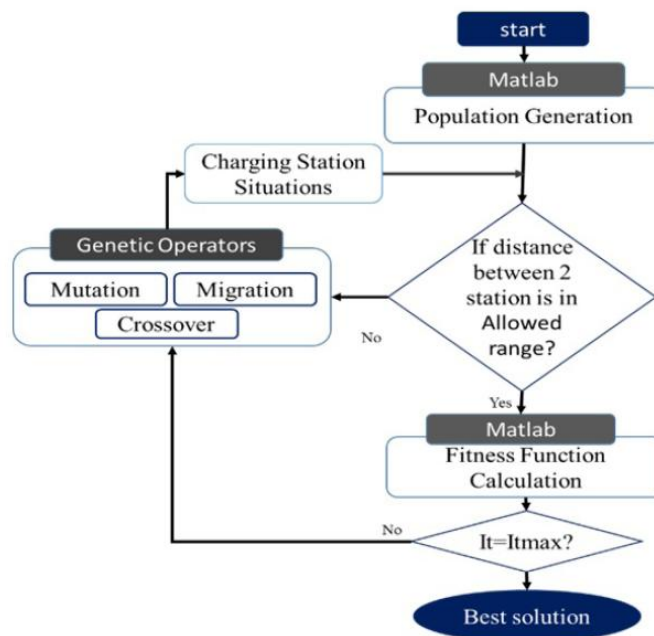


Figura 64. Método propuesto por Samaneh Pazouki

### 3.6.- Impacto sobre la red

La recarga masiva de las baterías de los vehículos eléctricos tendrá un impacto técnico y económico en el sistema eléctrico, tanto en la operación del sistema eléctrico como en los posibles refuerzos necesarios de la actual infraestructura eléctrica.

Por todo esto, Oliveira en la referencia [51] investiga los efectos de los vehículos eléctricos enchufables y los vehículos híbridos eléctricos enfuchables, la generación de energía a partir de las mareas y del viento para recargar la batería de los vehículos híbridos y así introducir la energía renovable en los sistemas de distribución. Además, presenta un sistema de distribución con la generación de energía renovable. Los resultados mostraron que la penetración de energía renovable aumenta debido a que los vehículos se consideran como sistemas de almacenamiento de energía y ayudan en el equilibrio de la energía del sistema. Para los fines de los servicios auxiliares de V2G (Vehicle-to-grid, traducido del

inglés como "del vehículo a la red"), describe un sistema en el cual la energía puede ser vendida a la red eléctrica por el conductor de un vehículo todo-eléctrico o híbrido enchufable, cuando éste es conectado a la red en los momentos que no se use para el transporte. Alternativamente, cuando las baterías del coche necesiten ser recargadas, el flujo se invertirá y la electricidad fluirá de la red al vehículo. Los resultados muestran que los PHEV y PEVS encajan mejor en la regulación del mercado, por lo que es necesaria una planificación de la capacidad precisa para nuevos estacionamientos y las fuentes distribuidas.

Kadar en la referencia [52] nos muestra diferentes soluciones para la carga y recarga de las baterías de los coches eléctricos. Una de ellas es la transmisión de energía inalámbrica a alta frecuencia entre la cinta de acero de las ruedas de los coches y los electrodos enterrados debajo de la superficie de la carretera. Otra solución es la carga por medio de un sistema de energía fotovoltaica el cual puede generar la suficiente energía para el coche.

La nueva conciencia por el medio ambiente se hace notar por el uso de los vehículos eléctricos, y la generación de electricidad renovable. Por supuesto, la electricidad generada por energía fotovoltaica es una buena fuente de combustible para el tráfico y favorable al medio ambiente ya que al generarla no se producen emisiones a la atmosfera.

En el otro lado, los vehículos eléctricos se pueden cargar de diferentes maneras:

- ❖ Por el cargador rápido durante una breve parada mientras se viaja
- ❖ Por el cambio de la batería
- ❖ Por el cargador normal en casa por la noche
- ❖ Durante el tiempo de trabajo en el garaje de la oficina.

Hay más opciones de cómo combinar la fuente fotovoltaica con las baterías de los vehículos eléctricos:

- A. Película delgada fotovoltaica pintada en el chasis del coche: otra solución es las pinturas resistivas de luz en la superficie del coche. Las soluciones de la tecnología fotovoltaica con película delgada son baratas y pueden ser 'pintadas' en el cuerpo del coche.



- B. Sistema Fotovoltaico en casa con una capacidad de almacenamiento local
- C. Sistema central fotovoltaica en el estacionamiento de la casa

Para mejorar la eficiencia del sistema eléctrico es muy importante que la demanda eléctrica se desplace hacia las horas de menor consumo; y es ahí, donde la recarga lenta nocturna del coche eléctrico puede jugar un papel fundamental en el aplanamiento de la curva de demanda. Además, la recarga del vehículo eléctrico en las horas nocturnas permitirá optimizar las infraestructuras eléctricas y aprovechar la energía renovable que en ocasiones se deja de producir por la noche al no haber suficiente demanda para poder integrarla en el sistema. A largo plazo, el coche eléctrico puede convertirse en un sistema reversible de almacenamiento distribuido de energía, pudiendo verter de nuevo a la red, en los momentos de máxima demanda, la energía que se ha almacenado durante la noche. Esta interacción exigirá la implantación de sistemas de comunicación entre los usuarios y el operador del sistema.[53]

El proyecto Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid) es una forma de gestión eficiente de la electricidad que utiliza la tecnología informática para optimizar la producción y la distribución de electricidad con el fin de equilibrar mejor la oferta y la demanda entre productores y consumidores. Este sistema consiste en un modo especial de conexión del vehículo eléctrico con la red, de modo que se establece un vínculo inteligente entre ambos elementos (batería y red eléctrica), que no solo optimiza los tiempos de carga de las baterías, sino que establece una verdadera red de gestión de energía en el que los vehículos conectados pasan a convertirse en acumuladores de energía que dan servicio a la red en momentos de picos de demanda. Este flujo bidireccional de la energía eléctrica define un mapa eléctrico totalmente novedoso del que tanto la red como el usuario salen beneficiados [54].



Figura 65. Esquema básico de la Red Eléctrica Inteligente

# Capítulo 4

---

## *Modelado de un vehículo eléctrico*

### **4.1.- Introducción**

En este capítulo se presenta el procedimiento de obtención del modelo de un vehículo eléctrico, la validación del mismo mediante su comparación con resultados obtenidos por otros autores y la simulación del modelo en Matlab/Simulink.

## 4.2.- Simulación de un vehículo eléctrico

En las secciones previas, se han definido las ecuaciones de la dinámica del vehículo y de la batería. Para ver cuanta distancia puede recorrer un vehículo antes que la batería se descargue, se va a simular paso a paso el proceso a través de un ciclo de conducción. La manera de realizar este proceso está representado en el siguiente flujo grama en la Figura 68.

El primer paso es cargar los datos de velocidad para el ciclo de conducción seleccionado. El programa, realizado en Matlab/Simulink, da la opción de elegir diferentes tipos de ciclos de conducción. En primer lugar da la opción de elegir entre un ciclo con valores reglados o experimentales (Figura 66).

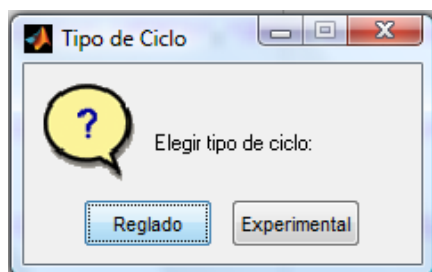


Figura 66. Mensajes en Matlab/Simulink para la elección del ciclo de conducción: Reglado o experimental

En el caso de elegir ciclo reglado, se pueden optar por los siguientes ciclos:

- ✓ FTP75
- ✓ UNECE Elementary Urban Cycle
- ✓ UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered Vehicles)
- ✓ UNECE Reg 83 Extra-Urban Driving Cycle

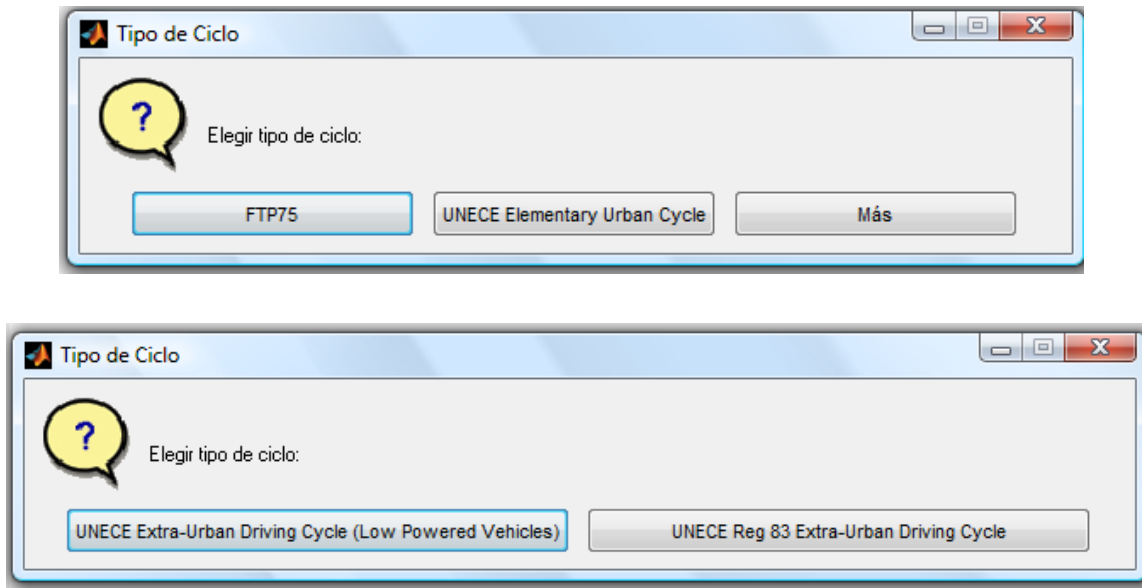


Figura 67. Mensajes en Matlab/Simulink para la elección del ciclo de conducción: Ciclos Reglados

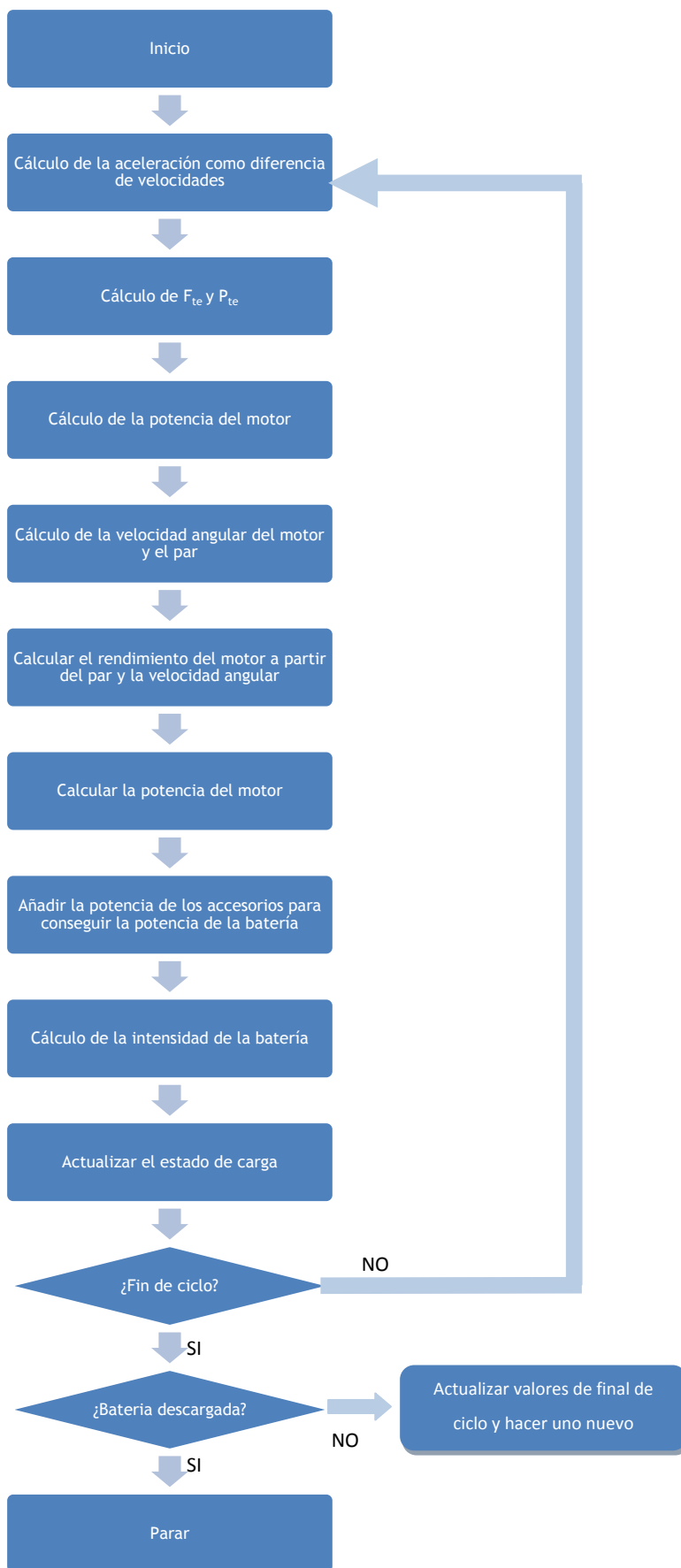


Figura 68. Diagrama de flujo de la simulación de la autonomía

Si se opta por la opción de ciclo experimental, el programa da a elegir entre: tráfico fluido y tráfico no fluido.

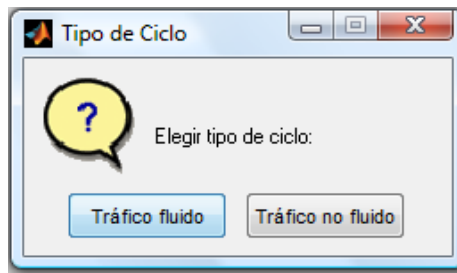


Figura 69. Mensajes en Matlab/Simulink para la elección del ciclo de conducción: Experimental

Estos valores son leídos desde Matlab/Simulink a partir de un fichero Excel. En el punto 8.2.- Ciclos de conducción se explican los diferentes ciclos de conducción y se muestran gráficamente los valores de la velocidad en función del tiempo.

El siguiente paso es establecer los parámetros del vehículo como la masa, el tipo de batería, potencia consumida por los accesorios, etc. El programa da la opción de poder elegir el tipo de batería y a partir de aquí el programa actualiza los valores dependiendo del tipo de batería elegido.

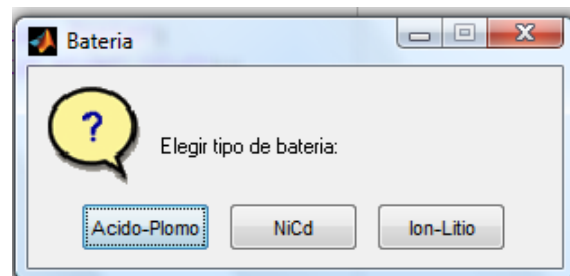


Figura 70. Mensajes en Matlab/Simulink para la elección de la batería

A continuación, se recoge una estimación muy somera de los consumos de los elementos que tiene el vehículo.

Accesorio	Cant	Consumo (W)	Total (W)	Empleo
Radio	1	30	30	Aleatorio
Luces de señalización	4	20	80	Noche
Luces de largo alcance	2	70	140	Noche y puntualmente
Aire acondicionado	1	200	200	Calor o frío moderado
Aire acondicionado	1	500	500	Calor o frío extremo
Ordenador e instrumentos	1	20	20	Permanente

Tabla 17: Potencia de los accesorios en un vehículo

Como se puede observar en el apartado 8.3.-Datos de entrada, la potencia de los accesorios se ha considerado de 150 kW, un promedio de uso de los accesorios dependiendo de su uso.

Durante la simulación hay que almacenar la carga eliminada de la batería, la profundidad de descarga y la distancia recorrida para tener los datos de partida para el siguiente ciclo de simulación.

La energía fluye en una batería de un vehículo eléctrico como se muestra en la Figura 71. Para predecir el rango, se calcula la energía requerida para mover el vehículo en cada segundo del ciclo de conducción y los efectos de la energía consumida. El proceso se repite hasta que la batería está descargada. Es importante recordar que al usar un segundo como intervalo de tiempo, la potencia y la energía son iguales.



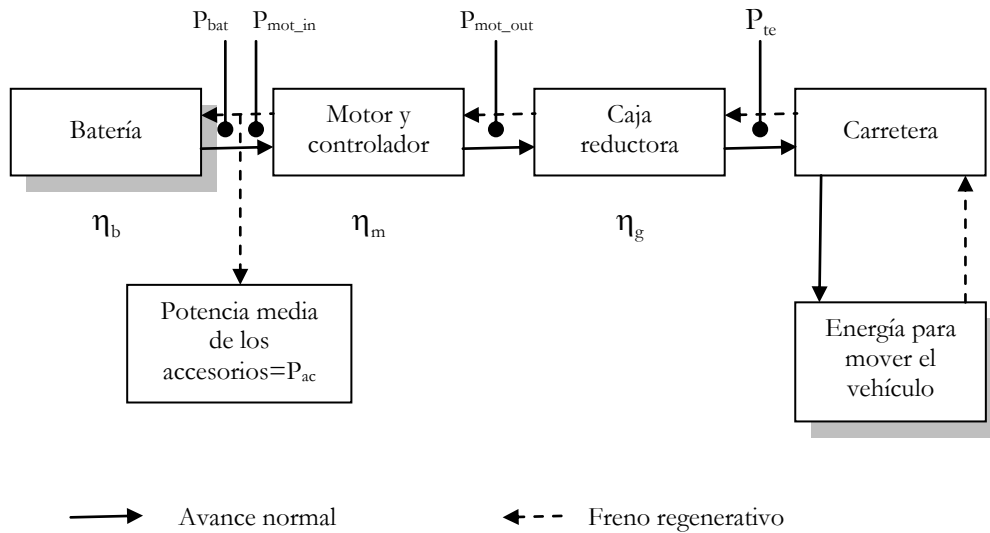


Figura 71. Flujo de energía en un sistema de tracción eléctrica con freno regenerativo

Tras cargar los datos de entrada, se obtiene el valor de la aceleración para cada instante como diferencia de las velocidades:

$$a_i = v_i - v_{i-1} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Siendo N el valor del tiempo dependiendo del ciclo de conducción elegido.

A partir de los valores de la aceleración, la velocidad y la dinámica del vehículo (ver apartado 2.5.-Modelado dinámico de un vehículo) se obtiene la fuerza total de tracción y la Potencia total de tracción:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{ta} + F_{wa}$$

$$P_{te} = F_{te}v$$

El rendimiento de la transmisión,  $\eta_g$ , se ha asumido que es constante debido a que los vehículos eléctricos normalmente poseen una única marcha.

La potencia mecánica requerida por motor será la potencia necesaria en las ruedas condicionada por las pérdidas en la transmisión,

en caso de tracción:

$$P_{mot\_out} = \frac{P_{te}}{\eta_g}$$

en caso de retención:

$$P_{mot\_out} = P_{te} \cdot \eta_g$$

El rendimiento del motor y su controlador se considera como un conjunto. El rendimiento del motor de inducción varía considerablemente con la potencia, el par y también con el tamaño del motor. El rendimiento del motor queda modelado con la siguiente ecuación:

$$\omega = G \frac{v}{r}$$

$$T = \frac{P_{mot\_out}}{\omega}$$

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C}$$

donde  $k_c$  es el coeficiente de pérdidas en el cobre,  $k_i$  es el coeficiente de pérdidas en el hierro,  $k_w$  es el coeficiente de pérdida por fricción con el aire y  $C$  representa la constante de pérdidas que se aplica a cualquier velocidad.

La potencia eléctrica requerida por el motor será la mecánica condicionada por las pérdidas calculadas en la anterior ecuación,

en caso de tracción:

$$P_{mot\_in} = \frac{P_{mot\_out}}{\eta_m}$$

en caso de retención:

$$P_{mot\_in} = P_{mot\_out} \cdot \eta_m$$

En este punto, se debe considerar otros sistemas eléctricos del vehículo, las luces, indicadores, calentadores, radio, etc. Denominaremos la potencia para los accesorios como  $P_{ac}$ . Se obtiene así la potencia requerida de la batería:

$$P_{bat} = P_{mot\_in} + P_{ac}$$

Cuando se frena, la potencia del motor será negativa reduciendo la magnitud de la potencia total.

Para el procedimiento de la simulación de una batería, lo primero que hay que calcular es el voltaje a circuito abierto, (ver apartado 2.6.2.-Circuito equivalente), el cual depende del estado de carga de la misma. A partir del cual junto con la potencia de la batería, se obtiene el valor de la intensidad de la batería:

$$P_{bat} = V \times I = (E - IR) \times I = EI - RI^2$$

$$I = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP_{bat}}}{2R}$$

En el caso que la potencia de la batería sea negativa, es decir, está en frenada regenerativa, la intensidad será:

$$P_{bat} = V \times I = (E + IR) \times I = EI + RI^2$$

$$I = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 4RP_{bat}}}{2R}$$

El valor de la resistencia interna de la batería, R, es diferente cuando la batería se carga o se descarga. En el caso de frenada regenerativa, una buena aproximación es doblar el valor, por lo que la ecuación para la obtención del valor de la intensidad quedará:

$$I = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 8RP_{bat}}}{4R}$$

A continuación, se calcula el valor de la carga eliminada:

En caso de tracción:

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t \cdot I^k}{3600}$$

En caso de retención:

$$CR_{n+1} = CR_n - \frac{\delta t \cdot I}{3600}$$

Finalmente, se calcula la profundidad de descarga de la batería

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p}$$

Teniendo en cuenta que la batería no esté descargada, se repite el proceso un segundo más tarde con la velocidad siguiente del ciclo.

En capítulo 8.4.-Modelado Vehículo Eléctrico en Matlab/Simulink se muestra el modelo del vehículo desarrollado en el programa Simulink.

### 4.3.- Comparativa de los diferentes tipos de batería

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos en la simulación del vehículo eléctrico y los diferentes tipos de baterías.

En primer lugar, se va a realizar una comparativa entre los tres tipos de baterías elegidas en la simulación, cuyas especificaciones son las siguientes:

	Ácido – plomo	Ni – Cd	Ión – litio
<b>Voltaje celda (V)</b>	2	1,2	3,2
<b>Nº celdas</b>	195	325	192
<b>Coefficiente de Peukert</b>	1,2	1,05	1,05
<b>Resistencia interna (Ω)</b>	0,022	0,06	0,06

Tabla 18: Características técnicas de diferentes baterías

#### 4.3.1.- Influencia de la temperatura

Para comparar la salida de la simulación, se ha elegido el ciclo de conducción FTP 75, la carretera por donde circula el vehículo no posee inclinación, únicamente está en el vehículo el conductor y el tiempo está en calma (velocidad de aire nula). Se simula un ciclo de descarga de la batería, hasta que la profundidad de descarga sea 0,9, y se obtiene la distancia recorrida en este período de tiempo.

Como se puede observar, la temperatura influye en la autonomía de la batería, ya que si se aumenta o disminuye la temperatura, la autonomía aumenta o disminuye respectivamente. En la Tabla 19, se observa que para el caso de una batería de Ión – Litio, la diferencia de autonomía si la temperatura está entre 10 °C y 35 °C es de 124,73 km, siendo esta diferencia de 32,74 km en el caso de una batería de ácido – plomo y de 19,2 km si se está hablando de una de níquel – cadmio. Esto es debido a la variación de la capacidad con respecto a la temperatura, la cual se multiplica por un coeficiente que refleja esta variación. Este coeficiente es dado por las casas que fabrican estas baterías (2.7.-Influencia de la temperatura en la batería).

	Ácido – plomo			Ni – Cd			Ión – litio		
Temperatura (°C)	10	26,7	35	10	26,7	35	10	26,7	35
Distancia recorrida (Km)	75,93	98,44	108,67	125,33	140,14	144,53	141,24	245,74	265,97
Profundidad de descarga	0,9001	0,9002	0,9000	0,9000	0,9001	0,9001	0,9003	0,9000	0,9000

Tabla 19: Variación de la autonomía con respecto a la temperatura en un vehículo eléctrico

### 4.3.2.- Influencia de la conducción

Dependiendo del ciclo de conducción, la autonomía de la batería es diferente. En este caso se ha simulado con la batería de ácido – plomo, con temperatura de 26,7 °C, sin velocidad de aire, únicamente se ha considerado la masa del conductor y sin inclinación de la calzada.

En la siguiente figura, Figura 72, se representa la distancia recorrida frente a la profundidad de descarga en los diferentes tipos de ciclos de conducción. El resultado obtenido es que en las mismas condiciones, con un modo de conducción UNECE Elementary Urban Cycle, se obtiene la mayor distancia recorrida, 123,78 km.

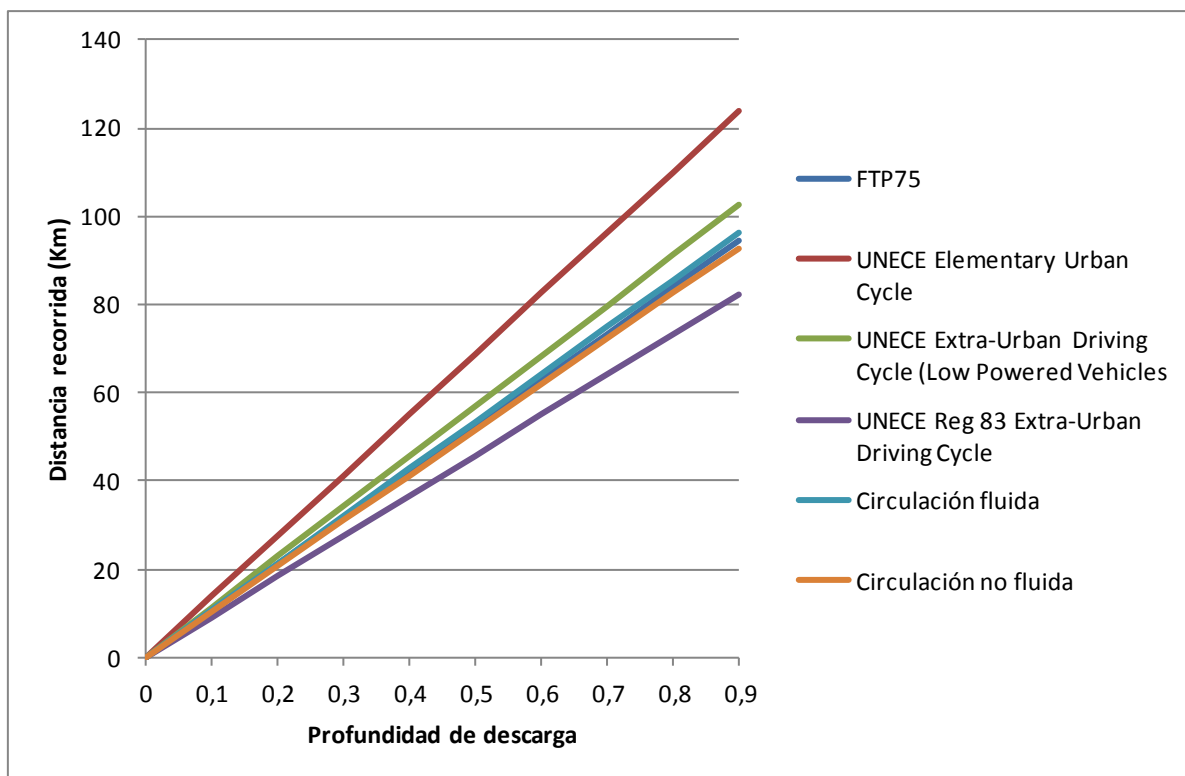


Figura 72. Autonomía del vehículo eléctrico en función del ciclo de conducción

### 4.3.3.- Influencia de los accesorios

Como se ha comentado en el apartado 4.2.-Simulación de un vehículo eléctrico, se ha recogido una estimación muy somera de los consumos de los elementos que tiene el vehículo, la cual se muestra en la Tabla 17.

Para analizar el impacto que tiene sobre la autonomía del vehículo el funcionamiento de estos accesorios se realiza la simulación de lo que se han considerados dos casos extremos. El más favorable correspondería a un día de temperaturas agradables y la radio apagada. Esto supone un consumo de los accesorios de 20 W, que son debidos a la potencia necesaria para alimentar el ordenador que gestiona el vehículo y los instrumentos del panel de conducción.

El segundo caso extremo, el más desfavorable, correspondería a la circulación en una noche de invierno, con frio intenso. Los accesorios en funcionamiento permanente serían la calefacción, las luces de señalización, el ordenador e instrumentos y puntualmente las luces de carretera (suponemos el 30 % del recorrido). Esto supone una potencia de 760 W.

Se ha simulado con el ciclo de conducción FTP 75, la temperatura ambiente de 26,7 °C, vehículo en vacío teniendo en cuenta la masa del conductor, sin inclinación en la calzada y sin la influencia del aire.

	Ácido – plomo		Ni – Cd		Ión – litio	
<b>Potencia accesorios (W)</b>	20	760	20	760	20	760
<b>Distancia recorrida (Km)</b>	100,38	91,30	143,08	130,56	250,28	228,90
<b>Profundidad de descarga</b>	0,9000	0,9003	0,9001	0,9000	0,9000	0,9001

Tabla 20: Variación de la autonomía con respecto a la potencia de los accesorios en un vehículo eléctrico

Como se puede apreciar, la influencia que tiene el funcionamiento de los accesorios del vehículo no implica una relevante variación en la autonomía. Para los casos extremos calculados, esta variación se establece en un 9,05%, 8,75% y 8,54% para la batería de ácido – plomo, níquel – cadmio e ión – litio, respectivamente. Para el resto de simulaciones, la potencia consumida por los accesorios se ha establecido en 150 W.

#### ***4.3.4.- Influencia de la masa***

La masa del vehículo eléctrico en vacío y un conductor ronda los 1605 kg. El peso máximo admitido, PMA, para el cual está diseñado el vehículo es de 1985 kg. Como se ha visto, el peso del vehículo tiene una gran influencia en las prestaciones del mismo. De igual manera, sucede para la autonomía.

Para medir el efecto de este aspecto se ha simulado el vehículo en ambas circunstancias extremas, con 1605 kg y con 1985 kg. El ciclo de conducción ensayado es el FTP 75 manteniendo la temperatura constante a 26,7 °C.

	Ácido – plomo		Ni – Cd		Ión – litio	
<b>Masa del vehículo (Kg)</b>	1605	1985	1605	1985	1605	1985
<b>Distancia recorrida (Km)</b>	98,441	81,533	140,142	119,332	245,745	209,958
<b>Profundidad de descarga</b>	0,9002	0,9001	0,9001	0,9000	0,9000	0,9000

Tabla 21: Variación de la autonomía con respecto a la carga del vehículo en un vehículo eléctrico

Los resultados obtenidos indican que el peso de la carga transportada tiene un gran impacto en la autonomía del vehículo.



# Capítulo 5

---

## *Modelado de un vehículo eléctrico híbrido en paralelo*

### **5.1.- Introducción**

En este capítulo se presenta el procedimiento de obtención del modelo de un vehículo eléctrico híbrido en paralelo, la validación del mismo mediante su comparación con resultados obtenidos por otros autores y la simulación del modelo en Matlab/Simulink.

## 5.2.- Simulación de un vehículo eléctrico híbrido en paralelo

El vehículo a simular dispone de un sistema híbrido en paralelo, con una configuración de dos ejes con acoplamiento de par que envía la potencia a las ruedas delanteras. A parte de esto, el motor térmico envía potencia al acoplador a través de la caja de cambios, la cual puede estar formada de 3, 4 ó 5 marchas. En el acoplador de par, el índice de transmisión entre el eje de salida y el eje proveniente de la caja de cambios se ha tomado la unidad, mientras que entre el mismo eje de salida y el eje proveniente del motor eléctrico se ha tomado por defecto 0,5 ya que el motor eléctrico gira a la mitad de velocidad que dicho eje de salida.

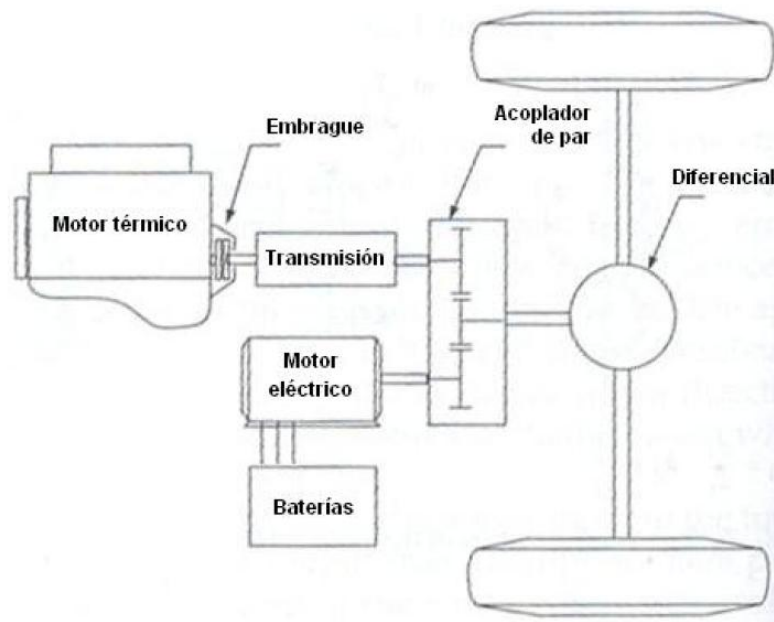


Figura 73. Esquema de la arquitectura de la planta híbrida

Esta configuración, como se ha comentado anteriormente, utiliza un motor térmico y uno eléctrico para propulsar el vehículo, así como para cargar las baterías.

Cuando un vehículo está funcionando en un patrón de conducción de parar y arrancar, la batería debe entregar su potencia al tren de propulsión con frecuencia. En consecuencia, la batería tiende a descargarse rápidamente. En este caso, es necesario mantener un estado de carga alto en la batería para asegurar que ésta sea capaz de suministrar la potencia suficiente al tren de accionamiento para apoyar la frecuente aceleración del vehículo. Las reglas básicas en esta estrategia de control es el uso del motor como la fuente primaria de energía tantas veces como sea posible y cargar la batería

siempre que el motor tenga un exceso de energía necesaria para la propulsión, sin que el estado de carga sea superior a su límite de carga completa [56].

La estrategia de control máximo se explica en la Figura 74. En esta figura, las curvas de potencia máximas de tracción híbrida (motor térmico más el motor eléctrico), la tracción del motor térmico por sí solo, de tracción del motor eléctrico solo y el frenado regenerativo se representan frente a la velocidad del vehículo. Las demandas de energía también se representan en diferentes condiciones, representadas por los puntos A, B, C, y D.

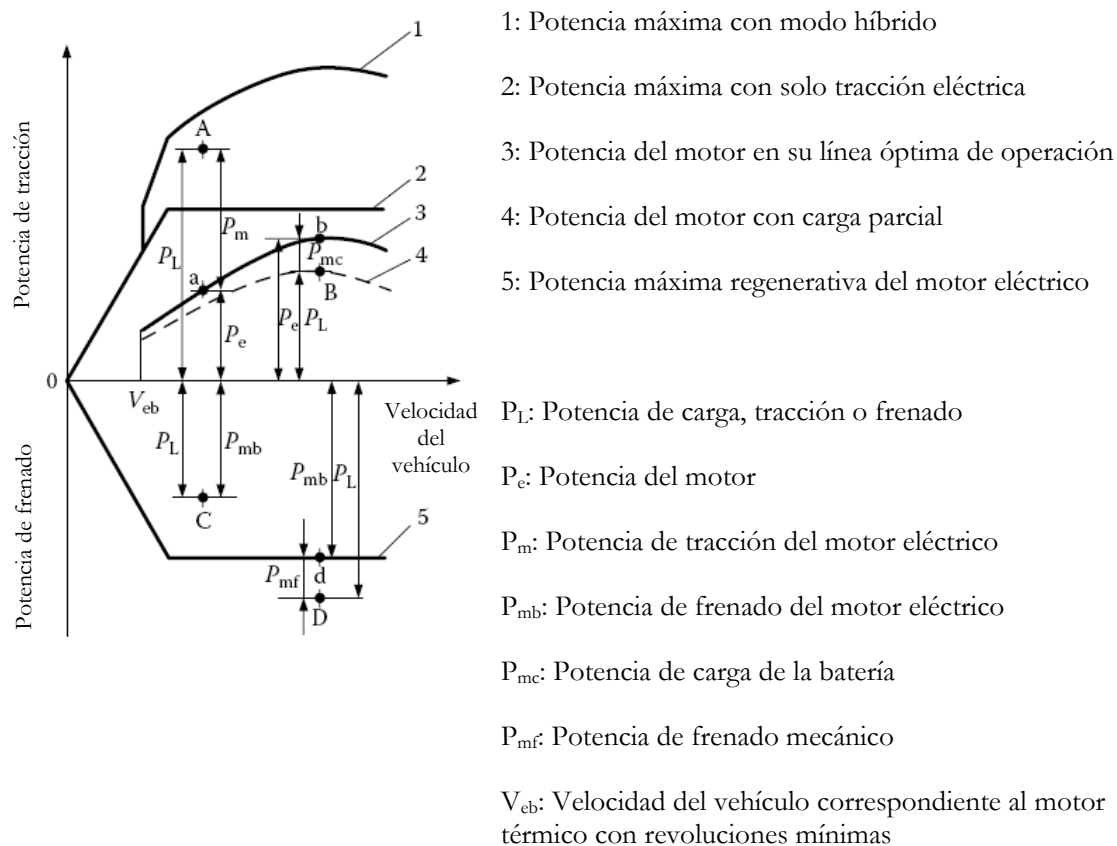


Figura 74. Demostración de varios modos de operación basados en la potencia demandada

Por esta razón, el control de la distribución de potencias entre el motor térmico y el eléctrico así como el calcular el punto óptimo de trabajo de ambos motores y el nivel de carga de las baterías se realiza a través de los distintos modos de funcionamiento.

Se han clasificado en seis modos de funcionamiento. La numeración que se les ha otorgado es mediante la cual se identifica en la simulación.

1. Eléctrico a baja velocidad. Este modo está activado cuando la velocidad del vehículo es inferior al mínimo que garantiza un rendimiento aceptable del motor térmico. En este modo, el motor térmico está apagado y el vehículo es propulsado únicamente por el motor eléctrico. Por ello, las baterías necesitan una cierta carga inicial para propulsar el vehículo hasta que el motor térmico entre en funcionamiento.

$$P_e = 0$$

$$P_m = P_L$$

$$P_{bat\_d} = \frac{P_m}{\eta_m}$$

Donde  $P_e$  es la potencia del motor térmico,  $P_L$  es la potencia que demanda el conductor por medio del pedal del acelerador,  $P_m$  es la potencia de salida del motor eléctrico,  $P_{bat\_d}$  es la potencia de descarga de la batería y  $\eta_m$  es el rendimiento del motor eléctrico.

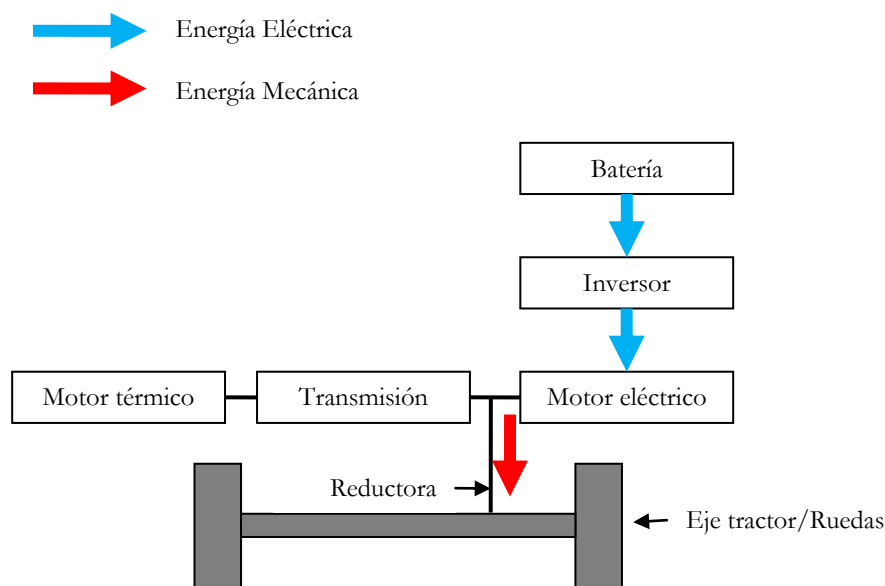


Figura 75. Diagrama del flujo de energía del modo sólo eléctrico

2. Propulsión híbrida. Cuando la potencia demanda por el conductor,  $P_L$ , representado por el punto A en la Figura 74, es mayor que la potencia que el motor térmico puede entregar, ambos, el motor térmico y el motor eléctrico, deben entregar su potencia al mismo tiempo, por lo que este

modo se activa. En este caso, el motor térmico entrega la potencia siguiendo la línea de máxima eficiencia. Para completar la potencia, se activa el motor eléctrico utilizando la energía almacenada en las baterías.

$$P_m = P_L - P_e$$

$$P_{bat\_d} = \frac{P_m}{\eta_m}$$

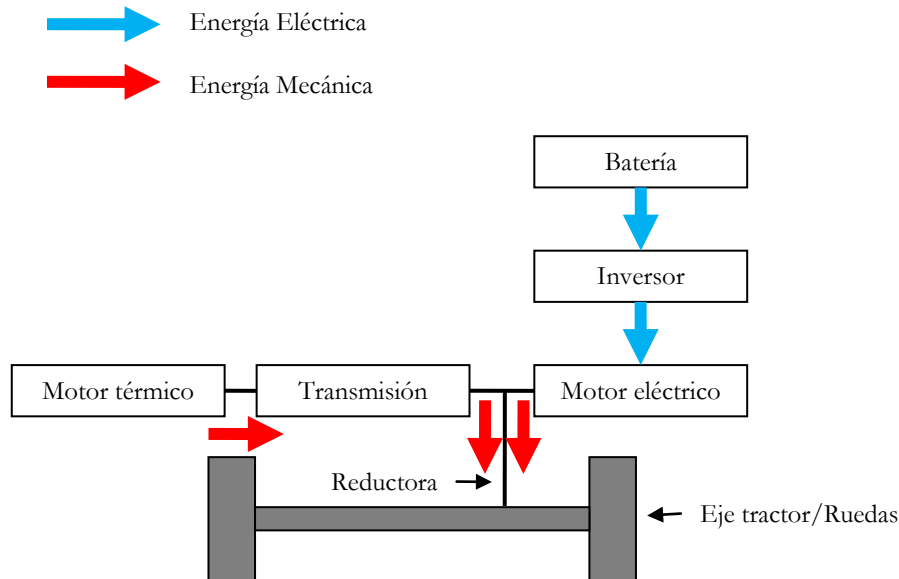


Figura 76. Diagrama del flujo de energía del modo híbrido

3. Recarga de las baterías. Este modo se activa cuando la potencia demandada,  $P_L$ , representada por el punto B en la Figura 74, es inferior al que suministra el motor térmico siguiendo la curva de máxima eficiencia. El par sobrante se envía al motor eléctrico, haciéndole trabajar como generador y recargando así las baterías. Cuando éstas están cargadas, este modo se desactiva.

$$P_m = (P_e - P_L)\eta_g$$

$$P_{bat\_d} = P_m\eta_m$$

Donde  $\eta_g$  es el rendimiento de la transmisión.

