

# TEMA 3

## 1 Requerimientos energéticos del vehículo eléctrico

# TIPOS DE VEHÍCULO

- **Tipos de vehículo: ligero, medio y pesado**
  - **Motorización y prestaciones**
- Tipos de uso: urbano, mixto o carretera
  - Tipo de conducción y consumo
- Modelización del requerimiento energético

## TIPOS DE VEHÍCULO

- La demanda de energía y potencia varía en función del tipo de vehículo y de las exigencias en cuanto a prestaciones (carga máxima, velocidad máxima, aceleración, etc.)
- Básicamente podemos distinguir tres tipos de vehículos, ligero, medio y pesado
- El vehículo ligero es utilizado fundamentalmente en desplazamientos por personas
- El vehículo medio se emplea para transporte mixto de personas y mercancías, aunque con cargas reducidas
- El vehículo pesado se diseña y configura para transporte de mercancías pesadas y/o voluminosas

## TIPOS DE VEHÍCULO

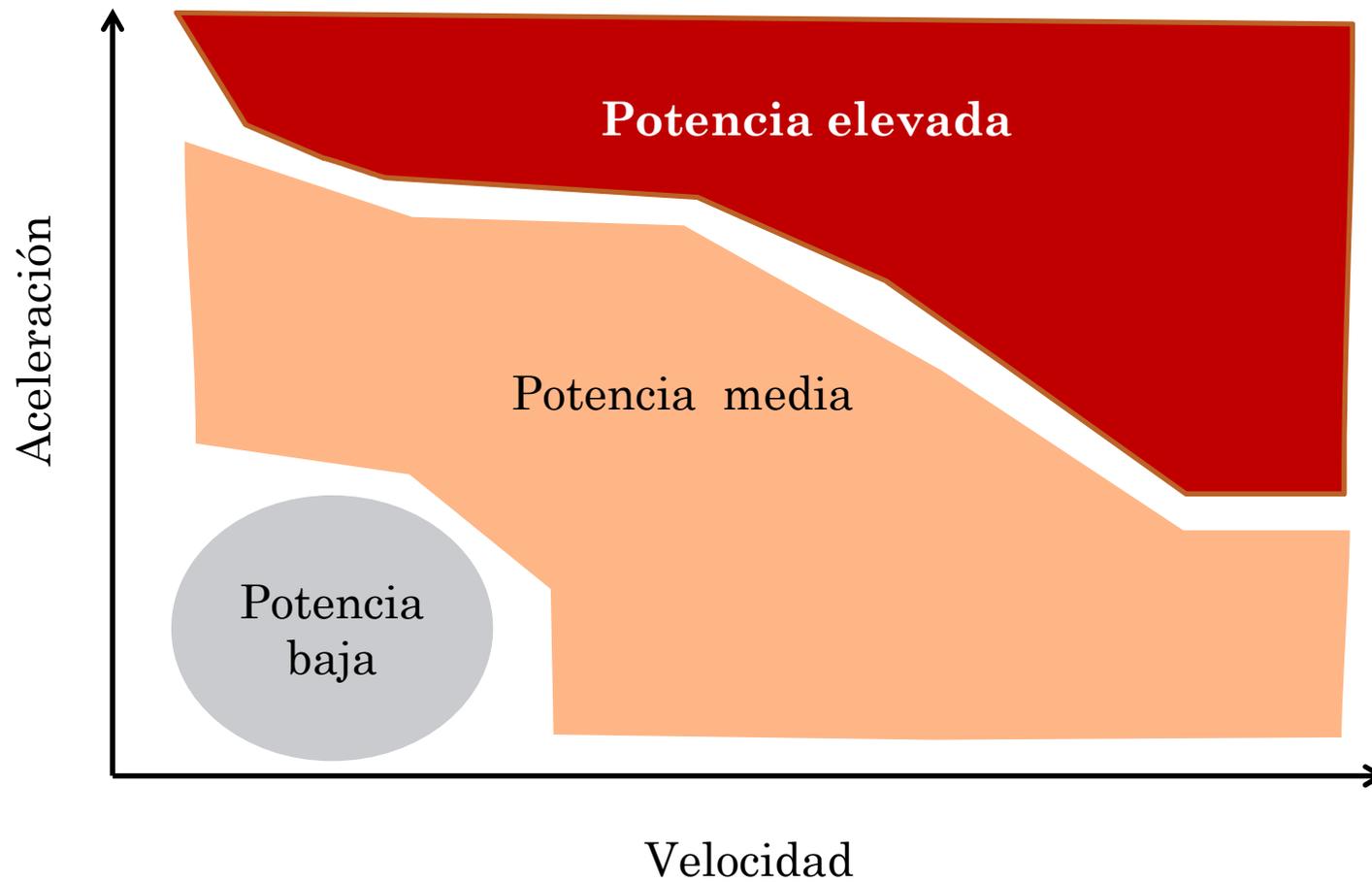
- Desde un punto de vista de requerimientos energéticos cada uno de los tres tipos de vehículo seleccionado presentan las siguientes características

	Ligero	Medio	Pesado
Velocidad	Alta	Media	Media/Baja
Aceleración	Media/Alta	Baja/Media	Baja
Carga	Baja	Media	Alta

## TIPOS DE VEHÍCULO

- La configuración de las características antes definidas es importante para poder establecer el tipo de fuente de energía que se requiere
- La potencia de un fuente de propulsión será función de la velocidad y carga máxima que se quieran alcanzar, pero también del valor de la aceleración que deba tener el vehículo
- Por otro lado, la rapidez con la que la fuente debe responder a la demanda de energía dependerá del tipo de fuente que se utilice

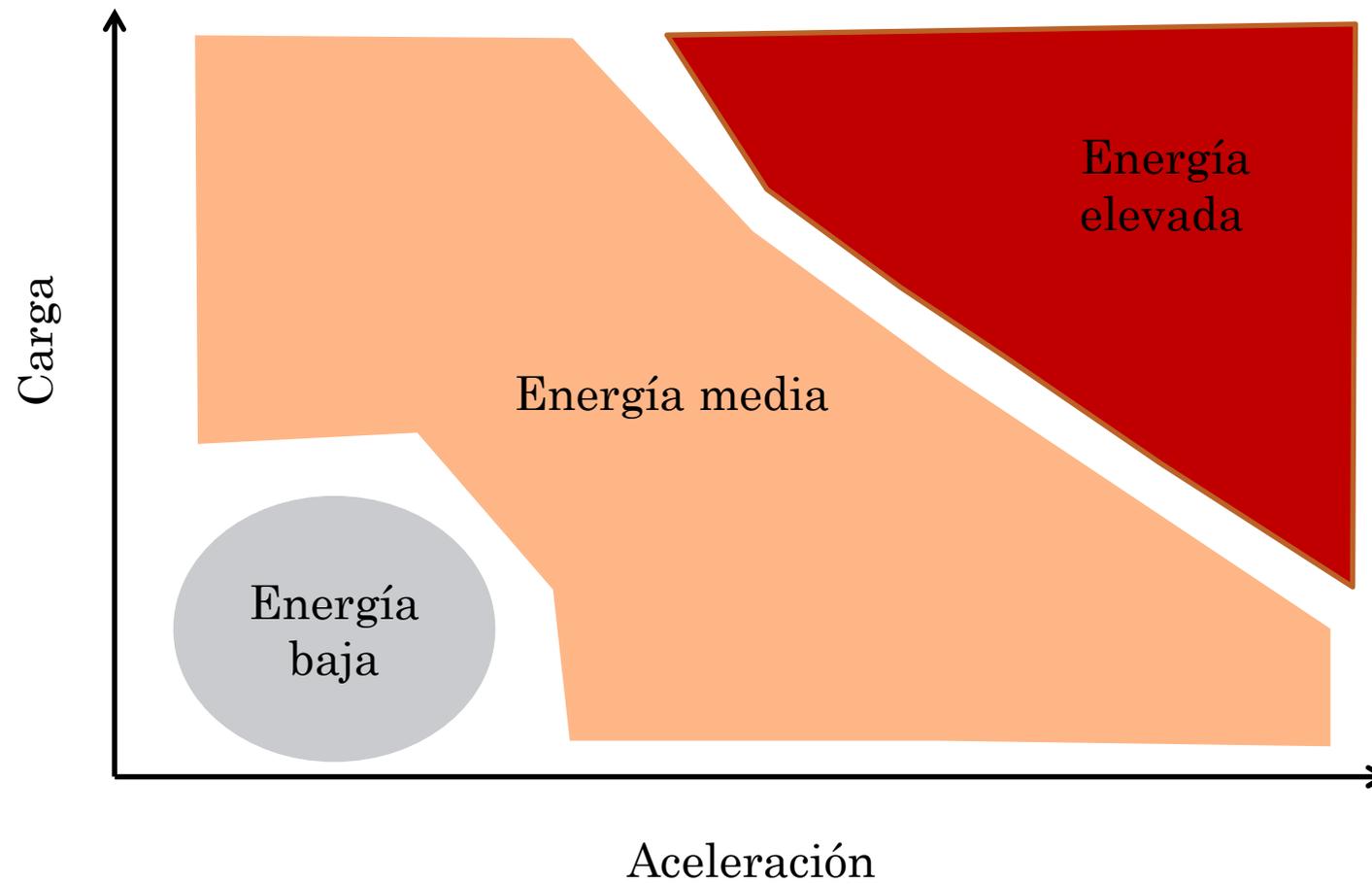
# TIPOS DE VEHÍCULO



## TIPOS DE VEHÍCULO

- Asimismo, la energía necesaria que se debe suministrar al motor, sea desde una fuente continua o desde un sistema de almacenamiento, dependerá tanto de la carga de trabajo como de la aceleración
- Al igual que sucede en el caso de la potencia, la forma en la que la energía debe liberarse es una función directa del tipo de uso al que esté destinado el vehículo (ligero, medio o pesado)

