



Tracción y Adherencia

Ferrocarriles

Luigi dell'Olio
Borja Alonso Oreña
José Luis Moura Berodia

Este tema se publica bajo Licencia:
Creative Commons BY-NC-SA 4.0.



Índice

- Dinámica longitudinal
- Cálculo de perfiles de velocidad
- Cálculo de tiempos de viaje
- Cálculo de energía consumida

Índice

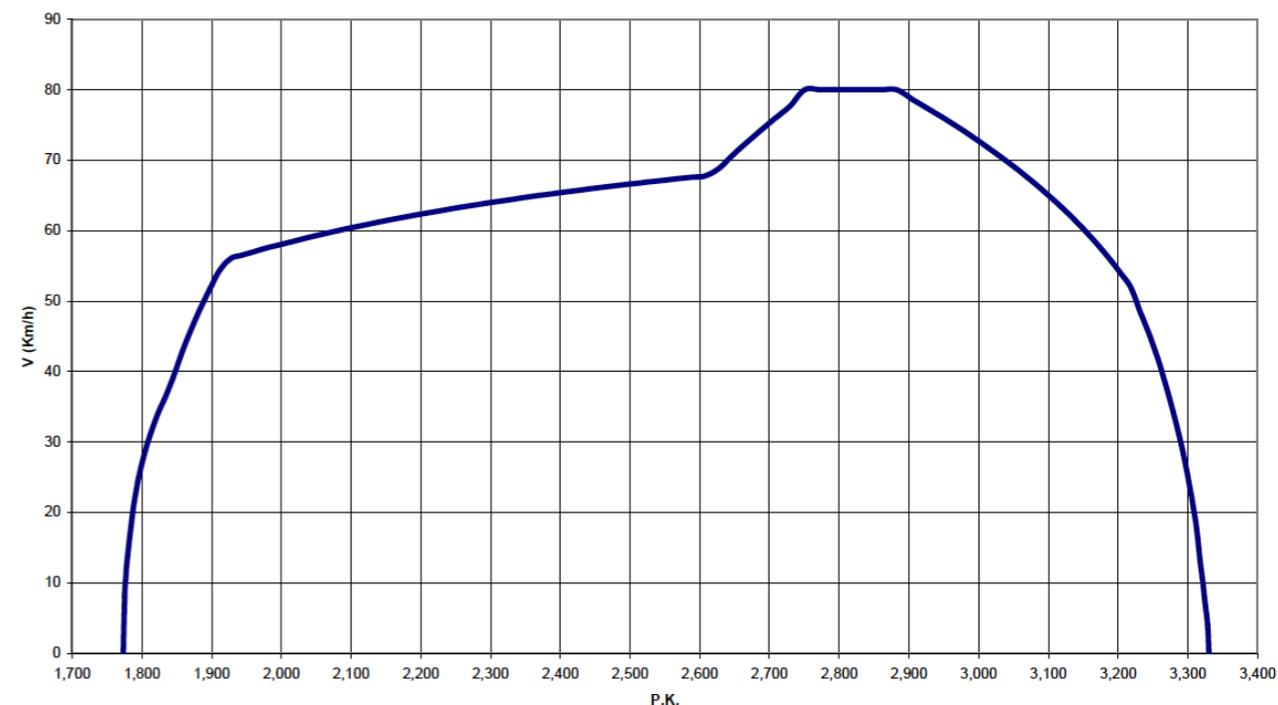
- **Dinámica longitudinal**
- Cálculo de perfiles de velocidad
- Cálculo de tiempos de viaje
- Cálculo de energía consumida

Introducción

- **Dinámica longitudinal:** Relación entre las fuerzas (tracción, freno, gravitatorias, de inercia) que actúan sobre el tren y su movimiento.

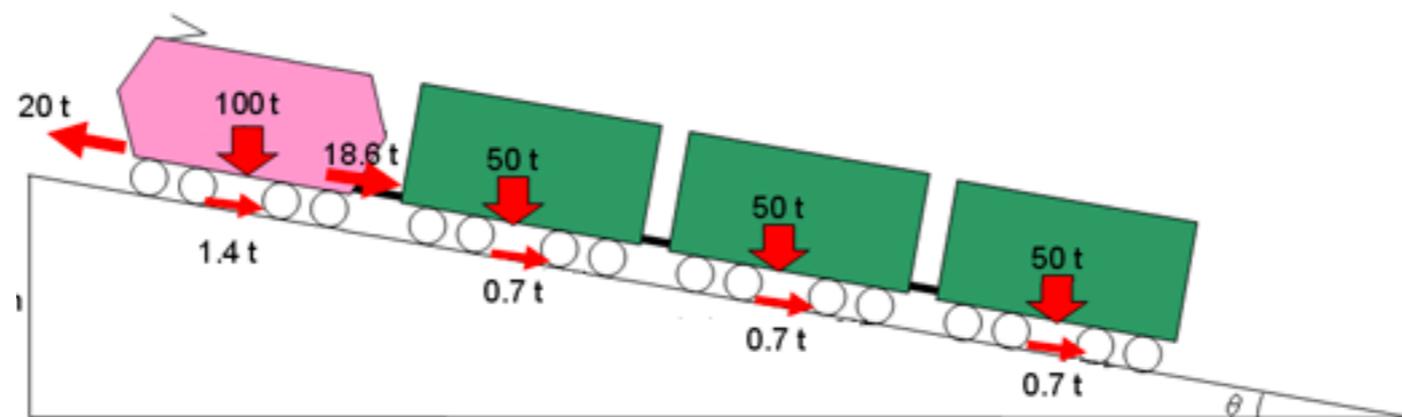
Ojo, no confundir con la dinámica vertical.

- De la dinámica longitudinal se derivan tres campos de estudio:
 - Cálculo de tiempos de viaje
 - Cálculo de cargas máximas
 - Cálculo de consumo de energía



Planteamiento general

- Sobre un tren pueden actuar **fuerzas a favor** del movimiento del tren:
 - **Esfuerzo de tracción**, procedente de los motores de tracción.
 - **Fuerza de gravedad**, que actúa en las pendientes.
- También actúan **fuerzas en contra** del movimiento del tren:
 - **Esfuerzo de frenado**, procedente del tren (ya sea dinámico o continuo).
 - **Resistencia al avance**.
 - **Fuerza de la gravedad** en las rampas.

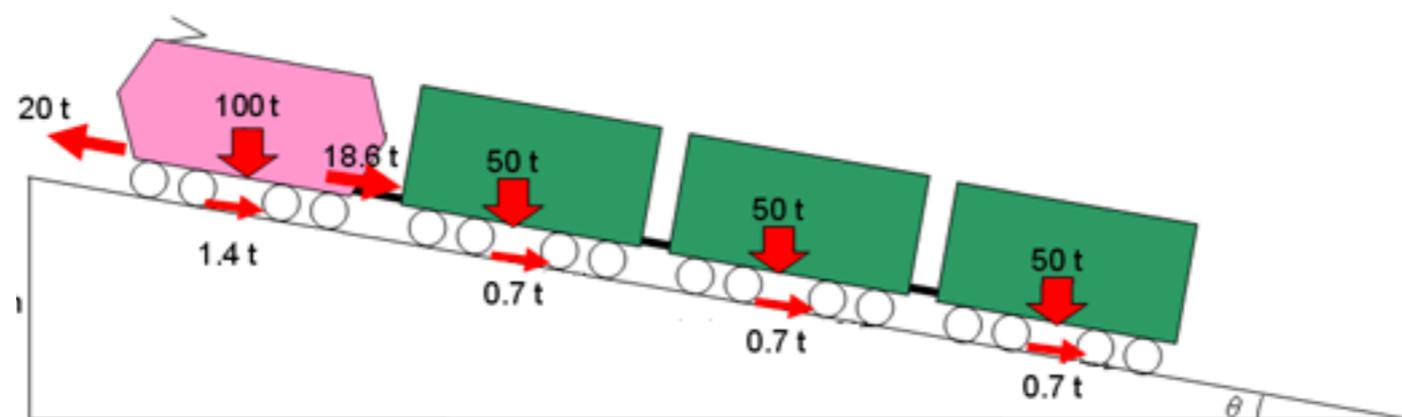


Planteamiento general

- Para que la circulación de un vehículo o conjunto de vehículos tenga lugar, es preciso que el elemento motor proporcione un esfuerzo (E) que sea capaz de vencer las resistencias (R) que se oponen a la marcha. La relación fundamental del movimiento viene dada por la expresión:

$$E - R = \frac{P}{g} \cdot \gamma$$

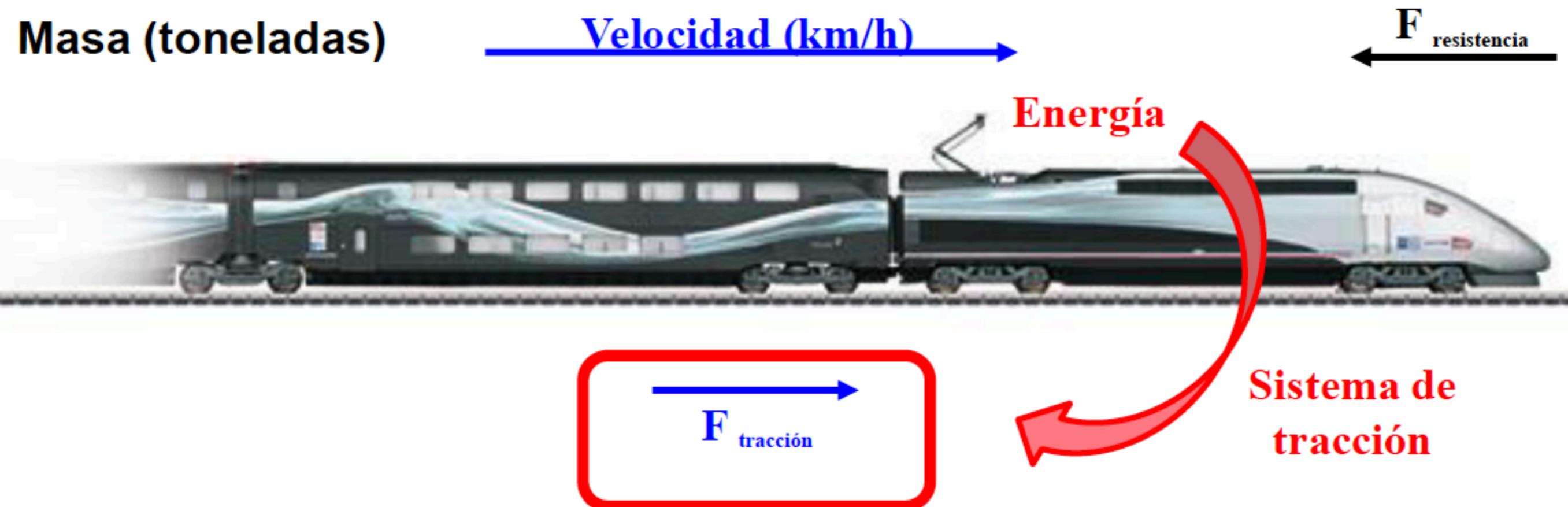
Siendo P el peso de la composición ferroviaria y γ la aceleración que el esfuerzo E produciría en la misma.