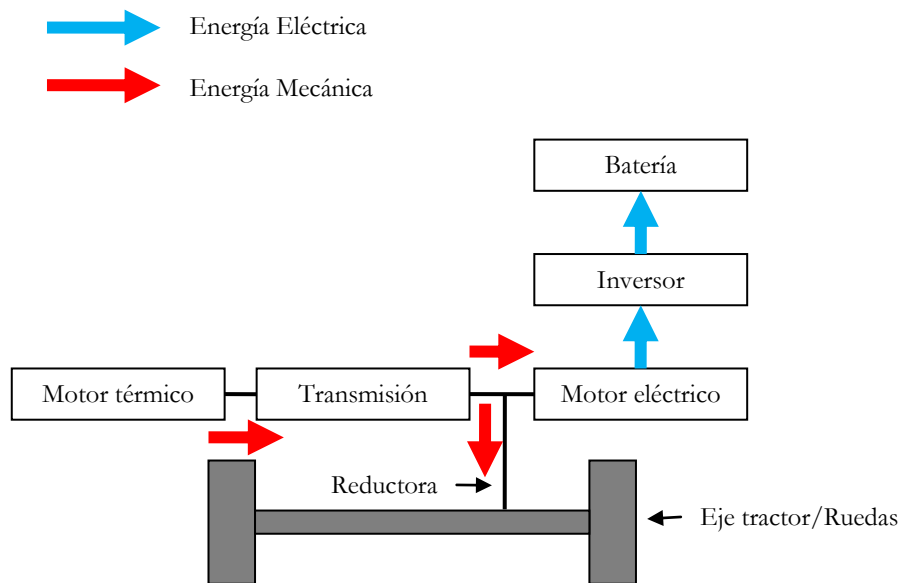


Figura 77. Diagrama del flujo de energía del modo recarga de baterías

4. Eléctrico puro. Este modo está activo cuando las baterías se han cargado por completo y se mantiene activo hasta que las baterías llegan a la carga mínima, excepto cuando el par exigido es superior al que puede dar el motor eléctrico y en caso de frenada regenerativa. La única fuente de energía son las baterías, por lo tanto, la única fuente de potencia es el motor eléctrico, mientras que el motor térmico permanece apagado.

$$P_e = 0$$

$$P_m = P_L$$

$$P_{bat\_d} = \frac{P_m}{\eta_m}$$

La figura de este modo es la misma que en el caso eléctrico a baja velocidad (Figura 75).

5. Frenada regenerativa. Cuando el vehículo está frenando y la carga de las baterías es inferior a la máxima, este modo se activa (Punto C en la Figura 74). El motor eléctrico funcionan como generador, recargando las baterías además de frenar el vehículo.

$$P_{mb} = P_L \eta_m$$

$$P_{bat\_c} = P_{mb}$$

Donde  $P_{mb}$  es la potencia de frenado y  $P_{bat\_c}$  es la potencia de recarga de las baterías.

Si la potencia de frenada es superior a la potencia que puede absorber el motor eléctrico, los discos de freno se activan absorbiendo esta energía (Punto D en la Figura 74).

$$P_{mb} = P_{mb,max}\eta_m$$

$$P_{bat\_c} = P_{mb}$$

$$P_{mf} = P_L - P_{mb}$$

Donde  $P_{mf}$  es la potencia de frenado mecánica

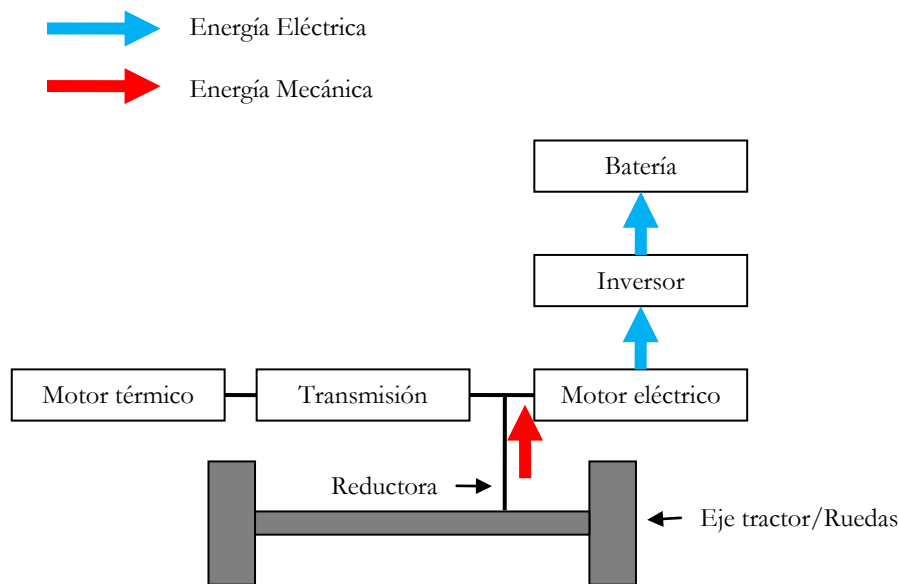


Figura 78. Diagrama del flujo de energía del modo frenada regenerativa

6. Térmico puro. Existen situaciones en las que el vehículo requiere una potencia aproximadamente constante que con una relación de transmisión adecuada, permitiría al motor térmico trabajar cerca de su punto óptimo en cuanto a eficiencia. Esta situación se pueden encontrar fácilmente en carreta cuando se circula a una velocidad media – alta.

En este caso, forzar al motor térmico a dar más potencia para transformar la parte sobrante en energía eléctrica (con las pérdidas en transmisión, conversión, almacenamiento y posterior uso que ello conlleva) supone una merma en la eficiencia, aparte de un desgaste innecesario de ciertos elementos de la planta propulsora.

Para ello, este modo evalúa si circulando con la marcha más alta el rendimiento del motor sería igual o superior al máximo que se podría obtener haciendo trabajar tanto al motor térmico como al eléctrico en su punto de máxima eficiencia, en cuyo caso el motor eléctrico se apaga y el vehículo se comporta como un vehículo convencional con motor térmico.

$$P_e = P_L$$

$$P_m = 0$$

$$P_{bat\_d} = 0$$

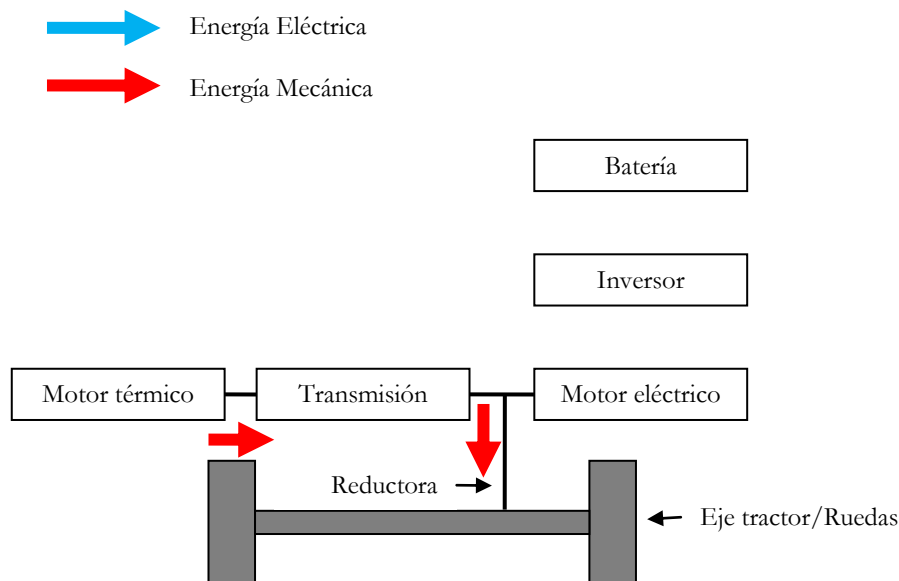


Figura 79. Diagrama del flujo de energía del modo térmico puro

En la siguiente figura, Figura 80, se puede el organigrama de la simulación de los modos de funcionamiento:



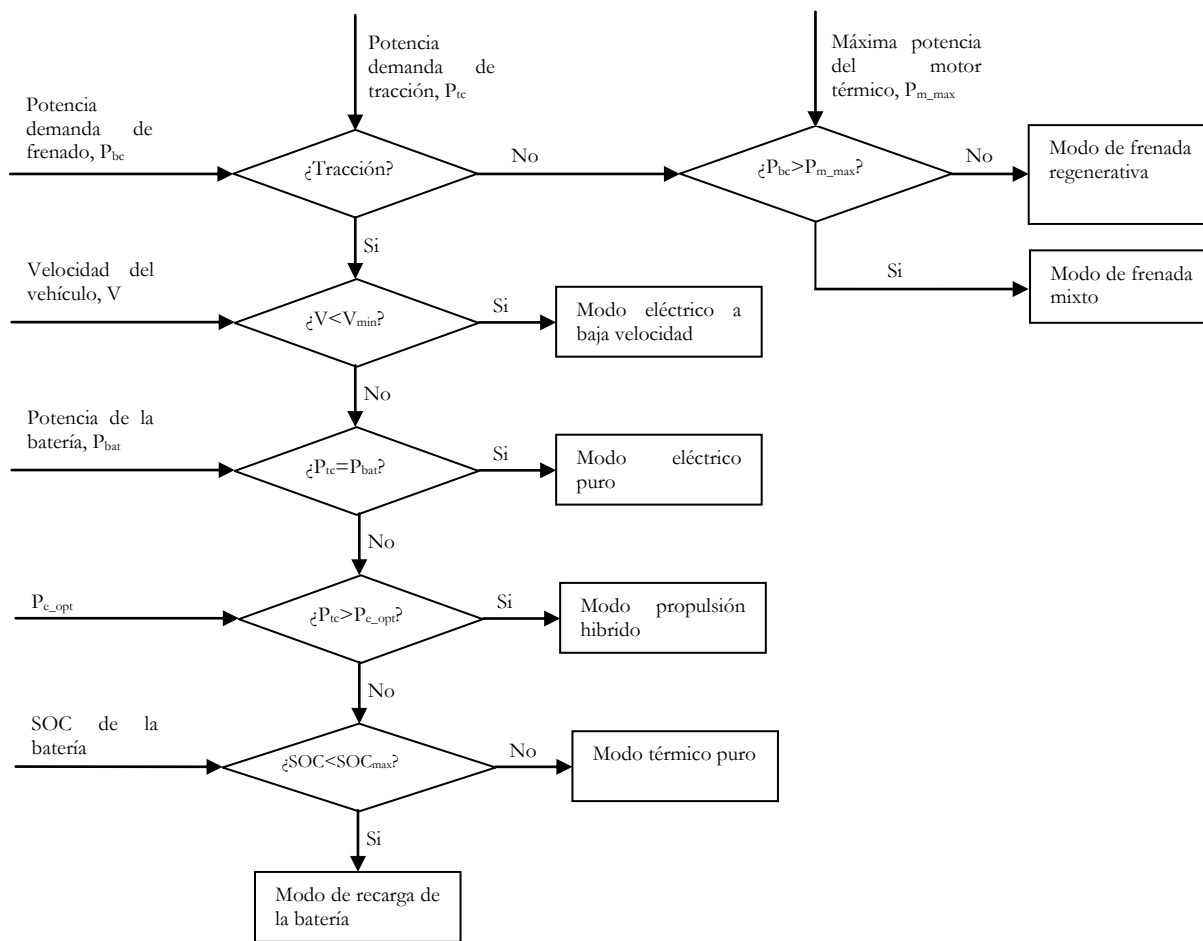


Figura 80. Organigrama de los modos de control del vehículo eléctrico híbrido en paralelo

El funcionamiento del modelo construido en Matlab/Simulink está resumido en la Figura 81.

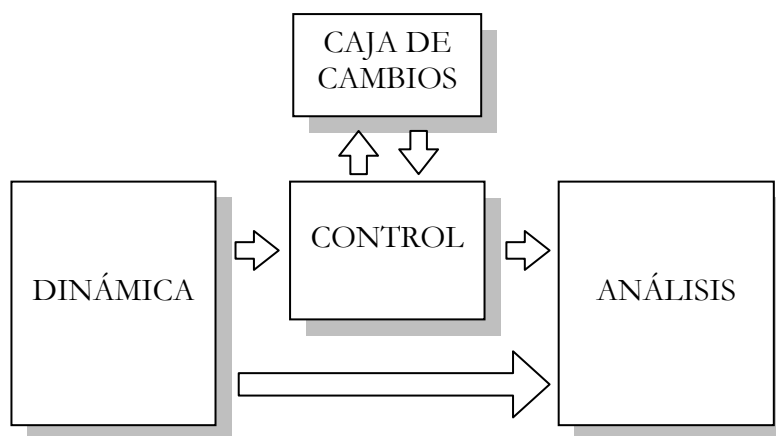


Figura 81. Diagrama de bloques del modelo del vehículo eléctrico híbrido en paralelo

En el bloque Dinámica se calcula la dinámica del vehículo como se ha comentado en el apartado 2.5.- Modelado dinámico de un vehículo del presente documento.

En el bloque Caja de Cambios se controla el funcionamiento de la transmisión, evitando que el motor trabaje fuera de su rango de régimen de giro admitido y siempre buscando la máxima eficiencia del mismo.

Se ha considerado que el régimen de giro del motor térmico se encuentre entre 1000 rpm y 5000 rpm. Para obtener una máxima eficiencia se calcula el rendimiento en una marcha superior e inferior a la que está y, si es posible, efectúa el cambio de marcha. Para evitar incomodidades en la conducción y no esté cambiando de marcha continuamente excepto que no se encuentre en los límites de régimen de giro, después de cada cambio de marcha transcurren unos segundos hasta que se pueda volver a cambiar de marcha.

En el bloque Control se gestiona la selección de los modos de funcionamiento y simula la operación de los mismos. Esto se lleva a cabo mediante los modos de funcionamiento, el punto de trabajo en que se encuentran el motor térmico y el eléctrico para cumplir con los requerimientos de potencia exigidos, manteniendo el nivel de carga de las baterías dentro de los límites óptimos.

Estos niveles de carga se han tomado el 50 % y el 70 % de la carga máxima de las baterías. Para evitar que el nivel de carga caiga por debajo del 50 % debido a una solicitud puntual elevada de potencia, el sistema de control mantiene una cierta reserva de energía por encima de este nivel.

Este margen, en el nivel mínimo de carga, depende del escenario en el que se esté trabajando. Si el sistema detecta que está circulando en ciudad, éste reserva la energía necesaria para realizar una aceleración de 0 a 50 km/h. De lo contrario, si detecta que está en una vía interurbana, reserva la energía necesaria para realizar una aceleración de 80 a 120 km/h.

Finalmente, en el bloque de análisis, se analizan tres aspectos: análisis de potencia, análisis de rendimiento y el análisis económico.

En el análisis de potencia se comprueba que el motor eléctrico no sea sobrecargado y que el nivel de las baterías baje por debajo del mínimo.

En el análisis de rendimiento se puede observar el rendimiento instantáneo y acumulado del motor térmico y eléctrico.

El bloque análisis económico calcula el coste previsto de este vehículo teniendo en cuenta el consumo de combustible y la batería.

En capítulo 8.5.-Modelado Vehículo Eléctrico híbrido en paralelo en Matlab/Simulink está el modelo del vehículo desarrollado en el programa Simulink.

### 5.3.- Comparativa de los diferentes tipos de batería

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos en la simulación del vehículo eléctrico híbrido en paralelo y los diferentes tipos de baterías.

En primer lugar, se va a realizar una comparativa entre los dos tipos de baterías elegidas en la simulación, cuyas especificaciones son las siguientes:

	Ácido – plomo	Ión – litio
<b>Energía específica (Wh/kg)</b>	40	110
<b>Ciclos de vida</b>	750	1250
<b>Rendimiento</b>	0,85	0,97
<b>Precio unidad de energía (€/kwh)</b>	100	150

Tabla 22: Especificaciones técnicas de las baterías para los vehículos híbridos eléctricos

En este caso, no se va a tener en cuenta la influencia de temperatura en la autonomía de la batería ya que al ser un vehículo eléctrico híbrido está apoyado por un motor de combustión interna.

Se ha realizado la simulación con un motor eléctrico de potencia 60,87 kW y un motor térmico de 124,5 CV. La velocidad mínima a la que se activa el motor de combustión interna es de 20 km/h y el intervalo de revoluciones en los cuales se mantiene la misma marcha es entre 1000 rpm y 5000 rpm.

En el caso de detectar si el vehículo circula a velocidad constante, el tiempo de detección se ha supuesto de dos segundos y el intervalo de velocidad de 4 Km/h.

Los resultados de las simulaciones son:

	Ácido – plomo	Ión – litio
Consumo (l/100 km)	7,19	6,39
DoD	0,068	0,0435

Tabla 23: Consumo de combustible en un HEV-P

A continuación, se muestran gráficamente los resultados obtenidos en la simulación para el caso de la batería de ácido – plomo y la de ión – litio.

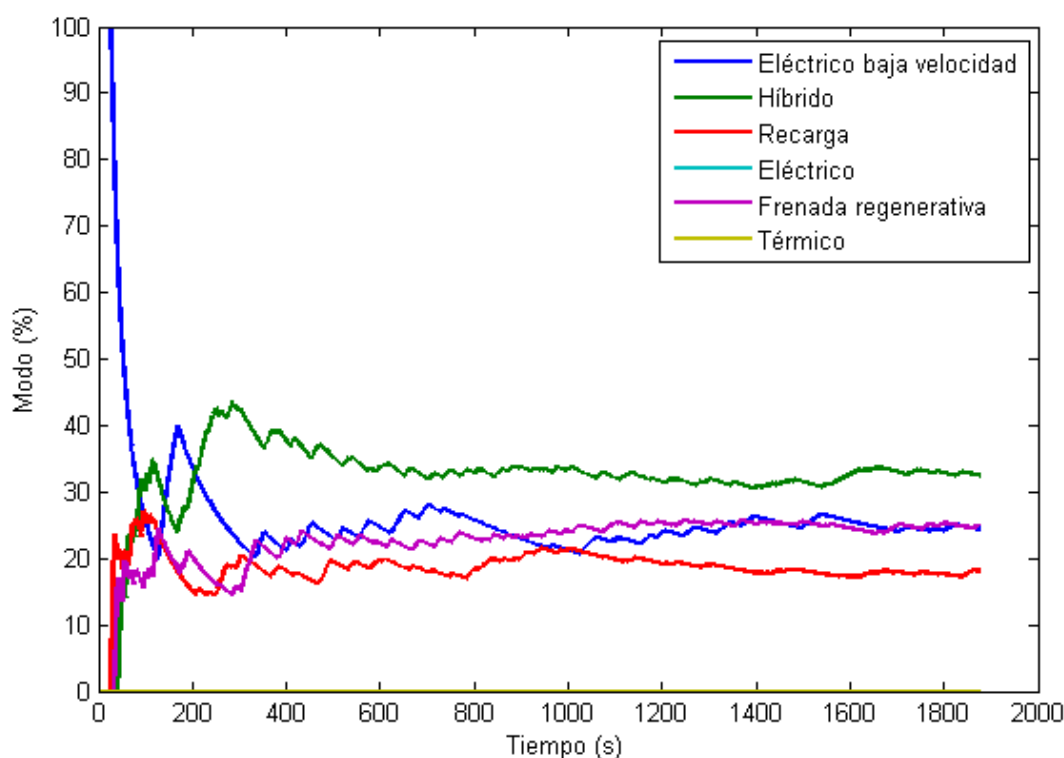


Figura 82. Distribución de modos: batería de ácido – plomo

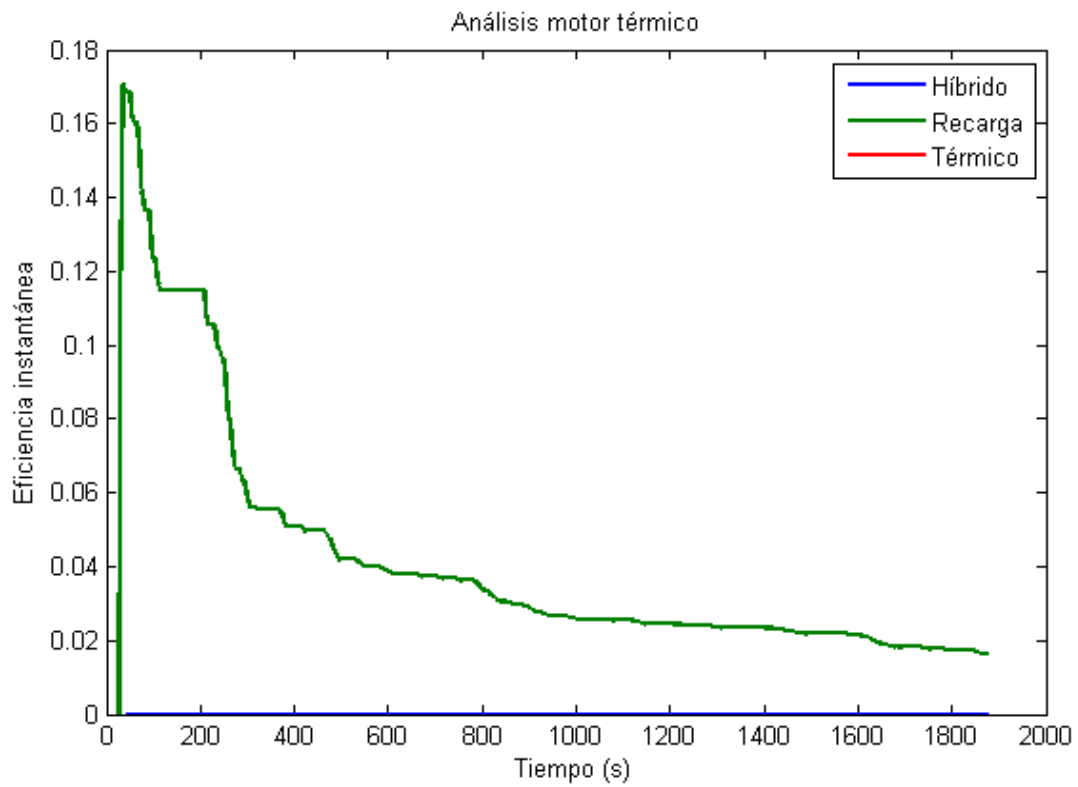


Figura 83. Análisis del motor térmico: batería de ácido – plomo

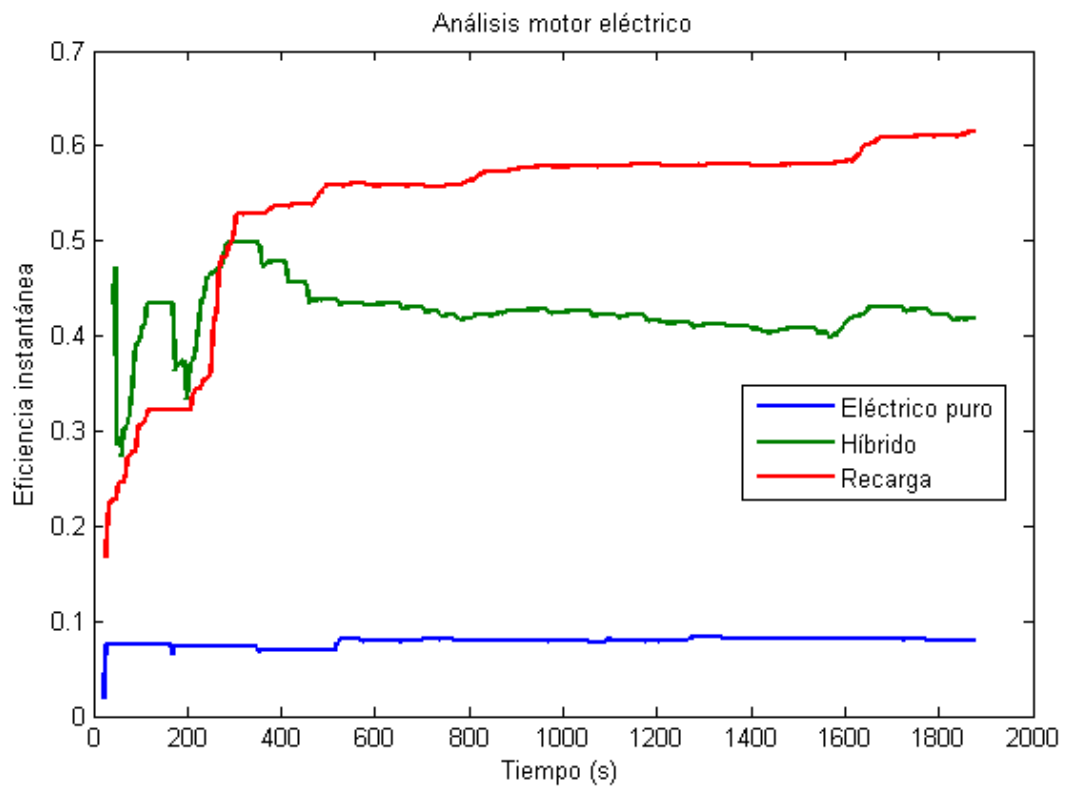


Figura 84. Análisis del motor eléctrico: batería de ácido – plomo

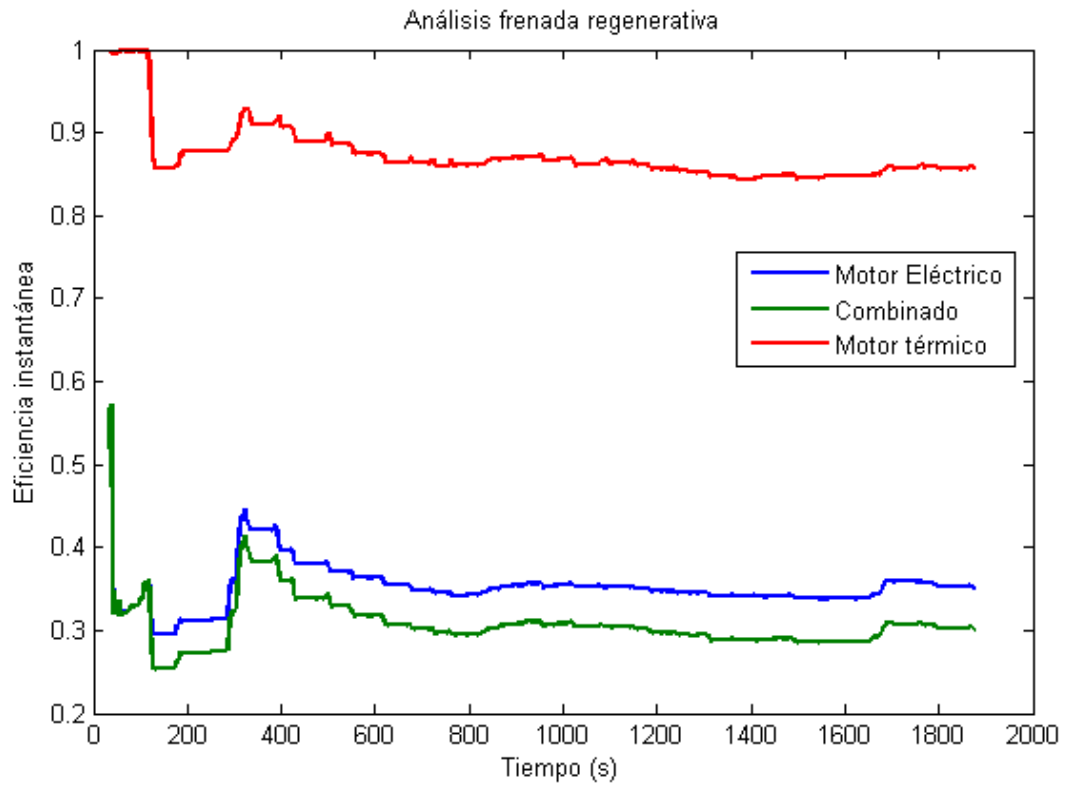


Figura 85. Análisis de la frenada regenerativa: batería de ácido – plomo

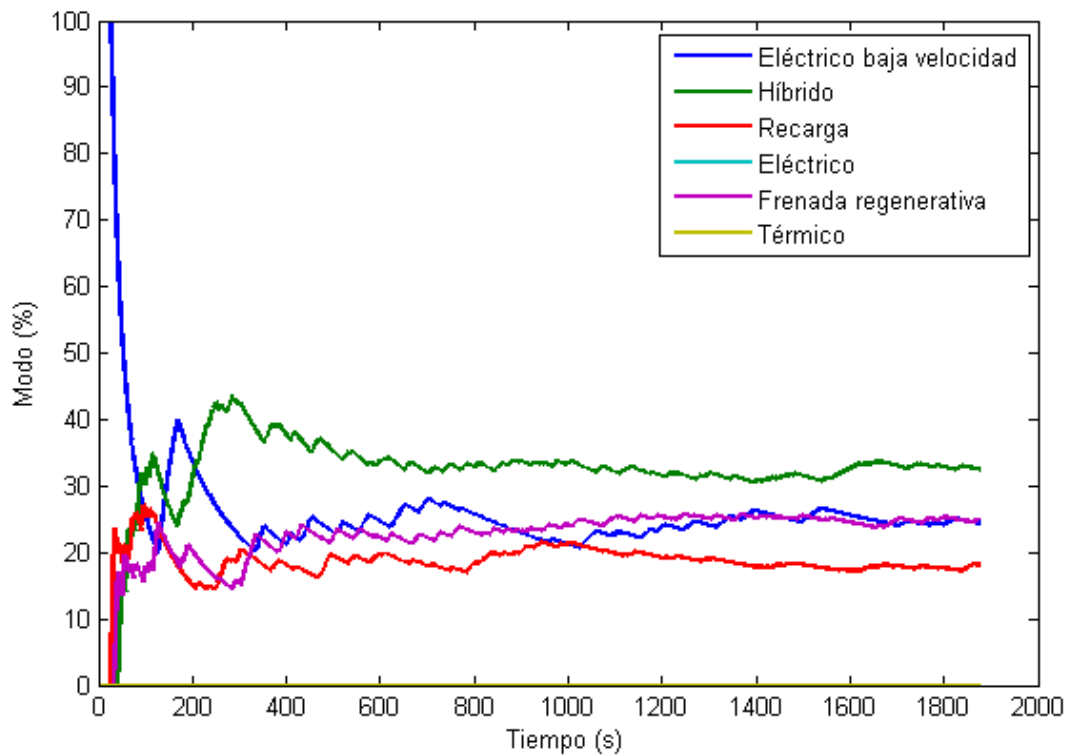


Figura 86. Distribución de modos: batería de ión – litio

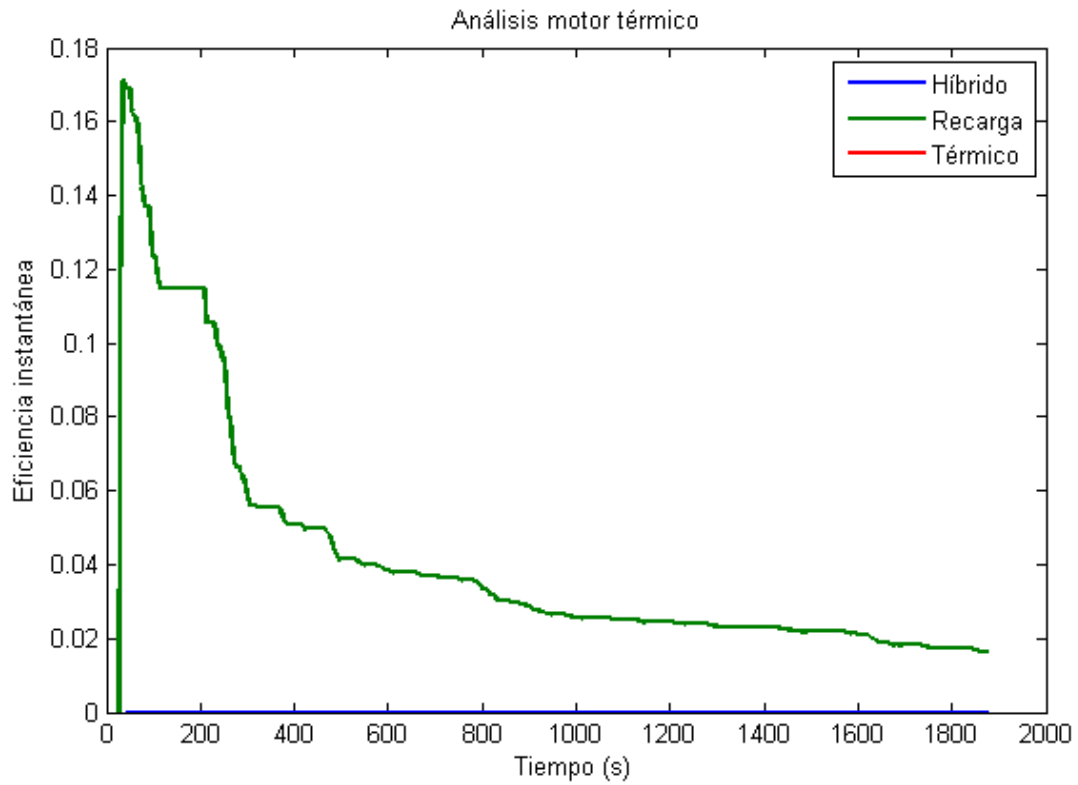


Figura 87. Análisis del motor térmico: batería de ión – litio

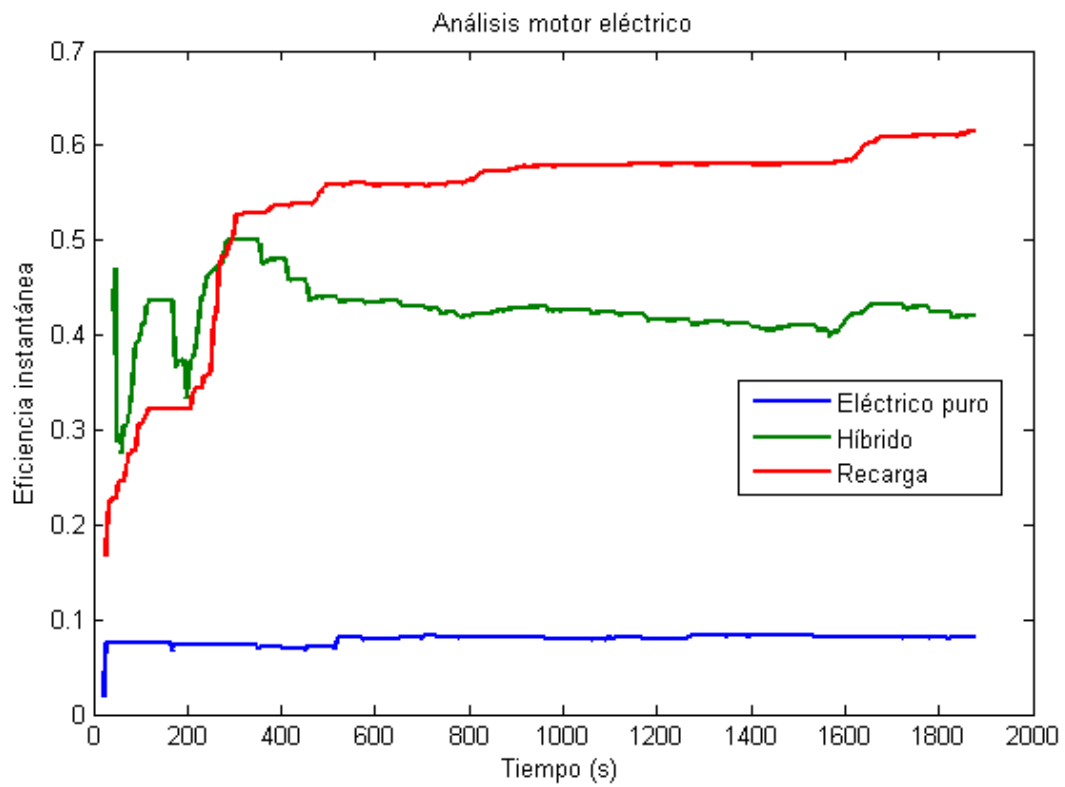


Figura 88. Análisis del motor eléctrico: batería de ión – litio

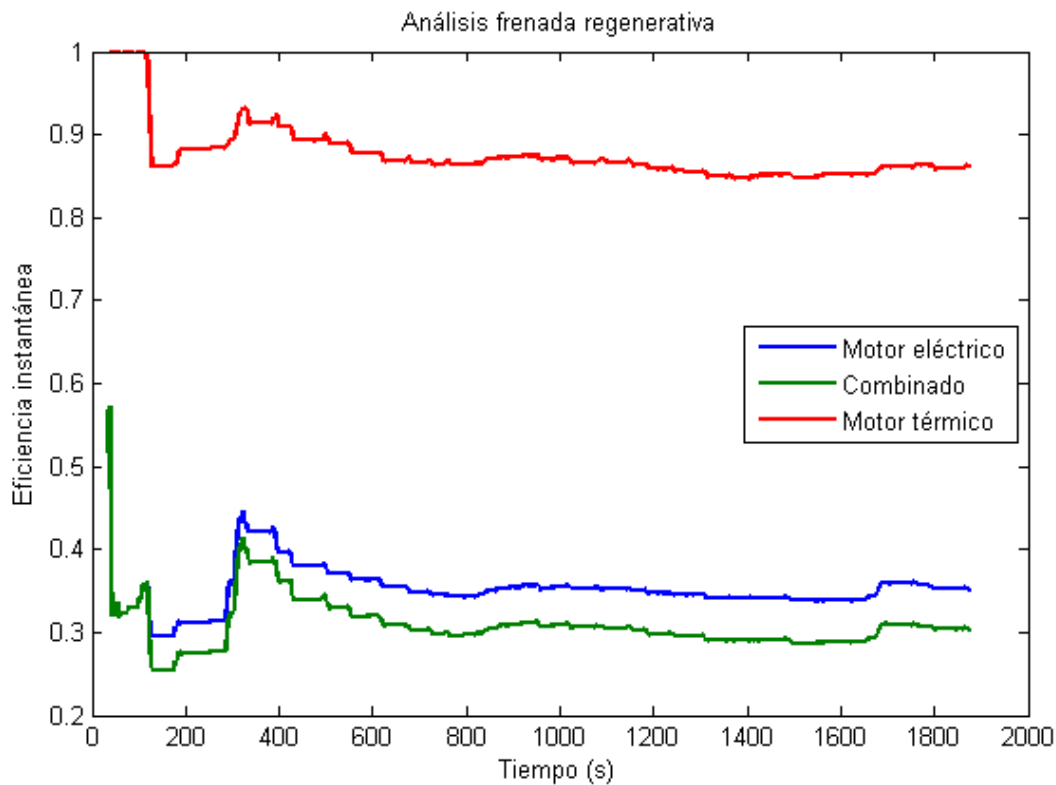


Figura 89. Análisis de la frenada regenerativa: batería de ión – litio

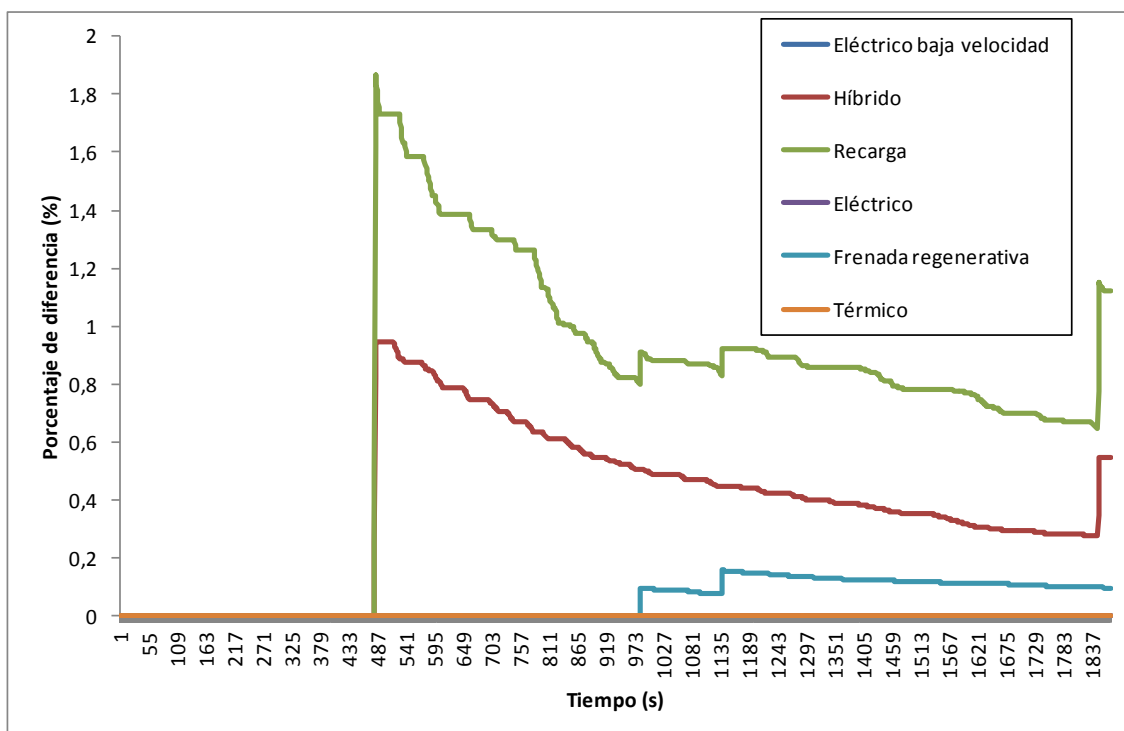


Figura 90. Distribución de modos: porcentaje de diferencia entre la batería de ácido – plomo y la batería de ión – litio



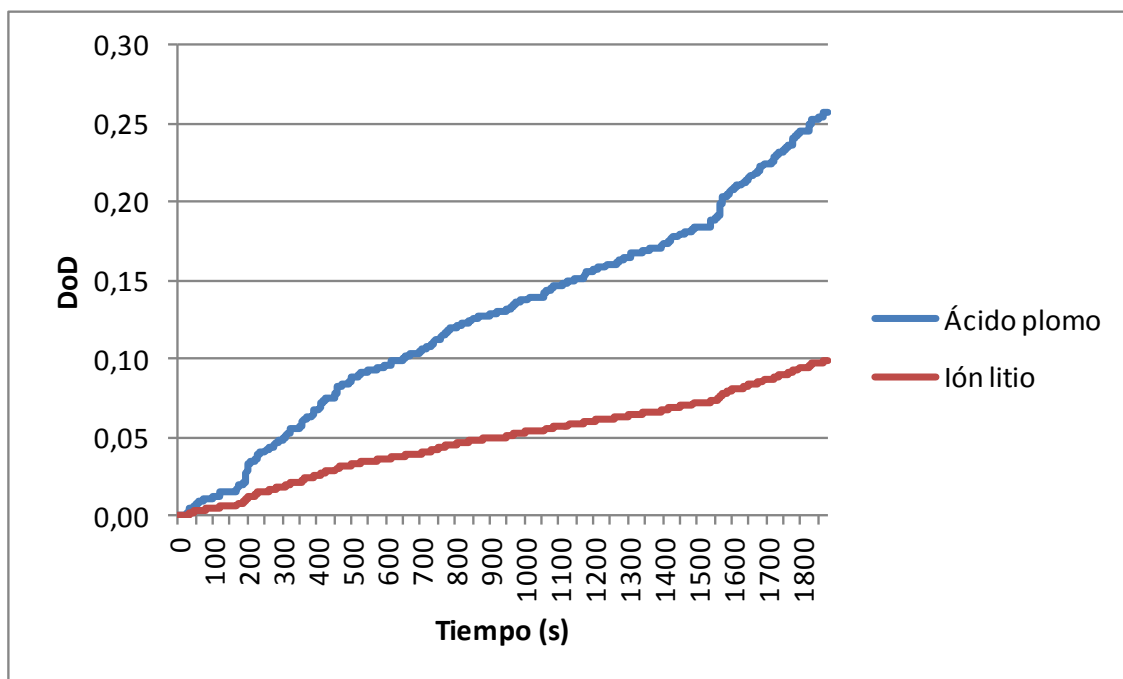


Figura 91. Comparativa DoD de la batería de ácido – plomo y la batería de ión – litio

En la simulación, se ha realizado un único ciclo, por lo que el motor de combustión interna no ha tenido la oportunidad de conectarse puesto que se ha partido de que la batería está completamente cargada y debido al rango de velocidades con la batería ha sido suficiente para que el vehículo recorra los 17,77 km del ciclo de conducción elegido, FTP 75.