# TIPOS DE VEHÍCULO



## TIPOS DE VEHÍCULO

- Dentro de cada una de las tres categorías que hemos definido previamente, podemos establecer rangos diferentes en cuanto a prestaciones, es decir las necesidades de potencia y energía que requiere un vehículo del tipo seleccionado
- Esta situación hace que la potencia y energía de cada segmento o tipo de vehículo sea muy variable, por lo que se hace necesario acotar el valor dentro de unos márgenes para poder analizar el tipo de fuente y las características de la misma

## TIPOS DE VEHÍCULO

- Una análisis detallado de los distintos factores que se han mencionado hasta el momento, y la dependencia que existe entre ellos, permite establecer una clasificación de los vehículos más próxima a la realidad. De acuerdo con estos criterios, los vehículos los podemos clasificar en:
  - Microurbano
  - Urbano
  - Compacto
  - Berlina media
  - Berlina grande
  - Monovolumen compacto
  - Monovolumen grande
  - SUV compacto
  - SUV grande

## TIPOS DE VEHÍCULO

- A partir de los valores de potencia y energía se diseña la motorización de un vehículo
- Una potencia elevada requiere, obviamente, de un motor potente
- Una demanda de energía considerable precisa de un motor de bajo consumo, lo que tiende a reducir la potencia
- La potencia de un motor para vehículos dependerá también de la demanda de energía

## TIPOS DE VEHÍCULO

- La potencia del motor para cada tipo sería:

Tipo	Potencia mínima CV/kW	Potencia ideal CV/kW
Microurbano	50/36,8	70/51,5
Utilitario	80/58,8	100/73,5
Compacto	90/66,2	120/88,2
Berlina media	110/80,9	150/110,3
Berlina grande	140/102,9	180/132,3
Monovolumen compacto	110/80,9	140/102,9
Monovolumen grande	150/110,3	200/147
SUV compacto	105/77,2	150/110,3
SUV grande	170/125	200/147

## TIPOS DE VEHÍCULO

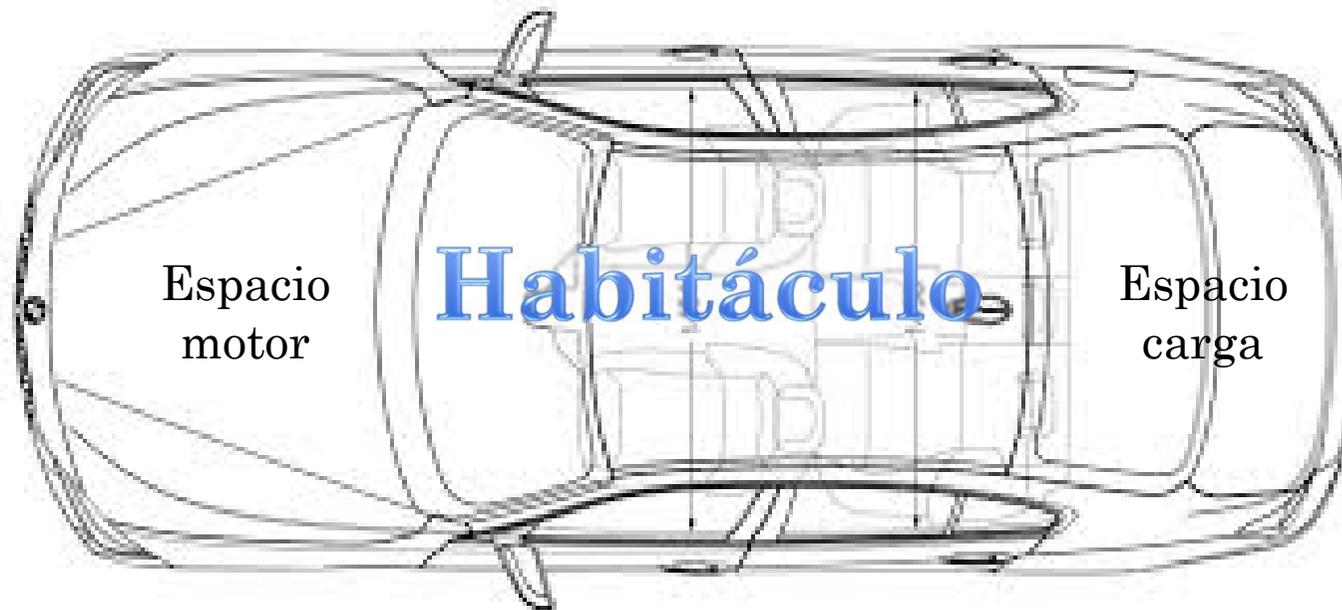
- Aunque estos valores sean habituales para vehículos convencionales, para alcanzar dicha potencia con una fuente puramente eléctrica se requiere de un sistema de alimentación o de un sistema de almacenamiento considerablemente voluminoso, lo que muchas veces lo hace poco útil
- El tamaño del sistema de suministro de energía a un vehículo eléctrico constituye, hoy en día, uno de los principales problemas, puesto que sistemas muy grandes reducen el espacio disponible para otro tipo de aplicaciones como son el habitáculo para personas o el tamaño donde guardar la carga

## TIPOS DE VEHÍCULO

- Si se considera un tamaño determinado de vehículo, y se quiere mantener el espacio destinado a personas y carga no queda otra solución que reducir el tamaño del sistema de suministro de energía (fuente o almacenador)
- Si se quiere mantener el tamaño del habitáculo, espacio para carga y, además, el tamaño del sistema de alimentación eléctrico hay que aumentar el tamaño del vehículo, lo que, de acuerdo con lo visto, requiere más potencia para mantener las mismas prestaciones

# TIPOS DE VEHÍCULO

## Estructura original



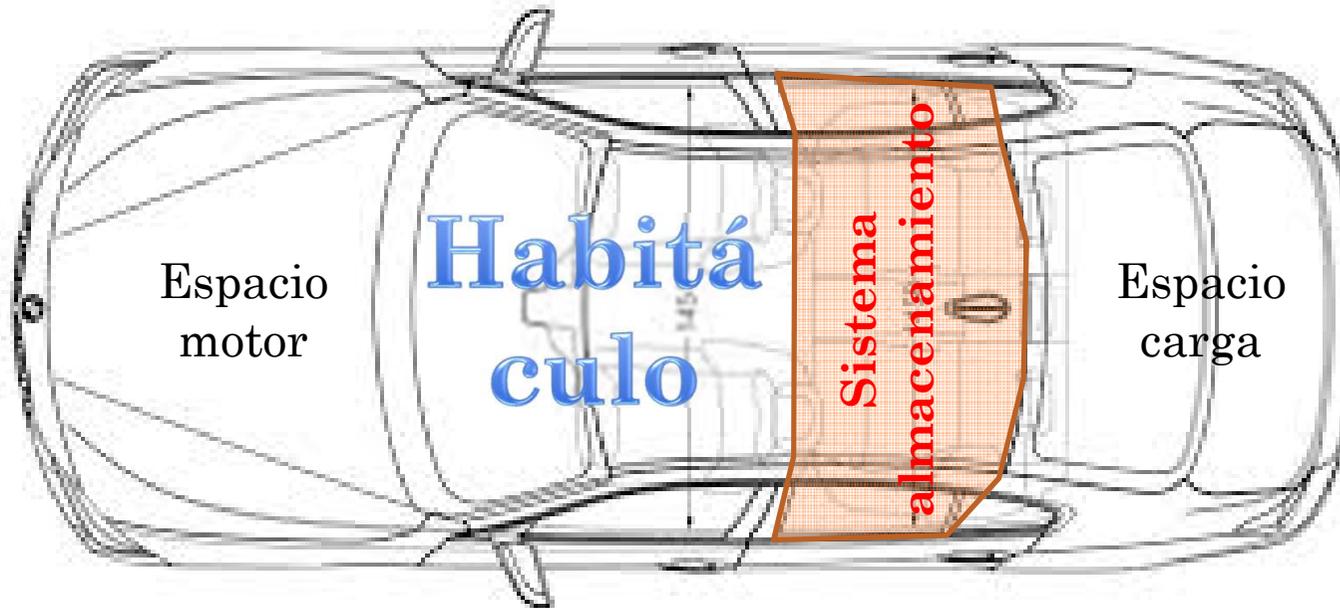
# TIPOS DE VEHÍCULO

## Estructura modificada: reducción del espacio de carga



# TIPOS DE VEHÍCULO

## Estructura modificada: reducción del habitáculo de pasajeros



# TIPOS DE USO

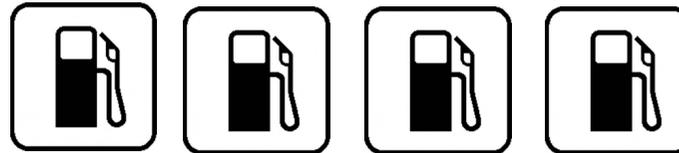
- Tipos de vehículo: ligero, medio y pesado
  - Motorización y prestaciones
- **Tipos de uso: urbano, mixto o carretera**
  - **Tipo de conducción y consumo**
- Modelización del requerimiento energético