Tracción

- El esfuerzo de tracción procede del motor de tracción y se transmite a algunas ruedas (a las ruedas motoras).
- El par motor sobre un eje se traduce en la llanta por una fuerza horizontal. Si la locomotora avanza, se debe a que esta fuerza encuentra en su apoyo sobre el carril una reacción igual y de sentido contrario.

$$Pot(watt) = F(Newton) \cdot v(m/s)$$



Tracción

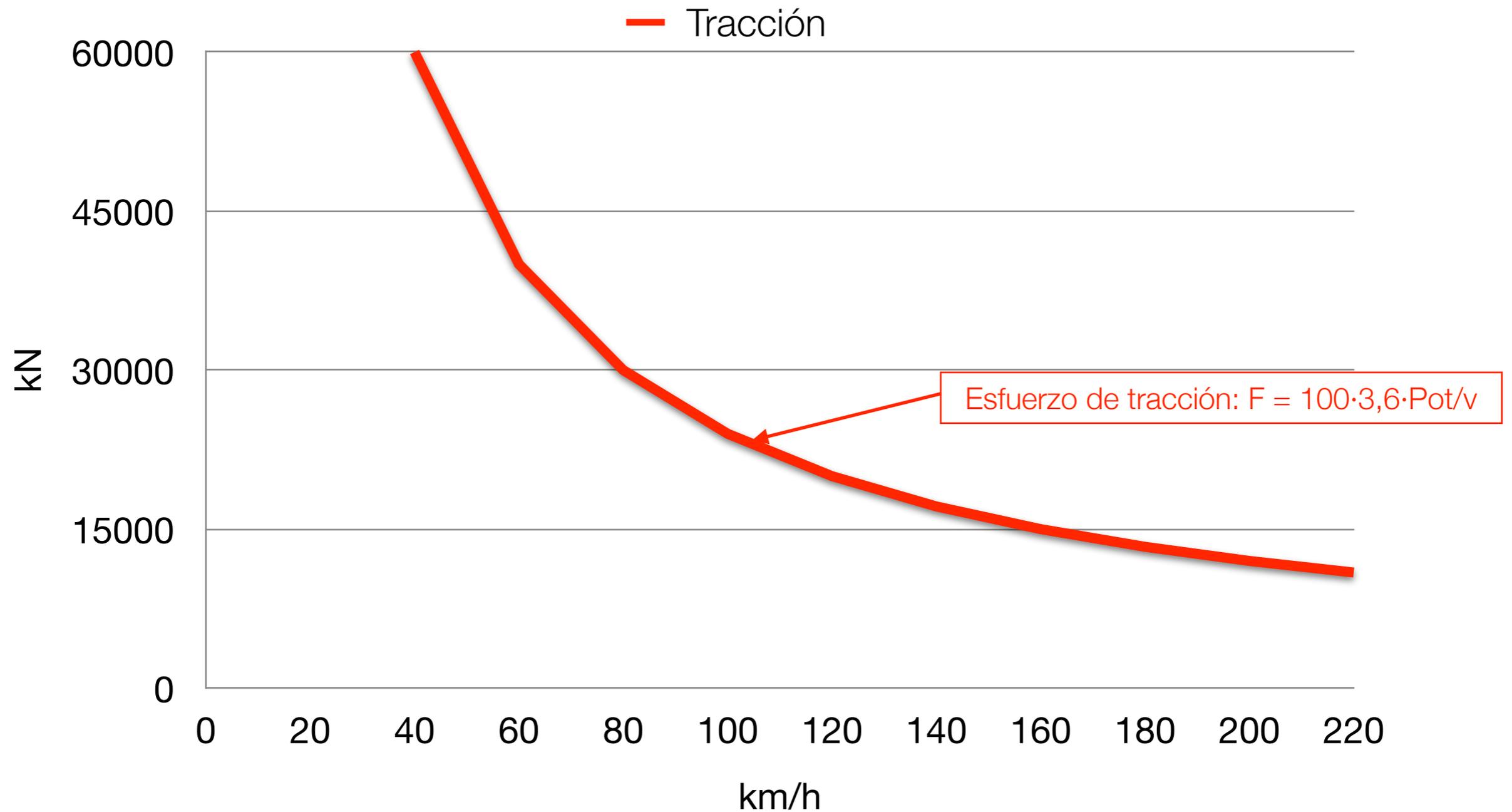
- En fcc, las unidades prácticas usadas son
 - Potencia en kW (La potencia de las locomotoras oscila entre los 3100 kW y los 5600 kW.). También puede darse en CV (1 CV = 750 w)
 - Fuerza en daN o en Kg = 9.8 N \approx 10 N \rightarrow 1Kg = 1 daN
 - Velocidad en km/h \rightarrow 1km/h = (1/3.6) m/s

$$F(daN) = 100 \cdot 3,6 \cdot Pot(kW)/v(km/h)$$

$$F(Kg) = 270 \cdot Pot(CV)/v(km/h)$$

Tracción

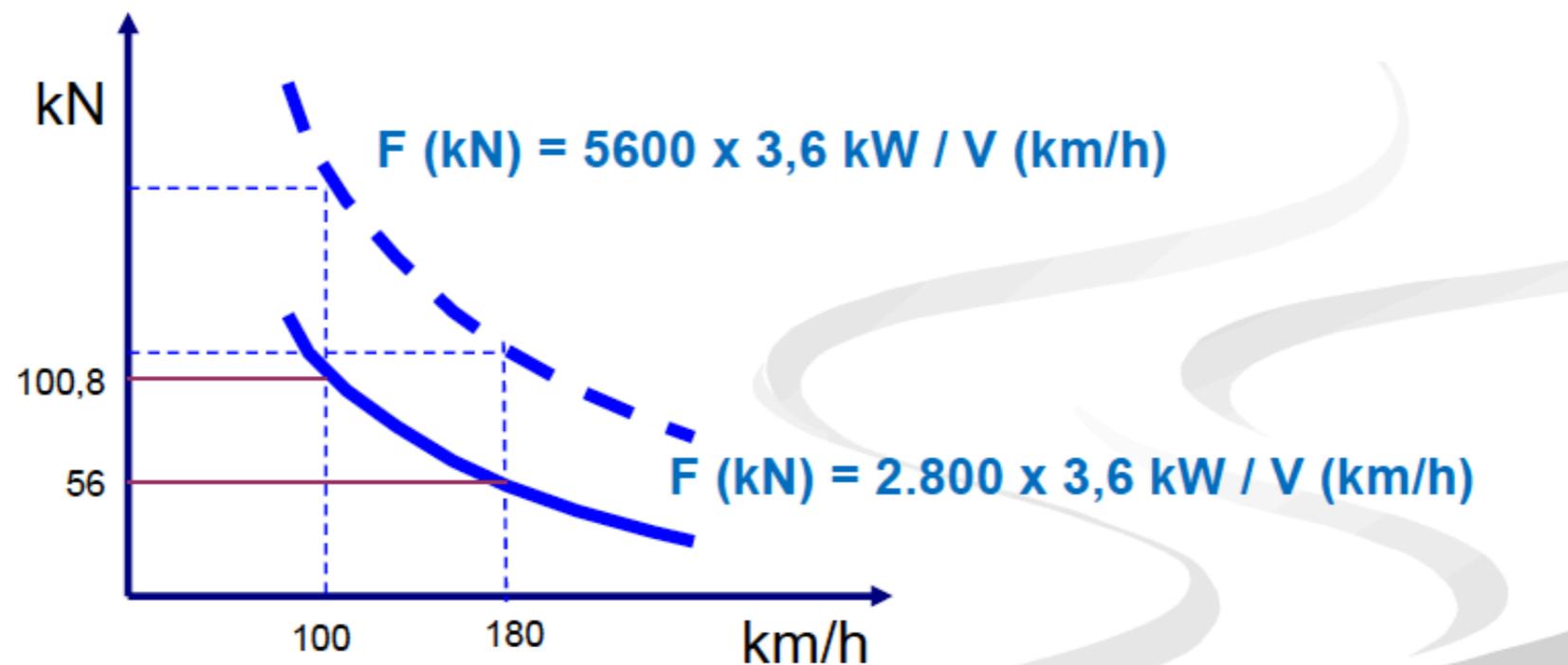
- El diagrama **esfuerzo-velocidad** permite visualizar la capacidad de tracción del tren.



Tracción

- El esfuerzo de tracción es mayor cuando mayor sea la potencia del tren.
- Es menor cuanto mayor sea la velocidad.
- Menos motores suponen menos potencia.

Ej. Máquina 252 con un único grupo motor (2.800 kW)



Adherencia

- Por otro lado, el esfuerzo máximo necesario deberá ser inferior al que produciría el **patinado** de la llanta.
- Este apoyo sin que exista deslizamiento de la rueda sobre el carril constituye la adherencia, que será tanto mayor cuanto mayor sea el peso que apoya sobre el carril.
- Por lo tanto, existirá adherencia siempre que: $F \leq \phi \cdot P_{adh}$, donde ϕ es el llamado coeficiente de adherencia y P_{adh} es el **peso adherente** (el peso de los ejes motores).
- Si $F > \phi \cdot P_{adh}$, se interrumpe la adherencia y la rueda desliza sobre el carril, por lo que el coeficiente pasa a ser $\phi' < \phi$, aumentando la aceleración de la rotación del eje y de las masas que giran con él. Es el fenómeno del **patinado**.



Adherencia



Adherencia

- La norma habitualmente utilizada por RENFE tiene la expresión:

$$\phi_v = \phi_0 \cdot \left[0.2155 + \frac{33}{v + 42} \right]$$

- La expresión más sencilla de uso corriente hoy es la siguiente:

$$\phi_v = \phi_0 \cdot \frac{1}{1 + 0.01 \cdot v}$$

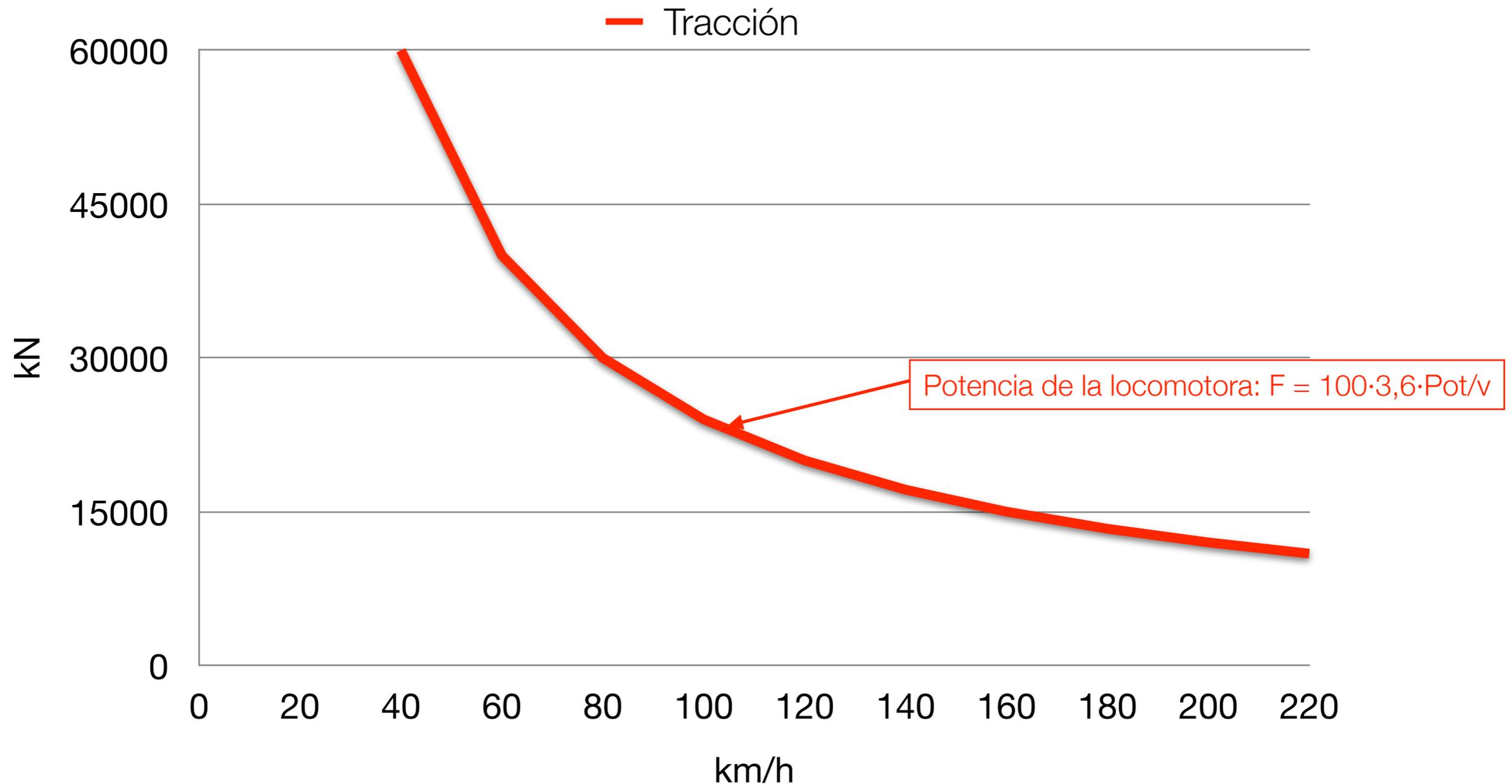
donde ϕ_0 es la adherencia con el tren parado y v la velocidad en km/h.