De los resultados obtenidos, se puede extraer la siguiente conclusión: aunque la distribución de modos y análisis en ambas tecnologías siguen la misma tendencia, se obtienen mejores rendimientos con las baterías de ión – litio que con las de ácido – plomo. En este caso, no se ha tenido en cuenta las variaciones de las variables que afectan a la descarga de las baterías puesto que en este caso se ven apoyadas por el motor de combustión interna y no es tan crítica la situación como si solo se poseyera una única tecnología, la batería.



# Capítulo 6

---

## *Planificación de las Estaciones de Carga*

### **6.1.- Introducción**

En este capítulo se presenta el procedimiento de obtención de la planificación de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos, la validación del mismo mediante su comparación con resultados obtenidos por otros autores y la simulación del modelo en el programa ArcGis.

## 6.2.- Simulación de la planificación de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos

La planificación de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos a desarrollar se realiza mediante el algoritmo de optimización denominado Algoritmos Genéticos.

### 6.2.1.- Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos utilizados para resolver problemas de optimización. Están basados en los procesos genéticos de los organismos biológicos. A lo largo de las generaciones, sobreviven los que mejor se adaptan al sistema de acuerdo con los principios de la selección natural y supervivencia. Los algoritmos genéticos son capaces de resolver problemas reales.

AG simulan los procesos genéticos en la naturaleza. Estos procesos son esenciales para la evolución y además poseen pocas reglas o ninguna para su desarrollo.

En la naturaleza, los individuos de una población compiten con otros por los recursos como la comida, el agua y el abrigo. También, miembros de una misma especie a menudo compiten por atraer a la pareja. Estos individuos, los cuales son más afortunados en la supervivencia y en la atracción de la pareja, tendrán más número de descendientes. Esto significa que los genes de los mejores adaptados, o con capacidad, estarán en los genes de los individuos de generaciones sucesivas. La combinación de buenas características de diferentes antecesores puede producir, a veces, descendencia supercapacitada, en los cuales el estado físico es mejor que el de los padres. De esta manera, las especies se adaptarán mejor a su entorno.

A cada individuo se le asigna una puntuación según su estado físico dependiendo de cómo sea la solución dentro del problema, es decir, que la solución sea buena o mala. La alta capacidad de los individuos les da más oportunidades de reproducirse, mediante un cruce con otros miembros de la población. Esto origina nuevos individuos, los cuales poseen características de cada uno de los padres.

La nueva población de posibles soluciones es, además, producida por la selección de los mejores individuos de las actuales generaciones, y la unión entre ellos produce nuevos miembros de la generación previa. De esta manera, más generaciones con mejores

características son transmitidas a través de la población, cruzándose y mutándose con otras características buenas. Si el AG está bien diseñado, la población convergerá a la solución óptima del problema.

AG no solo son algoritmos basados en analogías con la naturaleza. Otro ejemplo de esto, es la red de trabajos neuronales, la cual está basada en la capacidad de las neuronas del cerebro; el templado simulado, es una técnica de búsqueda basada tanto en procesos físicos como en biológicos.

El poder de los algoritmos genéticos viene del hecho de que la técnica es robusta, y puede tratar con existo un rango ancho de problemas, incluyendo aquellos que son difíciles de resolver por otros métodos. Los algoritmos genéticos no garantizan encontrar una solución global al problema, pero normalmente son buenos para encontrar soluciones aceptables para problemas rápidos.

#### **6.2.1.1.- Principios básicos**

Antes que los algoritmos genéticos puedan ser ejecutados, una adecuada codificación (o representación) para el problema debe de ser ideada. También se requiere una función de evaluación, la cual asigna el valor que le corresponde a la solución dentro de la población. Durante la ejecución, los padres deben ser seleccionados para la reproducción y la recombinación, generando la descendencia.

##### **6.2.1.1.1.- Codificación**

Es asumido que una solución al problema puede ser representada como un grupo de parámetros. Estos parámetros (conocidos como genes) están unidos para formar una cadena de valores, a menudo referida como cromosoma.

En términos genéticos, un grupo de parámetros representados por cromosomas particulares se le denomina genotipo. El genotipo contiene la información requerida para la formación de un organismo, a esta información se le denomina fenotipo. Estos términos son usados en los algoritmos genéticos. La capacidad de un individuo depende de la representación del fenotipo. Esto puede ser interferido desde el genotipo, por ejemplo, puede ser calculado desde el cromosoma, usando la función de evaluación.

```
BEGIN /* Algoritmo genético */  
  
    Generar la población inicial  
  
    Computar la capacidad de cada individuo  
  
    WHILE NOT termine DO  
  
        BEGIN /* produce una nueva generación */  
  
            FOR tamaño de la población / 2 DO  
  
                BEGIN /* ciclo reproductivo */  
  
                    Seleccionar dos individuos de la generación anterior para  
unirlos /* ser partidario de la mejor capacidad de uno de ellos */  
  
                    Evaluar la capacidad de la descendencia  
  
                    Insertar la descendencia en la nueva generación  
  
                END  
  
            IF población ha convergido THEN  
  
                TERMINAR := True  
  
            END  
  
        END  
  
    END
```

Figura 92. Tradicional Algoritmo Genético

#### 6.2.1.1.2. - Función de evaluación

La función de evaluación debe de ser diseñada para cada problema en cuestión. Dados unos cromosomas particulares, la función de evaluación devuelve un simple número, el cual es proporcional a la adaptación o a la habilidad del individuo para adaptarse al medio en el que se encuentra.

#### 6.2.1.1.3. - Reproducción

Durante la fase de reproducción de los AG, los individuos son seleccionados a partir de la población existente y son recombinados, para producir una descendencia, a

partir de la cual se origina la nueva generación. Los padres son seleccionados aleatoriamente de la población utilizando un programa. Este programa favorece a los individuos con mejores condiciones físicas.

Después de haber seleccionado a los padres, sus cromosomas son recombinados para generar la nueva descendencia. Para ello, se usan los mecanismos de cruzamiento y mutación. La forma más elemental de estas operaciones es la siguiente:

**Cruzamiento:** se toman dos individuos. Se cortan los cromosomas eligiendo la posición de corte aleatoriamente. Se producen dos segmentos principales y dos segmentos secundarios. Entonces, se toman los segmentos secundarios y se cambia el orden produciendo dos cromosomas nuevos. Esto se puede ver en la Figura 93.

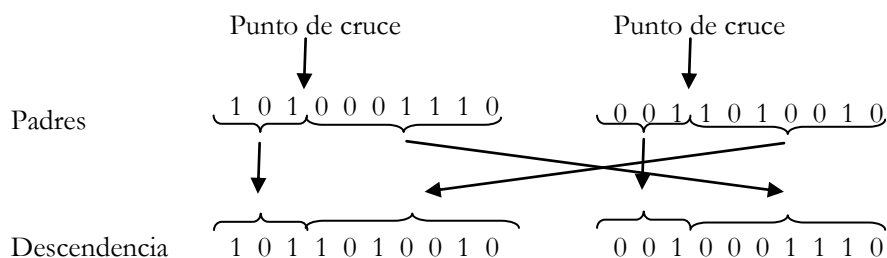


Figura 93. Un punto de cruzamiento

Si el cruzamiento no es aplicado, la descendencia generada es una simple copia de los padres.

**Mutación:** es aplicada a cada individuo ‘niño’ después del cruce. Aleatoriamente se altera cada gen con una pequeña probabilidad (habitualmente 0,001). La Figura 94 muestra este hecho.

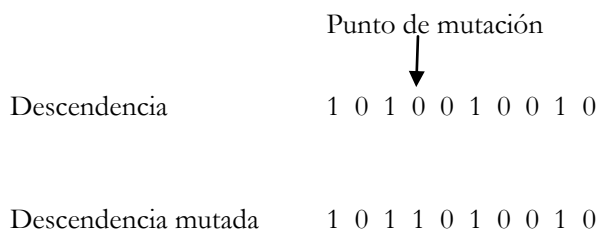


Figura 94. Punto de mutación

El cruzamiento es la técnica más importante de las dos técnicas mencionadas anteriormente para una rápida convergencia.

#### **6.2.1.1.4.- Convergencia**

Un gen se dice que ha convergido cuando el 95% de la población posee el mismo valor. La población ha convergido cuando todos los genes han convergido.

#### **6.2.1.2.- Comparación con otras técnicas**

Un gran número de otras técnicas se han propuesto para la búsqueda y optimización de problemas. Con los algoritmos genéticos, se asume que el problema está definido por una función de evaluación, la cual debe ser maximizada.

Hay una gran cantidad de técnicas de optimización, algunas de las cuales solo son aplicables a dominios limitados. Esto es un método para resolver problemas de control multipaso, los cuales solo son aplicables donde la función de evaluación global es la suma de la función de evaluación para cada estado del problema, y no hay interacción entre estados.

##### **6.2.1.2.1.- Método del gradiente**

Un gran número de métodos para la optimización de funciones continuas han sido desarrollados. Estos dependen de la información usada sobre el gradiente de la función, el cual guía la dirección de la búsqueda. Si la derivada de la función no se puede evaluar, porque es discontinua, estos métodos no sirven. Sin embargo, los algoritmos genéticos sí que pueden evaluar esta función porque no dependen de la continuidad de la función.

Tales métodos son generalmente llamados como 'hillclimbing'. Se puede realizar una función con un solo pico. Pero una función con muchos picos, posee un problema, éste es que el primer pico encontrado será escalado, pero puede ser que este pico no sea el pico más alto.



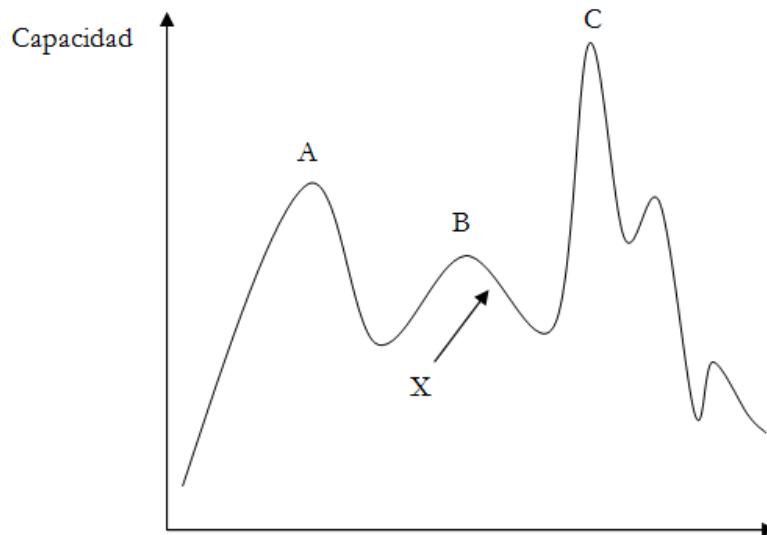


Figura 95. El problema 'hillclimbing'

#### 6.2.1.2.2.- Búsqueda iterativa

La búsqueda iterativa y la búsqueda del gradiente pueden estar combinadas para dar una búsqueda iterativa 'hillclimbing'. Una vez que un pico ha sido localizado, el 'hillclimb' empieza otra vez, pero con otro punto de comienzo elegido aleatoriamente. Esta técnica tiene la ventaja de la simplicidad, y puede trabajar bien si la función no tiene demasiados máximos locales.

Sin embargo, en cada ensayo aleatorio se lleva a cabo un aislamiento del dominio y no del dibujo global. Los procesos de búsqueda aleatorios continúan para asignarles ensayos incluso sobre el espacio de búsqueda. Esto significa que podrán ser evaluados tantos puntos en la región encontrada para ser de una baja capacidad como en las regiones encontradas para ser de una alta capacidad.

En los algoritmos genéticos, por comparación, empiezan con una población aleatoria, y evalúan los ensayos incrementando la región de búsqueda para tener alta capacidad. Esto es una desventaja si el máximo está en una pequeña región, rodeado por altos lados y por regiones con baja capacidad.

#### 6.2.1.3.- Técnicas de cruzamiento

El típico algoritmo genético utiliza un punto de cruzamiento. Se ha estudiado que el método de cruzamiento por multipuntos mejora el método, pero esto, además de añadir puntos de cruzamiento, reduce la verificación de los algoritmos genéticos. Sin embargo,

una ventaja de tener más puntos de cruzamiento es que el problema del espacio puede ser buscado más concienzudamente.

#### 6.2.1.3.1.- *Dos puntos de cruzamiento*

En dos puntos de cruzamiento, (y multipunto de cruzamiento, en general), antes que cadenas lineales, los cromosomas son considerados como lazos formados por la unión conjunta de los finales. Para cambiar un segmento de un lazo con otro de otro lazo requiere la selección de dos puntos de corte, como en la Figura 96.

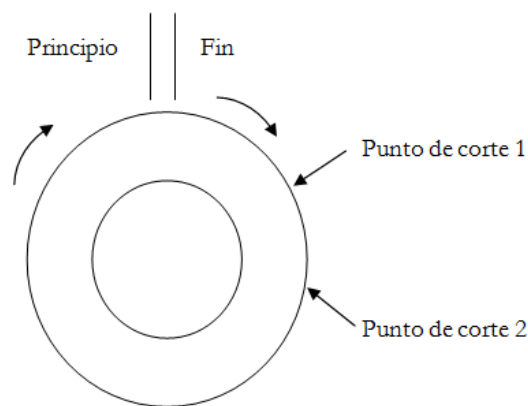


Figura 96. Cromosoma visto como un lazo

En esta vista, un punto de corte puede ser parecido a dos puntos de corte con uno de los puntos de corte unido al principio de la cadena.

#### 6.2.1.3.2.- *Cruzamiento uniforme*

El cruzamiento uniforme es completamente diferente al cruzamiento por un punto. Cada gen en la descendencia es creado por la copia del correspondiente gen de uno o del otro padre, eligiendo de acuerdo a la generación aleatoria de la máscara de cruzamiento. Donde hay un 1 en la máscara de cruzamiento, el gen es copiado del primer padre, y donde hay un 0 en la máscara, el gen es copia del segundo padre, como muestra la Figura 97. El proceso se repite con los padres cambiados y se produce la segunda descendencia.

La descendencia contiene una mezcla de los genes de cada padre.

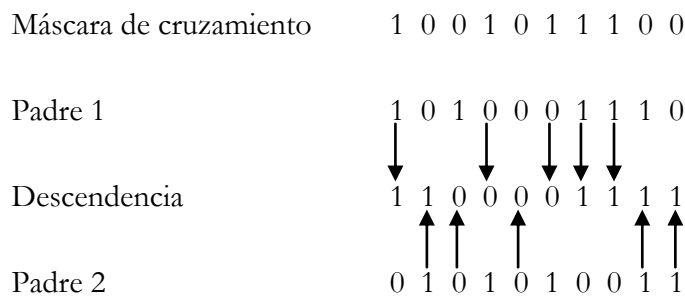


Figura 97. Cruzamiento uniforme

### 6.2.1.3.3.- ¿Qué técnica es mejor?

El cruce uniforme tiene la ventaja de que el orden de los genes es completamente irrelevante. Esto significa que la reordenación de los operadores con la inversión es innecesaria, y no hay que preocuparse sobre la localización de los genes.

Otros dicen que el cruzamiento con dos puntos se realizará pobremente cuando la población ha convergido en gran parte, reduciendo el rendimiento del cruzamiento.

### 6.2.1.4.- Mutación y la evolución de Naïve

La mutación es tradicionalmente vista como un operador de segundo plano, responsable de la reintroducción inadvertida de perdida en los genes, previniendo cambios genéticos, y proporcionando un pequeño elemento aleatorio buscado en la vecindad de la población cuando ha convergido en gran parte.

Se sugiere que la evolución de Naïve (solo selección y mutación) realiza una búsqueda como la 'hillclimb' la cual puede tener poder sin cruzamiento. Se investiga más esta hipótesis, y se encuentra que el cruzamiento da más rapidez a la evolución que solo la mutación. Sin embargo, al final, la mutación generalmente encuentra mejores soluciones que solo el cruzamiento. La mutación llega a ser más productiva y el cruzamiento menos, sí la población converge.

A pesar de esto, generalmente la baja probabilidad de uso, la mutación es un importante operador. Su probabilidad óptima es mucho más crítica que para el cruzamiento. Incluso si es un operador de segundo plano, no debería ser ignorada.

La mutación estándar y el cruzamiento son simplemente dos formas de un operador general de exploración, que pueden perturbar.

### ***6.2.2.- Programa de algoritmos genéticos***

El programa utilizado para realizar la programación de Algoritmos Genéticos ha sido realizado con la ayuda del programa Microsoft Office Excel. Dentro de éste programa se ha desarrollado una macro realizada en Visual Basic debido a que el ArcGis puede importar tablas Excel.

El programa está en el módulo uno (Módulo1) de la macro.

En este módulo existen varias funciones, las cuales se citan a continuación.

- Aleatorio: proporciona un número aleatorio
- do\_crossovers: realiza el cruce en la población existente;
- do\_mutations: realiza las mutaciones entre la población existente, solamente muta las coordenadas de las estaciones de carga;
- do\_mutations\_potencia: realiza las mutaciones entre la población existente, únicamente muta la potencia de dichas estaciones de carga;
- genetic\_aleatorio: genera una población aleatoria;
- geneticos: es el principal, el cual llama a las demás funciones;
- get\_chromosome: consigue las mejores soluciones dentro de la población;
- leer\_datos\_EV: lee las coordenadas y la potencia de los vehículos eléctricos;
- leer\_datos\_fichero: lee las coordenadas y la potencia de las estaciones de carga;
- leer\_datos\_iniciales: lee los valores de las variables;
- ordenar: ordena de menor a mayor los costes de las soluciones obtenidas, y
- sort\_by\_fitness1: evalúa la población existente;

El código del programa se puede observar en el capítulo 8.6.-Programación de la Planificación de Estaciones de Carga.

Durante la ejecución del proyecto se generan varias hojas Excel, las cuales guardan la información generada durante dicha ejecución. A continuación, se puede observar la relación que existe entre el usuario y el programa.

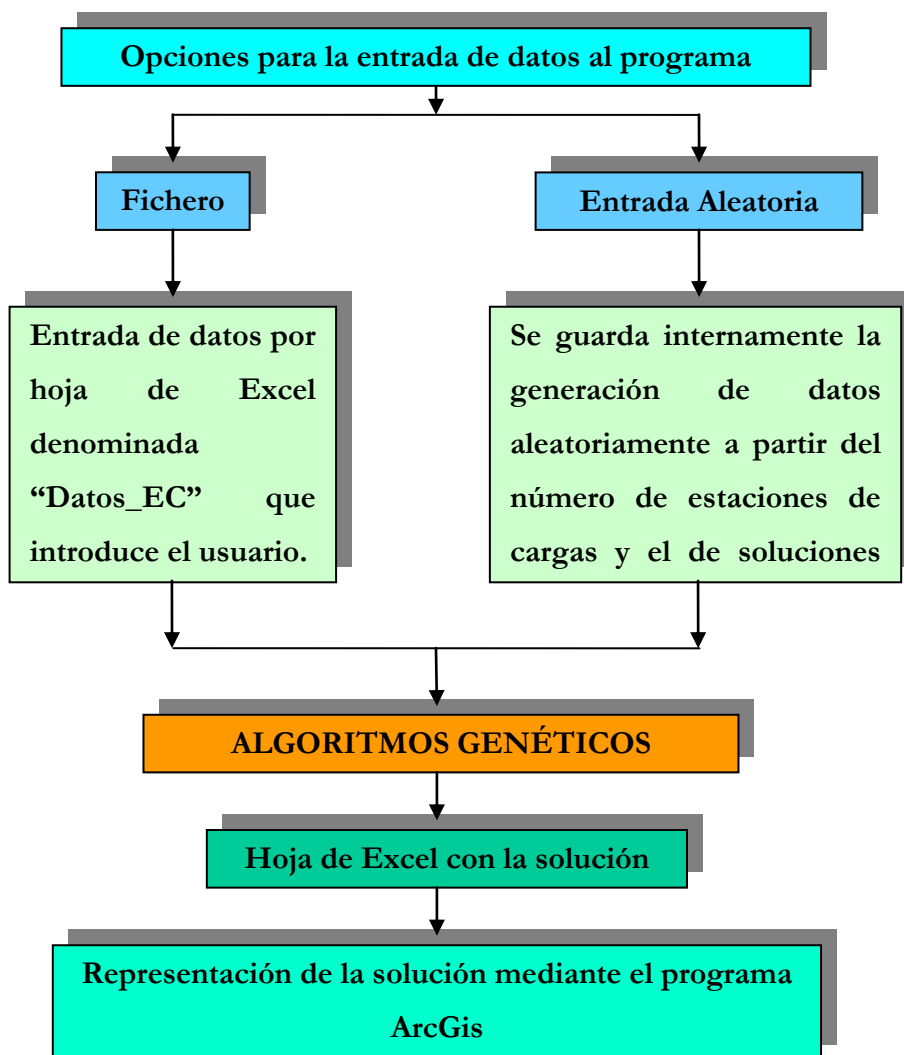


Figura 98. Esquema del programa de planificación de estaciones de carga

La relación entre las hojas del libro de Excel depende de si son entrada de datos o salidas de programa se muestran en la siguiente figura, Figura 99:

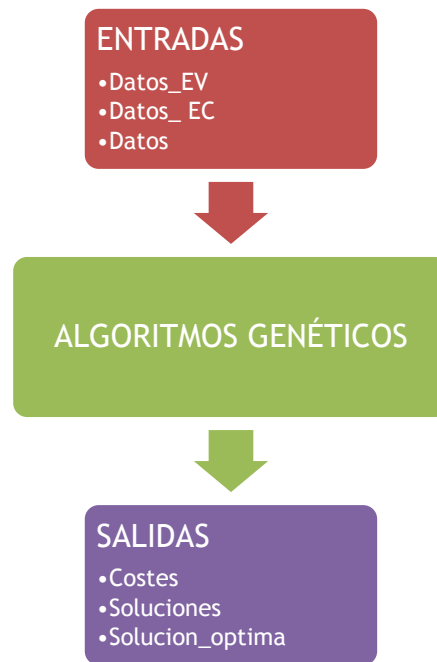


Figura 99. Relación de las hojas del fichero de Excel

El programa interactúa con el usuario por medio de ventanas en las cuales le permite realizar una serie de acciones. En primer lugar, el programa da la opción de leer los datos de la ubicación de las estaciones de carga originales a partir de las cuales se obtendrá el óptimo o bien que el mismo programa genere unas soluciones iniciales aleatorias.

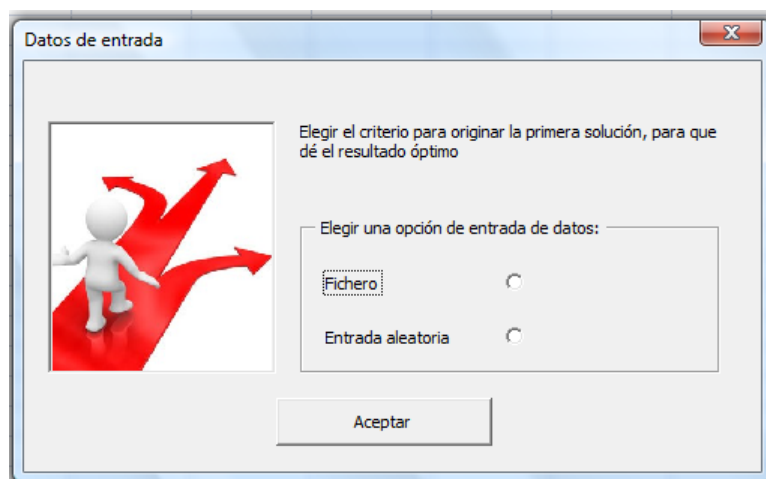


Figura 100. Ventana gráfica del programa de algoritmos genéticos donde da a elegir la manera de obtener la solución inicial del programa de optimización

En el caso de haber elegido la opción “Entrada aleatoria”, el programa necesita conocer la longitud y el número de cromosomas, es decir, el número de estaciones de carga por solución y el número de soluciones.

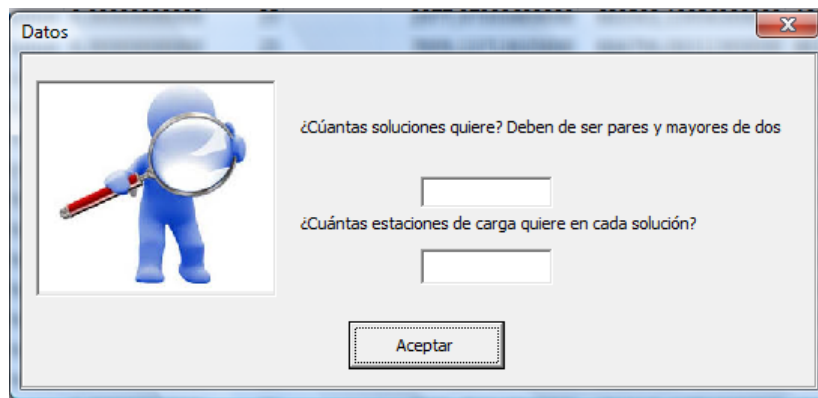


Figura 101. Ventana gráfica del programa de algoritmos genéticos donde hay que especificar la longitud y número de cromosomas

Independientemente de la elección realizada para obtener la solución inicial del problema, el programa interacciona con el usuario para que éste le introduzca el número de iteraciones a realizar para obtener la solución óptima.

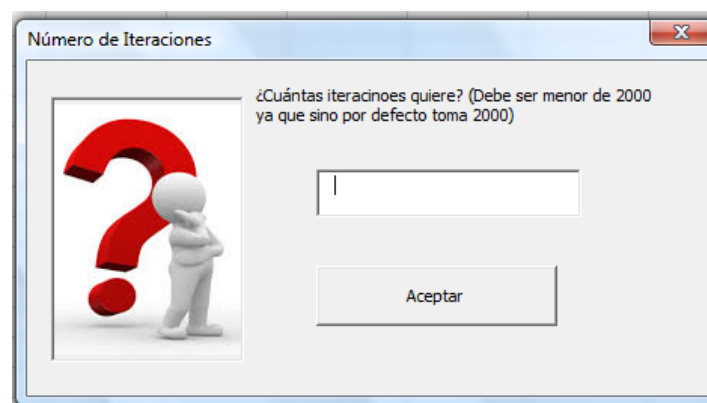


Figura 102. Ventana gráfica del programa de algoritmos genéticos donde hay que especificar el número de iteraciones

Una vez introducidos estos datos, el programa realiza los cálculos hasta que obtiene la solución óptima.

### 6.3.- Validación del programa desarrollado

En este apartado se muestran y comentan los resultados obtenidos con el programa desarrollado en Microsoft Office Excel y ArcGis.

Las soluciones que se obtiene en este programa son a través de hojas ubicadas en el fichero de Excel. Estas son:

- ☞ Costes: muestra la variación de los costes. Esta hoja muestra dos columnas:
  - Número de iteración.
  - El coste de las pérdidas. O sea, es la suma de los costes indirectos de pérdida más los costes de pérdida de potencia
- ☞ Solucion\_optima: esta hoja muestra la mejor solución obtenida la cual el ArcGis leerá y realizará el mapa temático

### ***6.3.1.- Representación gráfica de los costes***

Si se representan los costes o los costes de las pérdidas obtenidos mediante el programa se puede ver cómo van disminuyendo y convergiendo asintóticamente a un mínimo.

La convergencia a este mínimo puede ser más rápida o más lenta dependiendo de cómo se crucen o muten las soluciones y del número de cruces que se realicen en cada iteración.

Los cromosomas, es decir, las soluciones posibles que se pueden llevar a cabo, se cruzan de una forma aleatoria. Esto es, las soluciones que se cruzan y el punto de cruce son aleatorios. Por todo ello, habrá ocasiones en las cuales se obtendrán mejores soluciones con menos iteraciones que en otras ejecuciones del programa.

En las mutaciones ocurre lo mismo pero todavía más aleatorio porque se realiza un bucle que se repite tantas veces como estaciones de carga existan en las soluciones. En el ejemplo que se ha desarrollado, el número de veces que se repite el bucle es de catorce. Dentro del bucle hay una condición, si el número aleatorio que se ha originado al comienzo del bucle es mayor de cinco, entonces se realiza la mutación, sino se repite el bucle.

La otra dependencia comentada anteriormente es el número de cruces realizado en cada iteración. En este ejemplo, se han realizado numerosas pruebas para ver el funcionamiento del programa. La conclusión obtenida es la siguiente: el tiempo de



ejecución del programa depende del número de cruces que se realicen y por supuesto del número de iteraciones.

El tiempo depende del número de cruces porque la condición que posee el programa es que tiene que encontrar el número de cruces de soluciones diferentes a las que existen en un principio. Esto quiere decir, que si se cruzan siete veces el programa tiene que encontrar siete soluciones diferentes a las que existían en un principio. La ventaja que posee es que con un número menor de iteraciones se llega antes al objetivo.

A continuación, se van a mostrar dos gráficas en las cuales se puede observar lo comentado anteriormente.

La primera gráfica muestra como disminuye el coste y converge un valor determinado. Esta gráfica se ha realizado con dos cruces y doscientas iteraciones.

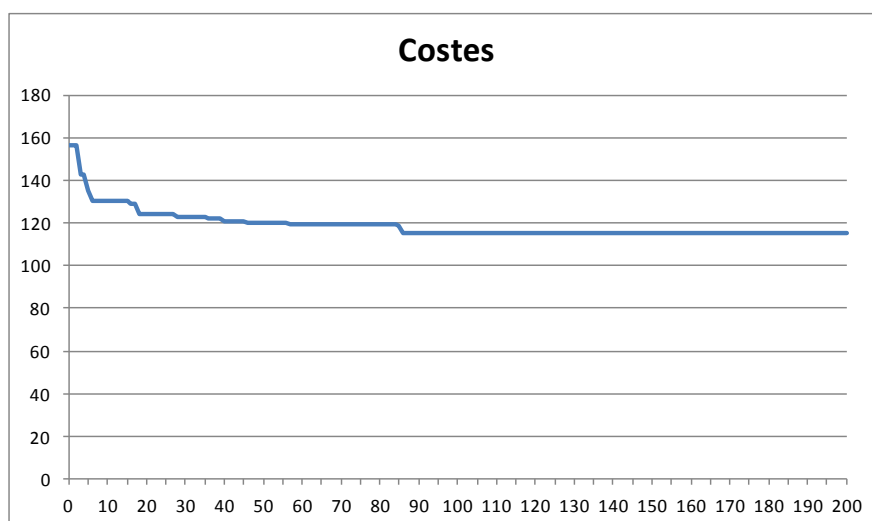


Figura 103. Representación de los costes de las pérdidas frente al número de iteraciones (dos cruces)

La siguiente gráfica expone la convergencia del programa con 10 cruces.

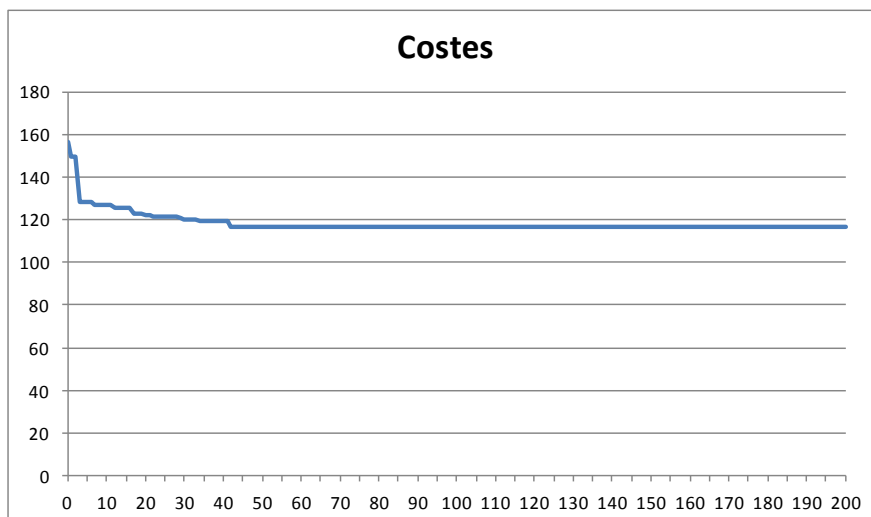


Figura 104. Representación de los costes de las pérdidas frente al número de iteraciones (diez cruces)

Como se ha comentado anteriormente, en un número menor de iteraciones llegamos a la misma solución o muy parecida que con solo dos cruces, pero el inconveniente de este método es que la realización de este número de iteraciones ha costado el doble de tiempo que en el otro caso.

### 6.3.2.- Mapa temático

En el programa se han introducidos datos aleatorios para obtener una solución mejor que la situación inicial. Un extracto de este fichero se puede ver en los anexos (Figura 113).

El coste de pérdidas obtenido es menor que los iniciales. El resultado obtenido es:

- ❑ Coste inicial de pérdidas: 156,60 €
- ❑ Coste final de las pérdidas: 115,27€

La localización de las estaciones de carga y la zona que abastece a cada vehículo eléctrico se observa en el siguiente mapa temático.

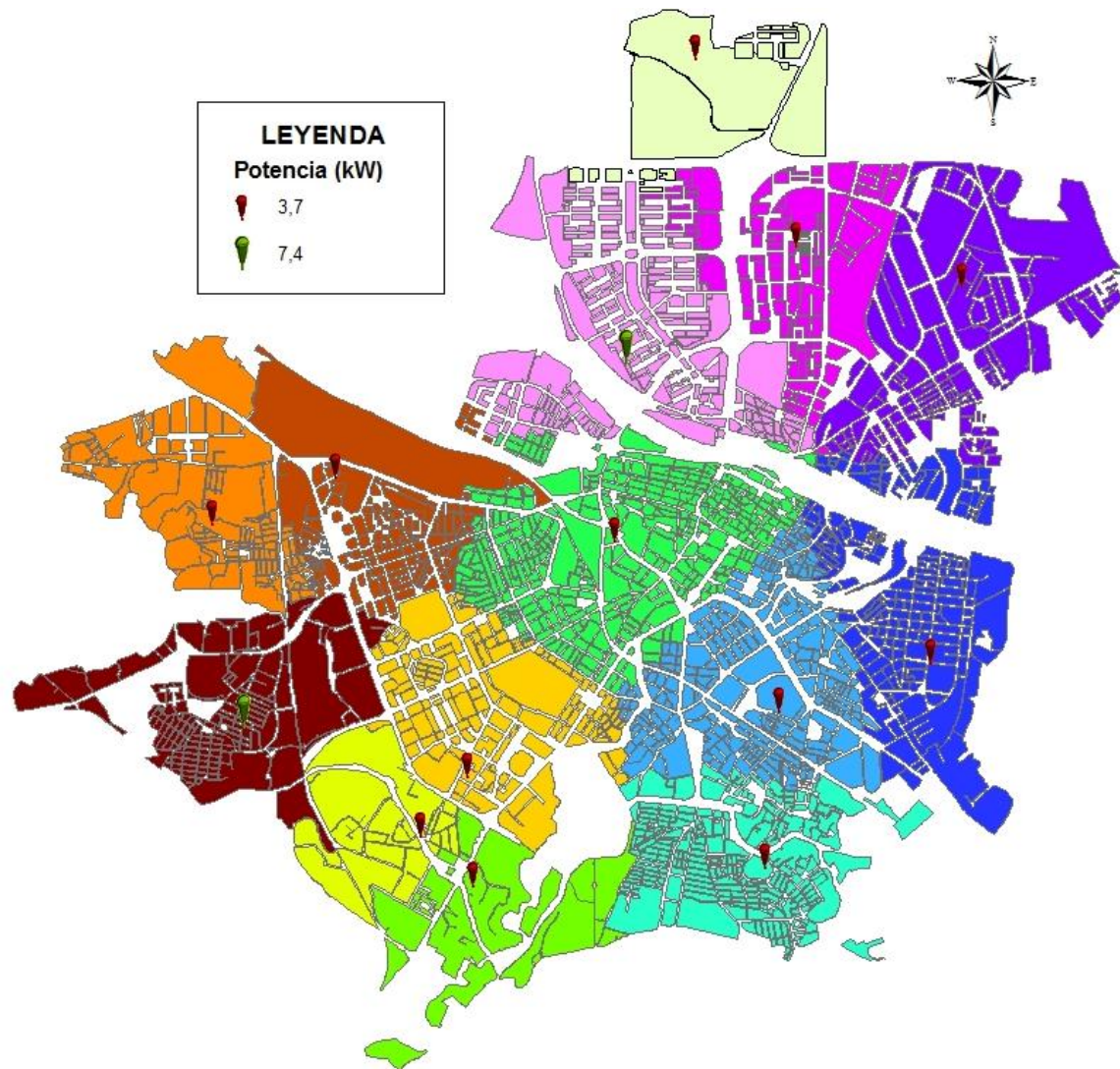


Figura 105. Mapa temático donde se representa la zona que abarca cada estación de carga y la localización de las mismas



# Capítulo 7

---

## *Conclusiones*

En esta Tesis de Doctorado se ha desarrollado el modelo dinámico y eléctrico de un vehículo eléctrico tanto en su versión totalmente eléctrico como en la versión híbrida en paralelo y la planificación de las estaciones de carga para estos vehículos mediante un sistema de información geográfica y el método de optimización basado en algoritmos genéticos.

Se ha desarrollado una herramienta mediante el programa Matlab/Simulink para valorar la idoneidad de la implantación de vehículos eléctricos en aplicaciones donde ahora funcionan vehículos convencionales. Esta herramienta puede ser aplicada a múltiples casos de transporte por carretera, tanto de personas, ya sea transporte público como transporte privado particular, así como de cargas, variando únicamente el valor de las variables en el fichero de entrada.

Si se compara la tecnología convencional, motor de combustión interna, con los vehículos eléctricos existen diversos factores que hay tener en cuenta, como las prestaciones, la autonomía, el consumo, vida de las baterías, costes de mantenimiento, etc.

En la simulación se han tenido en cuenta factores externos e internos a la hora de realizarla, por ejemplo

- Modo de conducción: los diferentes tipos de ciclos a elegir
- Geometría del vehículo: superficie aerodinámica, diámetro de la rueda y su coeficiente aerodinámico
- Masa del vehículo: el peso del vehículo en vacío más el conductor y/o la carga del maletero y viajeros
- Tipo de calzada: inclinación y coeficiente de rozamiento
- Climatología: temperatura y acción del viento
- Elementos mecánicos y eléctricos: índices de transmisión, rendimientos,...
- Tecnología: diferentes tipos de baterías

Una vez obtenidos todos los valores de entrada incluidos en el fichero de Matlab habilitado para ello, se ha desarrollado un método para obtener de esta aplicación concreta lo siguiente: los valores de las prestaciones, el consumo, la autonomía y la vida de las baterías del vehículo eléctrico seleccionado y el análisis económico de la inversión.

El modelo de Matlab/Simulink del vehículo calcula instantáneamente con gran precisión la fuerza necesaria debido al rozamiento con el asfalto, a los rozamientos internos, a la resistencia aerodinámica y a las inercias. El modelo calcula las pérdidas de rendimiento del motor así como de otros elementos de la transmisión y cuenta con la alimentación de elementos auxiliares. El montante de energía resultante necesaria es retirado del modelo de batería. Se ha modelado una batería genérica, que dependiendo de los valores de las características se comportará de un tipo u otro, para que reproduzca los principales factores que influyen en su rendimiento como la intensidad de descarga, el estado de descarga y la temperatura ambiente que repercute en la variación de la capacidad de la batería. En este caso, en el vehículo completamente eléctrico se puede elegir tres tipos

diferentes de tecnología, en el caso de la batería: ácido – plomo, níquel – cadmio e ión – litio. Sin embargo, para el caso del vehículo eléctrico híbrido en paralelo no se ha trabajado con la tecnología níquel – cadmio ya que ésta está prohibida debido a la contaminación del cadmio a excepción de algunos usos en concreto. Las baterías de níquel – cadmio, actualmente, se están sustituyendo por las de níquel – hidruro metálico debido a que poseen una tecnología similar.

Así mismo, se ha realizado la simulación del conjunto del vehículo en diferentes ciclos de conducción.