## TIPOS DE USO

- Además del tipo de vehículo, es preciso prestar atención al tipo de trayecto que se realiza, puesto que eso influye sobre las necesidades de energía
- Básicamente existen tres tipos de uso para el vehículo: urbano, mixto y carretera
- El tipo de uso afecta, sobre todo, al consumo y al recorrido, en menor medida a la velocidad, y de manera menos importante a la carga y a la potencia

# TIPOS DE USO

Consumo



Recorrido urbano



Velocidad



Recorrido



Carga

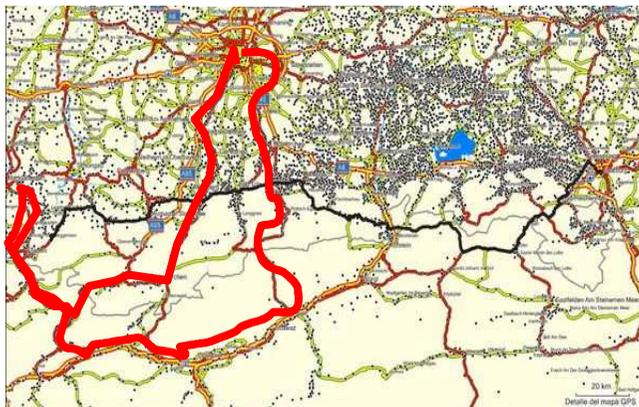


Potencia

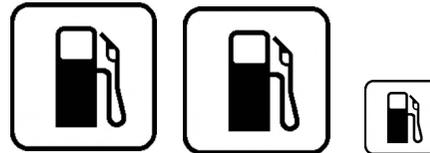


# TIPOS DE USO

Recorrido mixto



Consumo



Velocidad



Recorrido



Carga



Potencia



# TIPOS DE USO

Recorrido carretera



Consumo



Velocidad



Recorrido



Carga



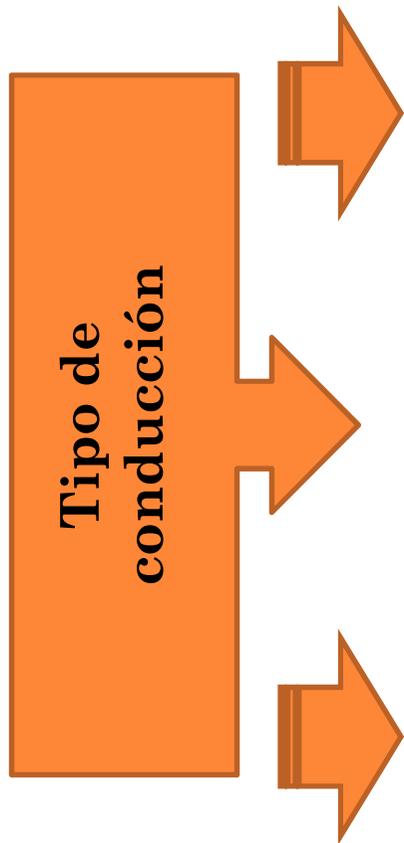
Potencia



## TIPOS DE USO

- La potencia y energía dependen, en gran medida, del tipo de conducción que se realice y del recorrido que se lleve a cabo
- Una conducción relajada y suave requiere poca potencia, en tanto que una conducción deportiva y agresiva necesita de una potencia elevada
- Igualmente, un corto recorrido precisa de una reducida cantidad de energía en tanto que si se trata de desplazamientos largos la cantidad de energía aumenta considerablemente

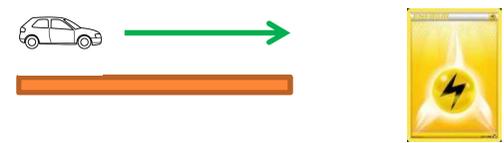
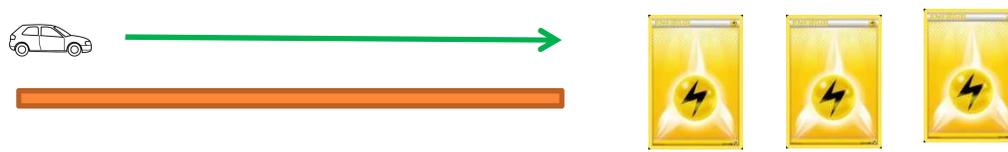
## TIPOS DE USO



# Potencia



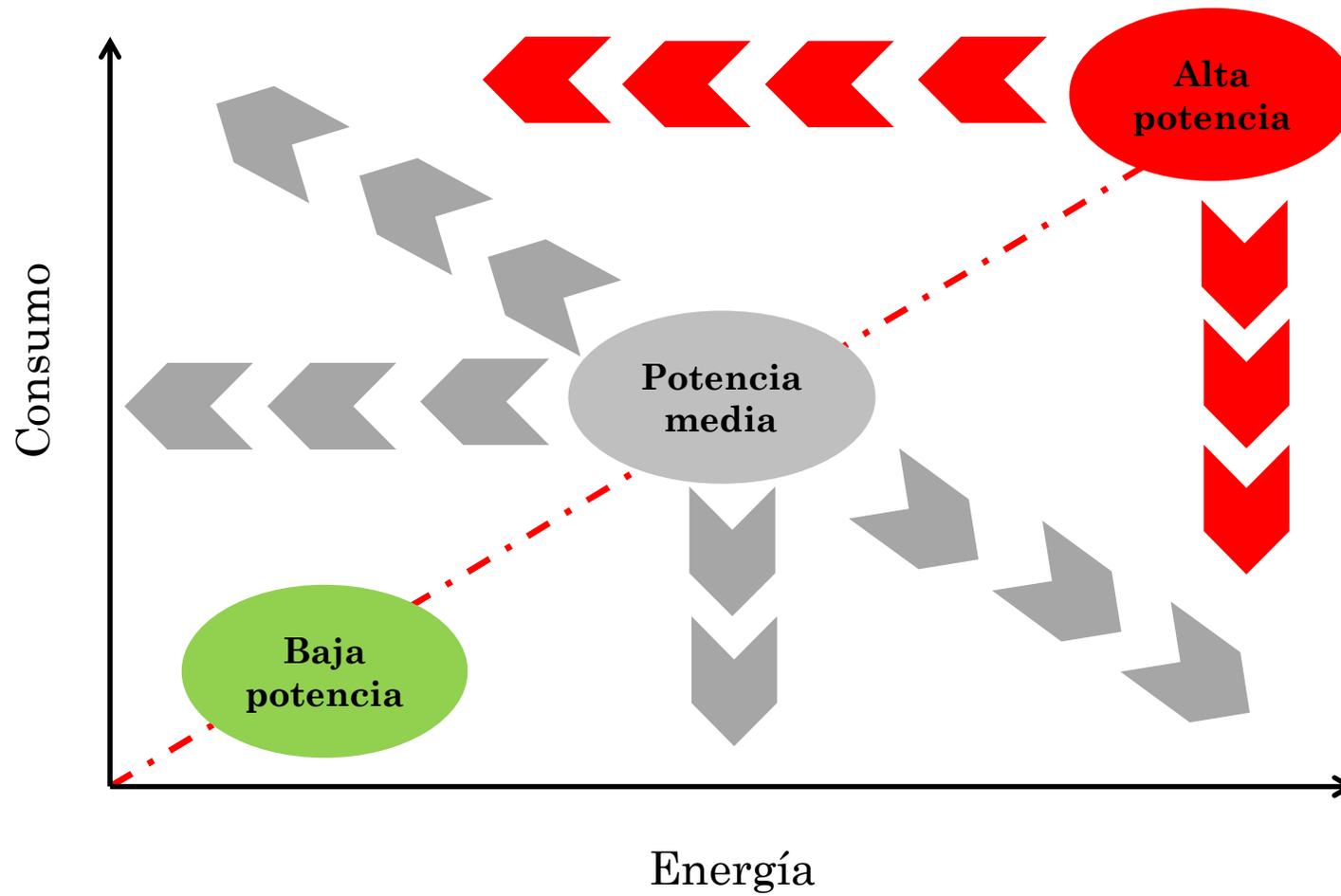
# TIPOS DE USO



# Energía

## Recorrido

# TIPOS DE USO



## TIPOS DE USO

- En función de los valores proporcionados por la tabla anterior, es fácil ver que la mayoría de los vehículos requiere una potencia muy considerable si operamos en términos de sistema eléctrico
- Esto va a obligar a que las prestaciones de un vehículo eléctrico difieran de manera apreciable respecto a las de un vehículo convencional, sacrificando alguna de las características que han sido mencionadas, potencia, velocidad, carga, consumo, o más de una ellas

## TIPOS DE USO

- Un sencillo análisis físico de las magnitudes involucradas en el estudio (potencia, energía, consumo, carga), nos muestra que existe una dependencia de todas ellas entre sí
- A partir de leyes físicas fundamentales de la cinética tenemos:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Fr}{t} = \frac{mar}{t} = mav$$

donde P es la potencia, W la energía, m la carga (masa), a la aceleración, v la velocidad y r la distancia recorrida

## TIPOS DE USO

- Por tanto, del análisis de la ecuación anterior se deduce que para una fuente de energía (potencia) dada, se tiene:

Potencia	Masa	Aceleración	Velocidad	Distancia	
Fija	Fija	Fija	↓	↑	
			↑	↓	
	Fija	↓	Fija	↑	
		↑		↓	
	Fija	Fija	↓	↑	Fija
			↑	↓	

## TIPOS DE USO

- Por tanto, del análisis de la ecuación anterior se deduce que para una fuente de energía (potencia) dada, se tiene:

Potencia	Masa	Aceleración	Velocidad	Distancia
Fija	↓	Fija	Fija	↑
	↑			↓
	↑	↓	Fija	Fija
	↓	↑		
	↓	Fija	↑	Fija
	↑		↓	