- Por lo tanto, el esfuerzo máximo tractor que puede ejercer una locomotora será su **peso adherente** (el peso de los ejes motores) por el coeficiente de adherencia:

$$E_{adh} = P_{adh} \cdot \phi_v$$

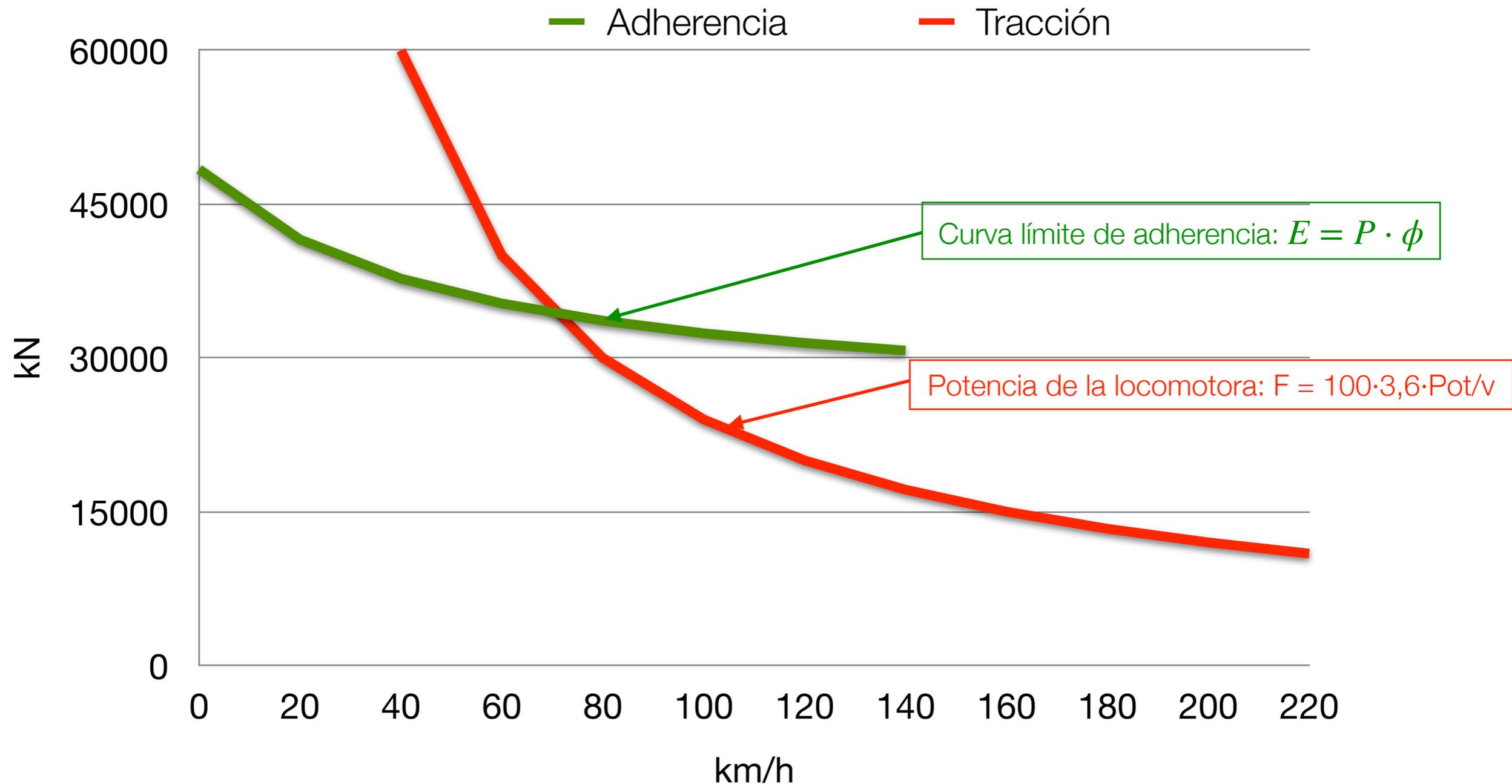
Tracción y adherencia

- Por lo tanto, el límite izquierdo de la curva no será asintótico ni podremos conseguir esfuerzo de tracción infinito...



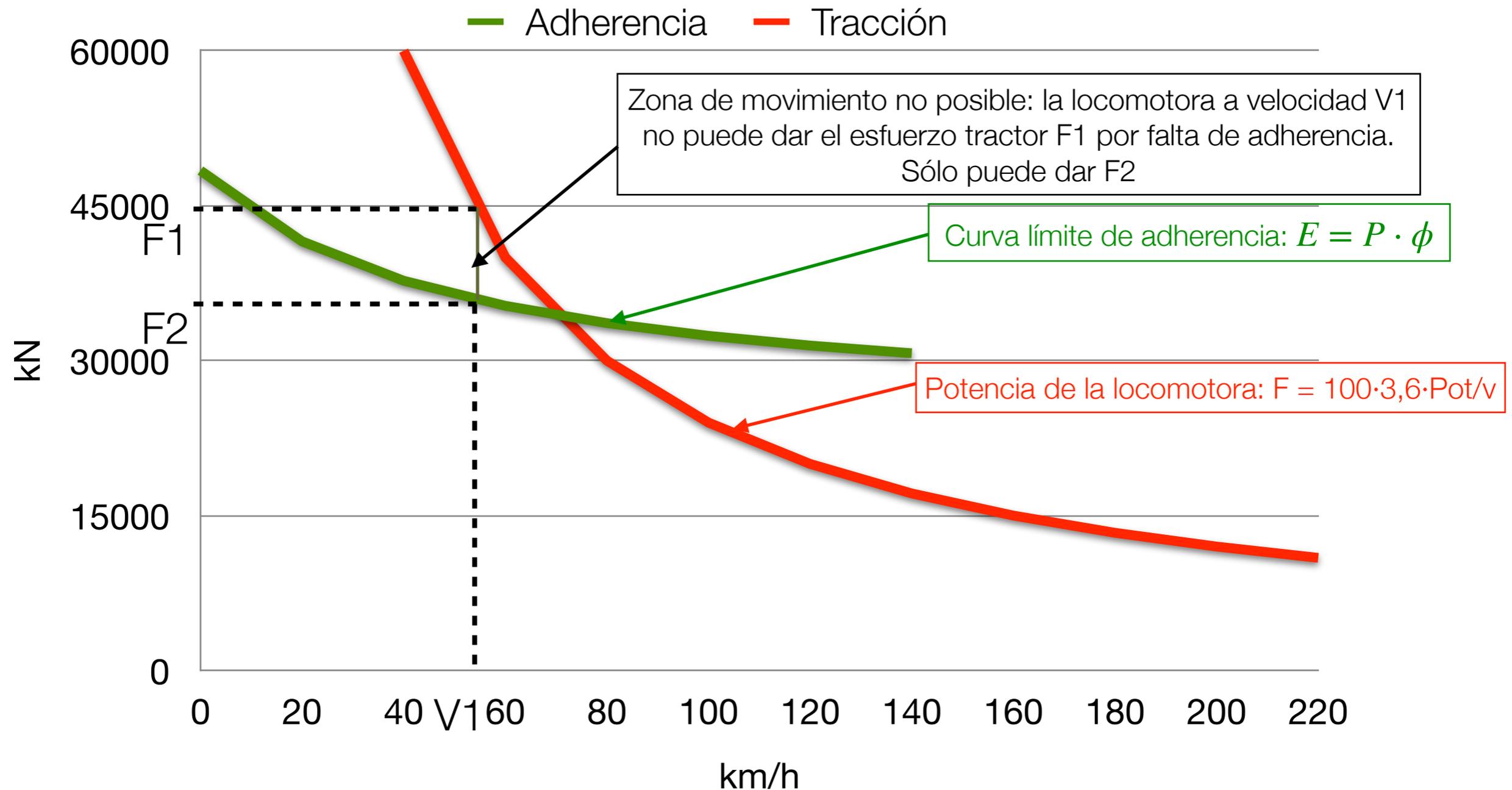
Tracción y adherencia

- Por lo tanto, el límite izquierdo de la curva no será asintótico ni podremos conseguir esfuerzo de tracción infinito...