Con respecto al vehículo eléctrico:

- La autonomía del vehículo depende del ciclo de conducción elegido, además, ésta se ve mermada por el estado de envejecimiento de la batería. Para ver la influencia de la exigencia en la conducción y los efectos que tienen la orografía de las vías y el tipo de tráfico se han hallado las autonomías para los diferentes ciclos de conducción. Así para el FTP 75 el alcance sería de 94,3 km, 123,8 km para el UNECE Elementary Urban Cycle, 102,5 km para el UNECE Extra-Urban Driving Cycle y 82,3 km para el UNECE Reg 83 Extra-Urban Driving Cycle, en el caso de ciclos de conducción reglados. Si se elige un ciclo experimental con tráfico fluido, la autonomía es de 96,3 km y en el caso de tráfico congestionado o no fluido, ésta sería de 92,8 km.
- También se ha estudiado el efecto que ejerce la temperatura ambiente sobre el rendimiento de la batería y en consecuencia sobre el alcance del vehículo. La autonomía se ve mermada conforme disminuye la temperatura y aumenta conforme la temperatura ambiente aumenta. Esto es debido a que al aumentar la temperatura el rendimiento aumenta, sin embargo, los ciclos de vida de la batería disminuyen drásticamente. Así para el rango de temperaturas que se ha estudiado que va desde 10 °C hasta 35 °C, la autonomía oscila hasta 32,74 km en las baterías de ácido – plomo, 19,2 km para las de níquel – cadmio y finalmente 124,73 km para las de ión – litio.
- La variable que más afecta a la autonomía es la masa del vehículo, a medida que aumente la carga transportada disminuye el alcance del vehículo

llegando a recorrer tan sólo unos 81 km si circula a la máxima carga autorizada, 1985 kg, en el caso de las baterías de ácido – plomo. De la misma forma disminuyen sus prestaciones como es de esperar independientemente de la tecnología que se emplee.

- Otro factor que puede tener una influencia significativa en el alcance del vehículo es la cantidad de accesorios auxiliares que están consumiendo energía. Entre el caso más favorable, que consiste en llevar el mínimo de accesorios en funcionamiento (20 W) y el más desfavorable que consiste en llevar el máximo de accesorios funcionando (unos 760 W entre climatizador, iluminación de la carretera, señalización del vehículo, radio, etc.) esto puede suponer una disminución del 9,05% en la autonomía en el caso de la batería ácido – plomo, 8,75% para la batería de níquel – cadmio y 8,54% para el caso de la tecnología de ión – litio.

La vida de la batería es un dato de especial relevancia debido al coste que supone su reposición. Como se ha visto, la degradación de la batería se produce debido a factores acumulativos que son independientes del funcionamiento y que evolucionan con el tiempo, y por otro lado a factores que sí están directamente relacionados con las condiciones de uso.

Con respecto al vehículo híbrido:

- La unidad de control de acoplamiento híbrido en paralelo (UCAH-P) realiza la gestión de la potencia para que ésta sea adecuada. Se ha conseguido construir un modelo de vehículo híbrido con una elevada eficiencia, el cual diferencia entre conducción urbana e interurbana, ajustándose a ambas, e incluye numerosas variables de análisis permitiendo una eficaz localización de comportamientos inadecuados del vehículo.
- A diferencia de los vehículos eléctricos, donde el factor crítico de funcionamiento es el peso de las baterías, en los híbridos toma vital importancia el precio, número de ciclos de vida y eficiencia de las mismas. Esto se puede observar en los resultados obtenidos, para un ciclo de conducción FTP 75, donde realizan el mismo trayecto (velocidad y



distancia), las baterías de ácido – plomo poseen una profundidad de descarga de 0,068 frente a 0,043 de las de ión – litio.

- El motor eléctrico, por sus características de entrega de potencia, no precisa en general, de una transmisión de varias marchas en concepto de potencia máxima disponible. Sin embargo, el uso de una relación única de transmisión le obliga a trabajar en muchas situaciones fuera de su área de máximo rendimiento. Se debería valorar la utilización de una transmisión de dos marchas para la entrega de par del motor eléctrico.

Además de realizar el modelo dinámico y eléctrico de un vehículo eléctrico, se ha perfeccionado una herramienta informática capaz de planificar las estaciones de carga para recargar la batería de los vehículos eléctricos con el mínimo coste de planificación. Para el desarrollo de dicha herramienta, se ha desarrollado un novedoso algoritmo de optimización basado en los Algoritmos Genéticos. Todo ello, se ha integrado dentro de un Sistema de Información Geográfica, ArcGis, que permite trabajar con datos alfanuméricos y gráficos, realizar operaciones complejas con los datos espaciales y representar gráficamente por pantalla y en hojas Excel las soluciones obtenidas con el algoritmo ejecutado.

Los aspectos más importantes de esta herramienta informática son:

- Introducción del mapa en ArcGis: esta actividad consiste en la preparación de los datos. Si los datos no están en formato Shapefile (shp), esta tarea requiere gran paciencia y tiempo, ya que para introducir el mapa en ArcGis, lo primero que hay que hacer es digitalizarlo. Una vez realizado esto, se procede a la limpieza de éste. Para ello, hay que eliminar todos los elementos duplicados y crear polilíneas cerradas. Después, se abre desde el ArcGis con formato DWG (formato de AutoCad). Finalmente, se seleccionan todas las superficies de estudio, ubicadas en una capa y ésta se transforma a formato Shapefile con la finalidad de convertir las áreas a entidades y así, éstas posee todas las propiedades de la entidad área. Con estas propiedades se calcula el punto medio y el área de cada manzana.

- Obtención de los datos: la obtención de los datos se realiza a través del ArcGis. Hay dos tipos de datos a partir de los cuales se obtiene la solución óptima. Éstos son:
  - Las demandas: se obtienen a partir de la superficie selecciona y según el uso del suelo, es decir, cada manzana de un núcleo urbano posee una superficie específica; se calcula esta superficie y su punto medio. A partir de estos datos, se obtiene la demanda de esa zona tanto numérica como espacialmente. En la aplicación desarrollada el número de manzanas es de 2136.
  - Localización de las estaciones de carga: estos datos los introduce el usuario a través de una hoja de Excel o los genera aleatoriamente el programa.
- Obtención de la solución óptima: la solución óptima de la localización de las estaciones de carga se realiza mediante el algoritmo de optimización desarrollado, basado en los Algoritmos Genéticos. Este método calcula la distancia existente entre cada punto de demanda y las estaciones de carga. Se elige la mínima distancia y se asocia el punto de demanda con la estación de carga más cercana. Una vez seleccionada la estación de carga que le corresponde a cada demanda, se evalúan los costes de la planificación de las pérdidas debida a la red de distribución y las pérdidas por costes indirectos. Después, se elige el mínimo coste. Para obtener soluciones mejores, se cruzan y mutan las soluciones introducidas inicialmente; una vez obtenido nuevas soluciones se cruzan y mutan las mejores soluciones existentes.
- Representación de la solución: la representación de la solución obtenida se realiza a través de la pantalla por medio de un mapa temático, realizado con ArcGis. Para la realización del mapa temático se ha adaptado la salida del programa para que ArcGis lo entienda y represente la solución. En esta representación, se puede observar la distribución geográfica de las estaciones de carga y la zona que alimenta cada estación de carga. Esta zona está coloreada con diferentes colores, así se distingue con un golpe de vista la planificación de la red de estaciones de carga obtenida.

Después de haber realizado el programa se ha procedido a su validación.

Las ventajas que se pueden observar en las soluciones obtenidas en la planificación de la red de distribución de las estaciones de carga para la recarga de vehículos eléctricos son:

- ⊗ Disminución de las pérdidas de energía en la red
- ⊗ Reducción de las pérdidas de coste indirectos
- ⊗ Incremento de la calidad de servicio al mejorar la fiabilidad
- ⊗ Reducción considerable del coste de la red de planificación de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos

El objetivo de esta tesis doctoral era desarrollar un programa, el cual minimizara el coste en la red de planificación de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos modelados en la misma. Este objetivo se ha cumplido a lo largo de la tesis como se ha podido ver en el capítulo de 6.3.-Validación del programa desarrollado. La reducción del coste de las pérdidas es considerable.

Se pretende que este programa sea una herramienta informática con la cual se pueda mejorar el sistema de distribución de las estaciones de carga para los vehículos eléctricos. La labor investigadora realizada es importante para el desarrollo tecnológico y para el diseño de los sistemas de distribución, y sobre todo, para la planificación de las estaciones de carga de una zona.

Como conclusión, el algoritmo desarrollado se puede aplicar a la planificación de las estaciones de carga de cualquier zona, se puede ejecutar con zonas rurales, urbanas, países, Comunidades Autónomas, etc. El uso de un Sistema de Información Geográfica es primordial porque así se puede obtener la demanda en una determina área según la superficie de esa zona y el uso del suelo. Otra ventaja de los Sistemas de Información Geográfica es la representación de las soluciones geográficamente y el tratamiento de los tipos de datos, es decir, puede tratar datos espaciales, numéricos y alfanuméricos, de tal manera que el usuario pueda manejar el programa sencillamente.



# Capítulo 8

---

## *Anexos*

### **8.1.- Introducción**

En este apartado se van desarrollar y analizar las diferentes partes en las que consta los programas de simulación de los diferentes tipos de vehículos eléctricos, es decir, el vehículo puramente eléctrico y el híbrido en paralelo y la localización de las estaciones de carga de los vehículos eléctricos.

A parte de ello, se van a señalar las diferentes variables introducidas en Matlab y la macro desarrollada en Visual Basic para el desarrollo de los modelos de los vehículos eléctricos y la localización de las estaciones de carga de los mismos, respectivamente.

## 8.2.- Ciclos de conducción

Un ciclo de conducción es un conjunto de velocidades segundo a segundo que el vehículo simulado alcanza durante la simulación. Hay muchos ciclos de conducción estándar utilizados en las pruebas de los vehículos de carretera para la economía de combustible y con otros fines.

En esta tesis se han tenido en cuenta seis tipos diferentes de ciclos de conducción los cuales se han agrupado en dos grupos:

- Reglado
  - FTP75
  - UNECE Elementary Urban
  - UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered Vehicles)
  - UNECE Reg 83 Extra-Urban Driving Cycle
- Experimentales
  - Tráfico fluido
  - Tráfico congestionado o no fluido

### ***8.2.1.- Ciclos de conducción reglados***

#### **8.2.1.1.- FTP75**

El programa conducción en ‘ciudad’ o FTP75 consiste en partir con el motor frío y haciendo 23 paradas en un período de 31 minutos para una velocidad media de 20 mph (32 km/h) y con una velocidad máxima de 56 mph (90 km/h).

El ciclo tiene dos fases: fase de ‘arranque en frío’ de 505 segundos en una distancia proyectada de 5,78 kilómetros, con una velocidad media 41,2 km/h, y ‘fase transitoria’ 864 segundos. Las dos fases se separan por detener el motor durante 10 minutos. En los EE.UU. se aplican unos factores de ponderación de 0,43 y 0,57 para la primera y segunda fase, respectivamente.

El ciclo simula un recorrido urbano de 12,07 kilómetros (7,5 millas) con paradas frecuentes. La velocidad máxima es de 91,2 km/h (56,7 millas/h) y la velocidad media es del 31,5 km/h (19,6 millas/h). Un promedio de peso de la ciudad (55 %) y de la carretera (45 %) de las economías de combustible se utiliza para determinar el impuesto por alto consumo.

El procedimiento ha sido actualizado a la FTP75 añadiendo un ciclo de ‘arranque en caliente’, que se repite el ciclo de ‘arranque en frío’ y moviendo el 10 de pausa al final de la fase ‘transitoria’.

Los parámetros básicos del ciclo FTP75 son los siguientes:

Parámetros básicos	Valores
Distancia recorrida	11,04 millas (17,77 kilómetros)
Duración	1874 segundos
Velocidad media	21,2 mph (34,1 km/h)

Tabla 24: Parámetros básicos del ciclo FTP75

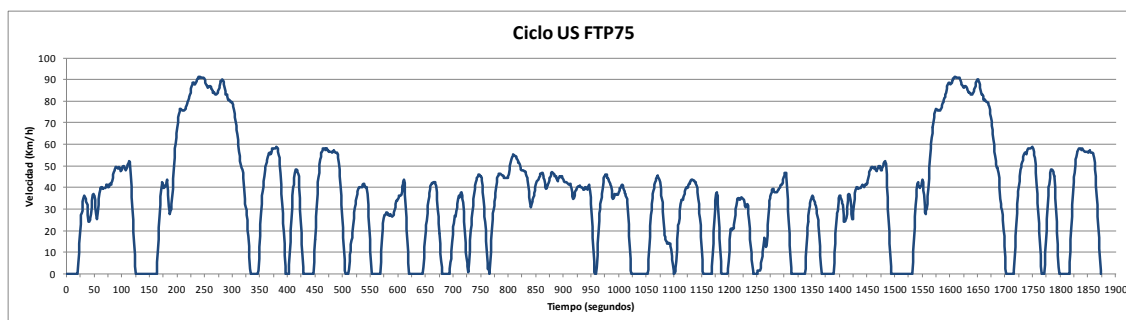


Figura 106. Ciclo de conducción FTP75

### 8.2.1.2.- New European Driving Cycle (NEDC)

De acuerdo a la directiva 98/69/EC [55] se efectúa la prueba de acuerdo a este esquema: la primera parte representa conducción urbana, en la que el vehículo se arranca por la mañana (tras haber estado toda la noche aparcado) y se conduce en hora punta con múltiples paradas de atasco. La segunda parte representa una conducción de carretera con una velocidad máxima de 120 km/h. Todas las pruebas tienen los ajustes indicados en la directiva 70/220/EC.

**8.2.1.2.1.- UNECE Elementary Urban Cycle (Part 1)**

El test urbano consiste en arrancar el coche, dejarlo al ralentí durante 11 segundos, poner primera, acelerar hasta 15 km/h, mantener 8 segundos esa velocidad y volver a detenerse, en este caso, otros 21 segundos. Posteriormente, se vuelve a arrancar y se acelera suavemente hasta 32 km/h, en segunda, velocidad que se mantiene durante 24 segundos. Tras una nueva parada, se sube, en tercera hasta 50 km/h. Esa velocidad se mantiene unos segundos, luego se baja a 35 km/h y el coche se detiene de nuevo. Esta secuencia se repite en cuatro ocasiones hasta totalizar 13 minutos a una media de 18,77 km/h para una distancia de 4067 metros. Con esta prueba se intentan reproducir las condiciones de circulación urbana con las paradas correspondientes en semáforos e intersecciones y el resultado queda homologado como consumo urbano

Los parámetros básicos del ciclo urbano elemental, parte 1 del Test 1, (UNECE Elementary Urban Cycle) son los siguientes:

Parámetros básicos	Valores
Distancia recorrida	0,994 kilómetros
Duración	195 segundos
Velocidad media	18,35 km/h

Tabla 25: Parámetros básicos del ciclo urbano elemental

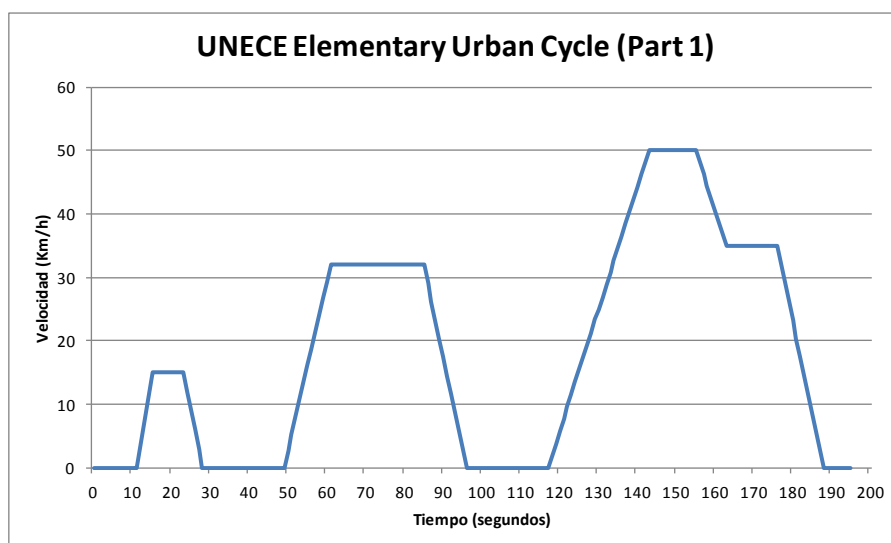


Figura 107. Ciclo de conducción UNECE Elementary Urban Cycle (Part 1)



**8.2.1.2.2.- UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Part 2)**

La prueba continúa sin detener el coche en una segunda parte que busca reproducir las condiciones de circulación en carretera. En este caso, tras un periodo al ralentí de 20 segundos, se acelera hasta 70 km/h en cuarta, velocidad que se mantiene durante 50 segundos. Después, se baja a 50 km/h y se mantiene también durante un tiempo antes de subir de nuevo a 70 km/h, y mantener esa velocidad otros 50 segundos. Luego se acelera hasta 100 km/h, se mantiene esa velocidad unos segundos y se sigue acelerando hasta alcanzar los 120 km/h. Tras 10 segundos a esa velocidad, se detiene el coche. La distancia teórica recorrida es de casi 7 kilómetros en 6 minutos y 40 segundos a una media de 62,6 km/h.

Los parámetros básicos del ciclo extra-urbano, parte 2 del Test 1 (UNECE Extra-Urban Driving Cycle) son los siguientes:

Parámetros básicos	Valores
Distancia recorrida	6,609 kilómetros
Duración	400 segundos
Velocidad media	62,59 km/h

Tabla 26: Parámetros básicos del ciclo extra-urbano

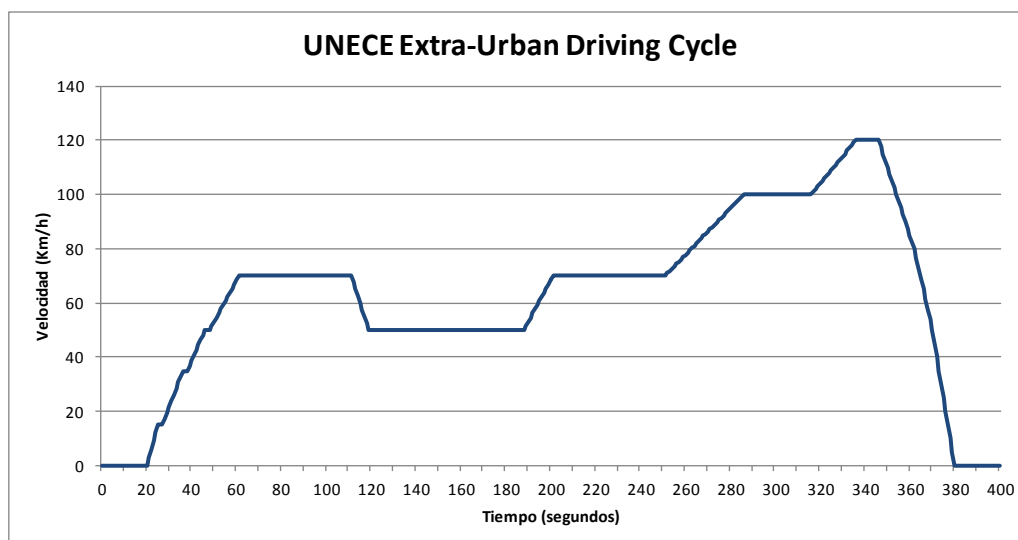


Figura 108. Ciclo de conducción UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Part 2)

**8.2.1.2.3.- UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered Vehicles)**

En el caso de vehículos con poca potencia, la prueba continúa sin detener el coche en una segunda parte que busca reproducir las condiciones de circulación en carretera. En este caso, tras un periodo al ralentí de 20 segundos, se acelera hasta 70 km/h en cuarta, velocidad que se mantiene durante 50 segundos. Después, se baja a 50 km/h y se mantiene también durante un tiempo antes de subir de nuevo a 70 km/h y mantener esa velocidad otros 50 segundos. Luego se acelera hasta 90 km/h, se mantiene esa velocidad 84 segundos y se detiene el coche.

Parámetros básicos	Valores
Distancia recorrida	6,609 kilómetros
Duración	400 segundos
Velocidad media	59,48 km/h

Tabla 27: Parámetros básicos del ciclo de conducción extra-urbano (Vehículos con baja potencia)

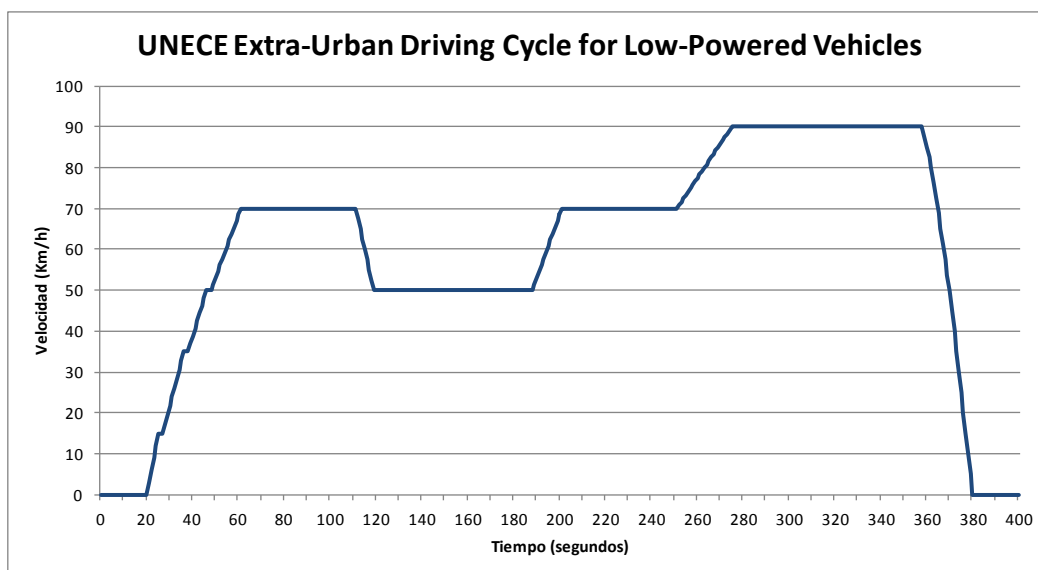


Figura 109. Ciclo de conducción UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low-Powered Vehicles)

**8.2.2.- Ciclos de conducción experimentales**

Borja Pintos [57] desarrolló una metodología que permitió generar ciclos de conducción para bancos de rodillos, los cuales representan la conducción en tráfico real urbano. Para ello, registró los datos mediante un equipo de captación de datos equipado a

bordo de un vehículo y generó dos ciclos representativos en función de la densidad del tráfico: uno para tráfico fluido y otro para tráfico congestionado o no fluido.

**8.2.2.1.- Tráfico fluido**

Los parámetros básicos del ciclo con tráfico fluido son los siguientes:

Parámetros básicos	Valores
Distancia recorrida	6,624 kilómetros
Duración	1000 segundos
Velocidad media	23,85 km/h

Tabla 28: Parámetros básicos del ciclo tráfico fluido

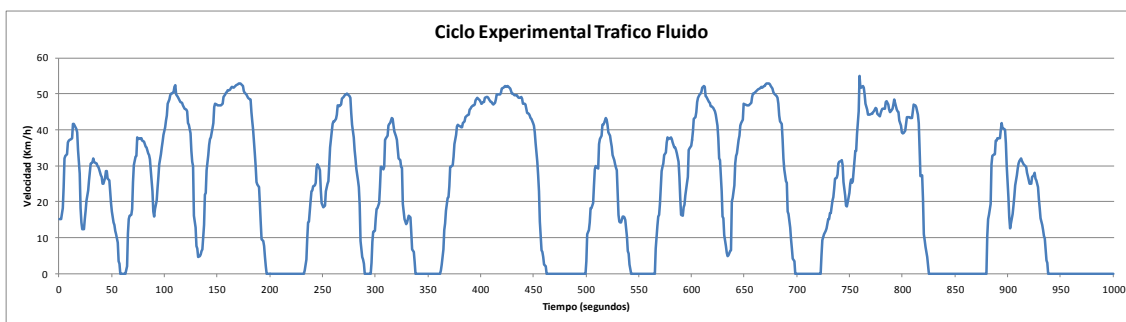


Figura 110. Ciclo de conducción con tráfico fluido

**8.2.2.2.- Tráfico congestionado o no fluido**

Los parámetros básicos del ciclo con tráfico no fluido son los siguientes:

Parámetros básicos	Valores
Distancia recorrida	10,074 kilómetros
Duración	1500 segundos
Velocidad media	24,18 km/h

Tabla 29: Parámetros básicos del ciclo tráfico no fluido

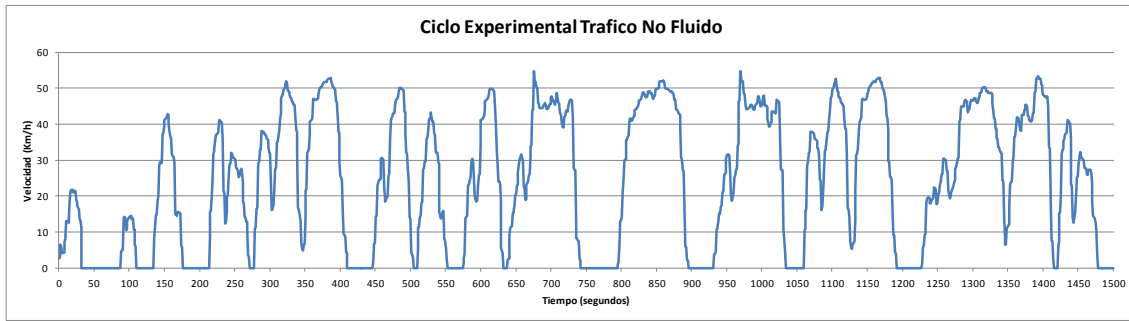


Figura 111. Ciclo de conducción con tráfico no fluido

## 8.3.- Datos de entrada

### 8.3.1.- Simulación del vehículo eléctrico en Matlab/Simulink

Dependiendo de la simulación a realizar se introducirán unos datos u otros.

A continuación se muestran las variables utilizadas para las simulaciones tanto del vehículo eléctrico como del vehículo eléctrico híbrido y en cada apartado se mostrarán los datos de cada simulación.

`densidad=1.25; %densidad del aire [kg/m3]`

`m=1605; %Masa del vehículo más el conductor (70 Kg) [Kg]`

`Af=2.64; %Area frontal del vehiculo [m2]`

`Cd=0.3; %Coeficiente aerodinámico`

`Coef_rozam=0.01; %Coeficiente rozamiento ruedas de pliegue radial`

`Theta=0; %Inclinacion del terreno`

`Va=0; %Velocidad del aire [m/s]`

`Gratio=13; %Ratio de reducción`

`r=0.376; %Radio de la rueda [m]`

`Geff=0.95; %Eficiencia de la caja de cambios`

`Regen=0.5; %Nivel de recuperación de energía por el motor y la batería en el caso de frenada regenerativa`

`Pacc=150; %Potencia accesorios [W]`

```
Kc=0.3; %Coeficiente de perdidas en el cobre
Ki=0.01; %Coeficiente de perdidas en el hierro
Kw=5*10^-6; %Coeficiente de perdidas por fricción con el
aire
c=600; %Constante de perdidas para todas velocidades

ivc=4; %[km/h] Intervalo de deteccion velocidad cte
tvc=2; %[seg] Tiempo de deteccion velocidad cte

i1=4; %Indice de transmisión 1
i2=2; %Indice de transmisión 2
i3=1; %Indice de transmisión 3
i4=0.5; %Indice de transmisión 4
i5=0.3; %Indice de transmisión 5
marchas=4; %Número de marchas

rpm_max=5000; %[rpm] Rendimiento máximo antes de subir
marcha
rpm_min=1000; %[rpm] Rendimiento minimo antes de reducir
marcha

%MOTOR ELECTRICO
Tmax=387.5; %Par máximo del motor eléctrico [Nm]
Pmaxe=60870; %Potencia máxima del motor eléctrico [W]
rend_e_m=0.90; %Máximo rendimiento del motor eléctrico
Kc=0.3; %Coeficiente de perdidas en el cobre
Ki=0.01; %Coeficiente de perdidas en el hierro
Kw=5*10^-6; %Coeficiente de perdidas por fricción con el
aire
```

```
c=600; %Constante de perdidas para todas velocidades
ie=0.5; %Indice de transmisión motor eléctrico

%MOTOR TÉRMICO
rend_t_m=0.343; %Máximo rendimiento del motor térmico
Vmin=20; %[Km/h] Velocidad mínima motor térmico

%BATERÍA
CPPS=3.6*10^6; %[J] Carga Máximo PPS (Peaking Power Source
("Fuente de Potencia de Punta"))
cmax=0.7*CPPS; %[J] Límite superior de la carga máxima de
la batería: 70% de la carga máxima de la batería
cmin=0.5*CPPS; %[J] Límite superior de la carga minima de
la batería: 50% de la carga máxima de la batería
ren_b=0.85; %Rendimiento batería
CPPSi=0.60*CPPS; %[J] Carga inicial de la batería
establecida en un 60% de la carga Máxima
num_ciclos=2*10^8; %Número de ciclos de recarga
experimentados cada 200000 km
d_recorrida_bat=200000; %[km] Distancia recorrida en el
numero de ciclos
ciclos_vida=750; %Ciclos de vida de la batería
precio_bateria=100; %[€/kWh] Precio batería unidad de
energía
PVP_bateria= precio_bateria /3600000*CPPS; %[€] (1
kWh=1000J/s*3600s)

rendimiento_max_teorico=ren_b*rend_e_m*rend_t_m;

%COMBUSTIBLE
d_gasoil=0.832; %[Kg/l] Densidad del gasoil
```

```
d_gasolina=0.745; %[Kg/l] Densidad de la gasolina
pc_gasoil=43.10*10^6;    %[J/Kg] Poder calorifico del
gasoil
pc_gasolina=43.20*10^6;    %[J/Kg] Poder calorifico del
gasoil
energia_especifica_gasoil=d_gasoil*pc_gasoil;
energia_especifica_gasolina=d_gasolina*pc_gasolina;
PVP_comb=1.40;    %[€/l] Precio del combustible
```

### **8.3.2.- Planificación de estaciones de carga**

Como se ha comentado en el apartado 6.2.2.-Programa de algoritmos genéticos hay tres tipos de entradas:

- ☞ Datos\_EV
- ☞ Datos\_EC
- ☞ Datos

#### **8.3.2.1.- Datos\_EV**

Estos datos lo que representan son la demanda de los vehículos eléctricos. Para la obtención de estos datos se ha obtenido el área de cada manzana y con la densidad de población se ha obtenido la población que le corresponde a cada manzana. Se ha supuesto que las familias están formadas por cuatro miembros y que poseen dos vehículos. De estos vehículos se ha supuesto que un 20 % son eléctricos.

Teniendo la cantidad de los vehículos eléctricos, la potencia unitaria de cada uno de ellos en kWh, el tiempo de recarga y el porcentaje de recarga de la batería se obtiene la potencia en kW que demanda cada manzana. Esta potencia se ubica en el centro de la misma y se obtiene las coordenadas de ésta.

El valor de la superficie de las manzanas y las coordenadas del centro de éstas se han obtenido a través del ArcGis, los cuales se pueden exportar en un archivo Excel y trabajar con ellos. A continuación se muestra un extracto como ejemplo de los valores obtenidos ya que hay un valor de 2136 puntos de demanda.

OJD	FID	Entity	Layer	Color	Linetype	Elevation	LineWt	RefName	Area	Centro X	Centro Y
0	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		14773,313714	685548,806872	4615504,344689
1	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3588,619634	687169,797472	4613134,54637
2	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		2977,973936	683502,139563	4614119,88627
3	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		7699,137136	684796,083119	4613560,7066
4	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3310,621708	682841,689721	4613007,04268
5	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		1751,696409	684616,958684	4610551,44875
6	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		2727,646299	683354,391272	4613400,1949
7	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		2301,770945	685681,889488	4611602,58956
8	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		7014,226361	684994,287876	4610963,95092
9	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		653769,869043	685313,908584	4617085,78858
10	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		1766,076114	685674,249236	4615393,49729
11	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3431,29265	687236,81789	4613126,10371
12	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		4049,695406	683595,548919	4614115,4235
13	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		1820,743342	684825,244617	4613805,01106
14	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		7077,857699	682816,174871	4612940,90983
15	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		2921,75964	684667,66726	4610582,41398
16	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3406,680639	683287,857491	4613375,98263
17	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		2235,336865	685711,396255	4611576,4272
18	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3894,367305	684721,462259	4610965,53752
19	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		498683,191433	685093,328952	4616749,28496
20	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		10630,011117	685690,012189	4615462,16415
21	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		1836,913675	687294,448715	4613112,60849
22	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		10553,690496	683538,836484	4614196,33035
23	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3263,394442	684645,789258	4613657,59945
24	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		10325,145888	682836,302134	4612876,09667
25	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		2589,587505	684680,182822	4610612,73833
26	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3467,605713	683209,149094	4613324,96982
27	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		7479,267606	685692,325374	4611677,13436
28	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		33402,269317	686835,978918	4611622,52836
29	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		15626,574001	685558,197901	4617265,30965
30	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		6521,650295	687040,772619	4613158,81313
31	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3709,020802	683654,546068	4614217,59443
32	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		5056,847098	684942,68358	4613568,36152
33	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		2337,21719	684693,721631	4610645,18917
34	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		481,977153	683315,636326	4613357,53119
35	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		6714,156767	685701,238007	4611734,68913
36	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		16495,965001	685729,724918	4617235,30749
37	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		4827,268645	685546,935124	4615830,59426
38	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		2530,993309	687084,709669	4613104,75252
39	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		12262,281719	683770,975682	4614189,41771
40	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		4999,479724	684944,823401	4613529,75263
41	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		6395,859741	682618,638809	4613061,99947
42	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		1923,337539	684706,728932	4610675,70277
43	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		454,38728	683347,788436	4613367,55285
44	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		1780,696033	685793,155321	4611676,08179
45	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		3351,939161	685720,316814	4617417,16056
46	0	LWPolyline	manzanas	5	Continuous	0	25		11372,64635	685663,30368	4615838,86396

Figura 112. Tabla de datos obtenida del ArcGis

### 8.3.2.2.- Datos\_EC

Estos datos son los que ha introducido el usuario como solución inicial a partir de la cual se genera la descendencia con mejores cualidades, en este caso en concreto, se obtienen soluciones con menor coste.

En la Figura 113 se puede observar parcialmente un ejemplo de estos datos:



		Coordenada X	Coordenada Y	Potencia (W)	Num crom
		685063,8634	4617438,216	3700	
		686484,686	4610111,229	3700	
		682807,2627	4610361,962	3700	
		681052,1288	4612534,985	3700	
tamaño cro	14	684172,3668	4616268,127	3700	
num_crom	20	684033,0705	4613983,667	3700	
		684172,3668	4610278,384	3700	1
		687487,6196	4613092,17	3700	
		681330,7215	4614930,882	3700	
		683782,337	4616073,112	3700	
		687097,5899	4613342,904	3700	
		680857,1139	4614763,726	3700	
		687459,7604	4614150,822	3700	
		684534,5373	4613398,622	3700	
		679074,1208	4619750,535	3700	
		683698,7592	4619834,113	3700	
		689298,472	4619694,817	3700	
		689604,924	4617354,638	3700	
		689744,2203	4612284,252	3700	
		689521,3462	4609136,154	3700	
		686066,797	4608857,562	3700	
		682779,4034	4609191,873	3700	2
		679018,4023	4609164,014	3700	
		679157,6986	4611169,881	3700	

Figura 113. Entrada de datos por fichero

En las columnas denominadas Coordenada X y Coordenada Y se almacena la posición de la estación de carga con su correspondiente potencia, almacenada en la columna denominada Potencia (W). La variable “tamaño cro” almacena las estaciones de carga por solución, es decir, los cromosomas que hay en un individuo y la siguiente variable, “num\_cro”, representan las soluciones iniciales o lo que es lo mismo el número de padres que hay en la población a partir de los cuales se genera la descendencia con mejores características. Esta variable está representada en la columna denominada “Num crom”. En este ejemplo en concreto, hay veinte soluciones iniciales (“num\_cro”) y cada una de ellas posee catorce estaciones de carga (“tamaño cro”).

### 8.3.2.3.- Datos

Las variables que se utilizan durante el programa de algoritmos genéticos son las siguientes:

Número de vehículos por familia.....	2
Densidad de población (hab/km <sup>3</sup> ).....	688,81
Miembros por familia.....	4
Fracción EV .....	20 %
Potencia unitaria (kWh) .....	22

Tiempo de recarga (h).....	7
Porcentaje de recarga de la batería.....	80 %
Precio de recarga (€/kWh).....	p=0,1
Kilómetros por kWh.....	g=7
Coste del viaje de los usuarios (€/h).....	k=2,03
Velocidad media (Km/h).....	v =20
Distancia media recorrida (Km).....	dmax= 30

#### 8.4.- Modelado Vehículo Eléctrico en Matlab/Simulink

A partir de las relaciones definidas en los apartados anteriores, se realiza un modelo que las englobe para que interactuando entre ellas obtengamos los parámetros deseados.

En primer lugar, se muestra el código en Matlab a partir del cual se obtienen los valores de las variables, como masa del vehículo, área frontal, coeficiente de rozamiento, velocidad dependiendo del ciclo elegido, tipo de batería, etc.

A partir de aquí, se crea un modelo en Simulink (Figura 114), el cual de forma gráfica relaciona todas las variables del sistema. Realiza la simulación en pasos de un segundo y se repite la simulación hasta que la batería posee una profundidad de descarga mayor de 0,9. Se ha elegido este valor para que la batería no sufra y no se descargue completamente.

A continuación, se muestra el código del programa en Matlab:

```
Velocidad=questdlg('Elegir tipo de ciclo:', 'Tipo de Ciclo',
'Reglado', 'Experimental', 'Reglado');

if strcmp(Velocidad, 'Reglado')

    Velocidad=questdlg('Elegir tipo de ciclo:', 'Tipo de
Ciclo', 'FTP75', 'UNECE Elementary Urban
Cycle', 'Más', 'FTP75');

end

if strcmp(Velocidad, 'Más')
```

```
Velocidad=questdlg('Elegir tipo de ciclo:', 'Tipo de
Ciclo', 'UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered
Vehicles)', 'UNECE Reg 83 Extra-Urban Driving Cycle', 'UNECE
Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered Vehicles)');

end

if strcmp(Velocidad, 'Experimental')

    Velocidad=questdlg('Elegir tipo de ciclo:', 'Tipo de
Ciclo', 'Tráfico fluido', 'Tráfico no fluido', 'Tráfico
fluido');

end

if strcmp(Velocidad, 'FTP75')

    v=xlsread('FTP75.xlsx', 'D:D');

end

if strcmp(Velocidad, 'UNECE Elementary Urban Cycle')

    v=xlsread('UNECE Elementary Urban Cycle.xlsx', 'C:C');

end

if strcmp(Velocidad, 'UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low
Powered Vehicles)')

    v=xlsread('UNECE Extra-Urban Driving Cycle (Low Powered
Vehicles).xlsx', 'C:C');

end

if strcmp(Velocidad, 'UNECE Reg 83 Extra-Urban Driving
Cycle')

    v=xlsread('UNECE Reg 83 Extra-Urban Driving
Cycle.xlsx', 'C:C');

end

if strcmp(Velocidad, 'Tráfico fluido')

    v=xlsread('Experimental.xlsx', 'C:C');

end

if strcmp(Velocidad, 'Tráfico no fluido')

    v=xlsread('Experimental.xlsx', 'B:B');

end
```

```
V1=v*1000/3600; %Convierte de Km/h a m/s
N=length(v); %Longitud del vector velocidad
t=ones(N,1);
for i=2:N
    t(i,1)=t(i-1,1)+1;
end
V=[t,V1];

densidad=1.25; %densidad del aire [kg/m3]
m=1605; %Masa del vehículo más el conductor (70 Kg) [Kg]
Af=2.64; %Area frontal del vehiculo [m2]
Cd=0.3; %Coeficiente aerodinámico
Coef_rozam=0.01; %Coeficiente rozamiento ruedas de
pliegue radial
Theta=0; %Inclinacion del terreno
Va=0; %Velocidad del aire [m/s]
Gratio=13; %Ratio de reducción
r=0.376; %Radio de la rueda [m]
Geff=0.95; %Eficiencia de la caja de cambios
Regen=0.5; %Nivel de recuperación de energía por el motor y
la batería en el caso de frenada regenerativa
Tipo_bateria=questdlg('Elegir tipo de
bateria:', 'Bateria', 'Acido-Plomo', 'NiCd', 'Ion-Litio',
'Acido-Plomo');
Capacidad=65; %Capacidad [Ah]
if strcmp(Tipo_bateria, 'Acido-Plomo')
    Celdas=195; %Número de celdas
    Temp=10; %Rango de tiempo para el calculo de la
resistencia por medio de la capacidad [h]
```

```
Ra=0.022; %Constante para el calculo de la
resistencia

Tipo_bat=1;

k=1.2; %Coeficiente de Peukert

end

if strcmp(Tipo_bateria, 'NiCd')

    Celdas=325; %Número de celdas

    Temp=3; %Rango de tiempo para el calculo de la
resistencia por medio de la capacidad [h]

    Ra=0.06; %Constante para el calculo de la
resistencia

    Tipo_bat=2;

    k=1.05; %Coeficiente de Peukert

end

if strcmp(Tipo_bateria, 'Ion-Litio')

    Celdas=192; %Número de celdas

    Temp=3; %Rango de tiempo para el calculo de la
resistencia por medio de la capacidad [h]

    Ra=0.06; %Constante para el calculo de la
resistencia

    Tipo_bat=3;

    k=1.05; %Coeficiente de Peukert

end

T=26.7; %Temperatura ambiente [°C]

Pacc=150; %Potencia accesorios [W]

Kc=0.3; %Coeficiente de perdidas en el cobre

Ki=0.01; %Coeficiente de perdidas en el hierro

Kw=5*10^-6; %Coeficiente de perdidas por fricción con el
aire
```

```
c=600; %Constante de perdidas para todas velocidades

find_system('Name','VE_Completo');

DoD_end=zeros(1,1000); %Profundidad de descarga al final de
cada ciclo

CR_end=zeros(1,1000); %Carga eliminada de la bateria,
Peukert, al final de cada ciclo

D_end=zeros(1,1000); %Distancia recorrida en m al final
de cada ciclo

DoD=zeros(1,N); %Profundidad de descarga

CR=zeros(1,N); %Carga eliminada de la bateria, Peukert

D=zeros(1,N); %Distancia recorrida en m

CY=1;

Distancia_acumulativa=0;

DoD_acumulativo=0;

CR_acumulativo=0;

DD=0; %Muestra la descarga de la bateria, la cual debe ser
DD<0.9

while DD<0.9

    open_system('VE_Completo');

    set_param(gcs,'simulationCommand','Start');

    DoD_end(CY)=DoD(end,2);

    CR_end(CY)=CR(end,2);

    D_end(CY)=D(end,2)/1000;

    Distancia_acumulativa=D(end,2); %D(1);

    DoD_acumulativo=DoD(end,2); %DoD(1);

    CR_acumulativo=CR(end,2); %CR(1);
```

```

DD=DoD_end(CY); %Actualizar el estado de descarga
set_param(gcs, 'simulationCommand', 'Stop');
CY=CY+1;
end
close_system('VE_Completo');
plot(D_end, DoD_end, 'k+');
ylabel('Profundidad de descarga');
xlabel('Distancia recorrida**/Km');
    
```

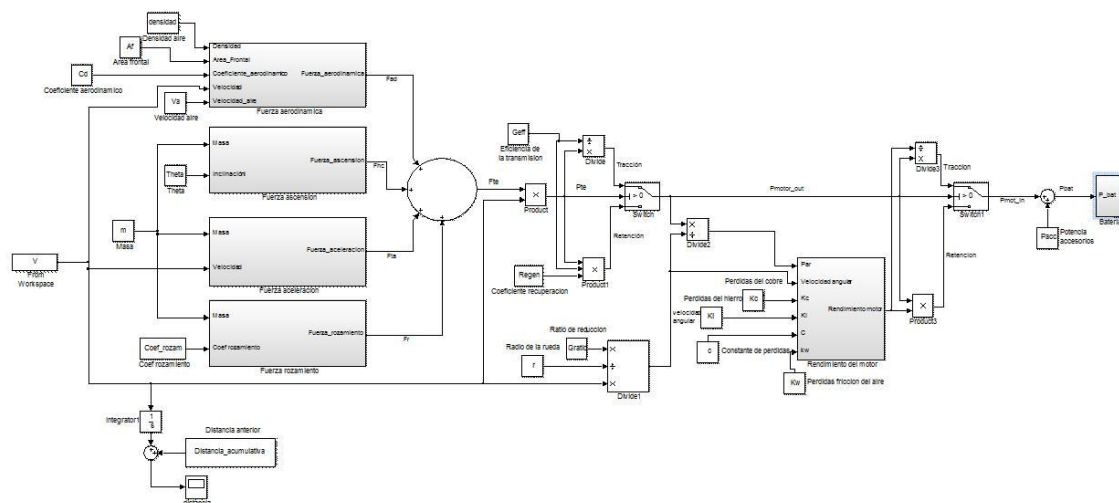


Figura 114. Vista general del modelo del vehículo eléctrico en Simulink

### 8.4.1.- Dinámica del vehículo

Este bloque es el encargado de calcular la fuerza motriz necesaria para cumplir los requerimientos de la marcha del vehículo.