# TIPOS DE VEHÍCULO

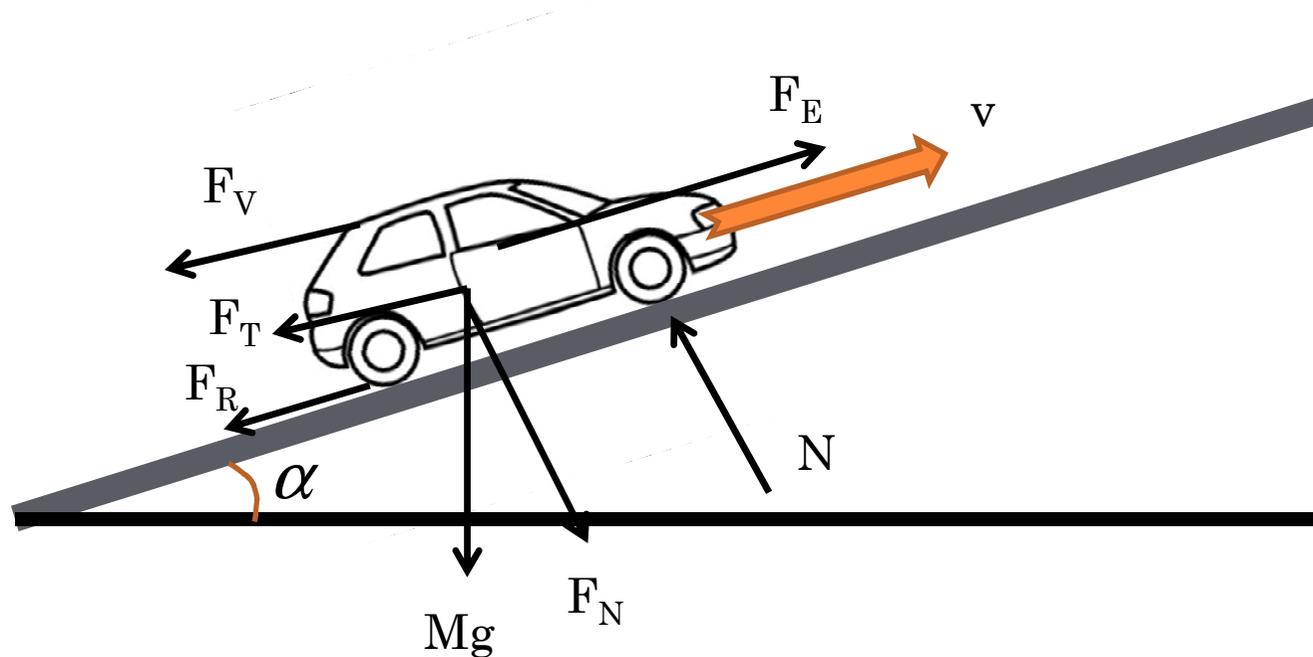
- Tipos de vehículo: ligero, medio y pesado
  - Motorización y prestaciones
- Tipos de uso: urbano, mixto o carretera
  - Tipo de conducción y consumo
- **Modelización del requerimiento energético**

## MODELIZACIÓN

- Para la modelización del requerimiento energético de un vehículo eléctrico se han desarrollado diversas herramientas que tienen en cuenta diversos factores y componentes
- En particular, los diferentes procesos de modelización analizan los siguientes elementos:
  - Rendimiento
  - Consumo
  - Nivel de emisiones
  - Dispositivos eléctricos

## MODELIZACIÓN

- Desde el punto de vista de la modelización vamos a suponer el vehículo como una carga mecánica que se desplaza a una cierta velocidad
- Gráficamente tenemos



## MODELIZACIÓN

- Del esquema anterior podemos deducir que si el vehículo se desplaza a velocidad constante:

$$F_E = F_V + F_R + F_T$$

- Considerando que la fuerza de rozamiento viene dada por:

$$F_R = C_f Mg \cos\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right)$$

siendo  $C_f$  el coeficiente de fricción en la zona de rodadura (neumático)

## MODELIZACIÓN

- Por otro lado, la fuerza viscosa debida al viento se puede expresar de la forma:

$$F_V = 0.5 \rho C_x A v^2 \operatorname{sgn}(v)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $C_x$  es el coeficiente aerodinámico del vehículo  $A$  es la superficie frontal del mismo,  $v$  su velocidad y  $\operatorname{sgn}$  una función definida de la forma:

$$\operatorname{sgn}(v) \begin{cases} 1 & \text{si } v > 0 \\ -1 & \text{si } v < 0 \end{cases}$$

## MODELIZACIÓN

- Asimismo, la componente tangencial del peso del vehículo viene dada por:

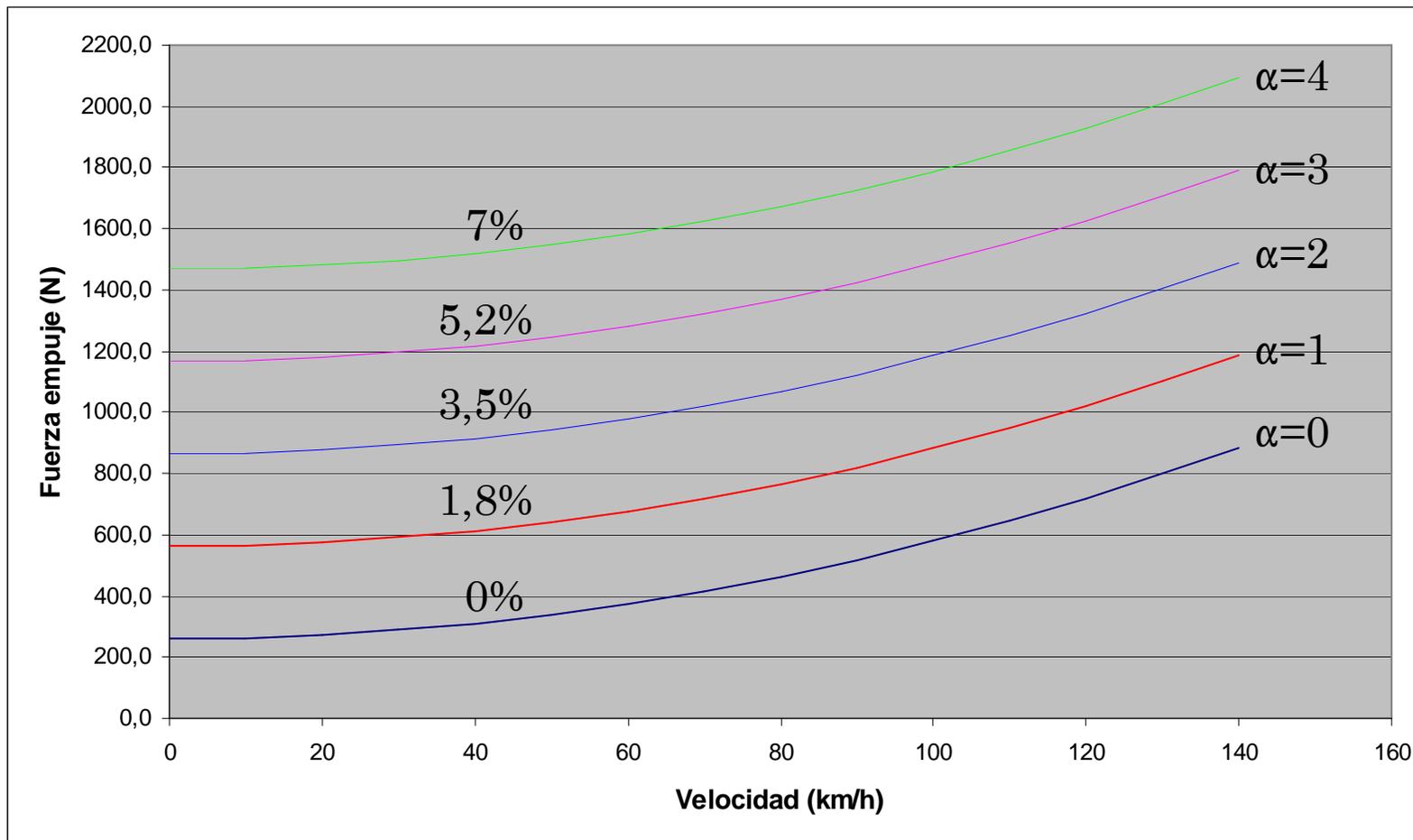
$$F_T = Mg \sin\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right)$$

- A partir de las relaciones anteriores podemos simular el valor de la fuerza necesaria para impulsar el vehículo

## MODELIZACIÓN

- Realizando una simulación para un vehículo de 1767 kg (vehículo medio), que circula sobre una vía con un coeficiente de rozamiento de 0,015, teniendo el vehículo un  $C_x=0,35$  y un área frontal de fricción al viento de  $1,93 \text{ m}^2$ , y suponiendo una densidad del aire de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , se obtienen los siguientes valores (ver gráfico)
- Los valores de  $\alpha$  corresponden al ángulo de inclinación de la vía, y el % es la elevación de la carretera, equivalente al ángulo proporcionado