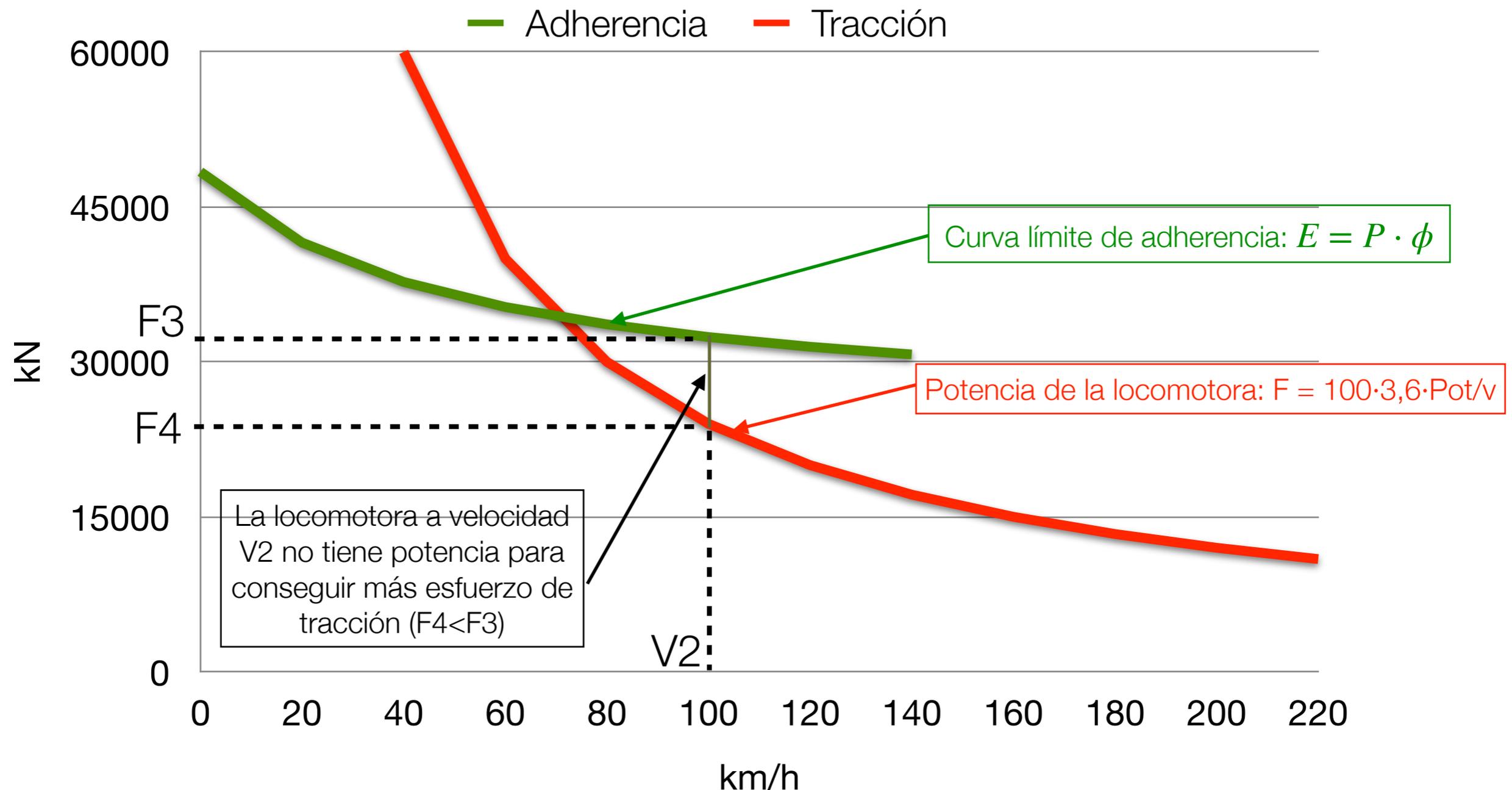
Tracción y adherencia

- Existirán zonas en las que se puede estar limitado por la adherencia o por la potencia de la locomotora...



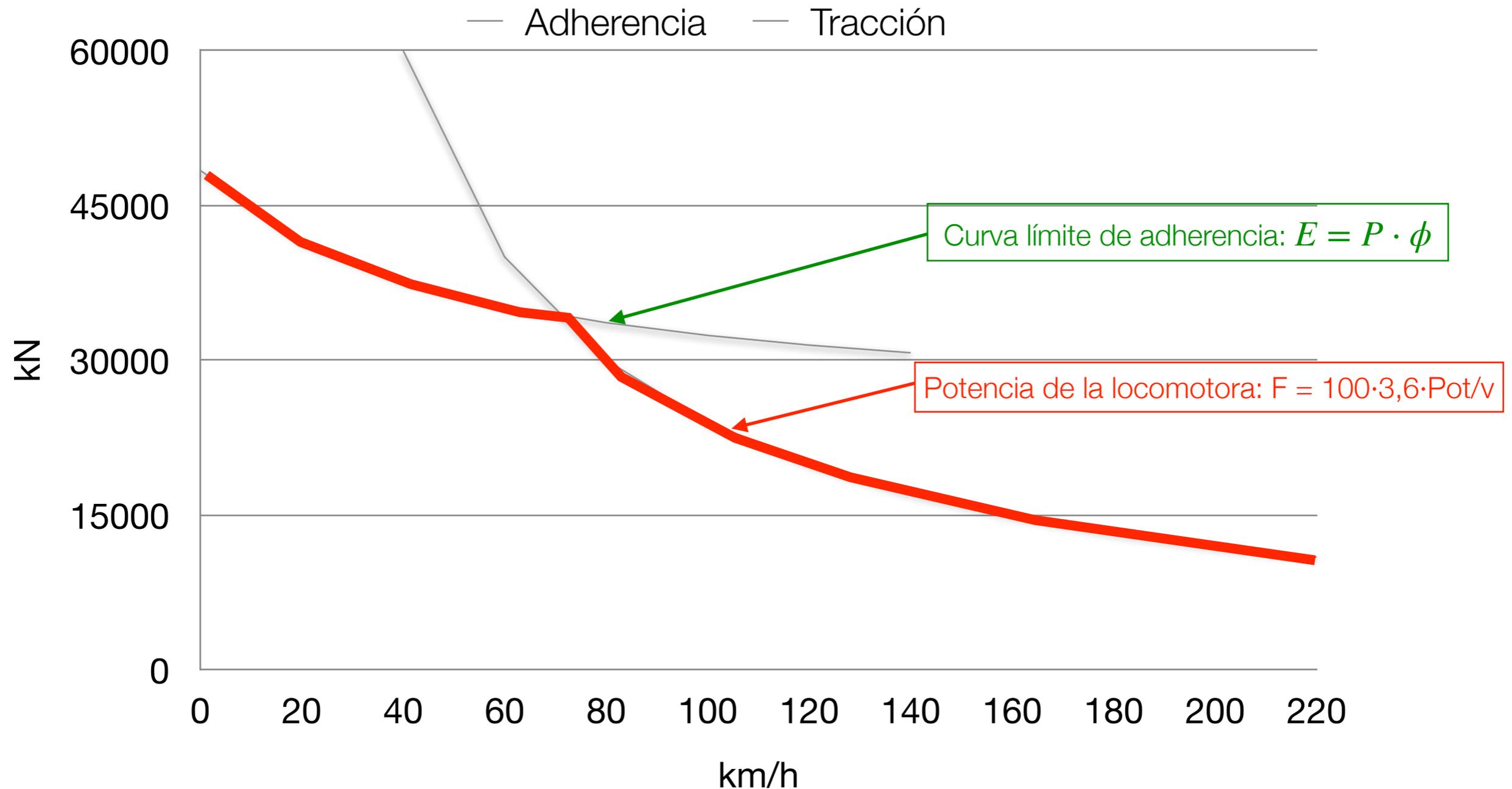
Tracción y adherencia

- Existirán zonas en las que se puede estar limitado por la adherencia o por la potencia de la locomotora...



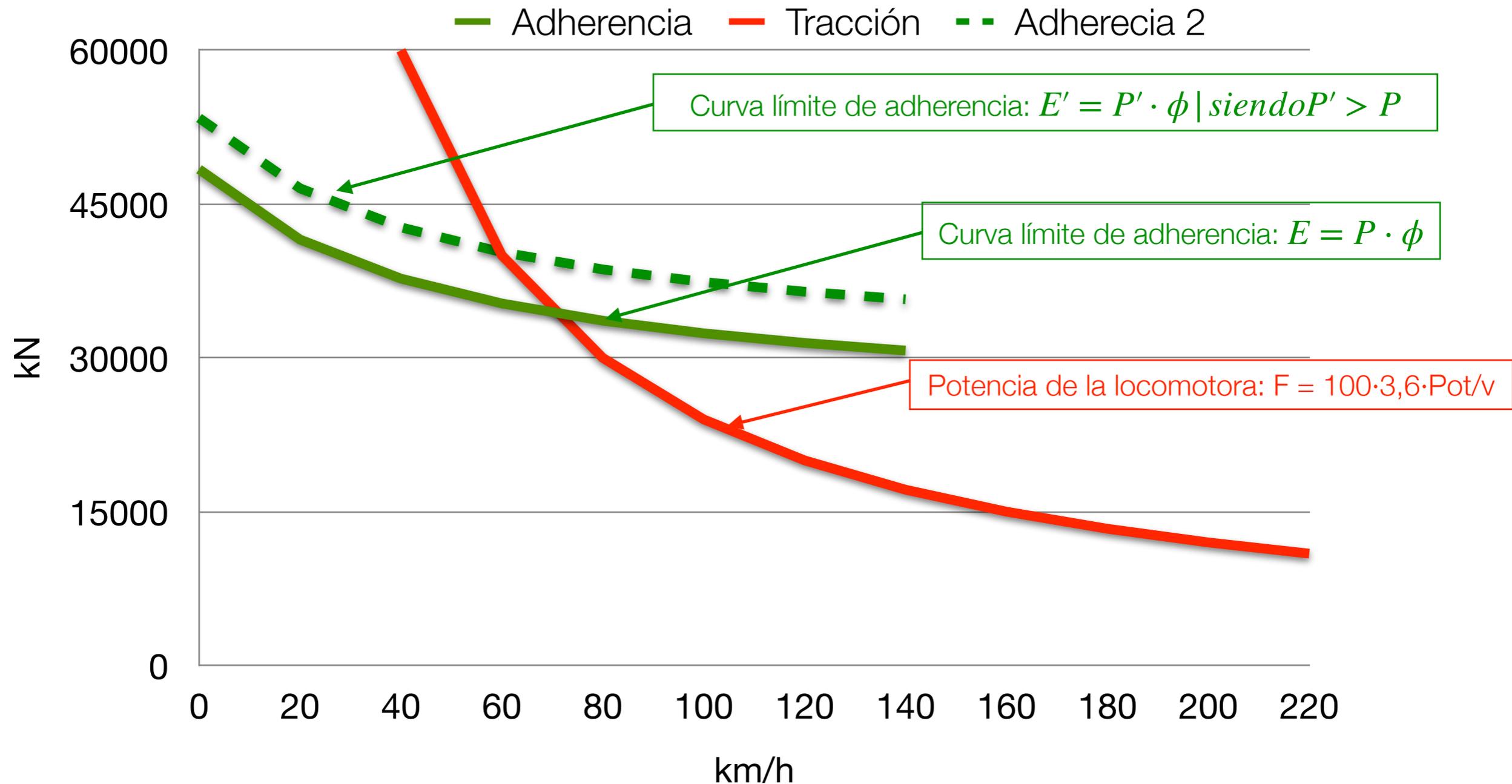
Tracción y adherencia

- Existirán zonas en las que se puede estar limitado por la adherencia o por la potencia de la locomotora...