En la dinámica del vehículo se localizan cuatro bloques: Fuerza aerodinámica, Fuerza ascensión, Fuerza aceleración y Fuerza rozamiento, los cuales proporcionan la fuerza de resistencia aerodinámica, la fuerza de ascensión en el caso que exista una cuesta, la fuerza de aceleración y la fuerza de rozamiento, respectivamente.

La fuerza motriz se obtiene combinando la segunda ley de Newton con un equilibrio de fuerzas en la dirección de la marcha del vehículo. De esta forma, la fuerza motriz, “ $F_{te}$ ”, debe ser igual a la suma de las fuerzas anteriormente mencionadas.

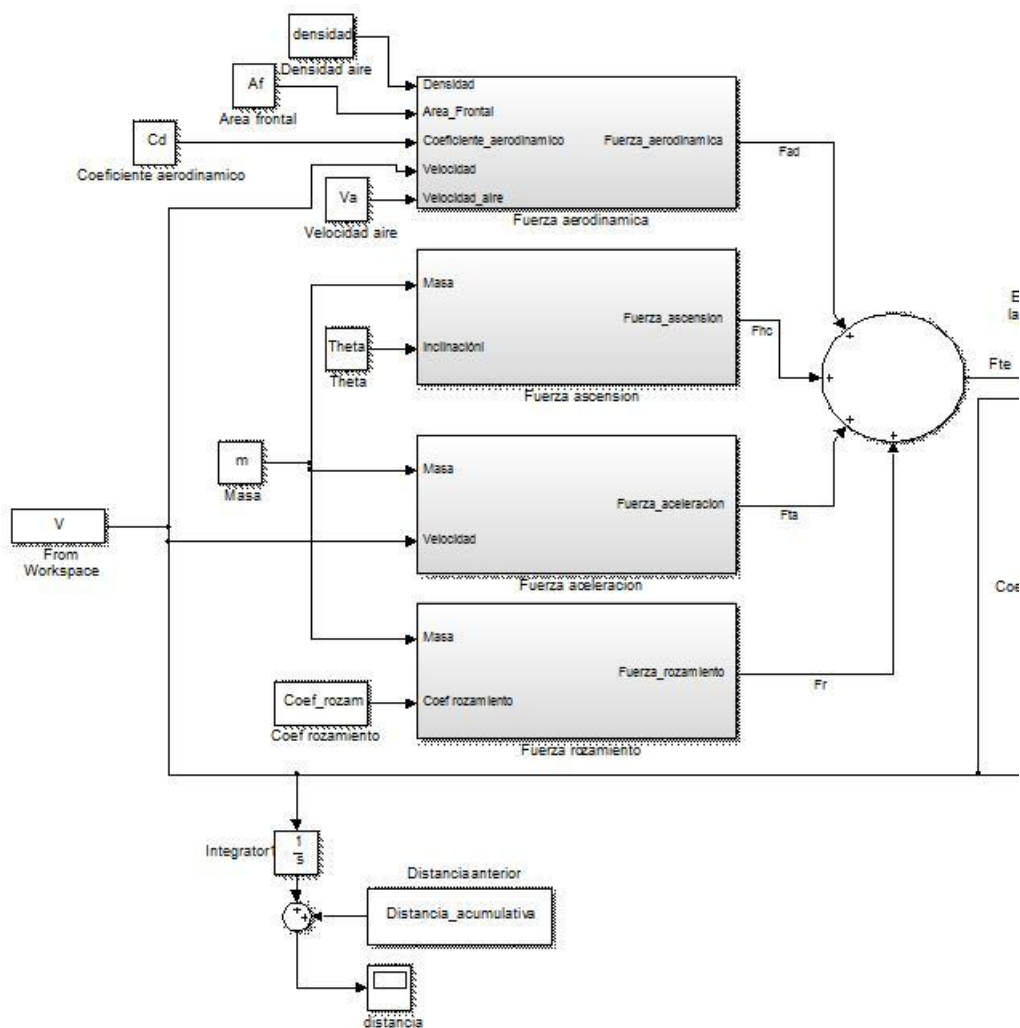


Figura 115. Detalle de la dinámica del vehículo eléctrico en Simulink

### 8.4.2.- Eficacia de la transmisión

La potencia requerida se calcula a partir de la fuerza calculada en el apartado anterior, “ $F_{te}$ ”, por la velocidad en ese instante a la que circula el vehículo.

En primer lugar, hay que tener en cuenta las pérdidas mecánicas de la reductora y del diferencial así como otros elementos como las juntas cardan. Un coeficiente de recuperación es aplicado en el caso de frenada regenerativa que representa el nivel de recuperación de energía por el motor y la batería. Los interruptores (bloque switch) sirven para seleccionar el camino que atraviesa la energía en función de si la energía es positiva (tracción) o negativa (frenada) y así aplicar correctamente los factores de pérdida.



En el bloque Rendimiento del motor se ha implementado la ecuación del rendimiento del motor en función del par motor y la velocidad angular mencionada en el apartado 4.2.-Simulación de un vehículo eléctrico.

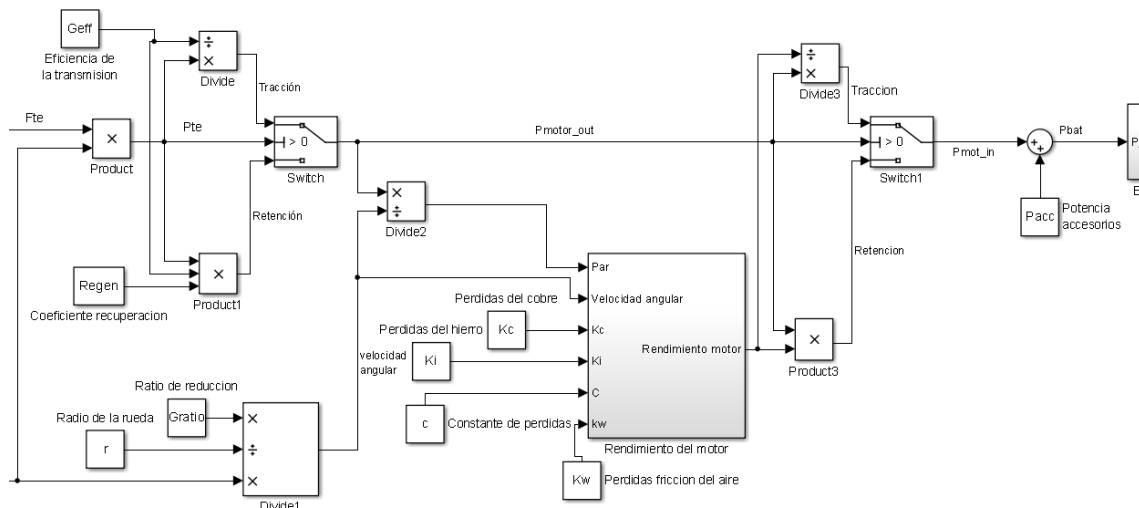


Figura 116. Detalle de los bloques de eficacia de la transmisión en Simulink

### 8.4.3.- Batería eléctrica

La potencia eléctrica que será retirada de la batería para mover el vehículo se obtiene a partir de la potencia necesaria para mover el vehículo, “ $P_{mot\_in}$ ”, teniendo en cuenta las pérdidas en la transmisión. A esta potencia es necesario sumar la potencia que consumen los elementos del vehículo como luces, sistema de climatización, radio, ordenador de a bordo, etc.

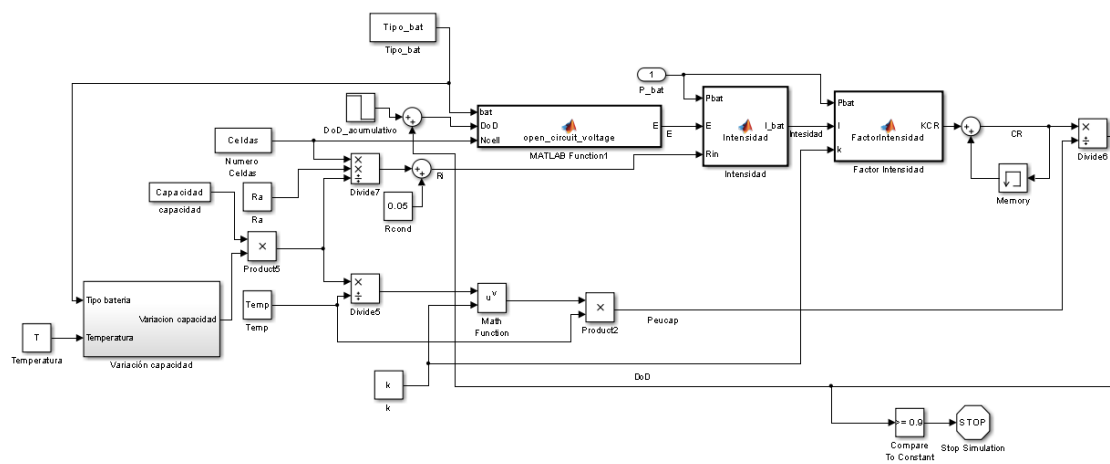


Figura 117. Detalle del bloques batería

En el subsistema denominado “*Variación Capacidad*” se calcula el coeficiente de variación de la capacidad frente a la temperatura. Este bloque tiene como entradas la temperatura y el tipo de batería y como salida el coeficiente de variación de la capacidad con respecto a la temperatura. Si el tipo de batería es ácido – plomo, se activa el interruptor superior, si es níquel – cadmio, se activa el interruptor intermedio y si es ión – litio se activa el interruptor inferior. El interruptor activado deja pasar la señal de la tabla correspondiente, la cual va al sumatorio obteniendo el porcentaje de variación de la capacidad de la batería respectiva en función de la temperatura.

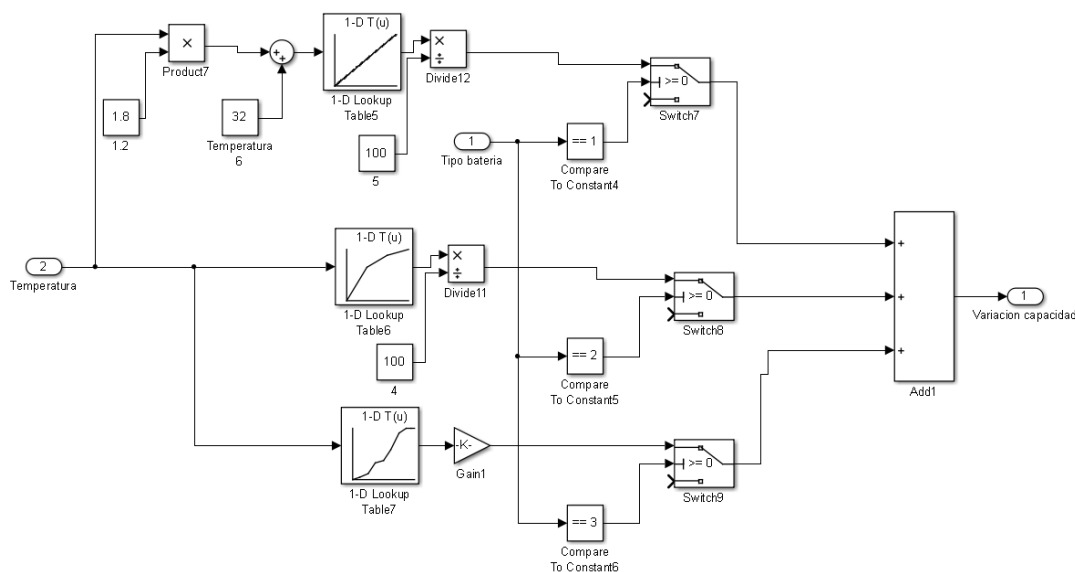


Figura 118. Detalle del bloques variación capacidad

En la función Voltaje a circuito abierto se calcula, como su nombre indica, el voltaje de la batería a circuito abierto en función del tipo de batería elegida, la profundidad de descarga y el número de celdas de las que consta la batería. Se han utilizado las fórmulas y gráficas anteriormente comentadas en el apartado 2.6.2.-Circuito equivalente.

La siguiente función, calcula la intensidad de la batería a partir de la potencia que se le demanda a la misma, el voltaje a circuito abierto y la resistencia interna teniendo en cuenta la resistencia de los conductores.

$$P_{bat} > 0 \rightarrow I = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP_{bat}}}{2R}$$

$$P_{bat} < 0 \rightarrow I = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 8RP_{bat}}}{4R}$$

La última función desarrollada en este bloque calcula el factor de intensidad que hay que añadir a la carga eliminada de la batería para conseguir la carga eliminada en el siguiente paso.

$$P_{bat} > 0 \rightarrow CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t \cdot I^k}{3600}$$

$$P_{bat} < 0 \rightarrow CR_{n+1} = CR_n - \frac{\delta t \cdot I}{3600}$$

siendo en este caso  $\delta t$  igual a la unidad.

A partir de la carga eliminada de la batería y la capacidad original se calcula la profundidad de descarga. Si ésta, en algún momento del ciclo, es mayor de 0,9, éste se detendrá.

## 8.5.- Modelado Vehículo Eléctrico híbrido en paralelo en Matlab/Simulink

En la Figura 119 está representado el modelo del vehículo eléctrico híbrido en paralelo, el cual, al ser tan complejo se han realizado subsistemas los cuales se van a describir a continuación.

Los valores de las variables se obtienen de un fichero, cuyos datos de entrada están descritos en el apartado 8.3.- Datos de entrada. Este fichero se ejecuta en Matlab, el cual te permite elegir el tipo de ciclo de conducción y el tipo de batería como se ha explicado en el modelo de vehículo eléctrico, a continuación, carga las variables en el espacio de trabajo de Matlab y a partir de aquí, Simulink toma los valores.

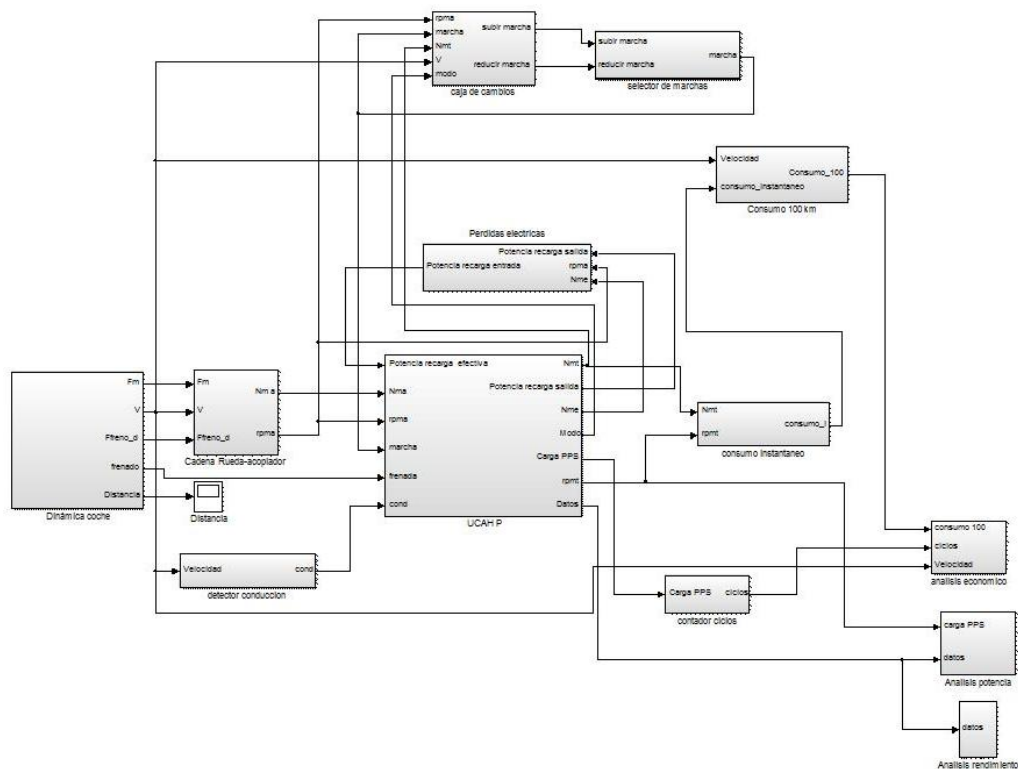


Figura 119. Modelo del vehículo híbrido en paralelo en Simulink

### 8.5.1.- Bloques comunes en la simulación

#### 8.5.1.1.- Desmultiplicador

La entrada a este bloque es el número de marcha con la que circula el vehículo y se obtiene el índice de transmisión y el inverso de éste. Actúa como un interruptor múltiple, dejando pasar la señal que es idéntica al número de marcha. Para evitar tener problemas al realizar el inverso del índice de transmisión, por si éste es cero, se ha colocado un bloque de saturación, el cual proporciona el índice de transmisión de la marcha más alta.

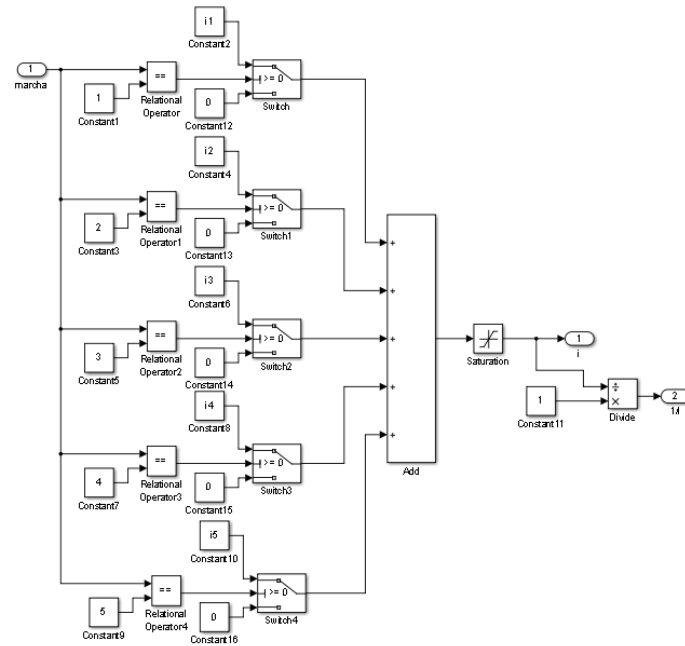


Figura 120. Bloque desmultiplicador

8.5.1.2.- Motor eléctrico

Con la ayuda de este bloque, se obtiene el valor del par que el motor eléctrico puede entregar en función de la velocidad de giro. La curva de par máximo de un motor eléctrico tiene dos zonas claramente diferenciadas: una, en la que el par es constante, y la otra, en la que trabaja a potencia constante. La velocidad a partir de la cual se pasa de una zona a otra es la velocidad base, la cual en esta tesis se ha supuesto de 1500 rpm.

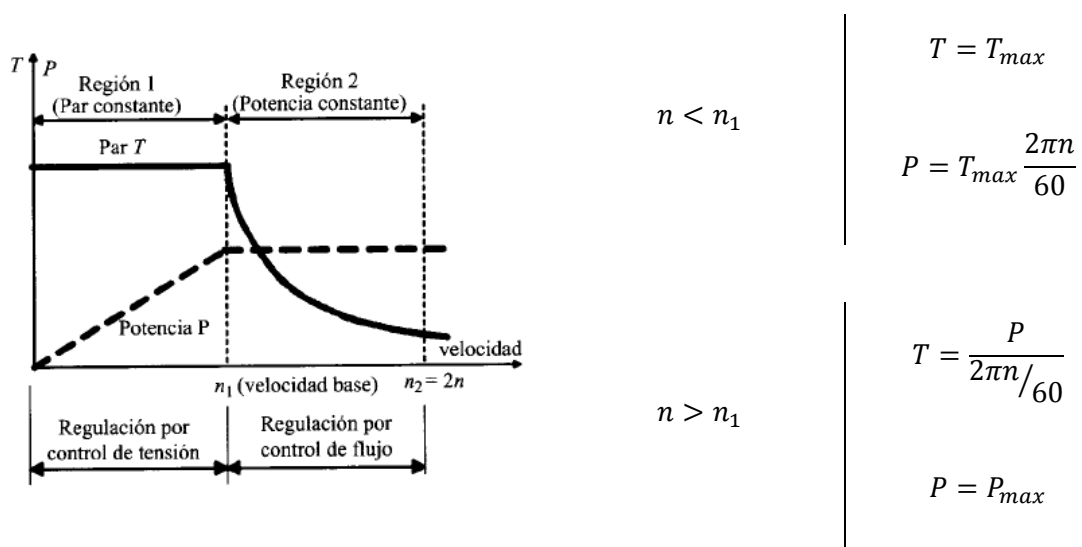


Figura 121. Regulación de velocidad a potencia constante y a par constante de un motor eléctrico

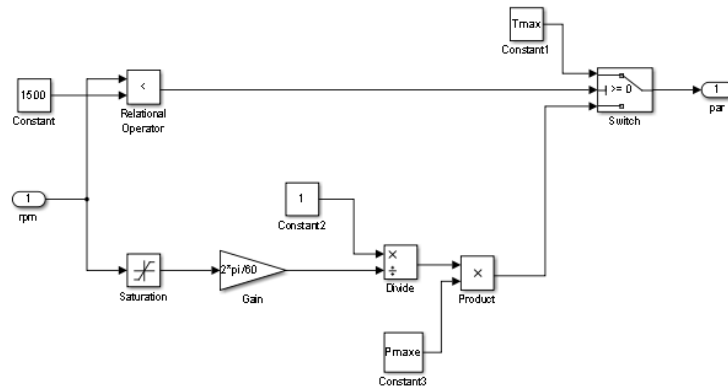


Figura 122. Bloque Motor Eléctrico

### 8.5.1.3.- Rendimiento del motor eléctrico

Este bloque se ha implementado la fórmula del rendimiento del motor eléctrico explicada en el apartado 4.2.-Simulación de un vehículo eléctrico.

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C}$$

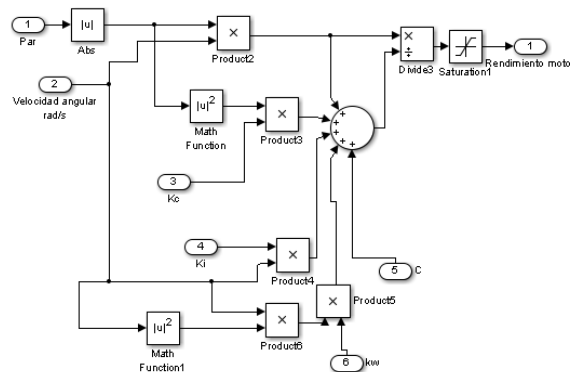


Figura 123. Bloque Rendimiento del Motor Eléctrico

### 8.5.1.4.- Rendimiento del motor térmico

Las entradas a este bloque son el par y el régimen de giro obteniendo el valor del rendimiento del motor térmico. Para ello, a partir de la gráfica de eficiencia del motor térmico elegido, se divide en cuatro sectores. Estos sectores están representados por los cuatro interruptores, los cuales dejan pasar el valor del rendimiento en tanto por cien obtenido de los valores de las tablas de cada sector.

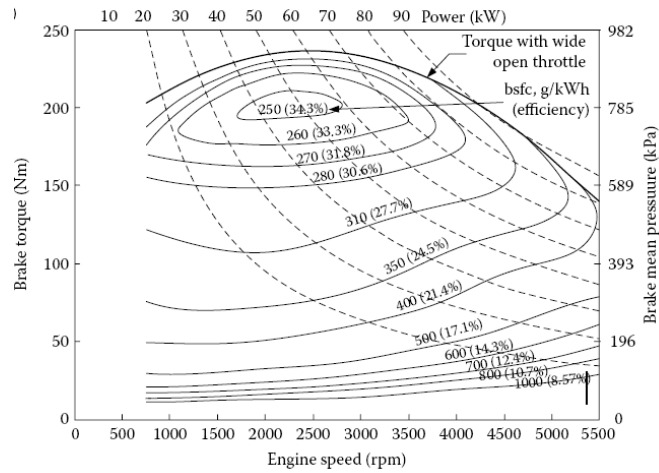


Figura 124. Características de un motor térmico

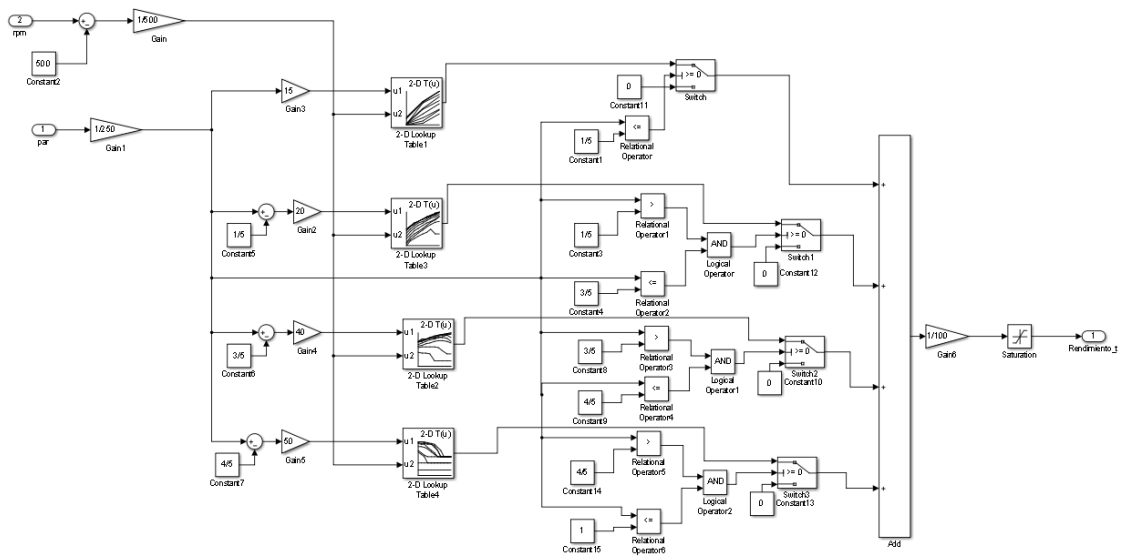


Figura 125. Bloque Rendimiento del Motor Térmico

8.5.1.5.- Velocidad constante

La finalidad de este bloque es determinar si el coche ha permanecido a velocidad constante durante un determinado periodo de tiempo.

El Bloque “Zero-hold” lo que hace es mantener el valor de la señal velocidad durante el tiempo indicado por la variable “*tvc*” (tiempo de detección a velocidad constante; *tvc*=2 segundos). A partir de aquí se divide la señal en dos para sumar o restar a cada parte la mitad del parámetro “*ivc*” (intervalo de detección a velocidad constante; *ivc*=4 km/h). Si la señal se mantiene dentro de este intervalo, se activa el bloque “*If Action Subsystem*” el cual integra una constante de valor 1, actuando como contador. Si éste llega al valor “*tvc*”

entonces se activa la salida del bloque y permanece activa durante el intervalo de tiempo que la señal de velocidad se halle dentro del intervalo indicado anteriormente.

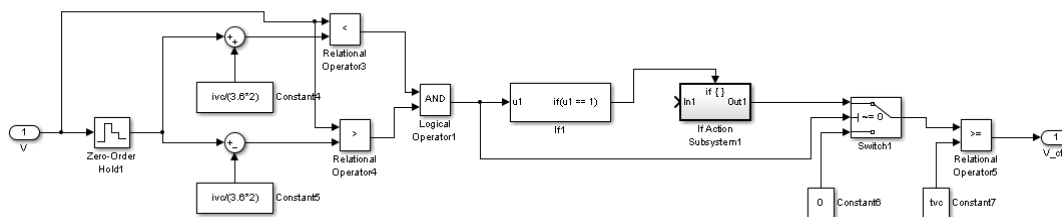


Figura 126. Bloque Velocidad Constante

### 8.5.2.- Dinámica del vehículo

Este bloque está basado en que se ha comentado en el apartado 8.4.1.- Dinámica del vehículo. La única diferencia existente entre ambos es que distingue entre la fuerza motriz generada por el motor y la fuerza generada por los frenos. Si la deceleración que experimenta el coche es mayor que la fuerza que producen las fuerzas resistivas por rodadura, aerodinámica y de ascensión, la fuerza motriz resultante se envía a la señal “*Ffreno\_d*” (con valor positivo) mientras que la señal “*Fm*” se anula y se activa la señal que indica que los frenos están actuando. Teniendo en cuenta que el motor eléctrico se encuentra en el eje delantero, únicamente se utiliza la fuerza de frenada delantera para recuperar la energía. Debido a esto, la señal “*Ffreno\_d*” posee una ganancia de valor 0,8.

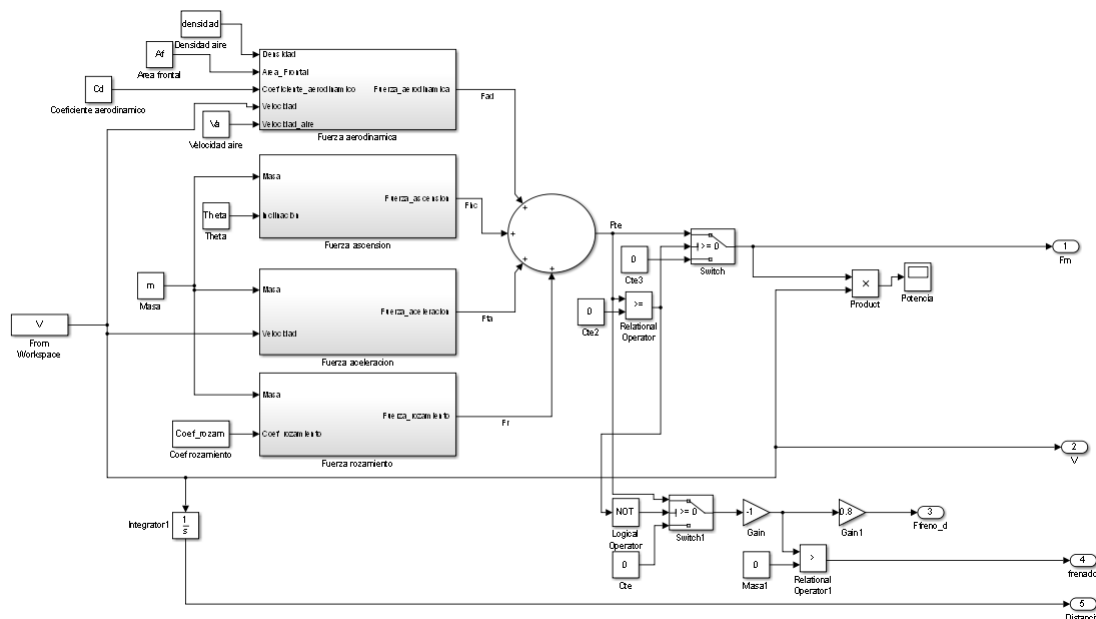


Figura 127. Bloque Dinámica del vehículo



### 8.5.2.1.- Distribución fuerza de frenado

Los objetivos en el diseño y control de un sistema de frenado tienen que poseer [56]:

1. Suficiente fuerza de frenado para reducir rápidamente la velocidad del vehículo
2. Una distribución apropiada de las fuerzas de frenado en las ruedas delanteras y traseras para asegurar la estabilidad durante el frenado
3. Recuperar la mayor cantidad de energía durante el frenado que sea posible

En un vehículo, la distribución de la fuerza de frenado entre ejes no está repartida equitativamente, es decir, las ruedas delanteras aplican más fuerza de frenado que las traseras. Esto es debido a dos motivos: el primero, es que al frenar el vehículo la masa de éste se desplaza hacia el eje delantero con lo que las ruedas delanteras disponen de mayor adherencia que las traseras. El segundo motivo es, preferible, que las ruedas delanteras se bloqueen por exceso de fuerza de frenado que no las traseras por motivos de seguridad. La relación entre la fuerza de frenado de las ruedas delanteras y traseras aparece indicada en la Figura 128 como la línea  $\beta$ .

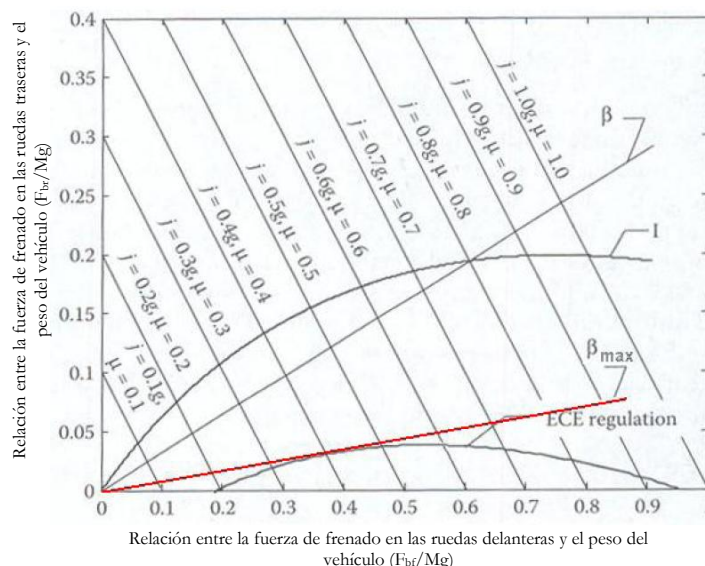


Figura 128. Distribución de las fuerzas de frenado en las ruedas delanteras y las traseras

Las líneas oblicuas indican la máxima deceleración ( $j$ ) que se puede alcanzar dependiendo del coeficiente de adherencia entre el neumático y el asfalto. Dicha

aceleración es igual al coeficiente de adherencia si la aceleración es expresada respecto a la aceleración de la gravedad. La regulación ECE indica mediante la curva parabólica, la fuerza de frenado mínima que se debe enviar al eje trasero. Debido a que en los vehículos híbridos únicamente se aprovecha la fuerza de frenado del eje delantero, es necesario fijar una relación entre las fuerzas de frenado que favorezcan lo máximo posible la fuerza en el eje delantero. Esto está representado en la Figura 128 mediante la línea  $\beta_{\max}$ .

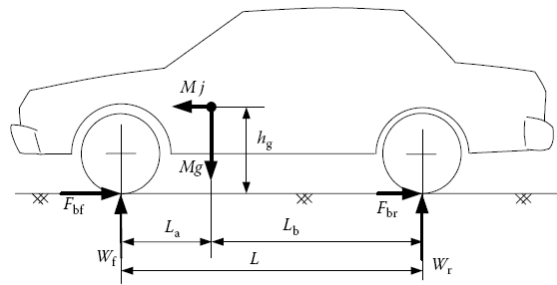


Figura 129. Fuerzas que actúan en un vehículo durante el frenado en una superficie plana

La mínima fuerza de frenado en las ruedas traseras, y por lo tanto, máxima fuerza de frenado en las ruedas delanteras, cuando las ruedas delanteras están trabadas, estipulado por la regulación ECE, está expresado como

$$\frac{F_{bf}}{W_f} \leq \frac{q + 0,07}{0,85}$$

Donde  $F_{bf}$  es la fuerza resultante de frenado en las ruedas delanteras,  $W_f$  es la carga vertical en las ruedas delanteras,  $q$  es la resistencia en el frenado, expresada como la relación entre la aceleración del vehículo y la aceleración de la gravedad ( $q=j/g$ ). Según la definición de la línea  $\beta$ , la fuerza de frenado de la rueda delantera se puede expresar como

$$F_{bf} = \beta F_b$$

Donde  $F_b$  es la resultante de la fuerza de frenado sobre el vehículo, la cual está relacionada con la resistencia de frenado,  $q$ , como

$$F_b = Mj = Mgq$$

La resistencia de frenado y la carga vertical en las ruedas delanteras tienen la siguiente relación

$$W_f = \frac{Mg}{L}(L_b + qh_g)$$

Donde M es la masa del vehículo, L es la distancia entre las ruedas,  $L_b$  es la distancia desde el centro de gravedad del vehículo hasta las ruedas traseras,  $h_g$  es la distancia desde el centro de la gravedad del vehículo hasta el suelo (Figura 129).

Combinado las ecuaciones, se obtiene

$$\frac{F_{bf}}{W_f} = \frac{\beta q L}{L_b + q h_g}$$

Despejando  $\beta$ ,

$$\beta \leq \frac{(q + 0,07)(L_b + q h_g)}{0,85 q L}$$

En esta ecuación se puede observar que el límite de  $\beta_{\max}$  para cumplir con la regulación ECE está en función de la resistencia en el frenado, q. Por lo tanto, el valor de este índice, el cual permite conocer el valor de  $\beta_{\max}$ , puede ser obtenido a través de la siguiente fórmula:

$$\left. \frac{d\beta}{dq} \right|_{q=q^0} = 0$$

El valor de q para el cual se obtiene el mayor valor de  $\beta$  es:

$$q^0 = \sqrt{0,07 \frac{L_b}{h_g}}$$

Sustituyendo este valor en  $\beta$  obtenemos el valor de  $\beta_{\max}$

$$\beta_{\max} = \frac{2\sqrt{0,07 L_b h_g} + L_b + 0,07 h_g}{0,85 L}$$

Tomando unos valores típicos para un turismo de  $L=2,65$  m,  $L_b=1,378$  m y  $h_g=0,45$  m, el valor de  $\beta_{\max}$  es de 0,8.

### 8.5.3.- Cadena rueda-acoplador

La finalidad de este bloque es transformar las variables lineales en variables rotacionales. Transforma la velocidad lineal en velocidad angular, en rpm, y la fuerza motriz en el par motor. Para el cálculo del par motor se ha tenido en cuenta la fuerza motriz y la fuerza de frenado; ya que la única diferencia es el flujo de fuerza, es decir, en el caso de la fuerza motriz, el motor eléctrico y/o térmico envían la potencia a través del diferencial y el acoplador a la ruedas; y en el caso de la fuerza de frenado, el sentido es inverso.

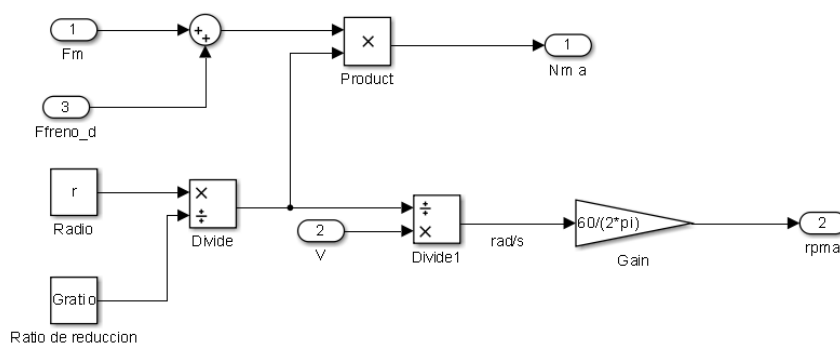


Figura 130. Bloque Cadena rueda-acoplador

### 8.5.4.- Selector de marchas

El propósito de este bloque es conocer en qué marcha está circulando el vehículo. Tiene como entradas las señales booleanas “subir marcha” y “reducir marcha” dando como resultado la marcha que lleva engranada en la caja de cambios con la señal “marcha”.

Dependiendo de qué señal esté activa en ese momento, el integrador integra la contante con valor de 10 si la señal “subir marcha” está activada o de -10 en el caso contrario. Mediante el bloque Transport Delay se retrasa la señal dos segundos y se compara con el valor que tenía esos dos segundos antes. Si la señal es superior o inferior en el valor de una unidad, se anulan las señales de subir o reducir macha mediante el bloque AND; entonces el sistema deja de integrar durante los dos segundos estipulados. Con esto, se obtiene un aumento o una disminución en el valor de la salida. Para garantizar que la salida es un número entero, se ha colocado un bloque denominado Quantizer.