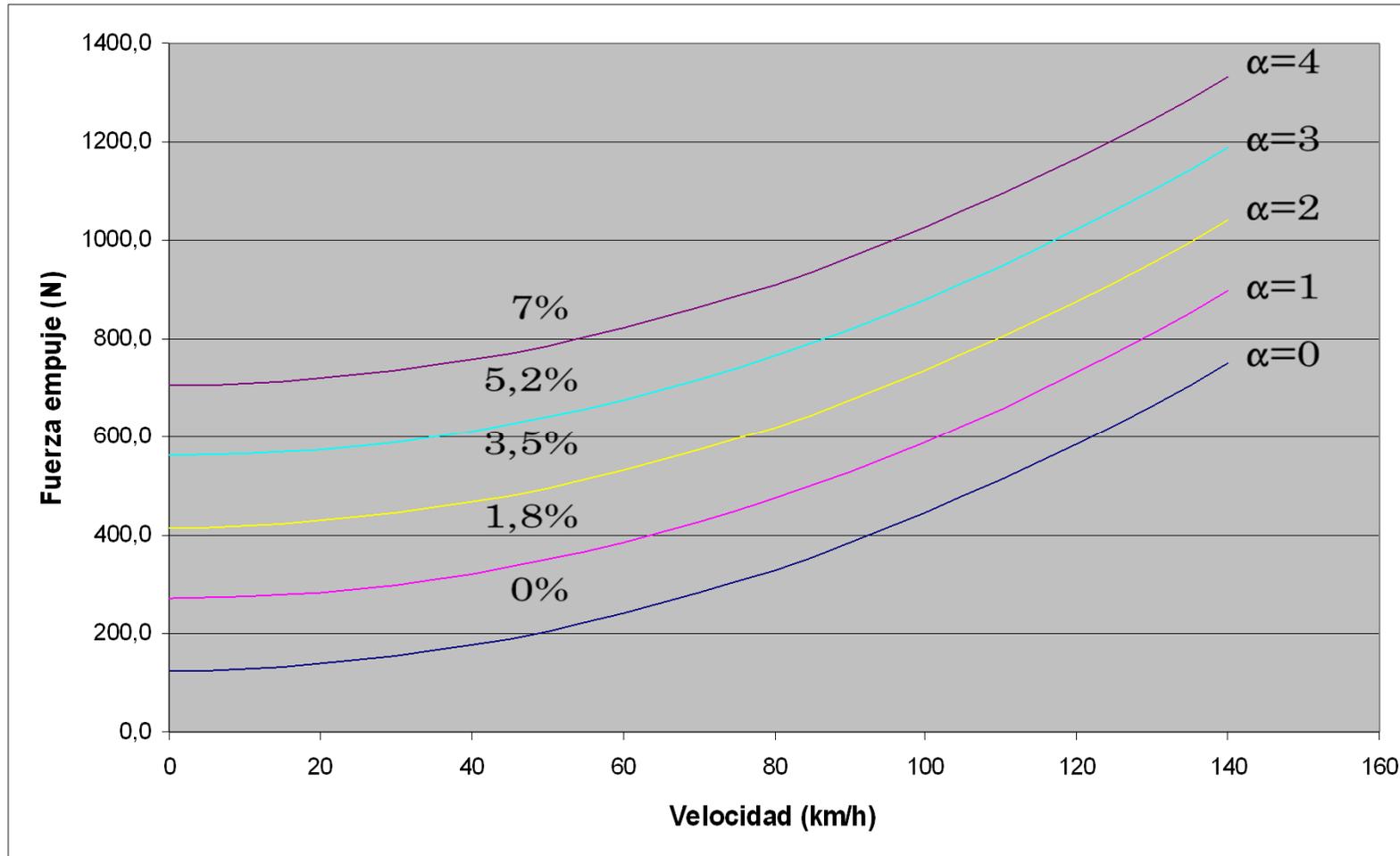
# MODELIZACIÓN (VEHÍCULO MEDIO)



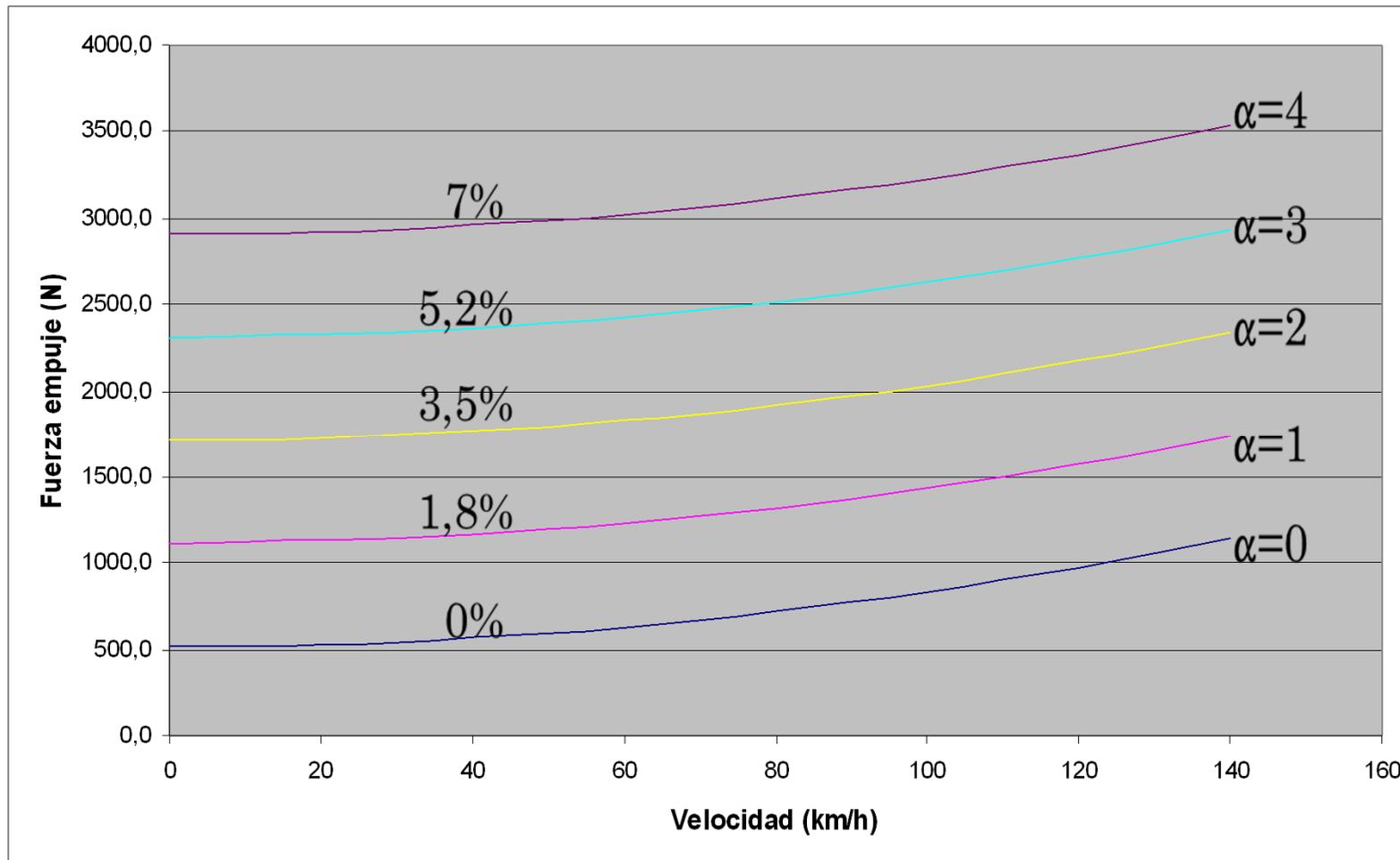
## MODELIZACIÓN

- Repitiendo la simulación para un vehículo de 850 kg (vehículo ligero), en las mismas condiciones que anteriormente, se obtienen los siguientes valores (ver gráficos)
- La simulación para vehículos pesados, por encima de 3500 kg, nos daría valores de fuerza demasiado grandes para poder alimentar el vehículo tan sólo con energía eléctrica procedente de baterías, supercapacitores o incluso pilas de combustible