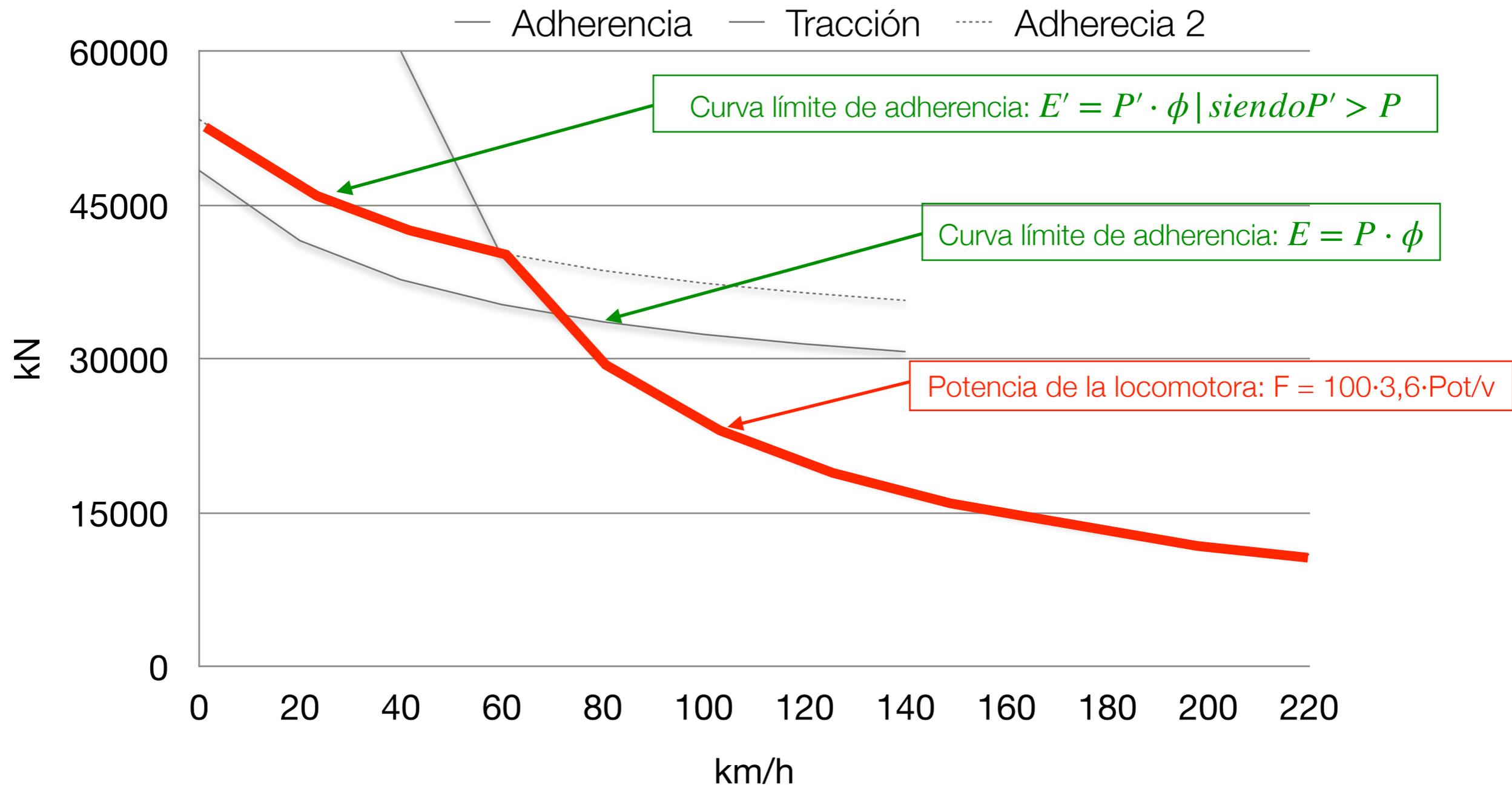
Tracción y adherencia

- La potencia es un compromiso entre la fuerza y la velocidad. Pero para lograr fuerza de arrastre, hace falta adherencia, y ésta se consigue con más masa.



Tracción y adherencia

- La potencia es un compromiso entre la fuerza y la velocidad. Pero para lograr fuerza de arrastre, hace falta adherencia, y ésta se consigue con más masa.



Tracción y adherencia



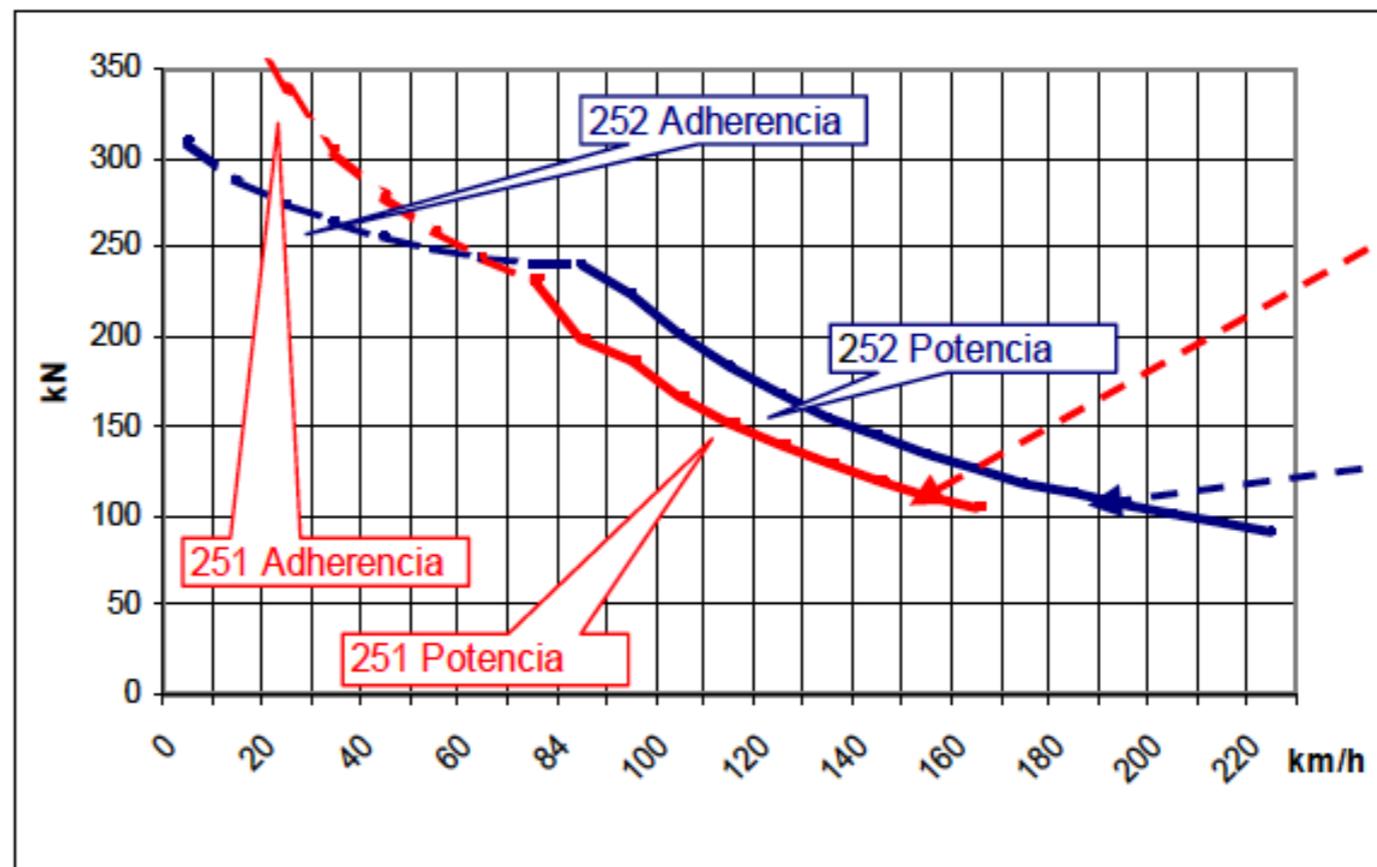
Por ejemplo;

Dos locomotoras con la misma potencia, pero una con una masa de 80 toneladas y otra con una masa de 120 toneladas, la segunda tiene una capacidad de remolque **de 50%** superior a la primera

- La adherencia (ϕ) es uno de los factores más relevantes en el transporte de mercancías.

$$E_{adh} = P_{adh} \cdot \phi_v$$

- Una máquina con más masa puede hacer más esfuerzo a velocidades bajas que otra máquina con más potencia pero con menos masa.



Máquina 251
4.650 kW,
138 t

Máquina 252
5.600 kW
92 t

Resistencias al avance

- Las principales causas de las mismas se atribuían a las características constructivas de los vehículos y de la vía, que podían verse influenciadas por condiciones climatológicas.
- Por lo que se refiere al **material**, las resistencias tenían su origen en:
 - el rozamiento existente en las cajas de grasa.
 - la resistencia a la rodadura
 - la resistencia debida a la flexión del carril
- Por otra parte, se debe contemplar la **resistencia del aire**, la cual depende de la velocidad relativa entre el tren y el viento.

Resistencias al avance

- La experiencia demuestra que la suma de las resistencias anteriores no da la resistencia total al avance. Por ello, las diferentes resistencias se pueden combinar mediante expresiones empíricas parabólicas dependientes de la velocidad.
- Para el caso de **material motor**, se adoptan expresiones (v en km/h):

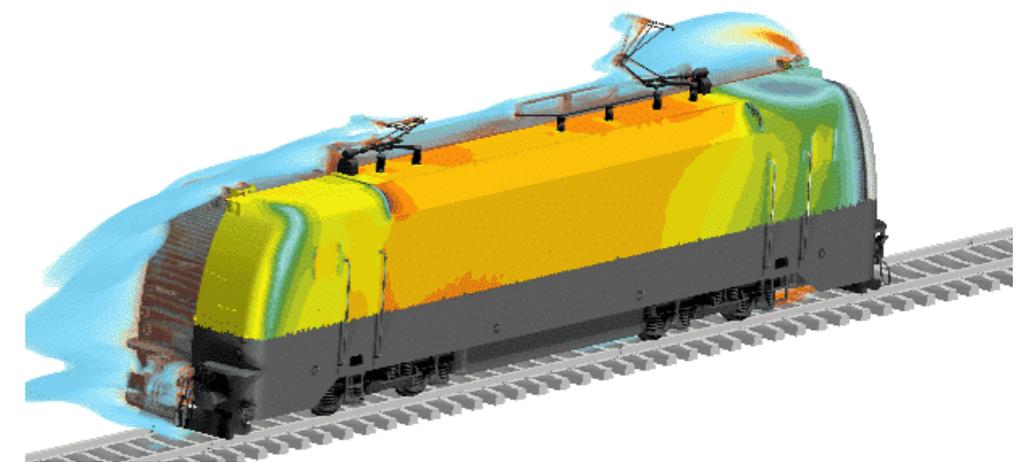
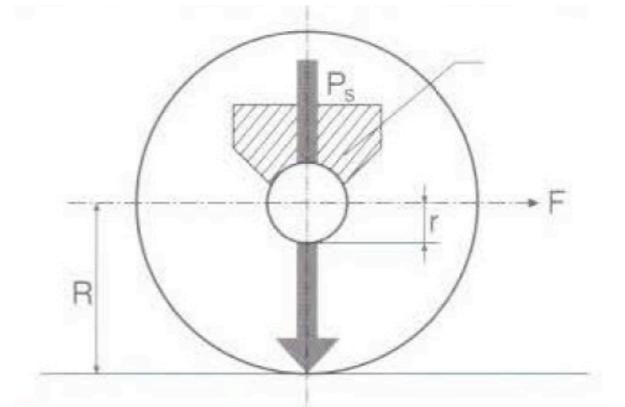
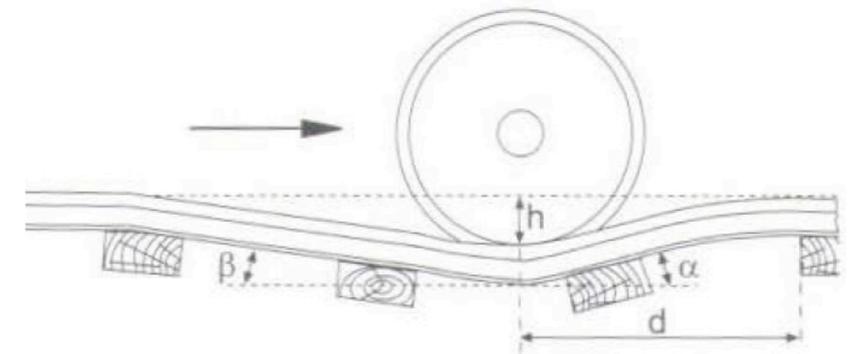
$$r_a(\text{daN/t}) = a + b \cdot v + c \cdot v^2$$