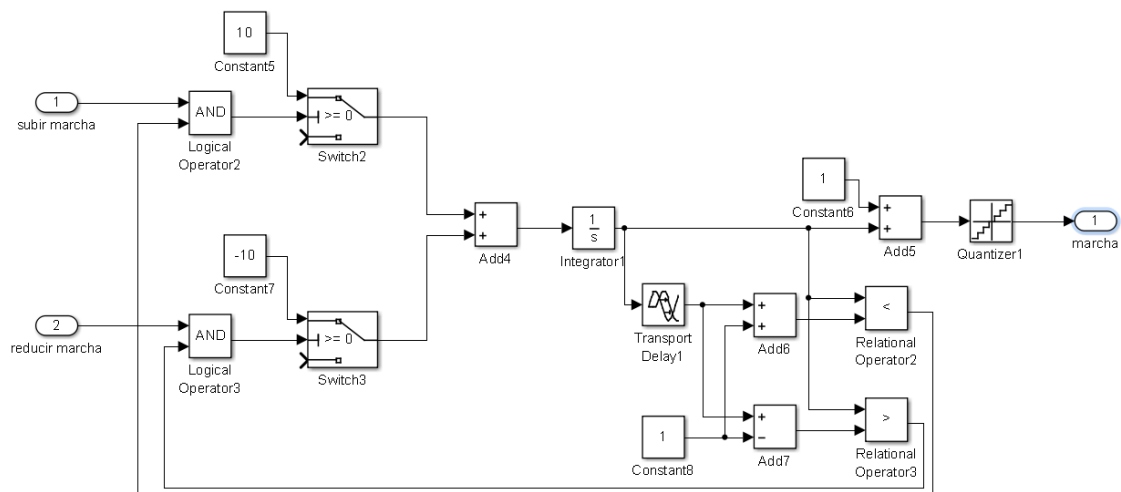


Figura 131. Bloque Selector de marchas

### 8.5.5.- Caja de cambios

Este bloque gestiona el funcionamiento de la caja de cambios para que el motor gire dentro del intervalo de giro adecuado con la máxima eficiencia posible. Las entradas que tiene son: el régimen de giro del eje de salida del acoplador de par que es mismo que el eje de salida de la caja de cambios; la marcha a la que circula en ese momento el vehículo; el par motor exigido al motor térmico; la velocidad del vehículo; y el modo de funcionamiento del vehículo. Las salidas son las señales de subir o reducir marcha para que el bloque selector de marcha realice la acción correspondiente.

Para que las señales de salida se activen es necesario que se cumplan dos señales a la vez; y una de éstas tiene tres opciones, es decir, en el caso que la señal subir marcha se active tiene que ser: la marcha que circule el vehículo menor al número de marchas que posea el vehículo y a la vez que una de estas tres esté activa: el régimen de giro del motor sea mayor al valor máximo del régimen de giro estipulado; que la salida del bloque “*Comparador de consumos con diferentes marchas*” posea activa la salida “*subir marcha*”, y por último, que el bloque “*comparador consumos en modo recarga*” tenga activa la salida en el caso que sea mejor subir una marcha.

Para el caso de reducir marcha, las señales serán: la marcha que circule el vehículo mayor a uno y, además, que se cumpla una de estas tres condiciones: que el régimen del giro del motor sea menor al valor mínimo del régimen de giro estipulado; que la salida del bloque “*Comparador de consumos con diferentes marchas*” posea activada la salida “*reducir marcha*”

y por último, que el bloque “*comparador consumos en modo recarga*” tenga activa la salida en el caso que sea mejor reducir una marcha.

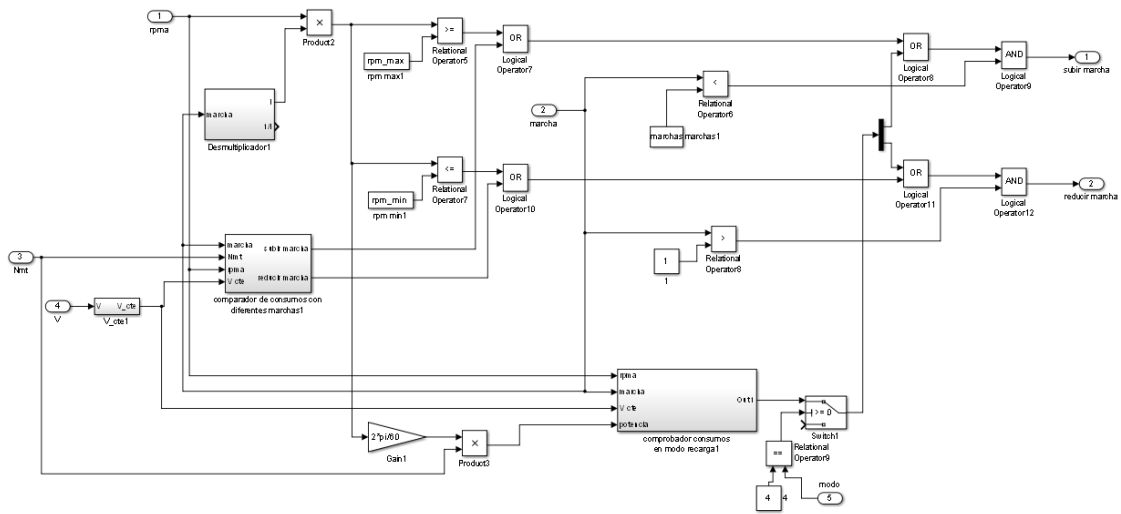


Figura 132. Bloque Caja de cambios

### 8.5.5.1.- Comparador de consumos con diferentes marchas

La finalidad de este bloque es comparar el rendimiento del motor térmico con la marcha a la que circula el vehículo en ese momento con el rendimiento de una marcha inmediatamente superior o inmediatamente inferior entregando el mismo par al acoplador. Si se obtiene un mejor rendimiento, activa la señal “*subir marcha*” o “*reducir marcha*”, respectivamente, con la condición de que, además, estén activadas las señales de “*velocidad constante*” y que el régimen de giro al cambiar de marcha esté en el régimen de giro permitido, es decir, que no sea inferior al mínimo ni superior al máximo permitido. La condición impuesta de que la señal “*velocidad constante*” esté activa es debido a que se mantenga en un determinado tiempo en la misma marcha y no esté cambiando continuamente de marcha cuando se está acelerando o decelerando ya que entorpecería la conducción.

Las entradas a este bloque son: la marcha a la que circula el vehículo; el par del motor térmico; y el régimen de giro. Obteniendo como salidas, dos señales booleanas: “*subir marcha*” y “*reducir marcha*”.

El rendimiento del motor se calcula a partir del par entregado y del régimen de giro. Los valores que se introducen a este subsistema no están situados en los mismos puntos de

la cadena cinemática, por lo que hay reubicarlos. La señal de entrada “*rpm<sub>a</sub>*” está medida en la salida del acoplador, por lo que hay que multiplicar su valor por el índice de transmisión para calcular el régimen de giro a la salida del motor.

Sin embargo, la señal de entrada “*N<sub>mt</sub>*” se refiere al par motor entregado por el mismo, por lo que hay que multiplicar por el inverso del índice de transmisión para reubicarlos en la salida del acoplador. Recíprocamente, al multiplicar el valor de par entregado por el motor por el índice de transmisión obtenemos el par aplicado en el acoplador, y así obtenemos el valor “*N<sub>ma</sub>*”. Si éste, lo multiplicamos por la inversa del índice de transmisión de las marchas superior e inferior nos proporciona el par exigido al motor con esas marchas. A partir de las cuales se calcula el rendimiento térmico con una marcha más o menos de la actual dependiendo en que caso se esté.

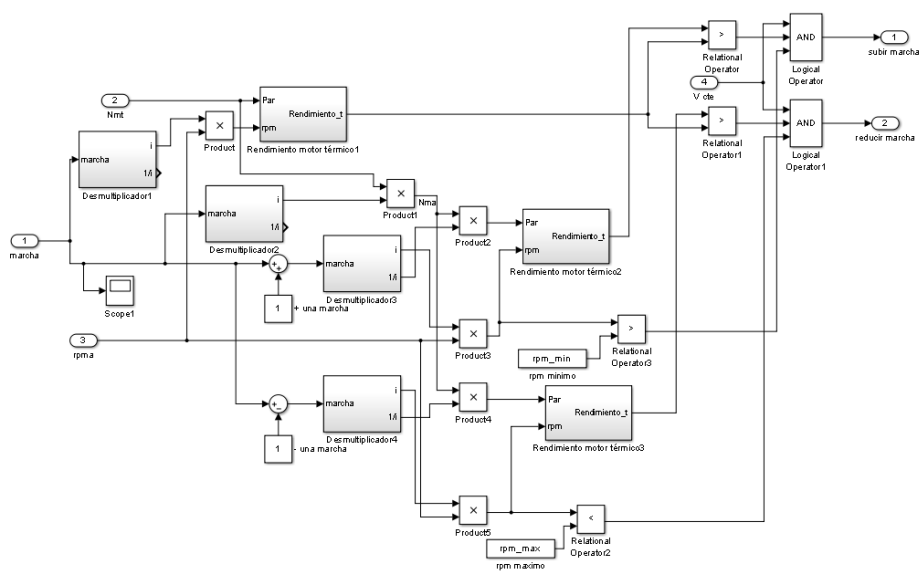


Figura 133. Bloque Comparador de consumos con diferentes marchas

### 8.5.5.2.- Comparador de consumos en modo recarga

En el modo recarga, a diferencia de los otros modos de circulación, el par motor entregado por el motor térmico puede ser ajustado, independientemente, siempre y cuando la potencia entregada sea superior a la demandada por la dinámica del vehículo para seguir la línea de máxima eficiencia del motor.

Este bloque posee cuatro entradas: régimen de giro en el acoplador; la marcha engranada; la señal de velocidad constante; y la señal de “*potencia*” la cual indica la potencia que se le está exigiendo a la planta de potencia híbrida.

Dentro de este bloque aparecen cuatro bloques, tres de ellos, “*rend\_marcha*”, “*rend\_marcha+1*”, “*rend\_marcha-1*”, los cuales calculan el rendimiento del motor en la marcha engranda, en una marcha inmediatamente superior y en una marcha inmediatamente inferior, respectivamente. El cuarto bloque comprueba si el motor térmico podría entregar la potencia demandada tanto en una marcha superior como en una inferior.

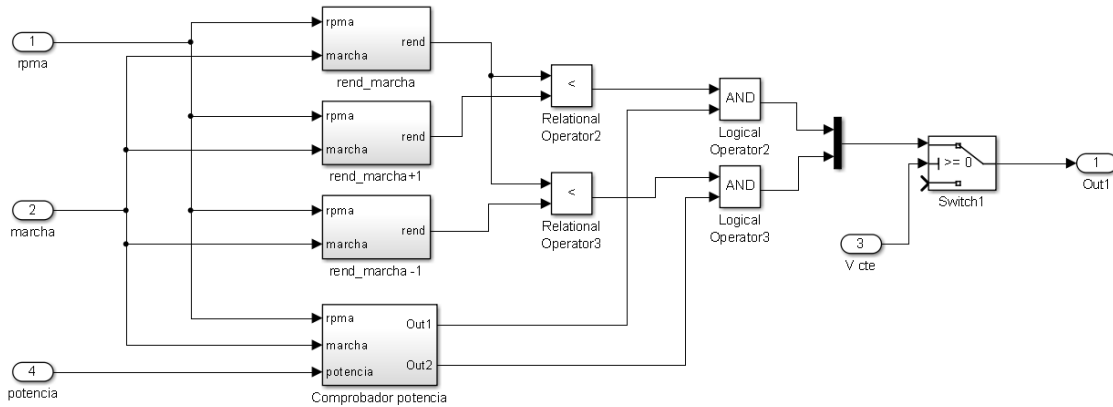


Figura 134. Bloque Comparador de consumos en modo recarga

8.5.5.2.1.- Bloque Rend\_marcha+1

Se va a explicar el bloque “*Rend\_marcha+1*”, y a partir de aquí, se puede extrapolar para el bloque “*Rend\_marcha*” y “*Rend\_marcha-1*”.

En primer lugar se calcula el par que podría dar el motor eléctrico. A continuación, se calcula el par que entrega a determinado régimen de giro siguiendo la línea de máxima eficiencia, bloque “*par rendimiento cte*”. A partir de estos dos valores, se selecciona el mínimo para calcular el rendimiento del motor térmico.

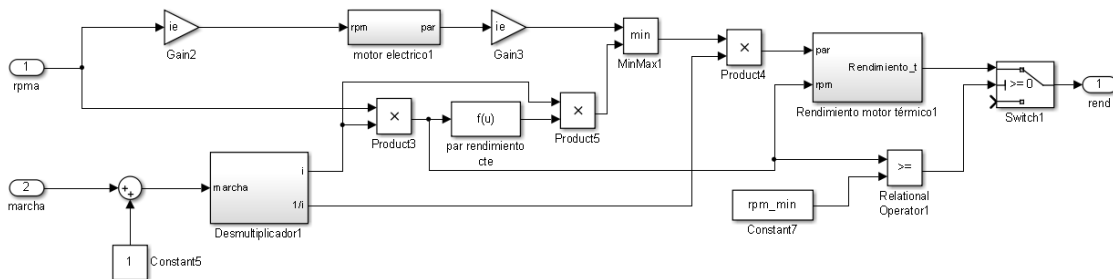


Figura 135. Bloque Rend\_marcha+1

La línea de par motor de máxima eficiencia ha sido aproximada por la siguiente función polinómica de segundo grado:



$$P(n) = -1,355 \cdot 10^{-5}n^2 + 0,06699n + 127,32$$

Donde P es el par entregado y n es el régimen de giro en rpm del eje de salida del motor.

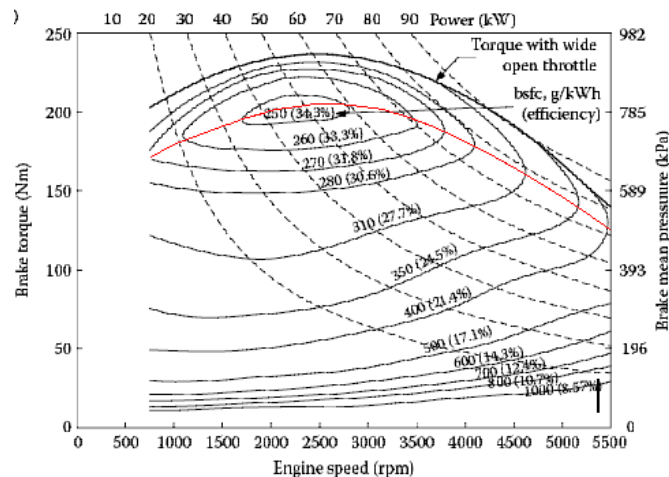


Figura 136. Línea de par de máxima eficiencia del motor térmico

### 8.5.5.2.2. - Bloque comprobador potencia

Este bloque lo que realizar es la comprobación si con la marcha inmediatamente superior y con la marcha inmediatamente inferior a la marcha a la que el vehículo está circulando, el motor térmico puede dar la potencia que se le está demandando. Para ello, se utiliza la función “Pot rend max”, la cual calcula el valor de la potencia a partir del par de máxima eficiencia por el régimen de giro.

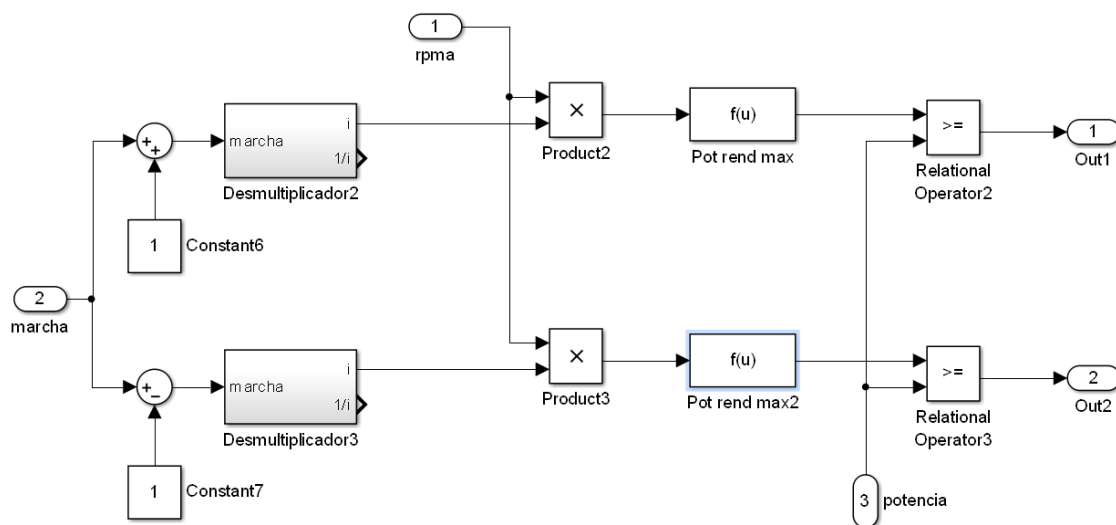


Figura 137. Bloque comprobador potencia

### **8.5.6.- *Detector conducción***

Este bloque tiene como entrada la señal de velocidad y como salida la señal numérica “*cond*”, la cual indica el modo de conducción. Si ésta posee un valor 1, indica que se está realizando una conducción urbana y si posee un valor 2, indica que está en el caso de conducción interurbana.

El bloque se ha diseñado de tal forma que ambos estados de conducción no están activos a la vez, y si se activa uno, automáticamente se desactiva el otro. El sistema siempre comienza en modo urbano, ya que la mayoría de las veces corresponde con esta situación. Mediante la entrada escalón de valor inicial 0, la señal en modo interurbano está desactivada con lo que activa la señal de modo urbano y el interruptor superior deja pasar la señal de valor constante 1 hasta la salida. Esta señal permanece activa hasta que la velocidad del vehículo sea mayor a 70 Km/h, momento en cual, el interruptor superior se desactiva y se activa el interruptor inferior dejando pasar la señal de valor constante 2. Hasta la salida corresponde al modo de conducción interurbana. En el bloque aparece “70/3,6” para convertir la velocidad de Km/h a m/s debido a que la velocidad en el modelo está expresada en m/s.

Si el vehículo circula a una velocidad mayor a 70 Km/h, como se ha comentado en el párrafo anterior, se activa el modo interurbano, el cual permanece activo hasta que el vehículo circula durante 60 segundos a una velocidad inferior a 50 km/h, lo cual descarta posibles deceleración producidas en rotondas o travesías por los municipios. Esto se realiza mediante la comparación de la velocidad a través del bloque “*From*”. Si se cumple la condición ( $v < 50/3,6$ ), el bloque “*IfAction Subsystem*” se activa e integra una constante unidad la cual hace de contador de tiempo. Esta señal es almacenada en el bloque de memoria “*A*”, la cual es comparada con el valor 60, duración establecida a la cual el vehículo puede circular a una velocidad inferior a 50 km/h. Si se supera dicho valor, el interruptor inferior se bloquea y se activa de nuevo el modo de circulación urbano.

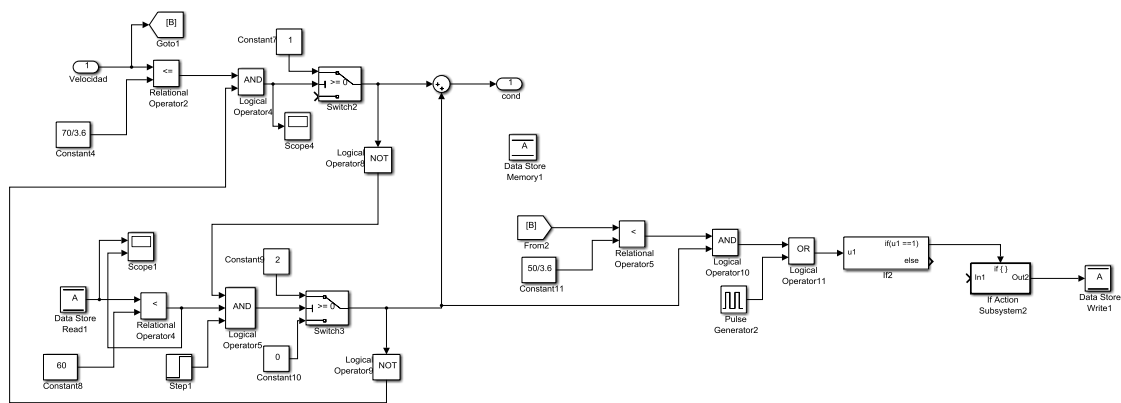


Figura 138. Bloque detector conducción

### 8.5.7.- Unidad de control de acoplamiento híbrido paralelo (UCAH-P)

La finalidad de este bloque es seleccionar el modo de funcionamiento más adecuado con una óptima eficiencia del vehículo, calculando el punto exacto de los motores y la potencia de recarga de las baterías.

Este bloque posee tres subsistemas: On-off, Termico\_puro y Frenada\_regenerativa, cada uno de los cuales tiene diferentes entradas pero las mismas salidas: el par motor entregado por el motor térmico; la potencia de recarga de salida; el par motor entregado por el motor eléctrico; el modo de funcionamiento representado mediante un valor numérico; y el régimen de giro del motor térmico. Este bloque, UCAH-P, posee las mismas salidas que los subsistemas, las cuales están englobadas en un bus de datos a excepción de la potencia de recarga. A parte de este bus de datos incluye, además, las variables del par en el acoplador y el régimen de giro de éste.

Las señales de entrada a este bloque son: la potencia de recarga efectiva de las baterías, el par motor requerido a la salida del acoplador de par, el régimen de giro del eje de salida del acoplador, la marcha engranada, la señal de frenado y el tipo de conducción.

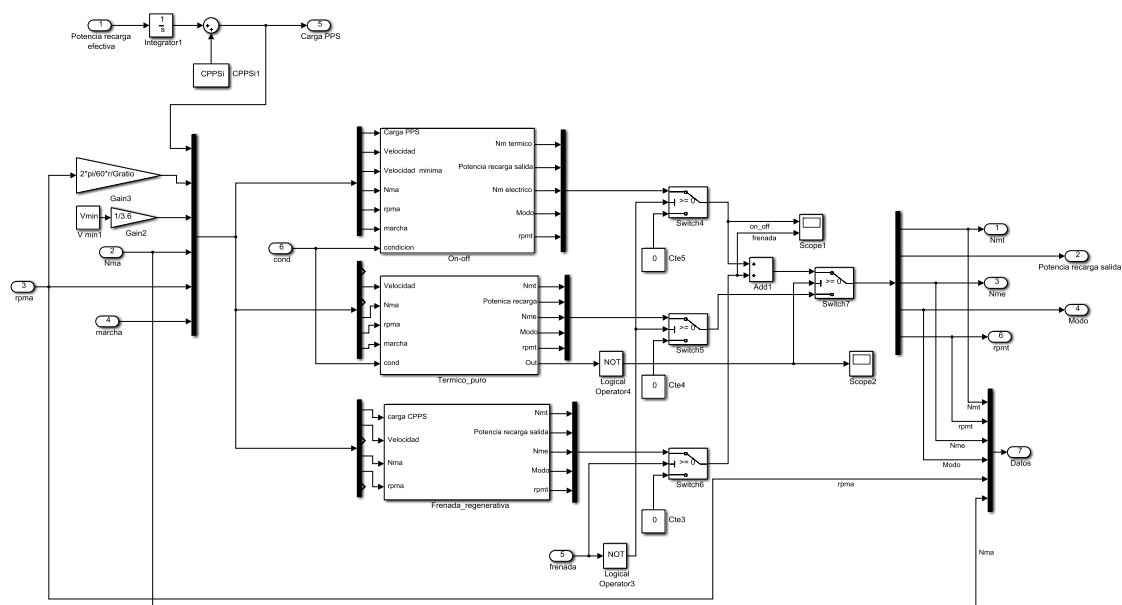


Figura 139. Bloque UCAH-P

### 8.5.7.1.- Bloque On-off

Este bloque actúa como termostato encendiendo y apagando el motor térmico cuando se alcanza el nivel mínimo o máximo de carga de las baterías, respectivamente, a través de los bloques “modo on” y “modo off”.

El bloque “Potencia reservada” es el encargado de calcular la energía de reserva necesaria para la conducción en modo urbano o interurbano.

Los bloques “modo on” y “modo off” no están nunca a la vez activados ya que cuando no está activado envía al otro bloque una señal que lo desactiva. El bloque “modo on” se desactiva cuando la señal “carga PPS” es mayor al valor máximo de la carga aceptada en la batería, mientras que el “modo off” se desactiva cuando llega al valor mínimo. Al iniciar la simulación y para que no exista un conflicto de activación entre ambos bloques, se ha incluido una entrada escalón, la cual durante un segundo permanece inactiva y así no permite que el bloque “modo off” no se active.

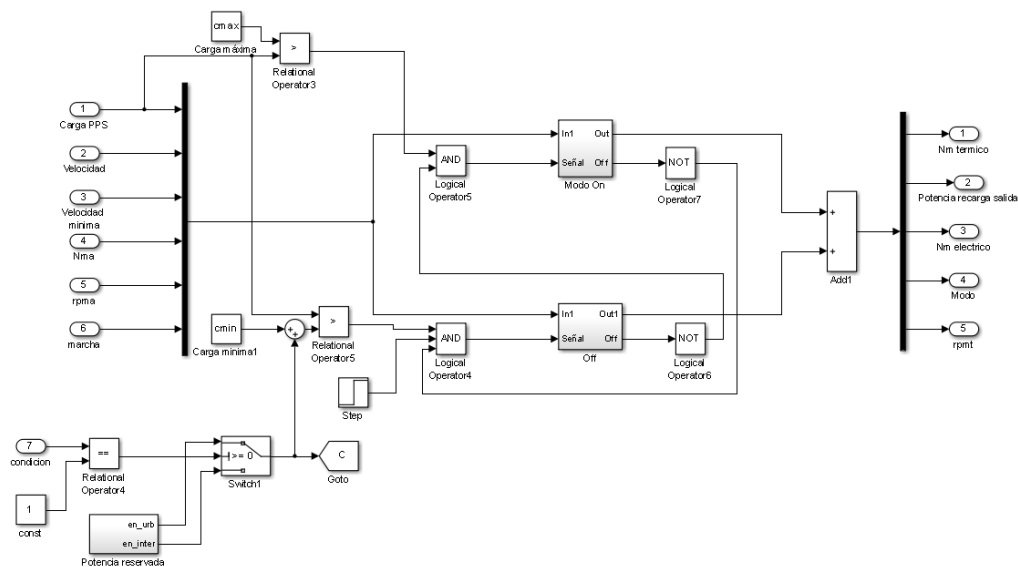


Figura 140. Bloque On-off

8.5.7.1.1.- *Bloque Modo On*

Este bloque está compuesto por tres subsistemas: Recarga PPS, Propulsión híbrida y eléctrico a baja velocidad. Cada bloque tiene sus entradas específicas pero los tres poseen las mismas señales de salida: el par motor del motor térmico, la potencia de recarga de salida, el par del motor eléctrico, el modo de funcionamiento y el régimen de giro del motor térmico. Las salidas de cada bloque se unen en un bus de datos, los cuales se suman para obtener una única señal. Esta señal pasará a la salida del bloque “modo on”, “out”, si el interruptor está activado. La señal booleana denominada “señal” es la que lleva la información de la activación y desactivación de este bloque. Si “señal” posee el valor de “false”, entonces la salida del bloque “modo on” denominada “off” se activa.

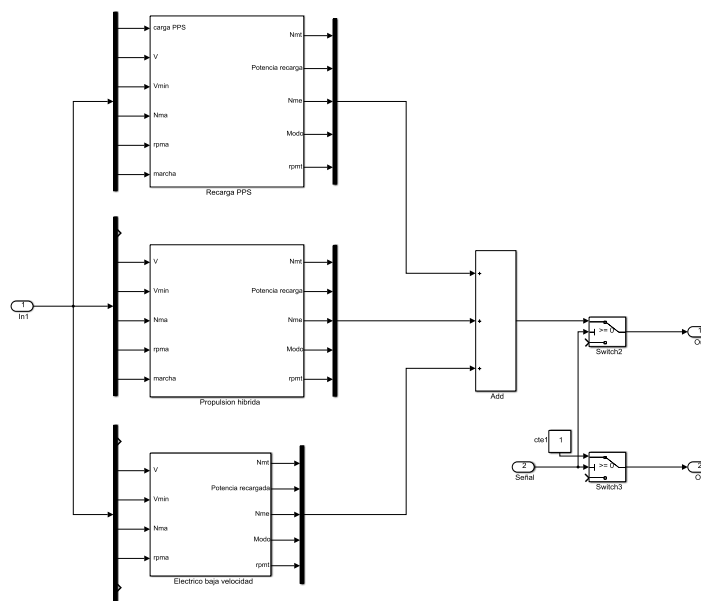


Figura 141. Bloque On

8.5.7.1.1.1.- Bloque Recarga PPS

Este bloque valora si el vehículo puede trabajar en el modo de recarga de la batería y para ello, calcula las condiciones de funcionamiento.

Las entradas de datos que posee este bloque son: el nivel de carga de las baterías, la velocidad del vehículo, la velocidad mínima para encender el motor térmico, el par motor requerido en el acoplador, el régimen de giro a la salida del acoplador y la marcha a la que circula el vehículo.

Para que este bloque se active debe cumplirse tres condiciones:

1. El nivel de carga de la batería sea menor a la carga máxima admitida
2. La velocidad del vehículo sea igual o mayor a la velocidad mínima
3. El par requerido en el acoplador sea menor o igual que el que entrega el motor térmico a máxima eficiencia.

Para el cálculo del par motor térmico a máxima eficiencia se multiplica el régimen de giro del acoplador por el índice de transmisión según la marcha engranada. Esto se realiza para situar la velocidad de giro en el motor térmico, valor de la señal “*rpm<sub>t</sub>*”. Una vez obtenida esta velocidad y con la función polinómica vista en el apartado 8.5.5.2.1.-

Bloque Rend\_marcha+1 se calcula el par térmico con la máxima eficiencia. Este valor se multiplica por el índice de desmultiplicación para obtener su valor en el acoplador de par.

A este par obtenido se le resta el par motor del acoplador resultando el par motor sobrante que se puede utilizar para recargar la batería. Este par está limitado por la capacidad del motor térmico, por lo tanto, hay que calcular el par máximo que puede soportar el motor eléctrico. Para ello, se multiplica la velocidad de giro del acoplador por el índice de transmisión del motor eléctrico obteniendo la velocidad de giro de éste. A partir de este valor y con la ayuda del bloque “*motor eléctrico*” se calcula el par de éste, el cual es multiplicado por el índice de transmisión; consiguiendo el par máximo que el motor eléctrico puede entregar al acoplador o el acoplador al motor eléctrico para trabajar como generador. Para avalar que el par sobrante del motor térmico no sea en ningún caso superior al par que puede soportar el motor térmico se ha colocado el bloque “*Min*”.

Si a la señal que se obtiene en el bloque “*Min*” se le suma el par motor del acoplador y se divide por el índice de transmisión de la caja de cambios se adquiere el valor del par motor del motor térmico.

El par motor recibido por el motor eléctrico, el cual en este caso trabaja como generador, se calcula a partir del producto de la señal que se obtiene a la salida del bloque “*Min*” y la inversa del índice de éste. Multiplicando este valor por el régimen de giro del acoplador convertido a radianes por segundo y por el índice de transmisión del motor eléctrico se obtiene la potencia de recarga.

La señal de modo obtendrá el valor numérico de tres, el cual corresponde con este modo de funcionamiento.

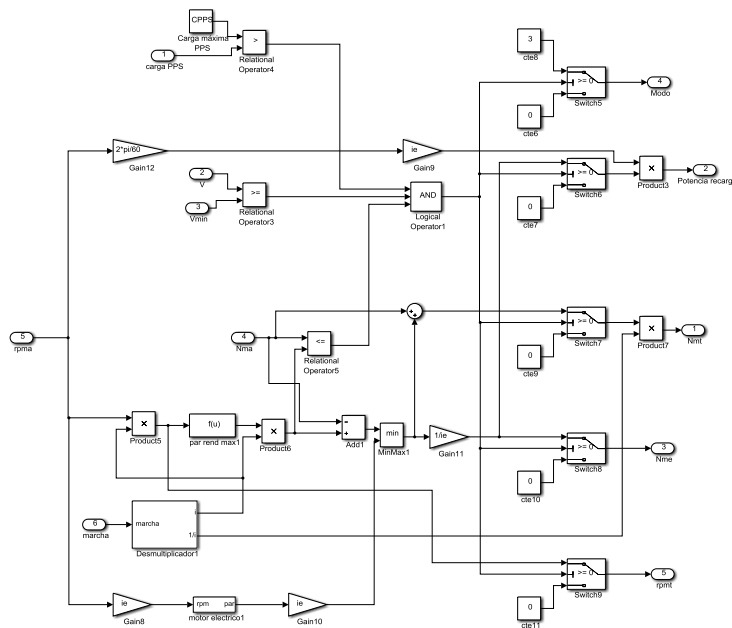


Figura 142. Bloque Recarga PPS

### 8.5.7.1.1.2.- Bloque Propulsión híbrida

Este bloque lo que realiza, como su propio nombre indica, es la activación del modo híbrido donde trabajan conjuntamente el motor térmico y el motor eléctrico.

Este bloque posee cinco entradas, las cuales son: la velocidad del vehículo, la velocidad mínima para encender el motor térmico, el par motor requerido en el acoplador, el régimen de giro a la salida del acoplador y la marcha a la que circula el vehículo.

Para que este bloque se active, debe cumplirse dos condiciones:

1. La velocidad del vehículo sea igual o mayor a la velocidad mínima
2. El par requerido en el acoplador sea mayor que el que entrega el motor térmico a máxima eficiencia.

Para el cálculo de par motor térmico a máxima eficiencia como se ha comentado en el bloque anterior, se multiplica el régimen de giro del acoplador por el índice de transmisión según la marcha engranada para situar la velocidad de giro en el motor térmico, valor de la señal “*rpm<sub>pl</sub>*”. Una vez obtenida esta velocidad y con la función polinómica vista en el apartado 8.5.5.2.1.- Bloque Rend\_marcha+1, se calcula el par térmico con la máxima eficiencia. Este valor, a su vez, se multiplica por el índice de desmultiplicación para obtener su valor en el acoplador de par.



La diferencia entre el par motor solicitado por la dinámica del sistema y el par motor entregado por el motor térmico siguiendo la curva de máxima eficiencia; multiplicada, a su vez, por el inverso del índice de transmisión del motor eléctrico nos proporciona el par suministrado por este último para satisfacer los requerimientos de potencia, correspondiente a la señal de salida “ $N_{me}$ ”. Siendo ésta el par motor entregado por el motor eléctrico.

La potencia de recarga será la opuesta del producto del par motor entregado por el motor eléctrico y el régimen de giro de éste, convirtiéndolo previamente a rad/s, debido a que en esta situación se descarga la batería.

La señal de modo obtendrá el valor numérico de dos, el cual corresponde con este modo de funcionamiento.

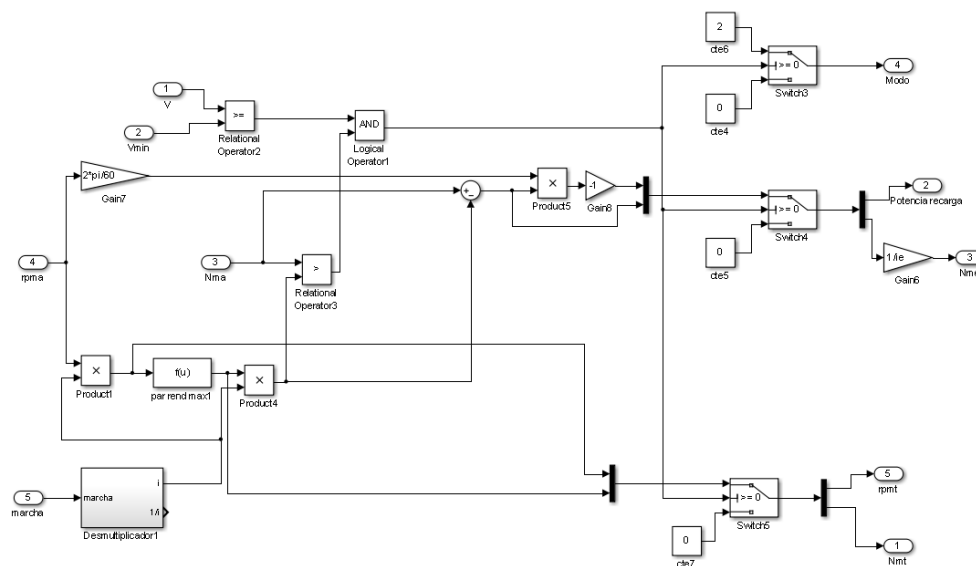


Figura 143. Bloque Propulsión híbrida

### 8.5.7.1.1.3.- Bloque Eléctrico Baja Velocidad

Este bloque tiene cuatro entradas: la velocidad del vehículo, la velocidad mínima, el par motor y el régimen de giro solicitados en el acoplador. Se activa cuando la velocidad del vehículo es menor a la velocidad mínima necesaria para que se active el motor térmico.

El par motor eléctrico se obtiene multiplicando el par de salida del acoplador por el inverso del índice de transmisión del motor eléctrico; mientras que la potencia de recarga se calcula como el opuesto del producto de dicho par por el régimen de giro del motor eléctrico convertido a rad/s.

En este bloque el par motor y el régimen de giro del motor térmico son nulos debido a que está apagado el motor térmico.

La señal de modo obtendrá el valor numérico de uno, el cual corresponde con este modo de funcionamiento.

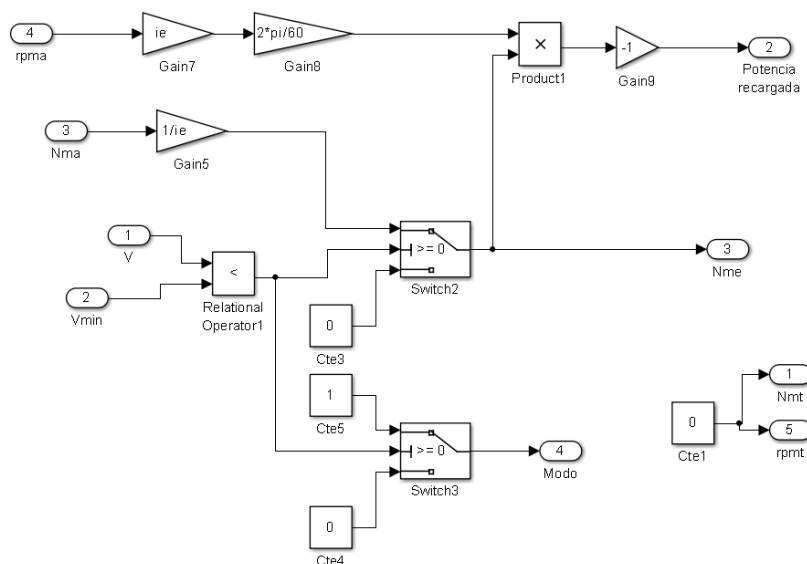


Figura 144. Bloque Eléctrico a baja velocidad

**8.5.7.1.2. - Bloque Modo Off**

La finalidad de este bloque es controlar el funcionamiento del vehículo cuando las baterías se han cargado, en ese momento el motor térmico se apaga y el vehículo se propulsa mediante la potencia del motor eléctrico. Por lo tanto, las señales de par motor y de régimen de giro del motor térmico son nulas.

El par motor del motor eléctrico se consigue por medio del producto del régimen de giro del acoplador por el inverso de la relación de transmisión del motor eléctrico. El valor de la potencia de recarga se calcula como el opuesto al producto del régimen de giro del motor eléctrico convertido a rad/s y el par entregado por el mismo.

La señal de modo obtendrá el valor numérico de cuatro, el cual corresponde con este modo de funcionamiento.

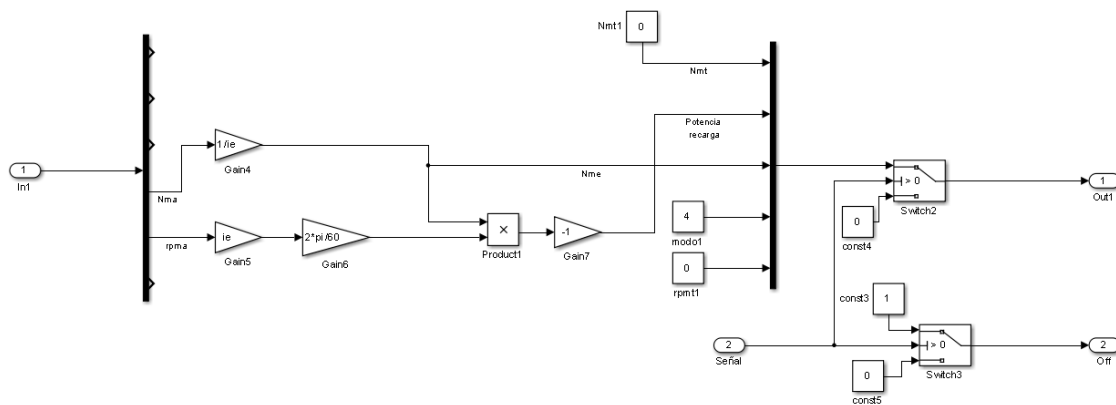


Figura 145. Bloque Modo Off

### 8.5.7.1.3. - Bloque Potencia reservada

Este bloque calcula la energía de reserva necesaria para la conducción urbana o interurbana.

Se activa la señal en modo urbano, “*en\_urb*”, o en modo interurbano, “*en\_inter*”, dependiendo del intervalo en se encuentre la velocidad, [0, 50 km/h] ó [80 km/h, 120 km/h], respectivamente.

Para el cálculo de la potencia, se multiplica la velocidad del vehículo por la fuerza motriz que ejerce el acoplador. Para ello, se han utilizado bloques comunes, y en otros, se ha invertido el flujo de potencias, es decir, como el bloque “*cadena acoplador-rueda*” el cual es idéntico al bloque “*cadena rueda-acoplador*” pero con el flujo de potencias inverso, es decir, transforma el par motor aplicado en el acoplador en fuerza motriz que impulsa al vehículo. Ésta se integra y se obtiene el valor de la energía necesaria en cada caso.

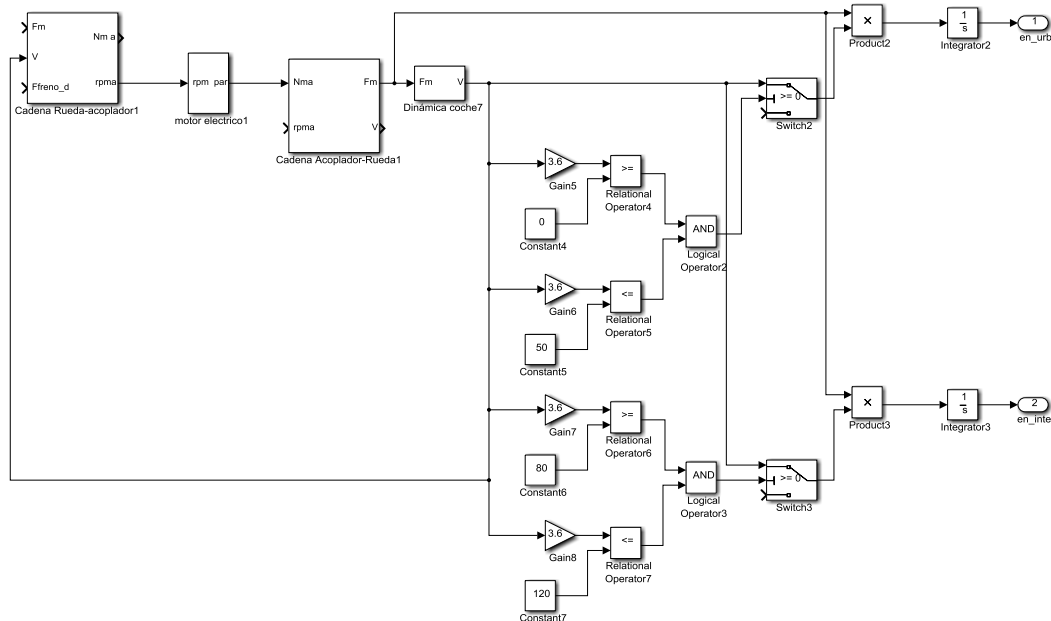


Figura 146. Bloque Potencia reservada

### 8.5.7.2.- Bloque térmico puro

Este bloque se activa cuando el motor térmico trabaja con mejor eficiencia que si trabaja en modo híbrido.