# MODELIZACIÓN (VEHÍCULO LIGERO)



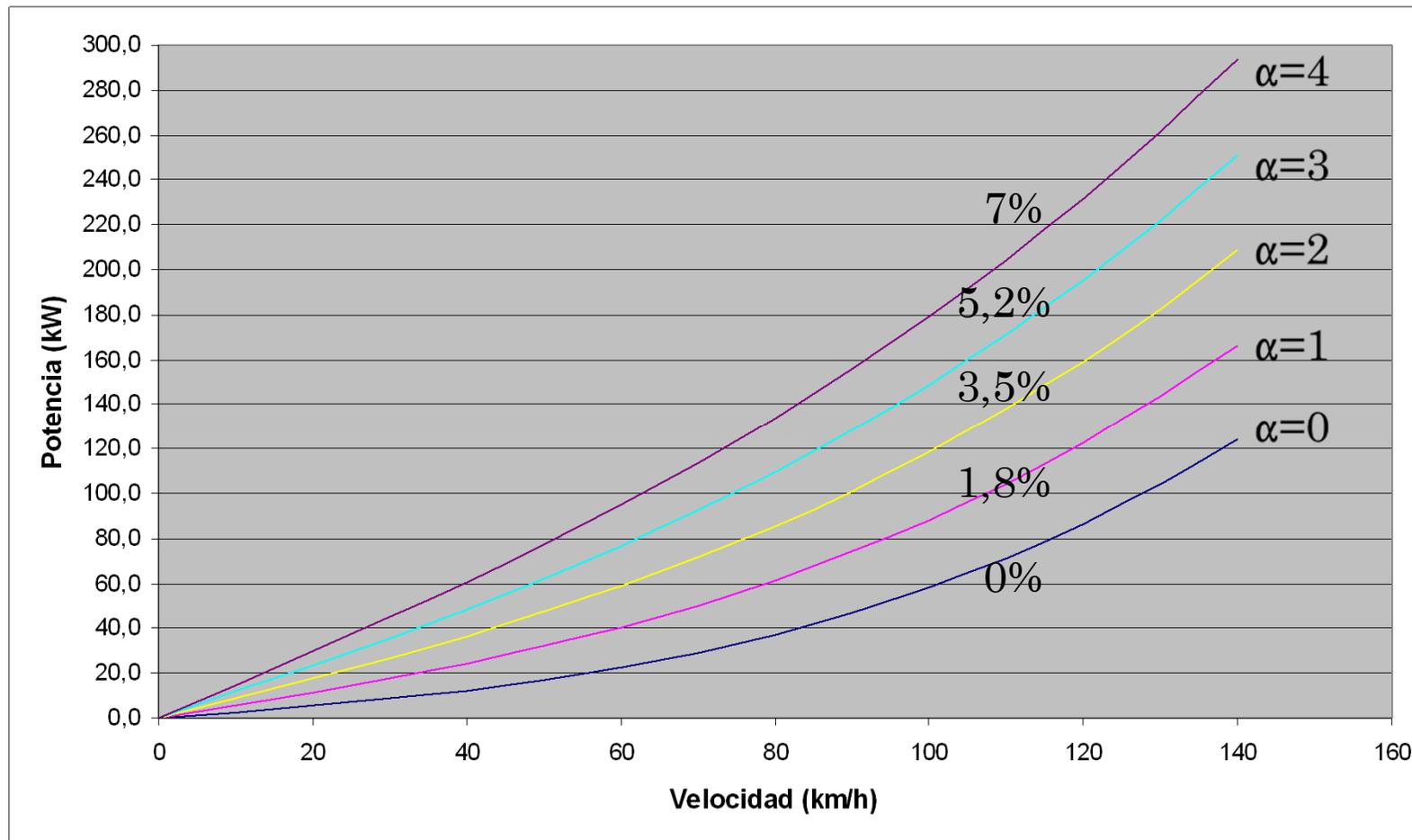
# MODELIZACIÓN (VEHÍCULO PESADO)



## MODELIZACIÓN

- Transformando los valores de fuerza en potencia, tenemos  $P_t = Fv$ : siendo  $F$  la fuerza calculada y  $v$  la velocidad
- En la gráfica siguiente, se puede observar que para circular en llano a una velocidad de 120 km/h la potencia requerida es de 90 kW (122 CV)
- Esta potencia es muy elevada, razón por la cual, para vehículos de propulsión eléctrica, es preciso limitar las velocidades

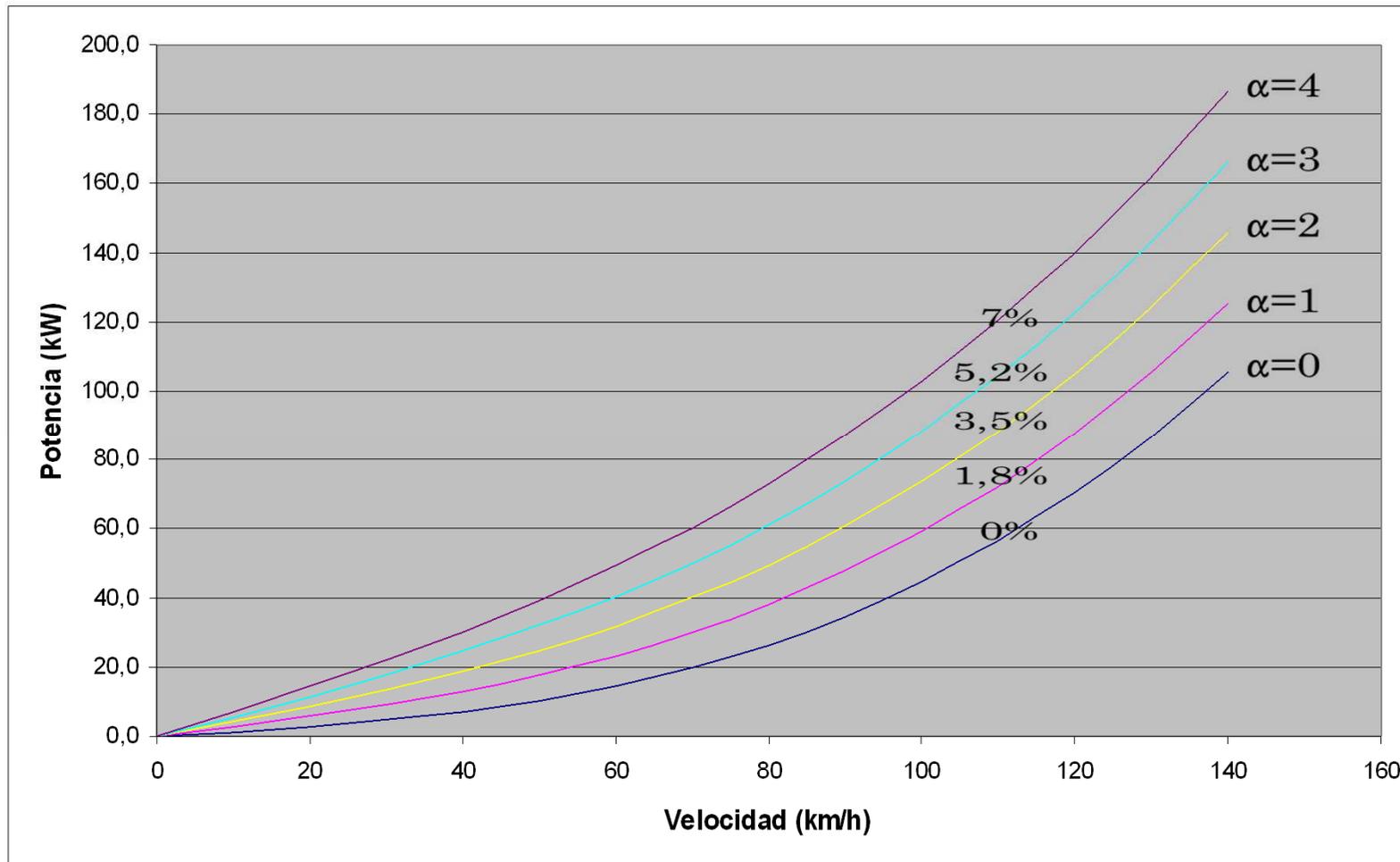
# MODELIZACIÓN (VEHÍCULO MEDIO)



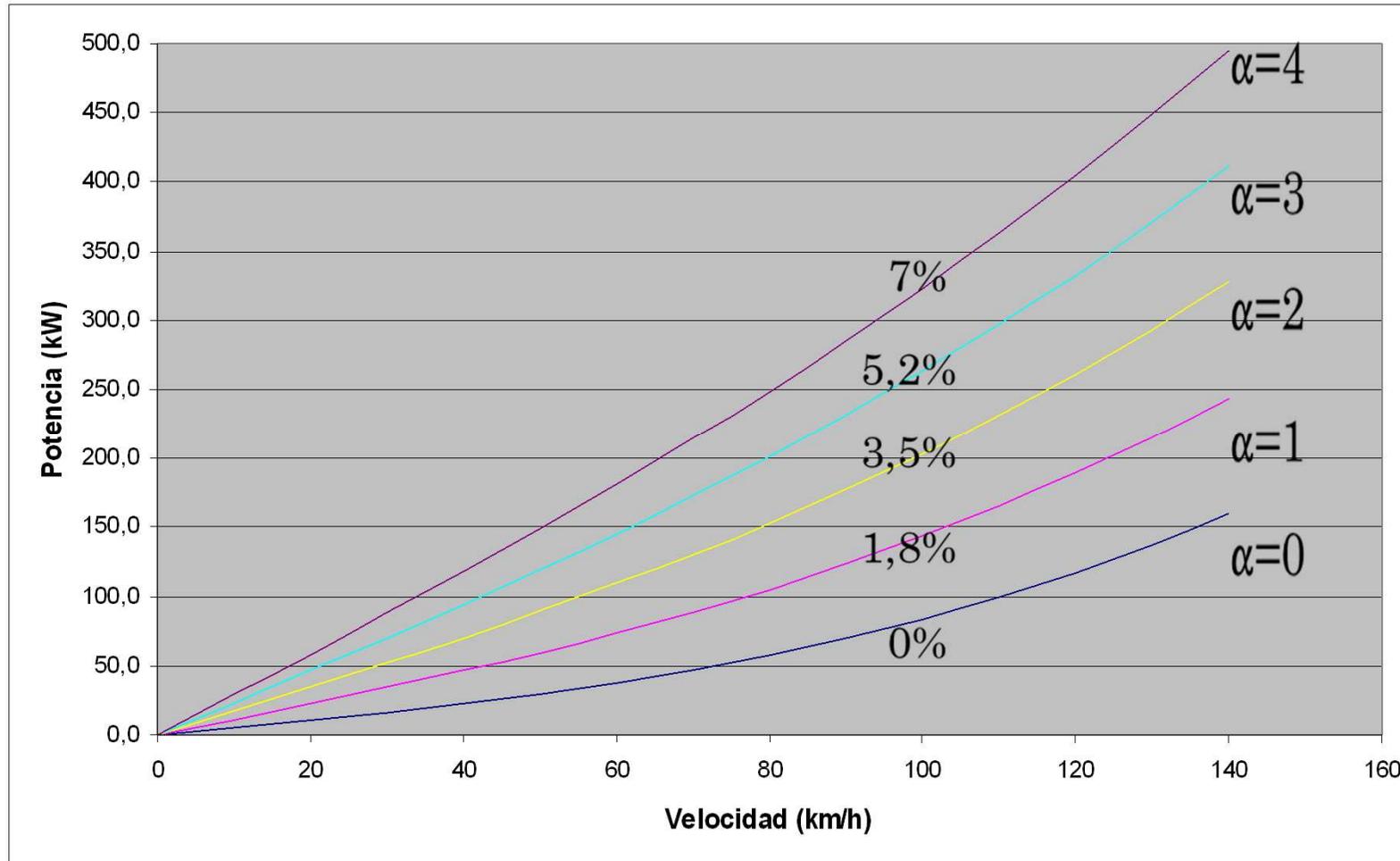
## MODELIZACIÓN

- Calculando ahora los valores de potencia para el vehículo ligero tenemos (ver gráfico siguiente)
- En este caso la potencia para la misma velocidad en terreno llano es tan sólo de 70 kW (95 CV)
- En el caso de un vehículo pesado (>3500 kg), la potencia necesaria es enorme, tal y como muestra la gráfica adjunta, con valores por encima de los 125 kW (170 CV)