- Para el caso de **vehículos remolcados**, ya sean coches de viajeros o vagones de mercancías, la resistencia específica (daN/t) se evalúa a partir de la expresión general:

$$r_a(\text{daN/t}) = a + c \cdot v^2$$

Resistencias al avance

- Resistencias **mecánicas** (*a*)
 - Resistencia a la rodadura (rodadura, flexión del carril, etc.)
 - Resistencia de los rozamientos internos (cajas de grasa, etc.)
- Resistencias debidas a la **entrada de aire** (*b*)
- Resistencias **aerodinámicas** (*c*)
 - Resistencia de presión: Choque del frontal del tren y succión en cola
 - Resistencia de fricción



$$r_a(\text{daN/t}) = a + b \cdot v + c \cdot v^2$$

Resistencias al avance

$$r_a(\text{daN/t}) = a + b \cdot v + c \cdot v^2$$

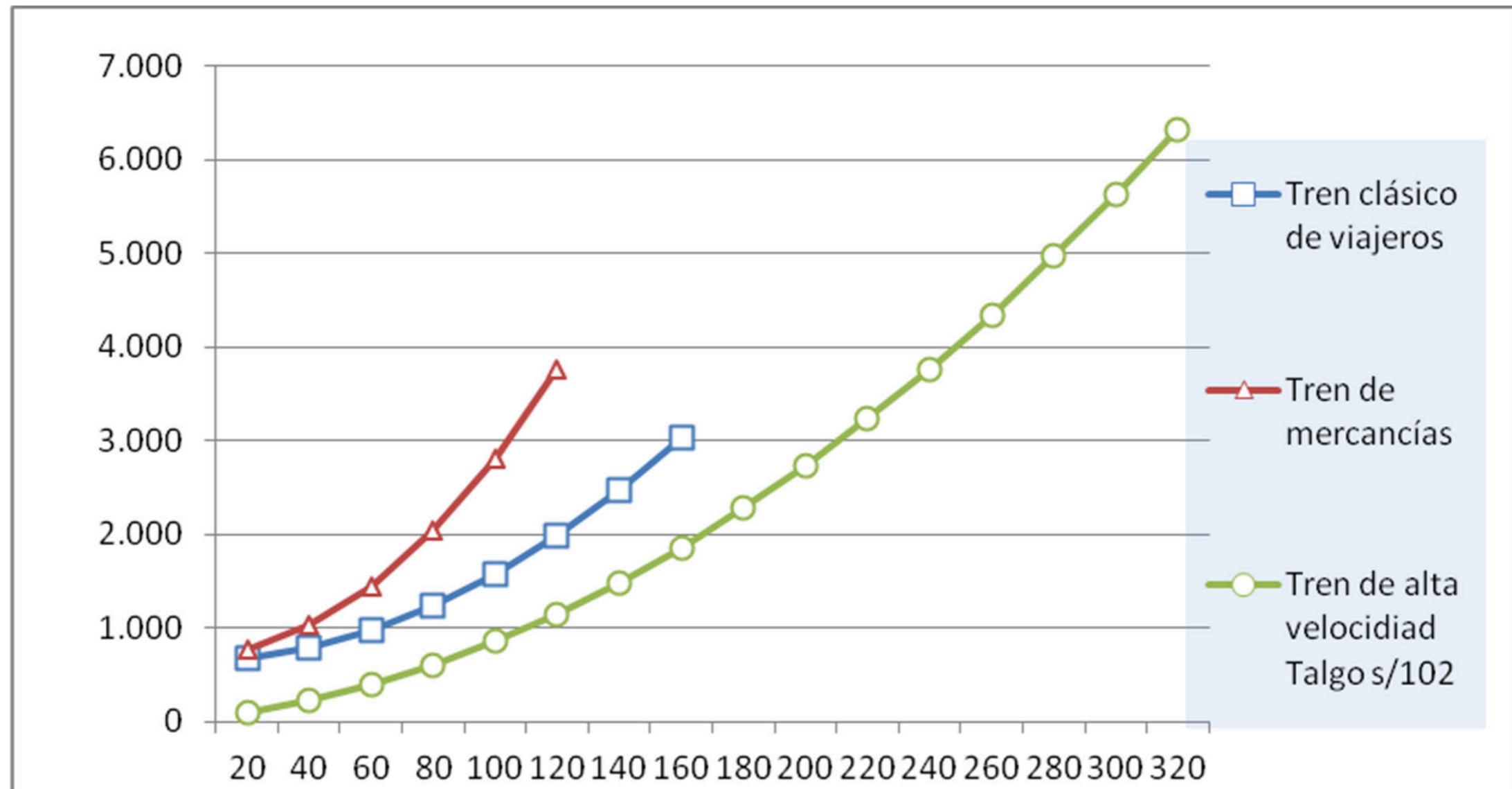
TREN	Masa t	a	b	c
Locomotora BB	80	1,25	0,01	$3,75 \cdot 10^{-4}$
Locomotora CC	120	1,2	0,01	$2,50 \cdot 10^{-4}$
2 locomotoras + 6 coches	400	1,15	0,00975	$2,87 \cdot 10^{-4}$
Clásico viajeros	Variable	1,5 – 2	0	$2,22 \cdot 10^{-4}$
Mercancías de bogies	Variable	1,5 – 2	0	$2,50 \cdot 10^{-4}$
Clásico mercancías	Variable	1,5 – 2	0	$6,25 \cdot 10^{-4}$
Alaris	177	1,5 – 2	0	$6,25 \cdot 10^{-4}$
TGV SudEst	418	0,562	0,00739	$1,28 \cdot 10^{-4}$
TGV Duplex	424	0,637	0,00755	$1,26 \cdot 10^{-4}$
ICE 3 Regional	231	0,735	0,00654	$1,47 \cdot 10^{-4}$

Resistencias al avance

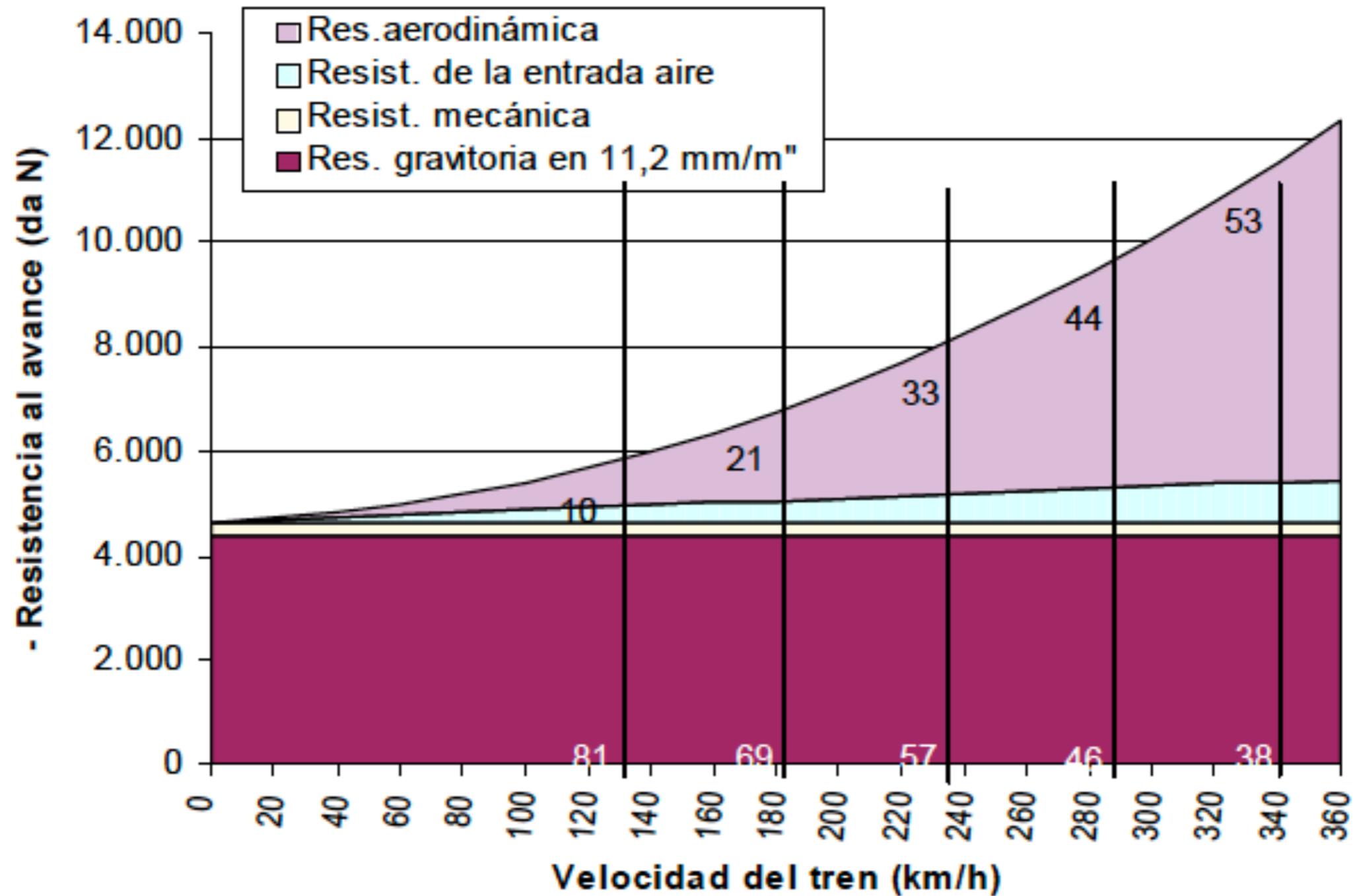
$$r_a(\text{daN/t}) = a + b \cdot v + c \cdot v^2$$

TREN	Masa t	a	b	c
S100	421	0,603	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,120 \cdot 10^{-4}$
S102	341	0,846	$10 \cdot 10^{-3}$	$1,149 \cdot 10^{-4}$
S103	485	0,736	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,112 \cdot 10^{-4}$
S104	245	1,337	$10 \cdot 10^{-3}$	$1,204 \cdot 10^{-4}$
S120	275	0,819	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,164 \cdot 10^{-4}$
S130	343	0,831	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,161 \cdot 10^{-4}$
S730 (eléctrico)	354	0,903	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,553 \cdot 10^{-4}$
S730 (diésel)	354	0,903	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,508 \cdot 10^{-4}$

Resistencias al avance



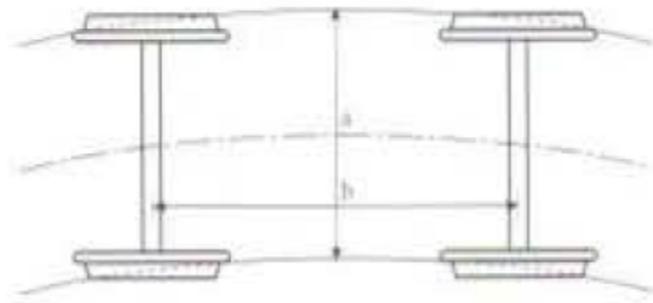
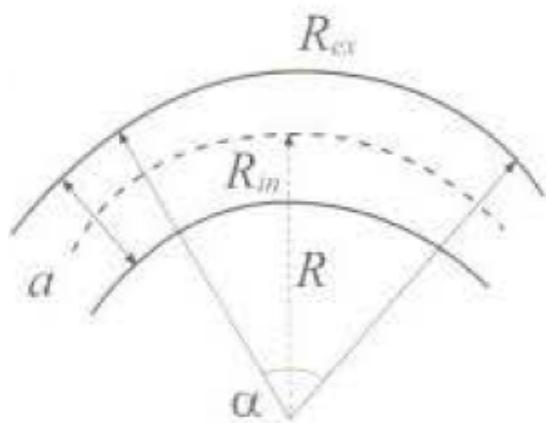
Resistencias al avance



Resistencias al avance

- La influencia de la vía se concretaba en las características del trazado, especialmente en la presencia de **rampas** y **curvas**.
- **Resistencia debida a las curvas:**
 - Estas resistencias se dan por tres causas principales: la solidaridad de las ruedas y los ejes; el paralelismo de los ejes y la fuerza centrífuga.