Las entradas de datos que posee este bloque son: la velocidad del vehículo, el par motor requerido en el acoplador, el régimen de giro a la salida del acoplador, la marcha a la que circula el vehículo y el modo de conducción.

Para que este bloque se active debe cumplirse cuatro condiciones:

1. La velocidad sea constante
2. El rendimiento del motor térmico circulando a la velocidad que en ese momento circula con la marcha más alta que posea el vehículo sea superior al rendimiento máximo teórico del sistema híbrido, el cual se calcula como el producto del rendimiento de las baterías y los rendimientos máximos del motor térmico y eléctrico.
3. El régimen de giro del motor térmico con la marcha más alta que posee el vehículo no sea inferior al régimen de giro mínimo admitido.
4. El vehículo conduzca en modo interurbano

Para realizar la comparación entre el rendimiento máximo teórico y el rendimiento del motor térmico con la máxima marcha del vehículo, lo primero que hay que calcular es el índice de transmisión con la marcha superior engranada. Con este valor, se divide el par motor requerido en el acoplador y se obtiene el par motor hipotético del motor térmico circulando en la marcha más alta; y si éste, se multiplica por el régimen de giro a la salida del acoplador, se obtiene el régimen de giro hipotético del motor en las condiciones anteriormente expuesta. A partir de estos datos, se calcula el rendimiento del motor térmico.

Las salidas de este bloque son: la potencia de recarga y el par motor del motor eléctrico los cuales son nulos ya que el motor eléctrico está apagado, el modo de circulación que en este caso posee el valor numérico de seis, la señal booleana “out” la cual indica si está el bloque activado o no, el par motor del motor térmico y el régimen de giro de éste.

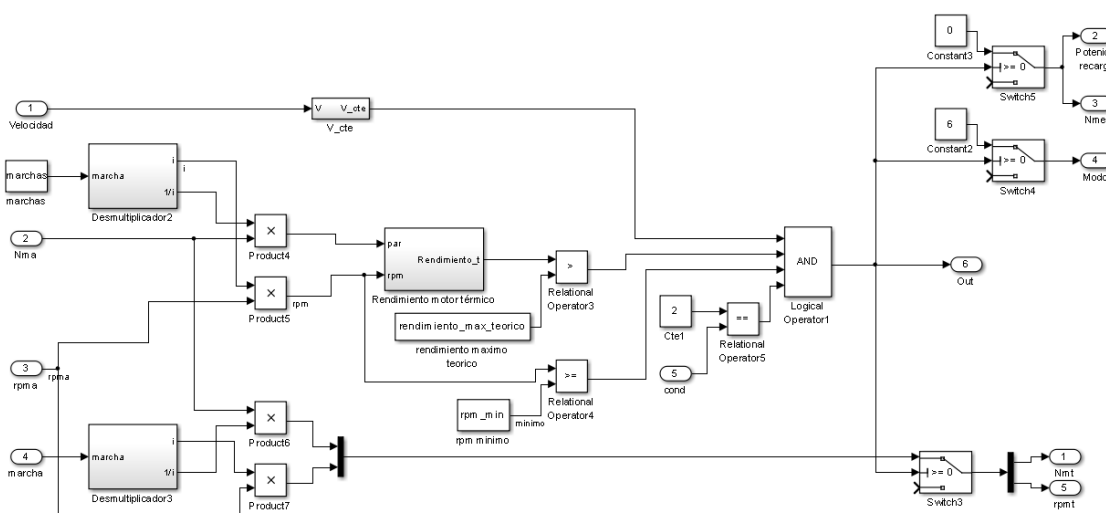


Figura 147. Bloque Térmico puro

**8.5.7.3.- Bloque frenada regenerativa**

Las entradas de datos que posee este bloque son: el nivel de carga de las baterías, la velocidad del vehículo, el par motor requerido en el acoplador y el régimen de giro a la salida del acoplador.

En este bloque hay un interruptor el cual deja pasar el valor del par motor en el motor eléctrico si el valor de la carga de la batería es menor que la carga máximo admitida y la velocidad del vehículo es mayor a 15 Km/h ya que debajo de esta velocidad el

rendimiento de conversión de energía mecánica a eléctrica es muy limitado. Por el contrario, esta señal se anula.

El par motor en el motor eléctrico se obtiene del valor mínimo entre el par aplicado al motor eléctrico, ya que éste trabaja como generador, y el par motor obtenido a partir del régimen de giro del acoplador.

La potencia de recarga se consigue a partir del par motor en el motor eléctrico y el régimen de giro convertido a rad/s.

El par motor en motor térmico y el régimen de giro de éste son nulos, ya que éste no trabaja en estas condiciones.

La señal de modo obtendrá el valor numérico de cinco, el cual corresponde con este modo de funcionamiento.

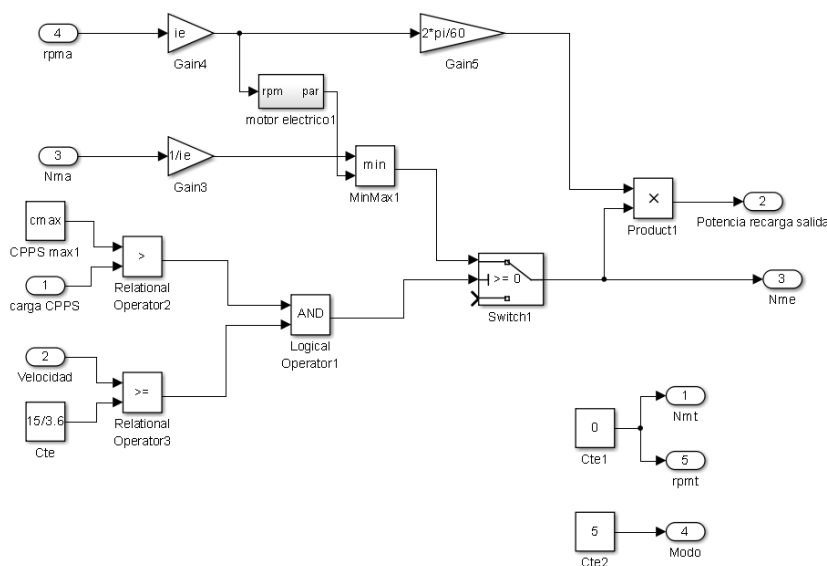


Figura 148. Bloque Frenada regenerativa

### 8.5.8.- Pérdidas eléctricas

La finalidad de este bloque es la representación de las pérdidas en la potencia de recarga o el aumento en la potencia de descarga, dependiendo de la situación, producidas en el motor eléctrico. Las entradas de este bloque son: la potencia de recarga de salida de la unidad de control de acoplamiento híbrido en paralelo (UCAH-P), el régimen de giro del acoplador y el par motor entregado por o al motor eléctrico. La salida que se obtiene es la

potencia de recarga de entrada a la unidad de control de acoplamiento híbrido en paralelo (UCAH-P).

El primer cálculo que realiza este bloque es el del rendimiento eléctrico; el cual es obtenido a partir del par motor y el régimen de giro del acoplador multiplicado por el índice de transmisión del motor eléctrico para trasladarlo a la posición del motor eléctrico. Este rendimiento es multiplicado por el rendimiento de la batería.

Como en este bloque el flujo de energía va en los dos sentidos, para calcular la potencia de recarga de salida hay que tener en cuenta el sentido de la energía, para ello, se ha introducido un interruptor el cual diferencia si la potencia de recarga de salida es positiva o negativa. En el caso de que sea positiva, el motor eléctrico está convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica por lo que la potencia efectiva de recarga, en este caso, es el producto de la potencia de recarga de salida por el rendimiento global anteriormente calculado. Por el contrario, si la potencia de recarga de salida es negativa, el motor eléctrico está convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica, por lo tanto, la potencia efectiva de recarga en este caso es el cociente de la potencia de recarga de salida entre el rendimiento de la conversión.

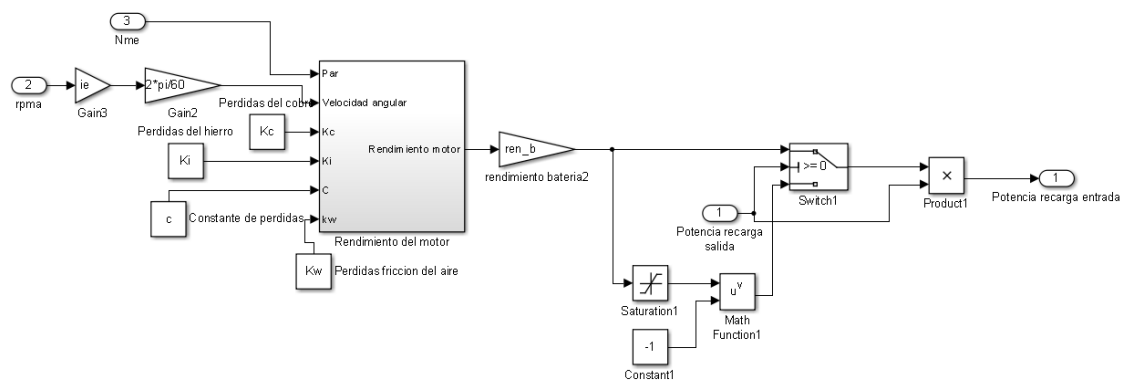


Figura 149. Bloque Pérdidas eléctricas

### 8.5.9.- Consumo instantáneo

El objetivo de este bloque es el consumo instantáneo de combustible realizado por el motor térmico, en litros por segundo. Las entradas a este bloque son: el par motor y el régimen de giro del motor térmico. La señal de salida es el consumo instantáneo.

En primer lugar, hay que calcular la potencia bruta entregada por el motor de combustión interna el cual se calcula multiplicando el par motor por el régimen de giro del

motor térmico en radianes por segundo y el resultado se divide por el rendimiento de dicho motor, que se habrá calculado a partir del bloque rendimiento térmico, cuyas entradas son el par motor y el régimen de giro de dicho motor.

Una vez obtenido la potencia bruta, se divide por la energía específica del combustible expresada en J/l para obtener el consumo instantáneo de combustible. En la siguiente tabla se muestran las características de los combustibles:

Combustible	Densidad [Kg/l]	Poder calorífico [MJ/Kg]
<b>Gasoil</b>	0,832	43,10
<b>Gasolina</b>	0,745	43,20

Tabla 30: Características de los combustibles

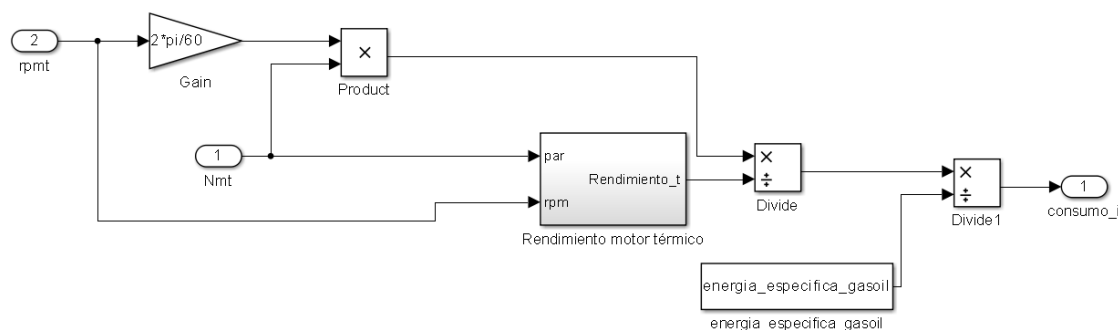


Figura 150. Bloque consumo instantáneo

### 8.5.10.- Consumo a los 100 km

Con este bloque, se calcula el consumo teórico de combustible a los 100 km manteniendo el consumo instantáneo promedio. Las entradas en este bloque son la velocidad del vehículo y el consumo instantáneo.

Se integran las señales de velocidad y consumo instantáneo para obtener la distancia recorrida y el consumo total acumulado, respectivamente. A partir de estos valores, se realiza el cociente entre ellos con la finalidad de obtener el consumo por metro recorrido. Este valor es multiplicado por 100000 para pasar el consumo por metro recorrido a consumo por 100 kilómetros recorridos.



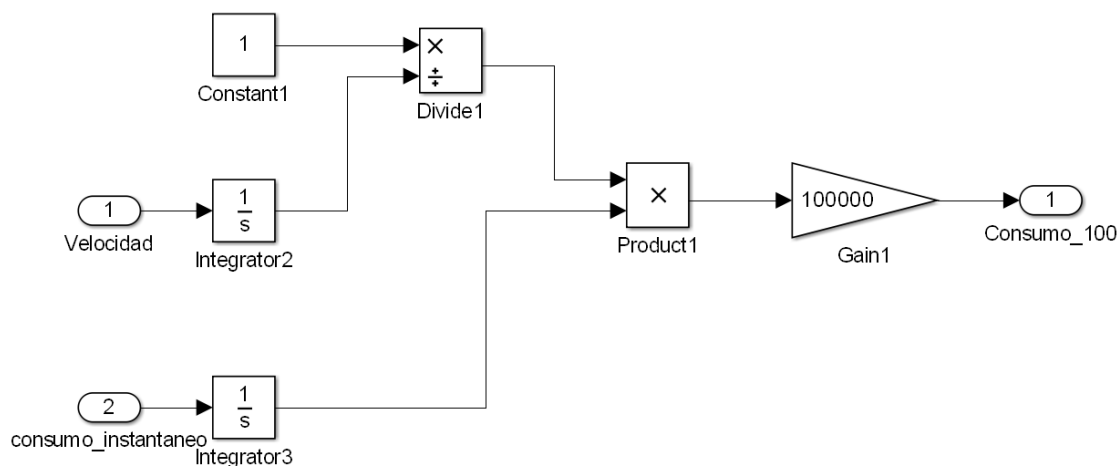


Figura 151. Bloque consumo a los 100 km

### 8.5.11.- Contador de ciclos

Con este bloque, se cuentan los ciclos de carga y descarga que ha realizado la batería. El ciclo de carga comprende desde que la carga de la batería está por debajo del 52 % de la carga máxima más el margen para la energía de aceleración dependiendo del modo en que circule, o bien urbano o bien interurbano; y esté sobre el 68 % de la carga máxima.

La señal de carga de la batería es comparada con el valor mínimo de un ciclo. En el caso que sea menor, el interruptor bloque a la señal y se mantiene como entrada el valor mínimo de carga. El bloque comparador “*menor o igual*” está comparando dos señales iguales por lo que su señal de salida está activa. Mientras, la señal de carga de la batería se compara con el valor máximo del ciclo de carga. Si se supera este valor, la carga de la batería ha completado un ciclo y se aumenta en uno el valor de ciclos realizados. Para ello, se realiza el proceso comentado en el apartado 8.5.4.- Selector de marchas, pero en este caso no se reduce, únicamente se aumenta el valor. Al aumentar el valor en uno de los ciclo, el valor de la señal de salida no es igual al valor almacenado en el bloque “*memory*”, lo que no se cumple la igualdad. El opuesto de esta señal activa, a través del bloque “*OR*”, el interruptor que activa el paso de la señal de carga de batería comienza un nuevo ciclo habiendo aumentado la señal de salida en uno.

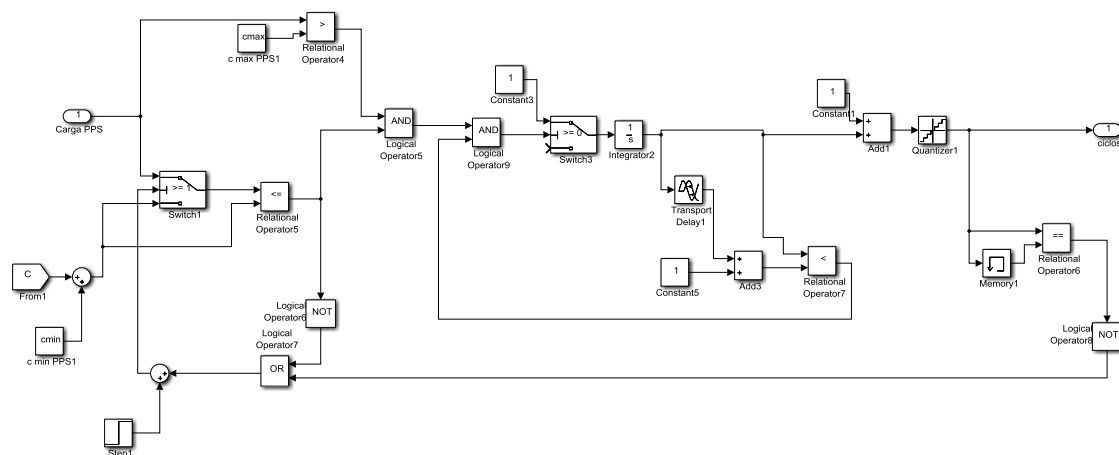


Figura 152. Bloque contador de ciclos

### 8.5.12.- Análisis de los rendimientos

La finalidad de este bloque es el cálculo de los distintos rendimientos. La señal de entrada es un bus de datos, el cual posee las siguientes señales: el par motor y el régimen de giro del motor térmico; el par motor del motor eléctrico; el modo de conducción; y el par motor y el régimen de giro del acoplador.

Esta señal de entrada es enviada a cuatro subsistemas, los cuales analizan los rendimientos: del motor térmico y eléctrico y en los casos de frenada regenerativa; únicamente motor eléctrico; solo motor térmico; y por último, la distribución de modos.

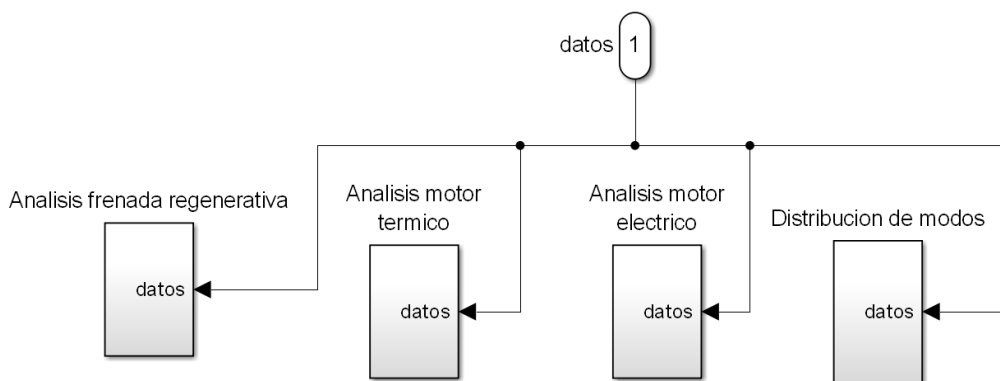


Figura 153. Bloque análisis de rendimientos

#### 8.5.12.1.- Análisis frenada regenerativa

Este análisis se activa si la señal de modos posee el valor numérico de cinco, el cual corresponde a la situación de frenada regenerativa.

Este bloque calcula tres rendimientos diferentes:

1. Rendimiento eléctrico del motor eléctrico: cuando convierte la energía mecánica recibida del acoplador en energía eléctrica
2. Rendimiento mecánico: se refiere a la cantidad de energía cinética que se aprovecha en energía mecánica a la entrada del motor el cual trabaja, en este caso, como generador eléctrico.
3. Rendimiento combinado: éste es el producto de los dos rendimientos anteriormente comentados, dando como resultado el rendimiento combinado al transformar la energía cinética durante las frenadas en energía eléctrica

El rendimiento eléctrico se obtiene del cociente entre la integral resultante del producto del par motor, régimen de giro y rendimiento del motor eléctrico y la integral del par y el régimen del mismo.

El rendimiento mecánico se obtiene del cociente entre la integral del producto del par y el régimen de giro del motor eléctrico (la energía bruta mecánica que llega al motor eléctrico) y la integral del producto del par y el régimen de giro del acoplador siendo la energía de frenada en las ruedas delanteras.

El rendimiento combinado es el producto de los dos rendimientos.

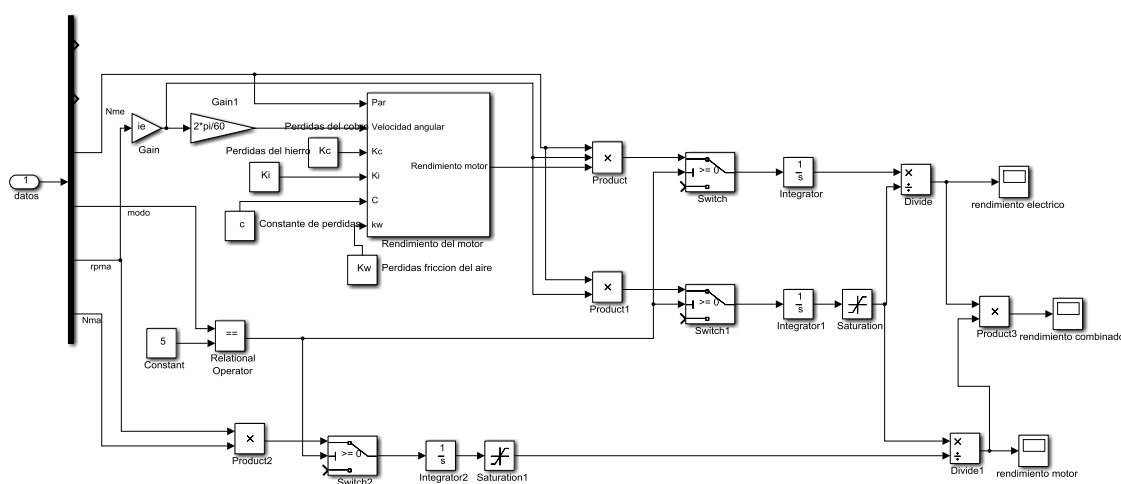


Figura 154. Bloque análisis frenada regenerativa

### 8.5.12.2.- Análisis del motor térmico

Este bloque analiza el rendimiento del motor térmico en los diferentes modos en los cuales puede estar funcionando.

El rendimiento instantáneo se obtiene del cociente entre la integral resultante del producto del par motor, régimen de giro y rendimiento del motor térmico; y la integral del par y el régimen del mismo.

En el caso que el modo activado sea el de propulsión híbrida, valor numérico de la señal modo igual a dos, se obtiene el rendimiento instantáneo híbrido. En el caso que el modo activado sea el de recarga de la batería, valor numérico de la señal modo igual a tres, se obtiene el rendimiento instantáneo recarga batería. Y por último, en el caso que el modo activado sea el de térmico puro, valor numérico de la señal modo igual a seis, se obtiene el rendimiento instantáneo térmico puro.

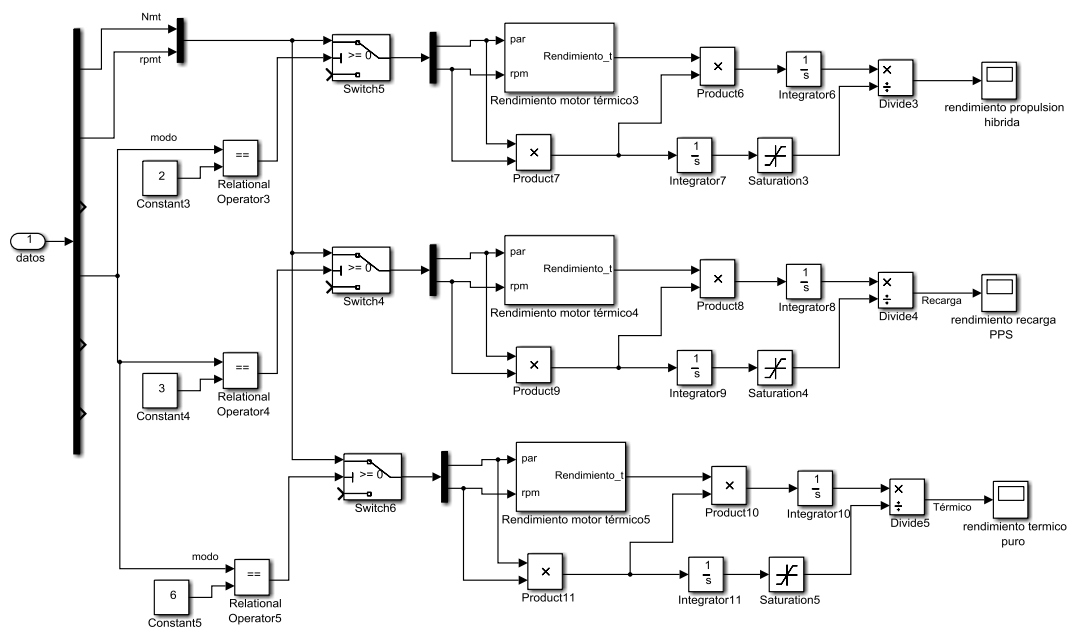


Figura 155. Bloque análisis motor térmico

### 8.5.12.3.- Análisis del motor eléctrico

Este bloque analiza el rendimiento del motor eléctrico en los diferentes modos en los cuales puede estar funcionando.

El rendimiento instantáneo se obtiene del cociente entre la integral resultante del producto del par motor, régimen de giro y rendimiento del motor eléctrico; y la integral del par y el régimen del mismo.

En el caso que el modo activado sea el de eléctrico a baja velocidad o eléctrico puro, valor numérico de la señal modo igual a uno o cuatro, respectivamente, se obtiene el rendimiento instantáneo eléctrico puro. En el caso que el modo activado sea el de propulsión híbrida, valor numérico de la señal modo igual a dos, se obtiene el rendimiento instantáneo híbrido. Y por último, en el caso que el modo activado sea el de recarga de la batería, valor numérico de la señal modo igual a tres, se obtiene el rendimiento instantáneo recarga batería.

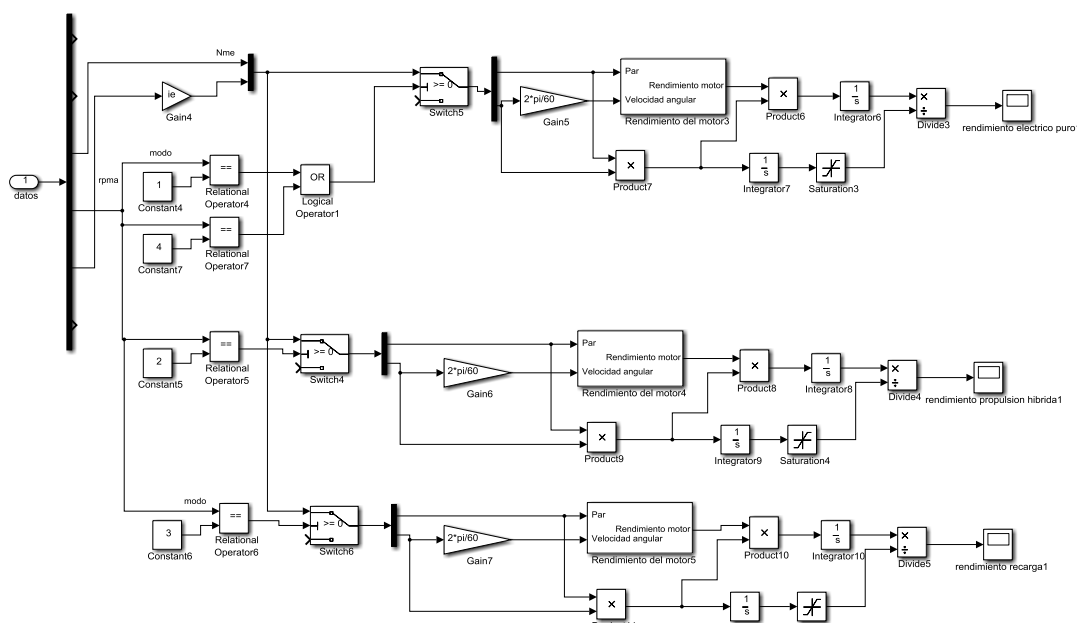


Figura 156. Bloque análisis motor eléctrico

### 8.5.12.4.- Análisis de distribución de modos

Este bloque computa la distribución temporal de los modos de funcionamiento del vehículo durante su recorrido.

Mientras el régimen de giro del acoplador es positivo, mediante un interruptor, envía una señal de valor la unidad, la cual es enviada a los interruptores correspondientes de cada uno de los modos en los que puede circular el vehículo. Estos interruptores están activados si el modo que circula corresponde al modo asignado a cada interruptor. La señal de salida de cada uno de estos seis interruptores es integrada actuando como contador de

tiempo de marcha en cada modo de funcionamiento. Dividiendo este valor por el tiempo total que el circula el vehículo y multiplicando el resultado por cien, se obtiene el porcentaje de tiempo que cada modo de funcionamiento permanece activo.

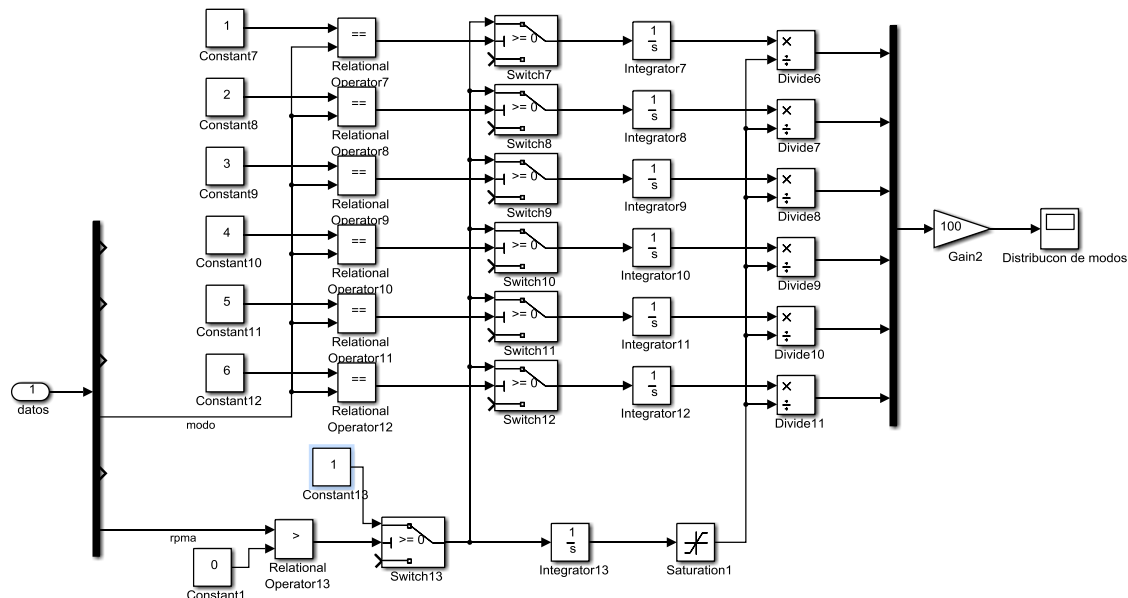


Figura 157. Bloque análisis distribución de modos

### 8.5.13.- Análisis económico

En primer lugar, se calcula el gasto del combustible que realiza el vehículo como si fuera un vehículo convencional. Para ello, se multiplica el consumo realizado durante 100 km, la distancia que puede recorrer la batería y el gasto del combustible.

En segundo lugar, se calcula el gasto de la batería. Con el fin, de obtener este valor, se divide el numero de ciclos de la batería entre la distancia recorrida (se integra la señal de velocidad). Este valor, se multiplica por el número de ciclos que posee de vida dicha batería se le suma uno para tener en cuenta el valor de la batería inicial; y el resultado se multiplica por el precio de la batería, obteniendo así el gasto en la misma.

El gasto total de combustible más el de batería es la suma de ambos gastos calculados anteriormente.

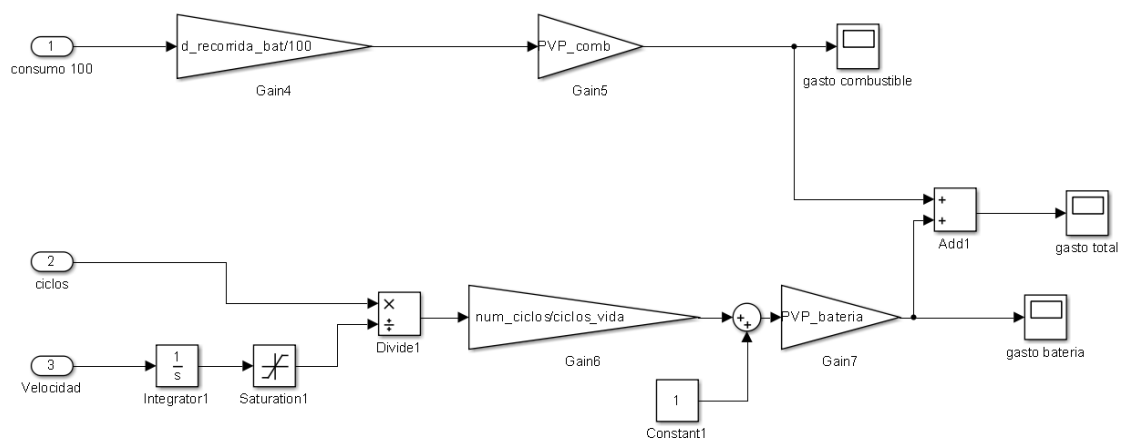


Figura 158. Bloque análisis económico

### 8.5.14.- Análisis de potencia

Este bloque comprueba el índice de carga de la batería comprobando si ha rebasado los límites de carga recomendados y el índice de potencia en los diferentes modos en los que trabaja el sistema.

El índice unitario de carga de las baterías se calcula dividiendo la señal de carga de las mismas entre el parámetro de carga máxima de las baterías.

El índice de carga del motor térmico se obtiene dividiendo el par motor del motor térmico y el par motor máximo del mismo. Esta señal está activada si el modo de funcionamiento corresponde a térmico puro, valor numérico de la señal modo igual a seis.

El índice de carga del motor eléctrico, se obtiene dividiendo el par motor del motor eléctrico y el par motor máximo del mismo. Esta señal está activada si el modo de funcionamiento corresponde a eléctrico a baja velocidad o eléctrico puro, valor numérico de la señal modo igual a uno o cuatro, respectivamente.

Y por último, el índice de carga del motor térmico y el eléctrico trabajando conjuntamente se obtiene dividiendo el par motor del motor eléctrico y el par motor máximo del mismo. Esta señal está activada si el modo de funcionamiento corresponde a funcionamiento híbrido, valor numérico de la señal modo igual a dos.

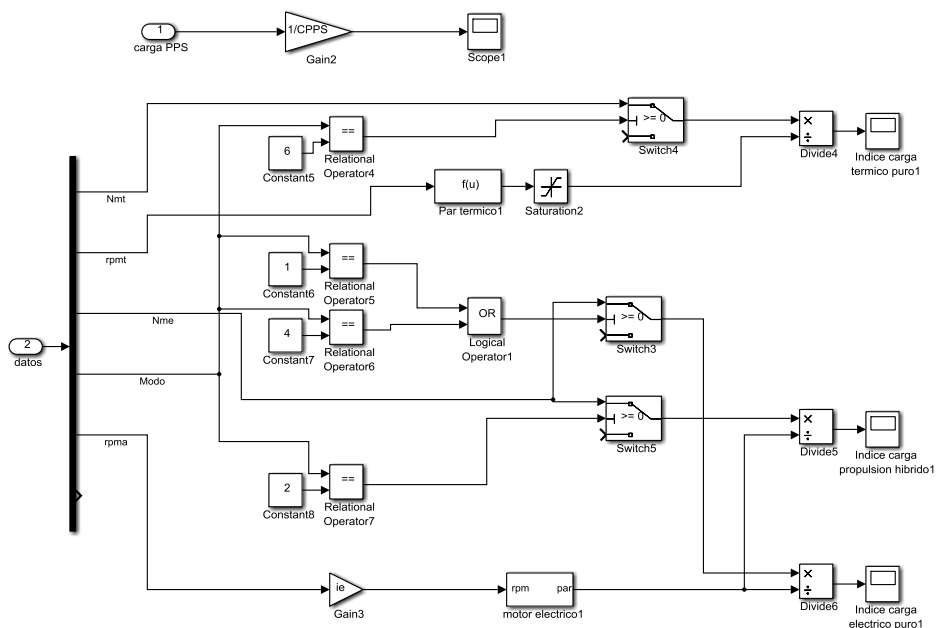


Figura 159. Bloque análisis potencia

## 8.6.- Programación de la Planificación de Estaciones de Carga

El programa utilizado para realizar la programación de Algoritmos Genéticos ha sido realizado con la ayuda del programa Microsoft Office Excel, debido a que el ArcGis puede importar tablas Excel. Dentro de éste programa, se ha desarrollado una macro realizada en Visual Basic.

El programa posee dos módulos:

- ❖ Módulo1: programa de algoritmos genéticos
- ❖ Módulo2: asigna la estación de carga a cada vehículo eléctrico.

### 8.6.1.- Módulo1

Éste es el módulo principal del programa donde está ubicado el programa de algoritmos genéticos.

En este módulo existen varias funciones, las cuales se citan a continuación:

- Aleatorio: proporciona un número aleatorio;
- do\_crossovers: realiza el cruce en la población existente;



- do\_mutations: realiza las mutaciones entre la población existente, solamente muta las coordenadas de las estaciones de carga;
- do\_mutations\_potencia: realiza las mutaciones entre la población existente, únicamente muta la potencia de dichas estaciones de carga;
- genetic\_aleatorio: genera una población aleatoria;
- geneticos: es el principal, el cual llama a las demás funciones;
- get\_chromosome: consigue las mejores soluciones dentro de la población;
- leer\_datos\_EV: lee las coordenadas y la potencia de los vehículos eléctricos;
- leer\_datos\_fichero: lee las coordenadas y la potencia de las estaciones de carga;
- leer\_datos\_iniciales: lee los valores de las variables;
- ordenar: ordena de menor a mayor los costes de las soluciones obtenidas, y
- sort\_by\_fitness1: evalúa la población existente;

#### 8.6.1.1.- Variables

A continuación, se van a comentar las variables utilizadas en este programa.

NOMBRE	TIPO	ALMACENA
NUM_GENE	Entero	Número de genes
num_EV	Entero	Número de demandas
NUM_CROMOSOMA	Entero	Número de cromosomas
MAX_CROMOSOMAS	Entero	Número máximo de cromosomas
size_cromosomas	Entero	Número de estaciones en cada solución
num_cromosomas	Entero	Número de soluciones
demanda_EV(num_EV, 2)	Real	Almacena las coordenadas y la potencia de la demanda de los vehículos eléctricos

NOMBRE	TIPO	ALMACENA
num_inter	Entero	Numero de iteraciones
cromosomas(NUM_GENE, NUM_GENE, 2)	Real	Vector cromosomas donde almacena las coordenadas y potencia de las estaciones de carga. El primer índice indica el número de solución en la que se encuentra la estación de carga, el segundo índice indica la ubicación de ésta dentro de la solución indicada y el tercer índice indica las coordenadas $(x, y)$ y la potencia de la estación de carga
num_EVs	Entero	Número de vehículos eléctricos
m	Entero	Punto medio
es(MAX_CROMOSOMAS)	Real	Almacena dos tipos de variables: poblacion(NUM_GENE, 2) fitness_values: acumula el valor del coste
dist(num_EV, 1)	Real	Almacena la distancia entre las estaciones de carga y las demandas
d_chrom(num_EV)	Real	Almacena la posición de la estación de carga dentro de la solución
coste_total(2000)	Real	Guarda el coste
poblacion_EV(num_EV, 2)	Real	Acopia la distancia entre la estación de carga y la propia demanda, la potencia de la misma y la ubicación dentro de una solución. El primer índice indica la solución y el segundo, almacena las variables comentadas anteriormente.
p	Real	Precio de recarga
g	Real	Acopia los kilómetros por kWh
k	Real	Coste del viaje a los usuarios
v	Real	Velocidad media
dmax	Real	Autonomía máxima del vehículo eléctrico

NOMBRE	TIPO	ALMACENA
opción	Entero	Almacena la opción elegida por el usuario, es decir, si la entrada es por fichero o es una entrada aleatoria

Tabla 31: Variables del módulo1 de los algoritmos genéticos

### 8.6.1.2.- Genéticos

El programa, como se ha comentado anteriormente, va llamando a las demás funciones en el orden correspondiente. Primeramente, limpia las celdas que se han rellenado en la ejecución anterior en el programa. A continuación, llama al formulario cuyo nombre es Datos\_entrada para que el usuario elija las opciones existentes y se le asigne el valor a la variable n la cual iniciara unos procedimientos u otros. Estas son:

- ☞ Entrada por fichero: a la variable n se le asigna el valor nulo
- ☞ Entrada aleatoria: se introducen el número de estaciones de carga y soluciones iniciales y el programa genera aleatoriamente las soluciones iniciales. En este caso a la variable n se le asigna el valor uno.

A continuación, el programa le pide el número de iteraciones. Este número debe ser menor de 2000 ya que llega un momento en el que el programa converge y existe poca variación con la solución anterior pero sin embargo sí que existe una gran diferencia en el tiempo de ejecución del programa, ya que éste es proporcional al número de iteraciones.

Seguidamente, según el bucle que le corresponda el programa realiza las funciones. Dentro del bucle lo primero que realiza es cargar los datos de entrada: las soluciones iniciales de la situación de las estaciones de carga y la localización de la demanda y la propia demanda. Los datos iniciales, tanto de las estaciones de carga como de la demanda, se encuentran en las hojas del propio fichero de Excel, excepto en el caso de que se generen aleatoriamente, puesto que el programa los genera in situ. Después de esto, se itera para obtener la mejor solución. En estas iteraciones, se cruzan las soluciones iniciales para obtener una población mejor a la anterior. Las soluciones obtenidas son almacenadas en la variable es(i) a continuación se mutan obteniendo otra generación de soluciones. Finalmente, después de evaluar las soluciones obtenidas se guarda en otra hoja del fichero las mejores y se llama a la función asignar\_EC del Módulo2 para que siga con el programa. Estas funciones serán comentadas con más profundidad en los siguientes puntos.