# MODELIZACIÓN (VEHÍCULO LIGERO)



# MODELIZACIÓN (VEHÍCULO PESADO)



## MODELIZACIÓN

- Una forma de adecuar la potencia a los requerimientos del vehículo eléctrico es reducir la masa o disminuir la velocidad media
- Si consideramos un vehículo que circula en ciudad a una media de 40 km/h, la potencia disminuye considerablemente, tal y como muestra la tabla adjunta

	V. ligero	V. medio	V. pesado
Potencia kW(CV)	7,0(9,5)	12,4(17)	22,6(31)

## MODELIZACIÓN

- Estas potencias se incrementan ligeramente si el trayecto es en ascenso, pero para un recorrido con pendientes medias no superiores al 2%, lo que es habitual en un circuito urbano, se tiene:

	V. ligero	V. medio	V. pesado
Potencia kW(CV)	12,9 (17,5)	24,5(33)	46,6(63,5)

## MODELIZACIÓN

- En el supuesto de un proceso de aceleración la energía consumida aumenta de manera notable, lo mismo que la potencia demandada
- En este caso:

$$F_G = F_T + F_{ac} = F_T + Ma$$

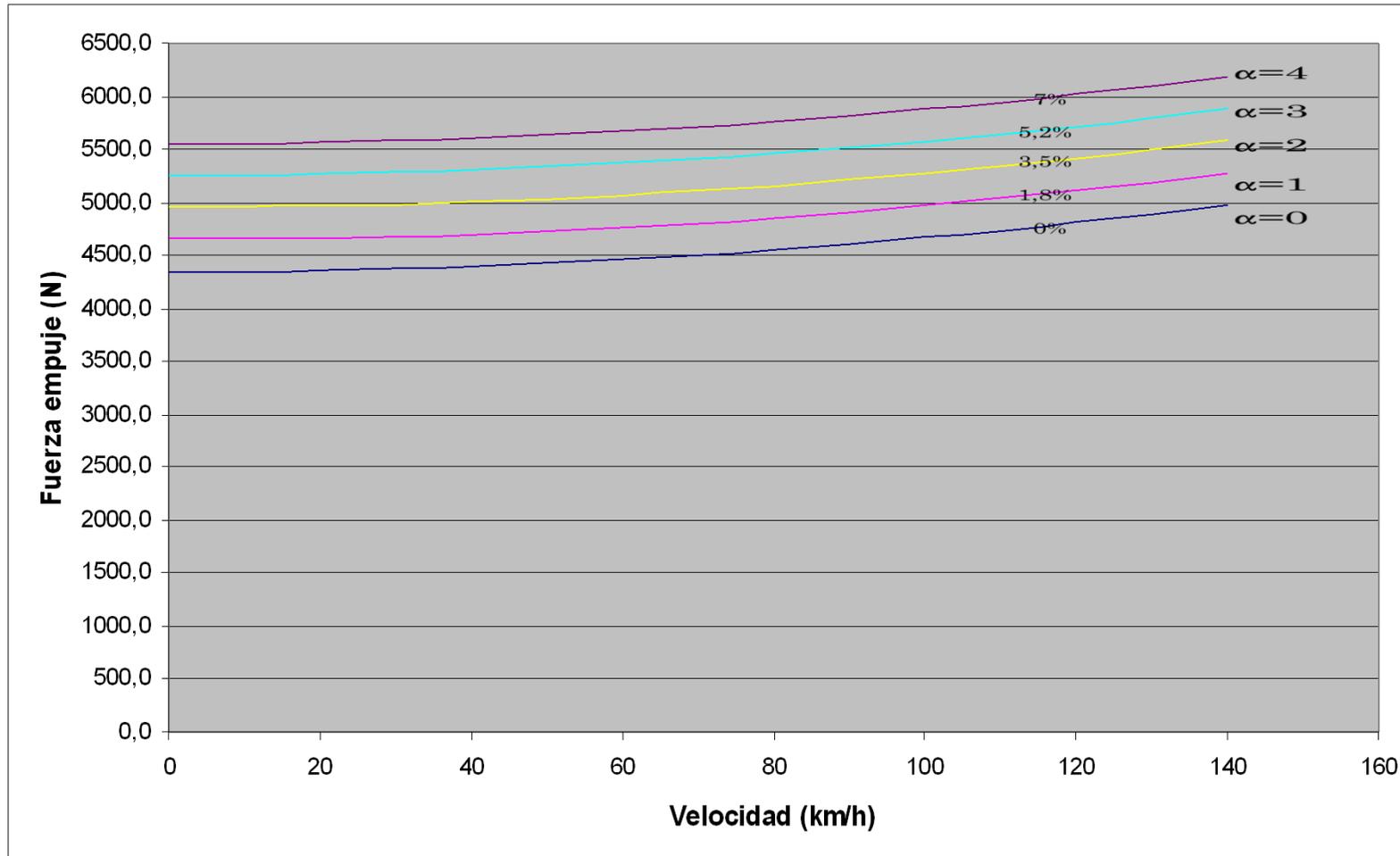
siendo  $a$  la aceleración del vehículo y  $M$  su masa

- Es fácil comprobar que cuanto más pesado sea el vehículo, o mayor aceleración tenga, tanto la cantidad de energía como de potencia aumentarán

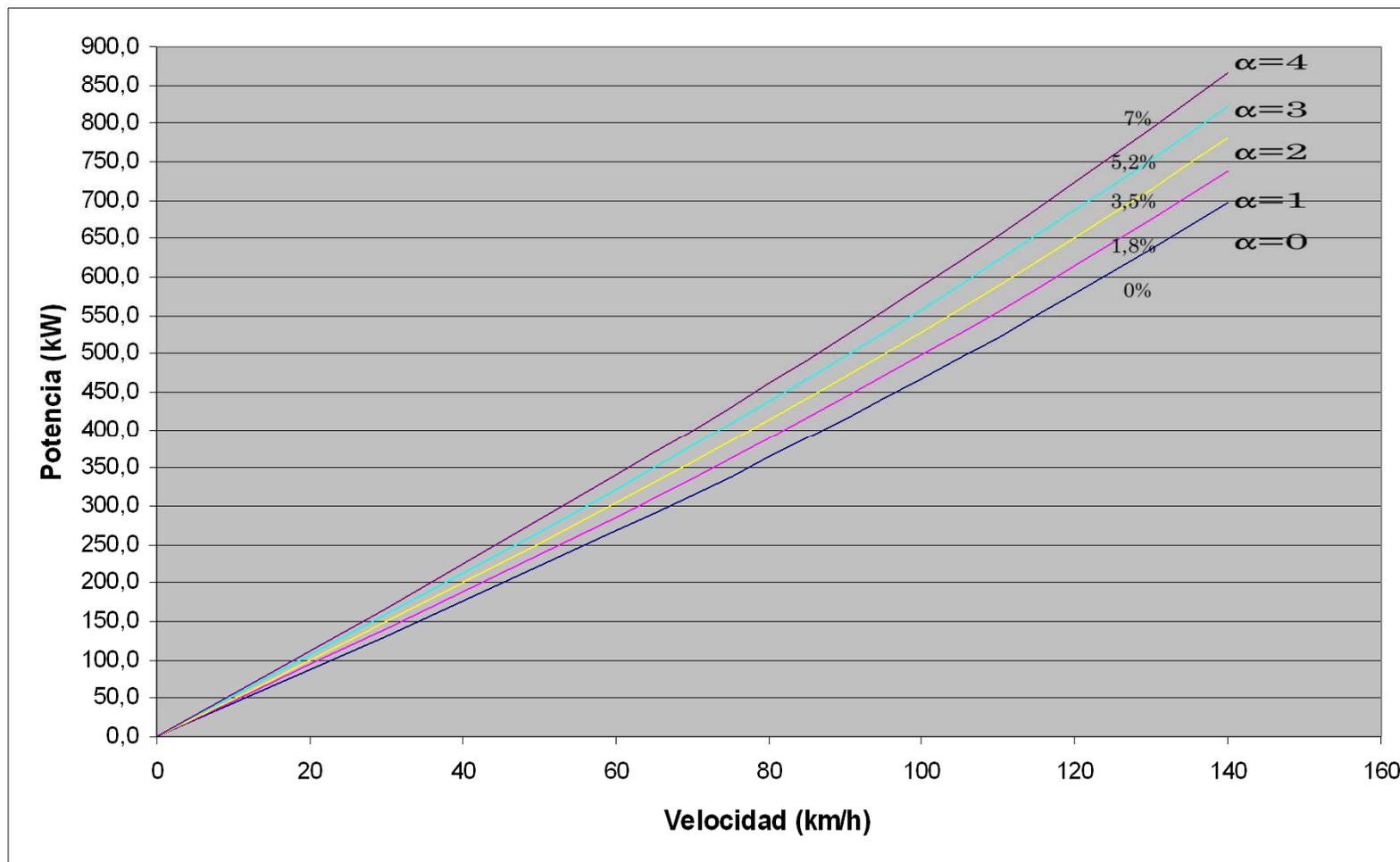
## MODELIZACIÓN

- Si consideramos el caso anterior de un vehículo medio con una aceleración media constante equivalente a pasar de 0 a 100 km/h en 12s, cosa relativamente habitual en un vehículo de prestaciones medias, tenemos los siguientes valores (ver gráfico)