$$F_c(daN/t) = a \cdot f \cdot \frac{P}{R} + \frac{P \cdot f}{2 \cdot R} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} + \frac{P \cdot f}{R \cdot g} \cdot (V^2 - V_0^2)$$



En la práctica, Adif emplea:

$$r_c(daN/t) = \frac{600}{R(m)} \quad r_c(daN/t) = \frac{800}{R(m)}$$

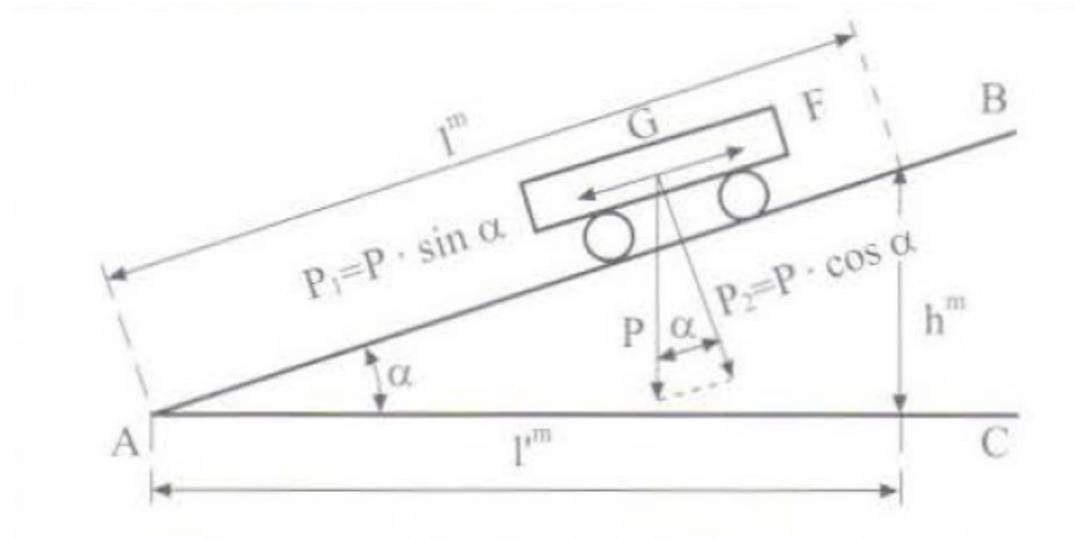
ancho estándar

ancho ibérico

Resistencias al avance

- **Resistencia debida a las rampas:**

- Si se considera el esquema habitual que representa una rampa de pendiente $i = \text{tg}(\alpha)$, de forma inmediata se deduce el esfuerzo suplementario a que dicha rampa daría lugar durante la circulación de un vehículo.



$$r(\text{daN/t}) = \frac{P \cdot i}{P} = i$$

- Por otro lado, se señala que la consideración conjunta de la resistencia en curva y en rampa da lugar al concepto de perfil ficticio (L') o **rampa ficticia**, que viene dado por la expresión:

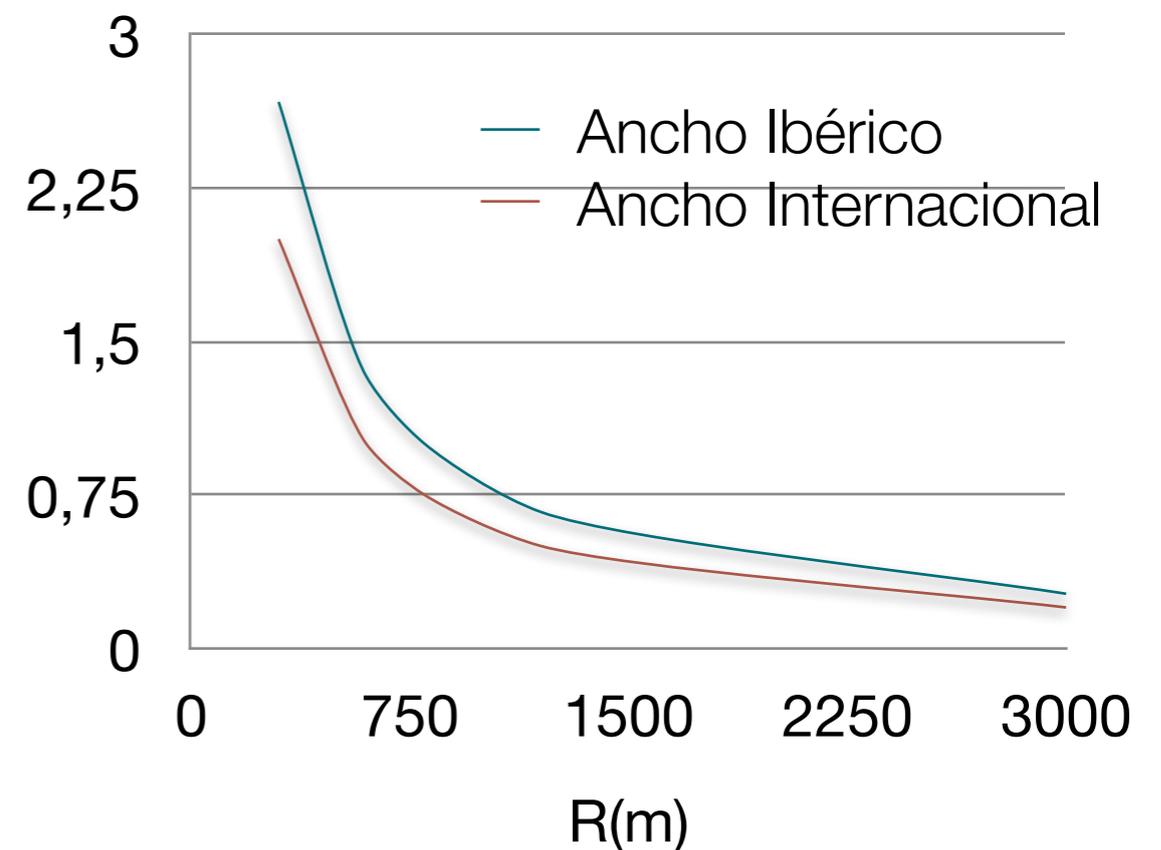
$$L' = \frac{800}{R(m)} + i$$

Resistencias al avance

$$r_c(\text{daN/t}) = \frac{800}{R(\text{m})} \quad r_c(\text{daN/t}) = \frac{600}{R(\text{m})}$$

R (m)	r(daN/t)	r(daN/t)
300	2,67	2
600	1,33	1
800	1,00	0,75
1200	0,666	0,5
3000	0,267	0,2

r(kg/t)



i(mm/m)	r(daN/t)
2	2
12	12
20	20
35	35

$$r(\text{daN/t}) = \frac{P \cdot i}{P} = i$$

Resistencias al avance

- **Resistencia total a velocidad constante:**

- La resistencia específica total a velocidad constante es la suma de las anteriores:

$$r_t(\text{kg/t}) = r_a + r_c + r_i \rightarrow R_t(\text{kg}) = R_a + R_c + R_i$$

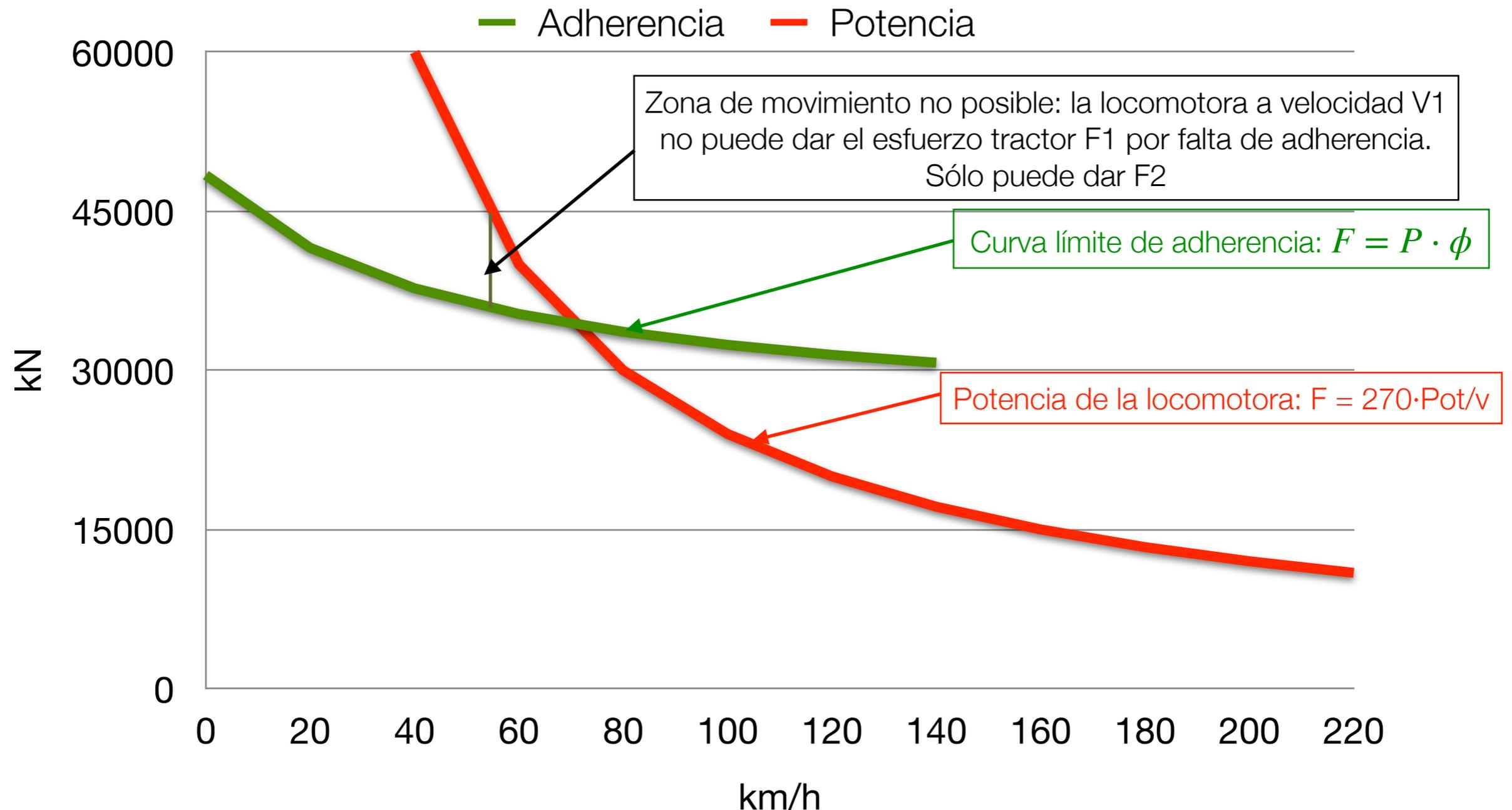
- **Resistencia de inercia:**

- La resistencia que se opone a todo cambio de velocidad, dependerá de la masa del tren y de la aceleración.
- Si a es la aceleración en cm/s^2 , la resistencia específica de inercia será:

$$R_{in} = \frac{P}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{P(\text{kg})}{g(\text{cm/sg}^2)} \cdot a(\text{cm/sg}^2) = P \cdot a(\text{kg})$$
$$r_{in} = \frac{R_{in}}{P} = \frac{P \cdot a}{P} = a(\text{kg/t})$$