La función desarrollada para este fin es la siguiente:

```
Sub geneticos()
Dim iter As Integer
Dim num_sol As Integer
Worksheets("Costes").Activate
Range("A2:C2000").Select
Selection.ClearContents
Worksheets("Soluciones").Activate
Range("A2:C2000").Select
Selection.ClearContents
Worksheets("Solucion_optima").Activate
Range("b2:d2000").Select
Selection.ClearContents
Load Datos_entrada
Datos_entrada.Show
If opcion = 0 Then
    Call leer_datos_fichero
Else
    Load Datos
    Datos.Show
    Call genetic_aleatorio
End If
Worksheets("Costes").Activate
ActiveSheet.Cells(3, 5) = num_cromosomas
ActiveSheet.Cells(2, 5) = size_cromosomas
Call leer_datos_EV
Call leer_datos_iniciales
Call sort_by_fitness1
Dim num_fila As Integer
num_fila = 2
For iter = 0 To num_inter
    Call ordenar
    coste_total(iter) = es(0).fitness_values
    Worksheets("Costes").Activate
    For i = 0 To iter
        Dim c As Integer
        c = i + 2
```

```
ActiveSheet.Cells(c, 1).Value = i
ActiveSheet.Cells(c, 2).Value = coste_total(i)
Next i
Call do_crossovers
Call do_mutations
Call do_mutations_potencia
Call ordenar
num_sol = 0
Call get_chromosome(num_sol)
For i = 0 To size_cromosomas - 1
    Worksheets("Soluciones").Activate
    ActiveSheet.Cells(num_fila + i, 1).Value = cromosomas(num_sol, i, 0)
    ActiveSheet.Cells(num_fila + i, 2).Value = cromosomas(num_sol, i, 1)
    ActiveSheet.Cells(num_fila + i, 3).Value = cromosomas(num_sol, i, 2)
Next i
For i = 0 To size_cromosomas - 1
    Worksheets("Solucion_optima").Activate
    ActiveSheet.Cells(2 + i, 2).Value = cromosomas(num_sol, i, 0)
    ActiveSheet.Cells(2 + i, 3).Value = cromosomas(num_sol, i, 1)
    ActiveSheet.Cells(2 + i, 4).Value = cromosomas(num_sol, i, 2)
Next i
num_fila = num_fila + i
Next iter
Call asignar_EC
End Sub
```

### 8.6.1.3.- Leer\_datos\_fichero

Esta función, como antes se ha comentado, lo que hace es leer a través de la hoja del fichero de Excel denominada “Datos\_EC” las soluciones de las estaciones de carga. Las coordenadas X e Y se guardan en  $es(i).poblacion(j,0)$  y  $es(i).poblacion(j,1)$ , respectivamente. La potencia de cada estación de carga se guarda en  $es(i).poblacion(j,2)$ .

El programa planteado es el que sigue:

```

Public Sub leer_datos_fichero()
Worksheets("Datos_EC").Activate
num_cromosomas = Cells(7, 6)
size_cromosomas = Cells(6, 6)
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim num_fila As Integer
num_fila = 2
For i = 0 To num_cromosomas - 1
  For j = 0 To size_cromosomas - 1
    es(i).poblacion(j, 0) = Cells(num_fila, 9)
    es(i).poblacion(j, 1) = Cells(num_fila, 10)
    es(i).poblacion(j, 2) = Cells(num_fila, 11)
    num_fila = num_fila + 1
  Next j
Next i
End Sub

```

#### 8.6.1.4.- Genetic\_aleatorio

Esta función realiza de forma aleatoria las soluciones iniciales de las estaciones de carga. A priori, se ha llamado a un formulario el cual le pide al usuario el número de soluciones iniciales y la cantidad de estaciones de carga por cada solución, Figura 101. Estos valores son cargados a las variables correspondientes. El número de soluciones iniciales se carga a la variable “*num\_cromosomas*” y en el caso del número de estaciones de carga por solución a “*size\_cromosomas*”. Una vez obtenidos estos datos se procede a la generación de las soluciones de forma aleatoria con la función llamada Aleatoria. Para que la función Aleatoria funcione, hay que introducir un valor por referencia a la variable para que ésta te devuelva la solución. En este ejemplo, se han introducido el valor de 9300 en el caso de *es(i).poblacion(j,0)* (coordenada X) porque la longitud de la geobase es de 9300 metros y su origen es de 679500 aproximadamente, por ello, los valores obtenidos no se salen de la geobase, y por lo tanto, son válidos. En el segundo caso, *es(i).poblacion(j,1)* (coordenada Y) ocurre lo mismo; el origen está en 4608600 y el tamaño es de 9300 metros. Coinciden ambos datos porque la geobase es un cuadrado. Estos datos son elegidos para que se sitúen las estaciones de carga dentro de la zona de estudio. Finalmente, se elige, también, aleatoriamente la potencia de las estaciones de carga, en este ejemplo se han elegido las potencias de 3700 W y 7400 W.

El programa es el siguiente.

```
Public Sub genetic_aleatorio()
If num_cromosomas > MAX_CROMOSOMAS Then
    MsgBox "Chromosome size is too large."
End If
'Initialize the population:
Dim i As Integer
Dim j As Integer
For i = 0 To num_cromosomas - 1
    For j = 0 To size_cromosomas - 1
        es(i).poblacion(j, 0) = (679500 + Aleatorio(9300))
        es(i).poblacion(j, 1) = (4608600 + Aleatorio(9300))
        Dim n As Integer
        n = Aleatorio(10)
        If n < 5 Then
            es(i).poblacion(j, 2) = 3.7
        Else
            es(i).poblacion(j, 2) = 7.4
        End If
    Next j
Next i
End Sub
```

#### 8.6.1.5.- Leer\_datos\_EV

Aquí se carga la variable “*demanda\_EV*” la cual almacena las coordenadas de las demandas y la demanda propiamente dicha. Las demandas se obtienen por medio de un archivo exportable de ArcGis. Para ello, se obtiene el área de cada parcela y con la densidad de población se ha obtenido la población que le corresponde a cada manzana. Se ha supuesto que las familias están formadas por cuatro miembros y que poseen dos vehículos. De estos vehículos se ha supuesto que un 20 % son eléctricos.

Teniendo la cantidad de los vehículos eléctricos, la potencia unitaria de cada uno de ellos en kWh, el tiempo de recarga y el porcentaje de recarga de la batería se obtiene la potencia en kW que demanda cada manzana. Esta potencia se ubica en el centro de la misma y se obtiene las coordenadas de ésta.

```
Public Sub leer_datos_EV()  
num_EVs = 0  
Worksheets("Export_output_3").Activate  
For num_EVs = 0 To 2135  
    demanda_EV(num_EVs, 0) = Cells(num_EVs + 2, 11)  
    demanda_EV(num_EVs, 1) = Cells(num_EVs + 2, 12)  
    demanda_EV(num_EVs, 2) = Cells(num_EVs + 2, 15)  
Next num_EVs  
End Sub
```

#### 8.6.1.6.- Leer\_datos\_iniciales

Esta función lee las variables comentadas en el punto 8.3.2.3.-Datos ubicadas en la hoja "Datos" del archivo Excel.

```
Public Sub leer_datos_iniciales()  
Worksheets("Datos").Activate  
p = Cells(9, 3)  
g = Cells(10, 3)  
k = Cells(11, 3)  
v = Cells(12, 3)  
dmax = Cells(13, 3)  
End Sub
```

#### 8.6.1.7.- Sort\_by\_fitness1

Este procedimiento evalúa las soluciones y las ordena según el valor que le devuelve la función *fitness\_func*. Este valor es almacenado en la variable *es(i).fitness\_values*, la cual almacena el coste de las pérdidas.



```
Public Sub sort_by_fitness1()  
Dim i As Integer  
Dim index As Integer  
For i = 0 To num_cromosomas - 1  
    es(i).fitness_values = fitness_func(i, size_cromosomas)  
Next i  
For i = 0 To num_cromosomas + m - 1  
    p_chrom(i) = i  
Next i  
Dim j As Integer  
For i = 0 To num_cromosomas + m - 1  
    For j = 0 To (num_cromosomas + m - 2)  
        For jj = j + 1 To (num_cromosomas + m - 1)  
            If es(j).fitness_values > es(jj).fitness_values Then  
                Dim f As Estacion  
                f = es(j)  
                es(j) = es(jj)  
                es(jj) = f  
            End If  
        Next jj  
    Next j  
Next i  
End Sub
```

#### 8.6.1.8.- Ordenar

Esta función ordena los costes de las pérdidas de menor a mayor. El programa desarrollado es el siguiente:

```

Public Sub ordenar()
Dim j As Integer
For i = 0 To num_cromosomas + m - 1
  For j = 0 To (num_cromosomas + m - 2)
    If es(j).fitness_values > es(j + 1).fitness_values Then
      Dim f As Estacion
      f = es(j)
      es(j) = es(j + 1)
      es(j + 1) = f
    End If
  Next j
Next i
End Sub

```

#### 8.6.1.9.- Do\_crossovers

Esta función realiza el cruzamiento de la población de estaciones de carga para obtener otras soluciones “mejores”, es decir, se parte de una población de individuos, en este caso, estaciones de carga, estos se cruzan de forma aleatoria para obtener unos descendientes, otra solución, con unos genes mejores que los antecesores.

En este programa, que a continuación se va a mostrar, el punto de cruzamiento se obtiene aleatoriamente como los dos cromosomas (soluciones) a cruzar. Estos datos se almacenan en las variables “*cross*”, “*s1*” y “*s2*”, respectivamente. Después de esto, se realiza el cruzamiento, obteniéndose “*m*” individuos; en este caso, “*m*” toma el valor de dos. Con los descendientes obtenidos se realiza la evaluación, para ello, se llama a la función *fitness\_func* la cual nos devuelve el coste. Si el coste de las pérdidas está en las soluciones anteriores, la variable binaria “*igual*” se le asigna el valor ‘*True*’.

Si la variable “*igual*” posee el valor ‘*False*’ se aumenta en uno el índice. Este índice indica el sitio donde se almacena esta solución. Si la variable “*igual*” posee el valor ‘*True*’, entonces, no avanza y en la siguiente solución se sobrescribe perdiendo dicha solución.

```

Public Sub do_crossovers()
'Nota: sort_by_fitness() debe ser llamada antes de esta función
For m = 0 To (num_cromosomas / (num_cromosomas / 2)) - 1
    Dim s1 As Integer
    Dim s2 As Integer
    s1 = Aleatorio(num_cromosomas / 2)
    s2 = Aleatorio(num_cromosomas / 2)
    Do While s1 = s2
        s2 = Aleatorio(num_cromosomas / 2)
    Loop
    Dim cross As Integer
    cross = (1 + Aleatorio(size_cromosomas - 2))
    For i = 0 To cross - 1
        es(m + num_cromosomas).poblacion(i, 0) = es(s1).poblacion(i, 0)
        es(m + num_cromosomas).poblacion(i, 1) = es(s1).poblacion(i, 1)
        es(m + num_cromosomas).poblacion(i, 2) = es(s1).poblacion(i, 2)
    Next i
    For j = cross To size_cromosomas - 1
        es(m + num_cromosomas).poblacion(i, 0) = es(s2).poblacion(j, 0)
        es(m + num_cromosomas).poblacion(i, 1) = es(s2).poblacion(j, 1)
        es(m + num_cromosomas).poblacion(i, 2) = es(s2).poblacion(j, 2)
    Next j
    Dim igual As Boolean
    igual = False
    Dim cos As Double
    cos = fitness_func(num_cromosomas + m, size_cromosomas)
    For q = 0 To size_cromosomas - 1
        If (es(m + num_cromosomas).poblacion(q, 0) = 0) Or (es(m +
num_cromosomas).poblacion(q, 1) = 0) Then
            cos = cos * 100
        End If
    Next q
    For asd = 0 To num_cromosomas - 1
        If cos = es(asd).fitness_values Then
            igual = True
        End If
    Next asd

```

```
If igual = True Then
    es(num_cromosomas + m).fitness_values = cos
    m = m - 1
Else
    es(num_cromosomas + m).fitness_values = cos
End If
Next m
End Sub
```

#### 8.6.1.10.- Do\_mutations

Como su propio nombre indica, esta función realiza las mutaciones en la población para que así converja antes a la solución óptima.

Las mutaciones se realizan aleatoriamente. Primero, se elige un número aleatorio del cero al diez. Si es mayor de cinco, se realiza mutación, y si no, se pasa a la siguiente iteración.

Dentro del bucle de las mutaciones se van a elegir dos números aleatorios, los cuales están comprendidos entre cero y el número de casos posibles de localización de las estaciones de carga introducidas al principio del programa. La primera variable, “*mut1*”, indica la solución que se va a mutar y la segunda, “*mut2*”, el elemento a mutar.

Después de esto, se evalúa la nueva solución encontrada. Si el coste de las pérdidas ya está en soluciones anteriores, la variable binaria “*igual*” se le asigna el valor ‘*True*’.

Si la variable “*igual*” posee el valor ‘*False*’ se aumenta en uno el índice que indica el sitio donde se almacena esta solución y si posee el valor ‘*True*’ no avanza y en la siguiente solución se sobrescribe perdiendo dicha solución.

```

Public Sub do_mutations()
For j = 0 To size_cromosomas - 1
  Dim b As Integer
  b = Aleatorio(10)
  If (b > 5) Then
    Dim mut1 As Integer
    Dim mut2 As Integer
    mut1 = Aleatorio(num_cromosomas)
    mut2 = Aleatorio(num_cromosomas)
    Do While (mut1 = mut2)
      mut2 = Aleatorio(num_cromosomas)
    Loop
    For i = 0 To j - 1
      es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 0) = es(mut1).poblacion(i, 0)
      es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 1) = es(mut1).poblacion(i, 1)
      es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 2) = es(mut1).poblacion(i, 2)
    Next i
    es(num_cromosomas + m).poblacion(j, 0) = es(mut2).poblacion(j, 0)
    es(num_cromosomas + m).poblacion(j, 1) = es(mut2).poblacion(j, 1)
    es(num_cromosomas + m).poblacion(j, 2) = es(mut2).poblacion(j, 2)
    For i = j + 1 To size_cromosomas - 1
      es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 0) = es(mut1).poblacion(i, 0)
      es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 1) = es(mut1).poblacion(i, 1)
      es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 2) = es(mut1).poblacion(i, 2)
    Next i
    Dim igual As Boolean
    igual = False
    Dim cos As Double
    cos = fitness_func(num_cromosomas + m, size_cromosomas)
    For q = 0 To size_cromosomas - 1
      If (es(m + num_cromosomas).poblacion(q, 0) = 0) Or (es(m +
num_cromosomas).poblacion(q, 1) = 0) Then
        cos = cos * 100
      End If
    Next q
    For asd = 0 To num_cromosomas - 1
      If cos = es(asd).fitness_values Then

```

```

        igual = True
    End If
Next asd
If igual = False Then
    es(num_cromosomas + m).fitness_values = cos
    m = m + 1
End If
End If
Next j
End Sub

```

#### 8.6.1.11.- Do\_mutations\_potencia

En esta función se muta la potencia. El procedimiento es idéntico al anteriormente comentado excepto que en el anterior se mutaban las coordenadas y aquí se muta la potencia de la estación de carga.

```

Public Sub do_mutations_potencia()
Dim cos As Double
Dim igual As Boolean
For jj = 0 To size_cromosomas - 1
    Dim b As Integer
    b = Aleatorio(10)
    If (b > 5) Then
        Dim mut1 As Integer
        Dim mut2 As Integer
        mut1 = Aleatorio(2)
        mut2 = Aleatorio(num_cromosomas)
        If mut1 = 0 Then
            For i = 0 To jj - 1
                es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 0) = es(mut2).poblacion(i, 0)
                es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 1) = es(mut2).poblacion(i, 1)
                es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 2) = es(mut2).poblacion(i, 2)
            Next i
            es(num_cromosomas + m).poblacion(jj, 0) = es(mut2).poblacion(jj, 0)
            es(num_cromosomas + m).poblacion(jj, 1) = es(mut2).poblacion(jj, 1)
            es(num_cromosomas + m).poblacion(jj, 2) = 3.7
        For i = jj + 1 To size_cromosomas - 1

```

```

    es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 0) = es(mut2).poblacion(i, 0)
    es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 1) = es(mut2).poblacion(i, 1)
    es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 2) = es(mut2).poblacion(i, 2)
Next i
igual = False
cos = fitness_func(num_cromosomas + m, size_cromosomas)
For q = 0 To size_cromosomas - 1
    If (es(m + num_cromosomas).poblacion(q, 0) = 0) Or (es(m +
num_cromosomas).poblacion(q, 1) = 0) Then
        cos = cos * 100
    End If
Next q
For asd = 0 To num_cromosomas - 1
    If cos = es(asd).fitness_values Then
        igual = True
    End If
Next asd
If igual = False Then
    es(num_cromosomas + m).fitness_values = cos
    m = m + 1
End If
End If
If mut1 = 1 Then
    For i = 0 To jj - 1
        es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 0) = es(mut2).poblacion(i, 0)
        es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 1) = es(mut2).poblacion(i, 1)
        es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 2) = es(mut2).poblacion(i, 2)
    Next i
    es(num_cromosomas + m).poblacion(jj, 0) = es(mut2).poblacion(jj, 0)
    es(num_cromosomas + m).poblacion(jj, 1) = es(mut2).poblacion(jj, 1)
    es(num_cromosomas + m).poblacion(jj, 2) = 7.4
    For i = jj + 1 To size_cromosomas - 1
        es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 0) = es(mut2).poblacion(i, 0)
        es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 1) = es(mut2).poblacion(i, 1)
        es(num_cromosomas + m).poblacion(i, 2) = es(mut2).poblacion(i, 2)
    Next i
    igual = False

```

```

cos = fitness_func(num_cromosomas + m, size_cromosomas)
For q = 0 To size_cromosomas - 1
    If (es(m + num_cromosomas).poblacion(q, 0) = 0) Or (es(m +
num_cromosomas).poblacion(q, 1) = 0) Then
        cos = cos * 100
    End If
Next q
For asd = 0 To num_cromosomas - 1
    If cos = es(asd).fitness_values Then
        igual = True
    End If
Next asd
If igual = False Then
    es(num_cromosomas + m).fitness_values = cos
    'es(num_cromosomas + m).coste = coste_global
    m = m + 1
End If
End If
End If
Next jj
End Sub

```

#### 8.6.1.12.- Get\_cromosome

Este procedimiento consigue los mejores cromosomas, es decir, almacena la mejor solución de todas las obtenidas para posteriormente guardarlas en una hoja del fichero de Excel.



```

Public Sub get_chromosome(l As Integer)
If (l < 0) Then
    l = 0
End If
If (l > (num_cromosomas - 1)) Then
    l = num_cromosomas - 1
End If
For i = 0 To size_cromosomas - 1
    For k = 0 To 3 - 1
        cromosomas(l, i, k) = es(l).poblacion(i, k)
    Next k
Next i
End Sub

```

#### 8.6.1.13.- Fitness\_func

Esta función, como se ha comentado anteriormente, devuelve el coste total de la construcción de la solución con todas las estaciones de carga. Si alguna estación de carga no puede suministrar toda la demanda entonces se multiplica el coste por dos. En el caso de que pueda suministrar la potencia pero la distancia es mayor a la distancia máxima, el coste también se dobla. Así ninguna de las dos condiciones que no se cumplan no se descartan directamente porque, de este modo, se puede cruzar y/o mutar y obtener mejores soluciones. Lo primero que se realiza es el cálculo de la distancia de un determinado punto de demanda a cada estación de carga. Éste es asignado a la estación de carga que esté más cerca. Todo esto se realiza para cada uno de los puntos de demanda. Estos valores son almacenados en la variable “*poblacion\_EV*”. Después de esto, se calcula el coste de cada estación de carga. Para ello se utiliza la ecuación,

$$Coste = \sum_{i=1}^{num\_EC} \left( \frac{d_i}{g} p + \frac{d_i}{V} k \right)$$

donde:

*p* es el precio de carga [€/kWh],

*g* es el kilometraje por kWh [km/kWh],

*k* es el coste de tiempo de los usuarios [€/h],

V la velocidad media [km/h],

$d_i$  es la distancia desde la estación de carga  $i$  hasta la demanda

num\_EC es el número de estaciones de carga

La deducción de esta fórmula se puede ver en el apartado 3.5.- Localización de las estaciones de carga de los vehículos eléctricos. Esta fórmula proporciona el coste total de las pérdidas de una estación de carga. Para cada solución hay que tener en cuenta todas las estaciones de carga y la potencia de cada una, puesto que hay que proporcionar energía a todos puntos de demanda asignados a esa estación de carga; por ello, como se ha comentado anteriormente, si una estación de carga no puede suministrar la potencia a la demanda que le corresponde se penaliza esta solución.

```
Public Function fitness_func(chrom_index As Integer, ch_size As Integer) As Double
Dim coste As Double
coste = 0
Dim i As Integer
i = 0
For bb = 0 To num_EVs - 1
    poblacion_EV(bb, 0) = 0
    poblacion_EV(bb, 1) = 0
    poblacion_EV(bb, 2) = 0
Next bb
For a = 0 To num_EVs - 1
    dist(a, 0) = 0
    dist(a, 1) = 0
Next a
For l = 0 To num_EV - 1
    For j = 0 To ch_size - 1
        dist(j, 0) = Sqr((es(chrom_index).poblacion(j, 0) - demanda_EV(l, 0)) ^ 2 +
(es(chrom_index).poblacion(j, 1) - demanda_EV(l, 1)) ^ 2) * 1.3 / 1000 'CS=1.3 por las
intersecciones y conversion a Km
        dist(j, 1) = demanda_EV(l, 2)
    Next j
    For b = 0 To ch_size - 1
        d_chrom(b) = b
    Next b

```

```

'ordenar las distancias y el estación de carga
For T = 0 To (ch_size - 2)
  For TT = T + 1 To (ch_size - 1)
    If dist(T, 0) > dist(TT, 0) Then
      Dim k As Integer
      k = d_chrom(T)
      Dim f As Double
      Dim ff As Double
      f = dist(T, 0)
      ff = dist(T, 1)
      d_chrom(T) = d_chrom(TT)
      dist(T, 0) = dist(TT, 0)
      dist(T, 1) = dist(TT, 1)
      d_chrom(TT) = k
      dist(TT, 0) = f
      dist(TT, 1) = ff
    End If
  Next TT
Next T
poblacion_EV(l, 0) = dist(0, 0)
poblacion_EV(l, 1) = dist(0, 1)
poblacion_EV(l, 2) = d_chrom(0)
Next l
Dim coste_perdida_pot As Double
coste_perdida_pot = 0
Dim coste_perdida_ind As Double
coste_perdida_ind = 0
Dim coste_global As Double
coste_global = 0
For n = 0 To ch_size - 1
  suma_pot = 0
  For b = 0 To num_EVs - 1
    If poblacion_EV(b, 2) = n Then
      suma_pot = suma_pot + poblacion_EV(b, 1)
    End If
  Next b
  If ((suma_pot < es(chrom_index).poblacion(n, 2))) Then

```

```

coste_perdida_pot = 0
coste_perdida_ind = 0
For i = 0 To num_EV - 1
  If poblacion_EV(i, 2) = n Then
    coste_perdida_pot = coste_perdida_pot + poblacion_EV(i, 0) * poblacion_EV(i, 1) * p
  / g
    coste_perdida_ind = coste_perdida_ind + poblacion_EV(i, 0) * poblacion_EV(i, 1) * k
  / v
  End If
  If poblacion_EV(i, 0) > dmax Then
    coste_perdida_pot = coste_perdida_pot * 2
    coste_perdida_ind = coste_perdida_ind * 2
  End If
Next i
Else
  coste_perdida_pot = 0
  For i = 0 To num_EV - 1
    If poblacion_EV(i, 2) = n Then
      coste_perdida_pot = coste_perdida_pot + poblacion_EV(i, 0) * poblacion_EV(i, 1) * p
    / g
      coste_perdida_ind = coste_perdida_ind + poblacion_EV(i, 0) * poblacion_EV(i, 1) * k
    / v
    End If
    If poblacion_EV(i, 0) > dmax Then
      coste_perdida_pot = coste_perdida_pot * 2
      coste_perdida_ind = coste_perdida_ind * 2
    End If
  Next i
  coste_perdida_pot = coste_perdida_pot * 2
  coste_perdida_ind = coste_perdida_ind * 2
End If
coste_global = coste_global + coste_perdida_pot + coste_perdida_ind
Next n
fitness_func = coste_global
End Function

```

#### 8.6.1.14.- Aleatorio

Esta función introduciendo un número da un número aleatorio, el cual está comprendido entre el cero y el valor introducido.

Esta función es la siguiente:

```
Public Function Aleatorio(n As Integer) As Integer
Randomize
Aleatorio = Int((n - 0 + 1) * Rnd + 0)
End Function
```

#### 8.6.1.15.- Asignar\_EC

Esta función se va a comentar en el siguiente apartado, 8.6.2.1.- Asignar\_EC, debido a que está desarrollada en el módulo 2.

### 8.6.2.- Módulo2

En este módulo está ubicado el programa de asignación de la demanda a cada estación de carga que le corresponda.

En este módulo existen varias funciones, las cuales se citan a continuación.

- asignaar\_EC: es la principal, la cual llama a las demás funciones;
- leer\_solucion\_optima: almacena la solución óptima;
- designación: designa a cada demanda la estación de carga que le corresponda.

#### 8.6.2.1.- Asignar\_EC

Esta función, como se ha comentado anteriormente, va llamando a las demás funciones en el orden correspondiente.

```

Sub asignar_EC()
Call leer_solucion_optima
Call designacion
End Sub

```

### 8.6.2.2.- Solucion\_optima

Esta función realiza la lectura de la solución óptima almacenada en la hoja Solucion\_optima y la almacena en la variable “*poblacion\_EV\_op(i)*”.

```

Sub leer_solucion_optima()
Worksheets("Solucion_optima").Activate
For i = 0 To num_cromosomas
    poblacion_EV_op(i, 0) = Cells(i + 2, 2)
    poblacion_EV_op(i, 1) = Cells(i + 2, 3)
    poblacion_EV_op(i, 2) = Cells(i + 2, 4)
Next i
End Sub

```

### 8.6.2.3.- Designacion

Este procedimiento realiza como su propio nombre indica la designación de la estación de carga a cada demanda.

```

Sub designacion()
Dim ch_size As Integer
ch_size = size_cromosomas
For bb = 0 To num_EVs - 1
    poblacion_EV_ES(bb, 0) = 0
    poblacion_EV_ES(bb, 1) = 0
    poblacion_EV_ES(bb, 2) = 0
Next bb
For a = 0 To num_EVs - 1
    dist_op(a, 0) = 0
    dist_op(a, 1) = 0
Next a
For l = 0 To num_EV - 1
    For j = 0 To ch_size - 1
        dist_op(j, 0) = Sqr((poblacion_EV_op(j, 0) - demanda_EV(l, 0)) ^ 2 + (poblacion_EV_op(j,

```

```

1) - demanda_EV(l, 1)) ^ 2) * 1.3 / 1000 'CS=1.3 por las intersecciones y conversion a Km
    dist_op(j, 1) = demanda_EV(l, 2)
Next j
For b = 0 To ch_size - 1
    d_chrom_op(b) = b
Next b
'ordenar las distancias y el estación de carga
For T = 0 To (ch_size - 2)
    For TT = T + 1 To (ch_size - 1)
        If dist_op(T, 0) > dist_op(TT, 0) Then
            Dim k As Integer
            k = d_chrom_op(T)
            Dim f As Double
            Dim ff As Double
            f = dist_op(T, 0)
            ff = dist_op(T, 1)
            d_chrom_op(T) = d_chrom_op(TT)
            dist_op(T, 0) = dist_op(TT, 0)
            dist_op(T, 1) = dist_op(TT, 1)
            d_chrom_op(TT) = k
            dist_op(TT, 0) = f
            dist_op(TT, 1) = ff
        End If
    Next TT
Next T
poblacion_EV_ES(l, 0) = dist_op(0, 0)
poblacion_EV_ES(l, 1) = dist_op(0, 1)
poblacion_EV_ES(l, 2) = d_chrom_op(0)
Next l
Worksheets("Export_Output_3").Activate
For i = 0 To num_EV - 1
    ActiveSheet.Cells(i + 2, 16) = poblacion_EV_ES(i, 2)
Next i
End Sub

```





# Capítulo 9

---

## *Referencias*

[1] FULLEA GARCÍA, JOSÉ; TRINIDAD LÓPEZ, FRANCISCO; AMASORRAIN ZABALA, JUAN CARLOS y SANZBERRO IRIARTE, MIKEL, *“El vehículo eléctrico tecnología, desarrollo y perspectivas de futuro”*, McGraw-Hill Interamericana de España, S.A. ISBN: 84-481-1201-6

[2] CHAN, C.C.; BOUSCAYROL, A.; CHEN, K., *“Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling”*, Vehicular Technology, IEEE Transactions on, Febrero 2010, vol.59, no.2, p.589-598

[3] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO, GOBIERNO DE ESPAÑA, *“La Energía en España 2013”*, [en línea] [Consulta: 2 de noviembre de 2014]. Disponible en web:

[http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia\\_en\\_espana\\_2013.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia_en_espana_2013.pdf)

[4] IDAE, “*Mapa tecnológico Movilidad Eléctrica*”, [en línea] [Consulta: 31 de mayo de 2013] Disponible en web:

[http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_Movilidad\\_Electrica\\_ACC\\_c603f868.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_Movilidad_Electrica_ACC_c603f868.pdf)

[5] PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, “*Reglamento (UE) n° 510/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de mayo de 2011, por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de los vehículos comerciales ligeros nuevos como parte del enfoque integrado de la Unión para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de los vehículos ligeros*”, Diario Oficial de la Unión Europea, L145/2, de 31 de mayo de 2011

[6] RED ELECTRICA DE ESPAÑA, “*Boletín mensual Septiembre 2014*”, [en línea] [Consulta: 2 de noviembre de 2014] Disponible en web:

[http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/ree\\_septiembre\\_2014.pdf](http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/ree_septiembre_2014.pdf)

[7] TECMOVIA, “*Motores de aire comprimido, la energía alternativa*”, [en línea] [Consulta: 2 de noviembre de 2014] Disponible en web:

<http://www.tecmovia.com/2012/04/26/motores-de-aire-comprimido-la-energia-alternativa/>

[8] IDAE, “*Combustibles y vehículos alternativos. Combustibles y nuevas tecnologías de vehículos que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes*” [en línea] [Consulta: 2 de noviembre de 2014] Disponible en web:

[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10297\\_TREATISE\\_CombustiblesVehiculosAlternativos\\_A2005\\_d9d8d6b3.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10297_TREATISE_CombustiblesVehiculosAlternativos_A2005_d9d8d6b3.pdf)

[9] GALLEGO NAVARRO JESÚS, “*Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos*”, Emilio Larrodé Pellicer; Universidad de Zaragoza, 2012, [en línea] [Consulta: 2 de noviembre de 2014] Disponible en web: <http://zagan.unizar.es/record/9906>

[10] ENDESA, “*Vehículo eléctrico*”, [en línea] [Consulta: 31 de mayo de 2013] Disponible en web: <https://www.endesavehiculoelectrico.com/>

[11] FUNDACIÓN INSTITUTO TECNOLÓGICO PARA LA SEGURIDAD DEL AUTOMÓVIL, FITSA, “*Tecnologías de propulsión híbridas y las evidencias científicas de su eficacia*”, [en línea] [Consulta: 3 de noviembre de 2014] Disponible en web: [http://www.fundacionfitsa.org/publicaciones\\_ficha.php?id=0000017](http://www.fundacionfitsa.org/publicaciones_ficha.php?id=0000017)

[12] CHAN, C.C., “*The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*”, Proceedings of the IEEE, Abril 2007, vol.95, no.4, p.704-718

[13] LI-QIANG JIN; XIA-HUA ZENG; WEI WANG, “*The control strategy and cost analysis for series Plug-in hybrid electric vehicle*”, Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference on, marzo 2010, vol.2, p.350-354

[14] QINGSONG LI; ZHENG ZHANG; WEIJUN ZHAO, “*Dynamic Control for Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicle*”, Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), 2012 International Conference on, Marzo 2012, vol.3, p.252-256

[15] YIMIN GAO; EHSANI, M., “*Design and Control Methodology of Plug-in Hybrid Electric Vehicles*”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Febrero 2010, vol.57, no.2, p.633-640

[16] RAHMAN, S.A.; NONG ZHANG; JIANGUO ZHU, “*A comparison on fuel economy and emissions for conventional hybrid electric vehicles and the UTS plug-in hybrid electric vehicle*”, Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on, Febrero 2010, vol.5, p.20-25

[17] EPA UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, “*Testing and Measuring Emissions*”, [en línea] [Consulta: 6 de junio de 2013]. Disponible en web: <http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm>

[18] LARMINIE, J.; LOWRY, J., “*Electric Vehicle technology explained, 2<sup>nd</sup> Edition*”, Wiley, ISBN: 978-1-119-94273-3

[19] BATTERY UNIVERSITY, “*Lithium-based Batteries*”, [en línea] [Consulta: 20 de febrero de 2014] Disponible en web: [http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries/1](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries/1)

[20] GAUCHÍA BABÉ, L., “*Modelado y simulación HIL (hardware-in-the-loop) de un sistema pila de combustible – batería*”, Dr. Javier Sanz Feito; Universidad Carlos III de Madrid,

Julio 2008, [en línea] [Consulta: 4 de febrero de 2014]. Disponible en web: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/7260>

[21] TROJAN BATTERY COMPANY, “*Guía del usuario*”, [en línea] [Consulta: 10 de octubre de 2013] Disponible en web: [http://www.trojanbattery.com/pdf/TRJN0147\\_UsersGuideSP\\_SPA.pdf](http://www.trojanbattery.com/pdf/TRJN0147_UsersGuideSP_SPA.pdf)

[22] SERVELEC SISTEMAS DE ENERGÍA, “*Batería Alcalina Níquel Cadmio Modelo: KPL 150*”, [en línea] [Consulta: 11 de febrero de 2014] Disponible en web: <http://www.servelec.com.ar/pdf/2012/KPL150.pdf>

[23] PANDAY, A.; BANSAL, H.O., “*Temperature dependent circuit-based modeling of high power Li-ion battery for plug-in hybrid electrical vehicles*”, Advances in Technology and Engineering (ICATE), 2013 International Conference on, 23-25 Enero 2013, p.1-6

[24] INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, CENTRO NACIONAL DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, “*Sistemas de Información Geográfica*”, [en línea] [Consulta: 17 de octubre de 2014] Disponible en web: <http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesSistemaInfoGeografica.do>

[25] BOSQUE SENDRA J., “*Sistemas de Información Geográfica*”, Ediciones Rialp, Madrid, 1997, 2ª edición corregida, p. 451, ISBN: 84-321-3154-7

[26] INGETEAM, “*Movilidad Eléctrica 2013 Una familia completa de estaciones de recarga*”, [en línea] [Consulta: 19 de octubre de 2014] Disponible en web: [http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Sector/Documento/SSE\\_1065\\_Archivo\\_catalogo-ingerev-es.pdf](http://www.ingeteam.com/Portals/0/Catalogo/Sector/Documento/SSE_1065_Archivo_catalogo-ingerev-es.pdf)

[27] SCHNEIDER ELECTRIC, “*Tipos de vehículos eléctricos*”, [en línea] [Consulta: 19 de octubre de 2014]. Disponible en web: <http://www.schneider-electric.com/>

[28] SCHNEIDER ELECTRIC, “*La Infraestructura de recarga. El principal factor para el éxito del vehículos eléctricos*”, [en línea] [Consulta: 19 de octubre de 2014] Disponible en web: <http://www.schneider-electric.com/>

[29] PROCHAZKA, P.; PAZDERA, I.; VOREL, P.; CERVINKA, D., “*Design of small electric car*”, Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on, Junio 2012, p.359-364

- [30] SCHWEIGHOFER, B.; WEGLEITER, H.; RECHEIS, M.; FULMEK, P., “Fast and accurate battery model applicable for EV and HEV simulation”, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International, Mayo 2012, p.565-570
- [31] MAS, F.B.; OLIVER, B.; ISERN, E.; PICOS, R. y ROCA, M., “Monitorización de vehículos eléctricos para el desarrollo de modelos de consumo”, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, SAAEI, Julio 2012, p. 482-487
- [32] HABIB ULLAH, M.; GUNAWAN, T.S.; SHARIF, M. R.; MUHIDA, R., “Design of environmental friendly hybrid electric vehicle”, Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2012 International Conference on, Julio 2012, p.544-548
- [33] IBRAHIM, S.; ASFANI, D.A.; TAKASHI, H., “Simulation-based analysis of short circuit fault in parallel-series type hybrid electric vehicle”, Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on, Octubre 2011, vol.3, p.2045-2049
- [34] YUAN CHENG; CHEN, K.; CHAN, C.C.; BOUSCAYROL, A.; SHUMEI CUI, “Global modeling and control strategy simulation”, Vehicular Technology Magazine, IEEE, Junio 2009, vol.4, no.2, p.73-79
- [35] JALALIFAR, M.; PAYAM, A.F.; MIRZAEIAN, B.; NEZHAD, S.M.S., “Dynamic Modeling and Simulation of an Induction Motor with Adaptive Backstepping Design of an Input-Output Feedback Linearization Controller in Series Hybrid Electric Vehicle”, Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES '06. International Conference on, Diciembre 2006, p.1-6
- [36] JUNJIE LI; XIUMIN YU; HUAJIE DING; PING SUN, “Design And Control Of The Propulsion For A Series Hybrid Electric Vehicle”, Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on, Julio 2010, p.2159-2162
- [37] DI CAIRANO, S.; LIANG, W.; KOLMANOVSKY, I.V.; KUANG, M.L.; PHILLIPS, A.M., “Engine power smoothing energy management strategy for a series hybrid electric vehicle”, American Control Conference (ACC), 2011, Junio-Julio 2011, p.2101-2106
- [38] RAZAVIAN, R.; AZAD, N.L.; MCPHEE, J., “On real-time optimal control of a series Hybrid Electric Vehicle with an ultra-capacitor”, American Control Conference (ACC), 2012, Junio 2012, p.547-552

- [39] EVANGELOU, S.A.; SHUKLA, A., “*Advances in the modelling and control of series hybrid electric vehicles*”, American Control Conference (ACC), 2012, Junio 2012, p.527-534
- [40] MILLNER, A.; JUDSON, N.; REN, B.; JOHNSON, E.; ROSS, W., “*Enhanced plug-in hybrid electric vehicles*”, Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference on, Septiembre 2010, p.333-340
- [41] WEI XU; GANG LEI; YONGCHANG ZHANG; TIANSHI WANG; JIANGUO ZHU, “*Development of electrical drive system for the UTS PHEV*”, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE, Septiembre 2012, p.1886-1893
- [42] KNOEDLER, K.; STEINMANN, J.; JONES, S.; HUSS, A.; KURAL, E.; BRINGMANN, O.; ZIMMERMANN, J.; LAVERSANNE, S.; SANCHEZ, D., “*Optimal energy management and recovery for FEV*”, Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2012, Marzo 2012, p.683-684
- [43] VASILJEVIC, G.; VRHOVSKI, Z.; BOGDAN, S., “*Dynamic modeling and simulation of a three-wheeled electric car*”, Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, Marzo 2012, p.1-8
- [44] CARDELLI, E.; MORETTINI, V., “*Modeling and simulation of a retrofitted electric car in urban and extra urban driving cycles*”, Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International, Septiembre 2012, p.1065-1070
- [45] ZARKESH, A.; THIRUCHELVAM, V.; SEERALAN, A., “*Alternative Energy Efficient System for Charging Electric Cars*”, Intelligent Systems Modelling & Simulation (ISMS), 2013 4th International Conference on, Enero 2013, p.394-396
- [46] MEHAR, S.; SENOUCI, S.M., “*An optimization location scheme for electric charging stations*”, Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT), 2013 International Conference on, vol.01, Junio 2013, p.1-5
- [47] JUN HE; BUXIANG ZHOU; CHAO FENG; HENGXIN JIAO; JINHUA LIU, “*Electric Vehicle Charging Station Planning Based on Multiple-Population Hybrid Genetic Algorithm*”, Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), 2012 International Conference, Diciembre 2012, p.403-406

[48] CHUN-LIEN SU; RONG-CENG LEOU; JUN-CHANG YANG; CHAN-NAN LU, “*Optimal electric vehicle charging stations placement in distribution systems*”, Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, Noviembre 2013, p. 2121-2126

[49] SHAOYUN GE; LIANG FENG; HONG LIU, “*The planning of electric vehicle charging station based on Grid partition method*”, Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference, Septiembre 2011, p. 2726-2730

[50] PAZOUKI, S.; MOHSENZADEH, A.; HAGHIFAM, M.-R., “*Optimal planning of PEVs Charging Stations and Demand Response programs considering distribution and traffic networks*”, Smart Grid Conference (SGC), Diciembre 2013, p. 90-95

[51] OLIVEIRA, D. Q.; NETO, P.B.L.; SAAVEDRA, O.; DELBONI, L. F N; LIMA, B. I L, “*The impacts of plug-in hybrid electric vehicles and renewable power penetration into distribution systems*”, Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES, Septiembre 2012, p.1-5

[52] KADAR, P.; VARGA, A., “*PhotoVoltaic EV charge station*”, Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 2013 IEEE 11th International Symposium on, Enero-Febrero 2013, p.57-60

[53] RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA, “*El vehículo eléctrico Una prometedora alternativa de futuro*”, [en línea] [Consulta: 9 de junio de 2012]. Disponible en web: <http://www.ree.es/operacion/pdf/FolletoCocheElectrico.pdf>

[54] ROIG ESTRADA, MIGUEL, “*Perspectiva actual de la tecnología del coche eléctrico. Análisis de los cambios en los procesos de producción con la llegada del vehículo eléctrico*”, Sancho Rodríguez, José y Berg, Christina, Universidad Pública de Navarra. Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, Febrero 2012, [en línea] [Consulta: 12 de mayo de 2013] Disponible en web: <http://hdl.handle.net/2454/6668>

[55] PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, “*Directiva 98/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 1998 relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo*”, Diario Oficial de la Unión Europea, L350/1, de 28 de diciembre de 1998

[56] EHSANI, MEHRDAD; GAO, YIMIN; EMADI, ALI; *“Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design 2<sup>nd</sup> Edition”*, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN: 978-1-4200-5398-2

[57] PINTOS GÓMEZ DE LAS HERAS, BORJA, *“Desarrollo de una metodología para generación de ciclos de conducción representativos del tráfico real urbano. Aplicación para medida de emisiones en banco de rodillos”*, Fonseca González, Natalia Elizabeth y Casanova Kindelán, Jesús, Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, 2011, [en línea] [Consulta: 8 de junio de 2014] Disponible en web: <http://oa.upm.es/9437/>