# MODELIZACIÓN (VEHÍCULO MEDIO)



# MODELIZACIÓN (VEHÍCULO MEDIO)



## MODELIZACIÓN

- Está claro que estos valores son exagerados, incluso para un vehículo convencional con MCI
- El principal motivo de estos valores tan elevados es que el proceso de simulación considera que mantenemos una aceleración constante y continua durante todo el tiempo, lo que dista de ser cierto
- Si consideramos una situación más cercana a la realidad, donde los cambios de velocidad no son tan bruscos, las fuerzas, y potencias, adquieren valores mucho más razonables

## MODELIZACIÓN

- Como ejemplo vamos a suponer el siguiente caso
  - Ciudad de 4 millones de habitantes
  - Velocidad límite: 100 km/h
  - Distancia máxima: 35 km
  - Regulaciones de velocidad: 50, 80, 90 y 100 km/h
  - Trayecto medio urbano: 42,8 km
  - Tiempo medio de uso: 2 horas
  - Aceleración media sostenida:  $1.4 \text{ m/s}^2$  (equivalente a un cambio de velocidad de 0-100 km/h en 20 s)
  - Vehículo medio de masa: 1435 kg

## MODELIZACIÓN

- La simulación se ha realizado teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:
  - El proceso de alcanzar la velocidad máxima se realiza por segmentos, cada uno de los cuales es tratado de manera independiente
  - Se han estimado tiempo para cada segmento ajustados a la realidad de un vehículo circulando en condiciones normales dentro del tráfico urbano
  - Se ha supuesto una aceleración constante para todos los segmentos
  - La velocidad media se ha obtenido como promedio ponderado del conjunto de segmentos

## MODELIZACIÓN

- Con los datos anteriores, y utilizando las relaciones matemáticas que se han definido con anterioridad, y aplicando las consideraciones que se han mencionado (condiciones de contorno), obtenemos los siguientes valores

# MODELIZACIÓN

Potencia y Energía	Aceleración (cambio de velocidad en km/h)			
	0-40	40-50	50-80	80-90
$V_i$ (km/h)	0,0	40	50	80
$V_f$ (km/h)	40	50	80	90
t (s)	8	2	6	2
a ( $m/s^2$ )	1,4			
$V_{med}$ (km/h)	42,8			
M (kg)	1435			
F (N)	1993,1			
Pt (kW)	85,3			
Pt (CV)	116			
$t_{uso}$ (h)	2			
E (kwh)	170,6			

## MODELIZACIÓN

- Como principales resultados de esta simulación del comportamiento de un vehículo eléctrico tenemos:
  - La potencia requerida, 85 kW, es muchísimo menor que la resultante de la modelización realizada anteriormente, 175 kW. Esto representa un ahorro del 50%, aproximadamente
  - El valor de la potencia es compatible con soluciones energéticas donde se utilicen fuentes renovables o sistemas de almacenamiento
  - El valor de la energía demandada es igualmente compatible con un sistema de almacenamiento o con fuentes de energía renovables

## MODELIZACIÓN

- Asimismo, si consideramos que la masa del vehículo se puede reducir, para trayectos urbanos y con transporte de carga moderado, tenemos:
  - La potencia se puede reducir de manera considerable, hasta un 50%, alcanzando valores por debajo de 45 kW
  - Los valores de la demanda de energía se pueden también reducir, lo que incrementa la autonomía de desplazamiento
  - La siguiente tabla muestra una simulación adicional que nos indica la evolución de la autonomía y velocidad media en función de la potencia y energía demandadas

# MODELIZACIÓN

**Velocidad media constante de 42.5 km/h**

<b>Potencia (kW)</b>	<b>Energía (kwh)</b>	<b>Autonomía (km)</b>	<b>Tiempo uso (h)</b>
85	170,0	289	2,0
60	84,7	72	1,4
50	58,8	35	1,2
40	37,6	14	0,9
30	21,2	4	0,7
20	9,4	1	0,5
10	2,4	0	0,2

## MODELIZACIÓN

- Si mantenemos la autonomía, se debe reducir el tiempo de uso. Así, para 289 km de recorrido

Potencia (kW)	Velocidad (km/h)	Tiempo uso (h)
85	42,5	2,0
60	21,2	2,8
50	14,7	3,4
40	9,4	4,3
30	5,3	5,7
20	2,4	8,5
10	0,6	17,0

## MODELIZACIÓN

- Como se puede comprobar de las simulaciones, algunos valores no tienen aplicación en condiciones reales, dado que proporcionan velocidades demasiado pequeñas, autonomías muy bajas, o tiempos de uso excesivamente reducidos
- Para potencias de motor eléctrico muy pequeñas, por debajo de 30 kW, o bien la autonomía y el tiempo de uso son demasiado reducidos, o bien la velocidad es completamente inadecuada
- En estos casos, hay que modificar alguna de las variables para hacer compatible la potencia del motor con las condiciones de circulación, por ejemplo reduciendo la velocidad y la autonomía

## MODELIZACIÓN

- A continuación mostramos datos de vehículos eléctricos comerciales para verificar el proceso de modelización y simulación que se ha llevado a cabo
- Se puede comprobar que los valores son similares, si bien las diferencias que se observan son debidas a variaciones en los parámetros que han intervenido en el cálculo, y que no son idénticos, como es lógico, para todos los vehículos que se indican
- Los valores en rojo indican el dato obtenido por simulación

## MODELIZACIÓN

- Relación de expresiones utilizadas

$$\bar{v} = P_t^2 / \xi \quad ; \quad t = P_t / \bar{v} = \xi / P_t \quad ; \quad d = \xi^2 / 100$$

donde  $v$  es la velocidad media,  $t$  el tiempo de uso,  $P_t$  la potencia del motor y  $\xi$  la energía

# MODELIZACIÓN

Modelo	Potencia (kW)	Autonomía (km)	Velocidad (km/h)	Vel. Sim. (km/h)
Renault ZOE	77	240	135	145,8
Renault Fluence	70	185	135	128,3
Renault Twizy	13	80	100	95,2
Nissan Leaf	80	175	145	140,5
Tesla III	385	346	250	197,4
Tesla S	225	370	210	204,2
Citroën Berlingo	36	170	110	122,8
Citroën c-Zero	47	150	130	130,2
Hyundai Ionic	88	250	165	167,7
Ford Focus	92	160	136	134,3

# MODELIZACIÓN

Modelo	Potencia (kW)	Autonomía (km)	Velocidad (km/h)	Vel. Sim. (km/h)
KIA Soul	80	212	145	154,5
Mitsubishi MIEV	49	150	130	130,0
Opel Ampera	110	60	160	82,3
Peugeot IOn	49	150	130	130,0
Peugeot Partner	49	170	110	122,8
Mercedes B	130	200	160	150,1
Smart Fortwo	55	145	125	127,8
Think City	34	210	110	136,5
Twike	6,6	600	85	230,7
VW Golf	85	190	140	146,2

## MODELIZACIÓN

- Ejemplo 1
- Supongamos un vehículo de masa 1364 kg con una aceleración de 4,47 m/s<sup>2</sup>, y que la fuerza de empuje, aerodinámica y tangencial equivalen al 10% de la fuerza de aceleración, y que el vehículo debe acelerar hasta alcanzar 96.5 km/h
- En este caso

$$F = 1.1ma = 1.1 \times 1364 \times 4.47 = 6704 N$$

$$\xi = (1/2)mv^2 = 0.5 \times 1364 \times 26.8^2 = 0.49 MJ$$

$$t = v^2/a = 26.8^2/4.47 = 6s$$

$$P_t = Fv = 6704 \times 26.8 = 180 kW$$

## MODELIZACIÓN

- Ejemplo 2
- Si en el caso anterior debe alcanzar la velocidad máxima en 10 s

$$a = v/t = 26.8 / 10 = 2.68m / s^2$$

$$F = ma = 1364 \times 2.68 = 3657 N$$

$$P_t = Fv = 3657 \times 26.8 = 98 kW$$

- En la práctica real la potencia se reduce a la mitad, esto es, 49 kW

## MODELIZACIÓN

- Ejemplo 3
- Consideremos ahora que la aceleración es progresiva, siguiendo una función senoidal

$$v = \int a dt = \int a_m \sin \omega t dt = a_m (1 - \cos \omega t) / \omega$$

$$\omega = \pi / t = \pi / 10 = 0.314$$

$$a_m = \omega v / (1 - \cos \omega t) \Big|_{t=0} = 0.314 \times 26.8 / 2 = 4.2 m / s^2$$

$$F = ma \sin \omega t = 1364 \times 4.2 \sin 0.314 t = 5728.8 \sin 0.314 t N$$

$$P_t = Fv = (5728.8 \sin 0.314 t) \left[ 4.2 (1 - \cos 0.314 t) / 0.314 \right] = 90 kW$$