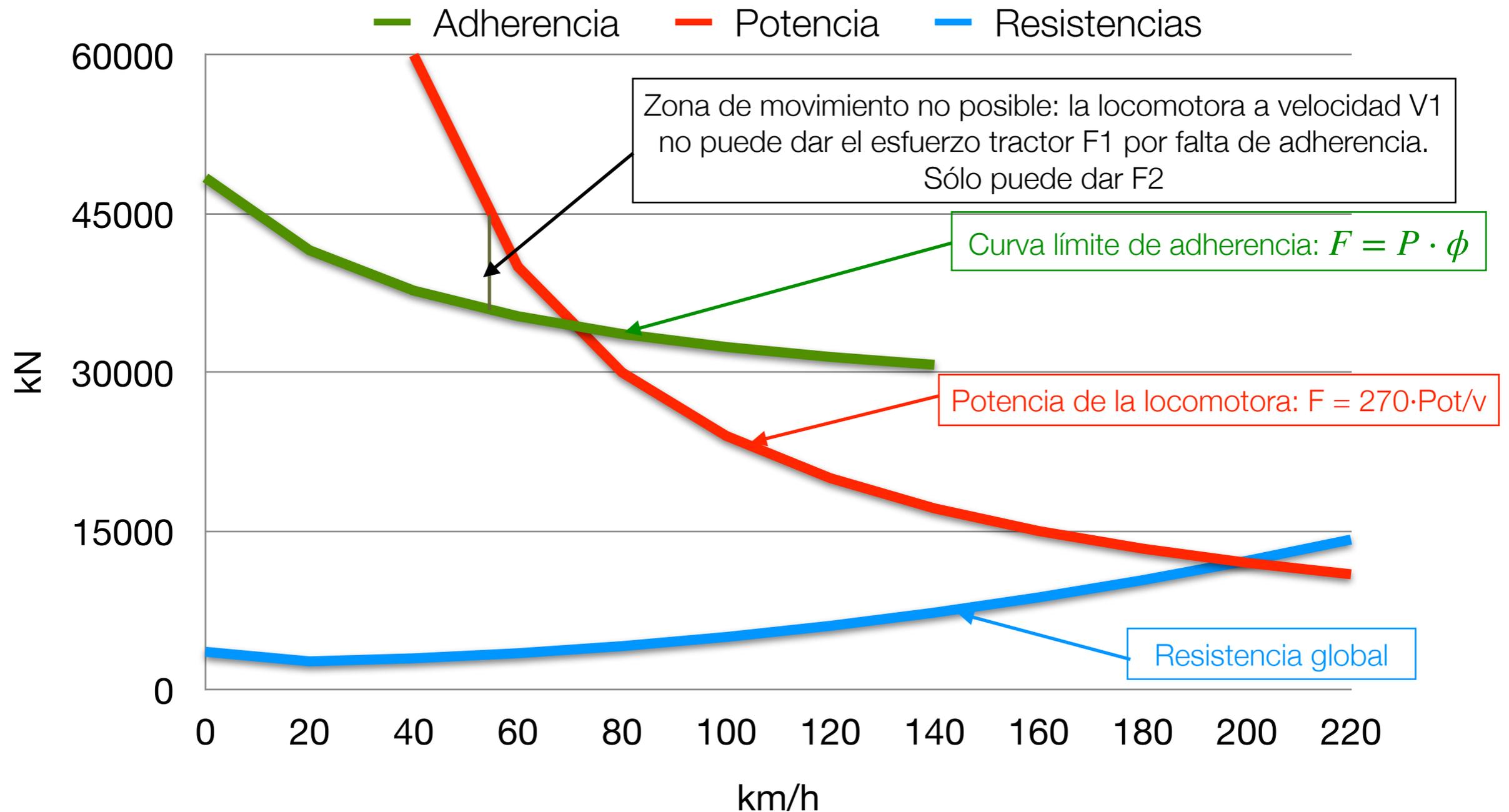
Resistencias al avance

- Si se representan todos estos efectos en un diagrama esfuerzo – velocidad, se tendrá:



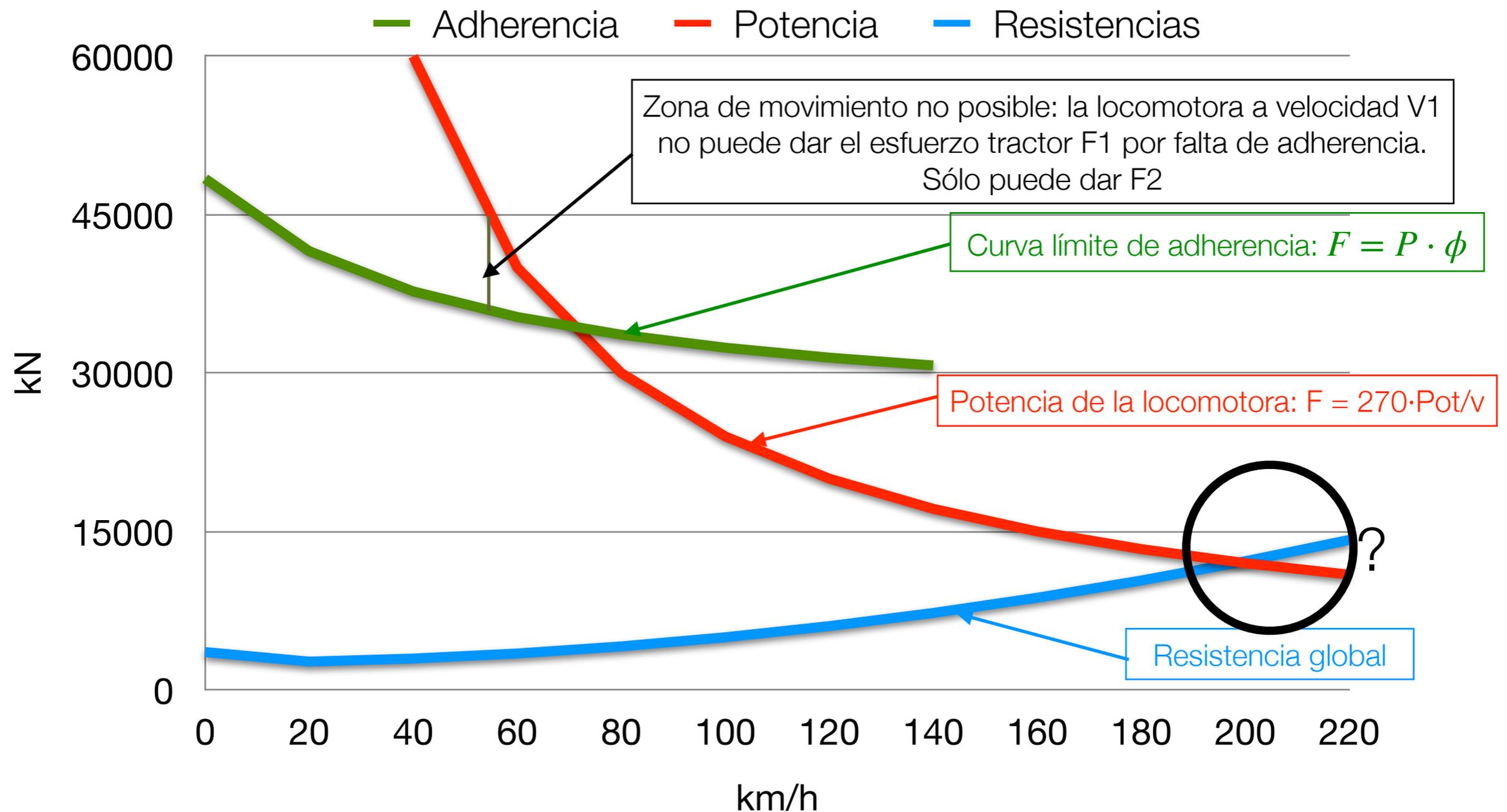
Resistencias al avance

- Si se representan todos estos efectos en un diagrama esfuerzo – velocidad, se tendrá:



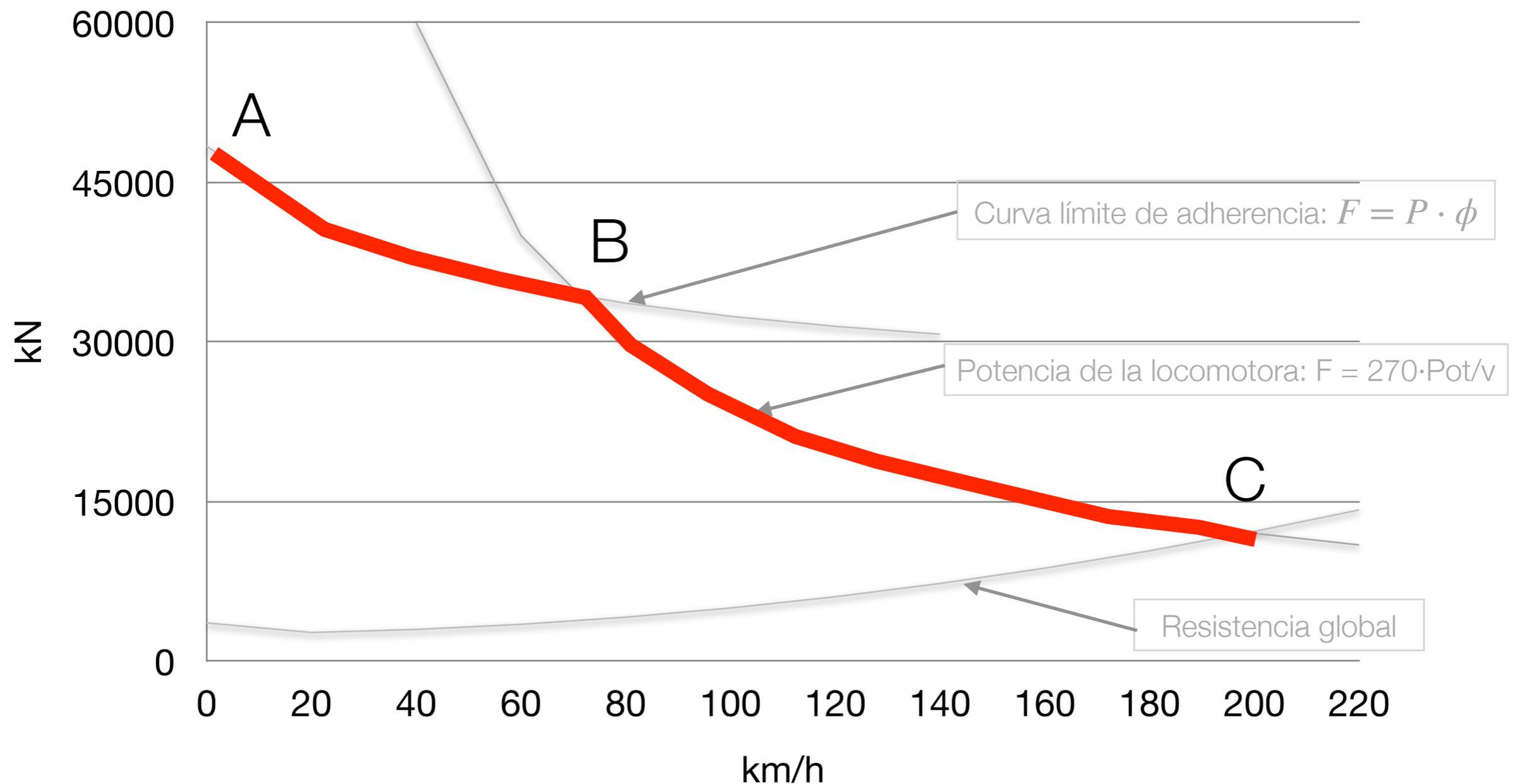
Resistencias al avance

- Si se representan todos estos efectos en un diagrama esfuerzo – velocidad, se tendrá:



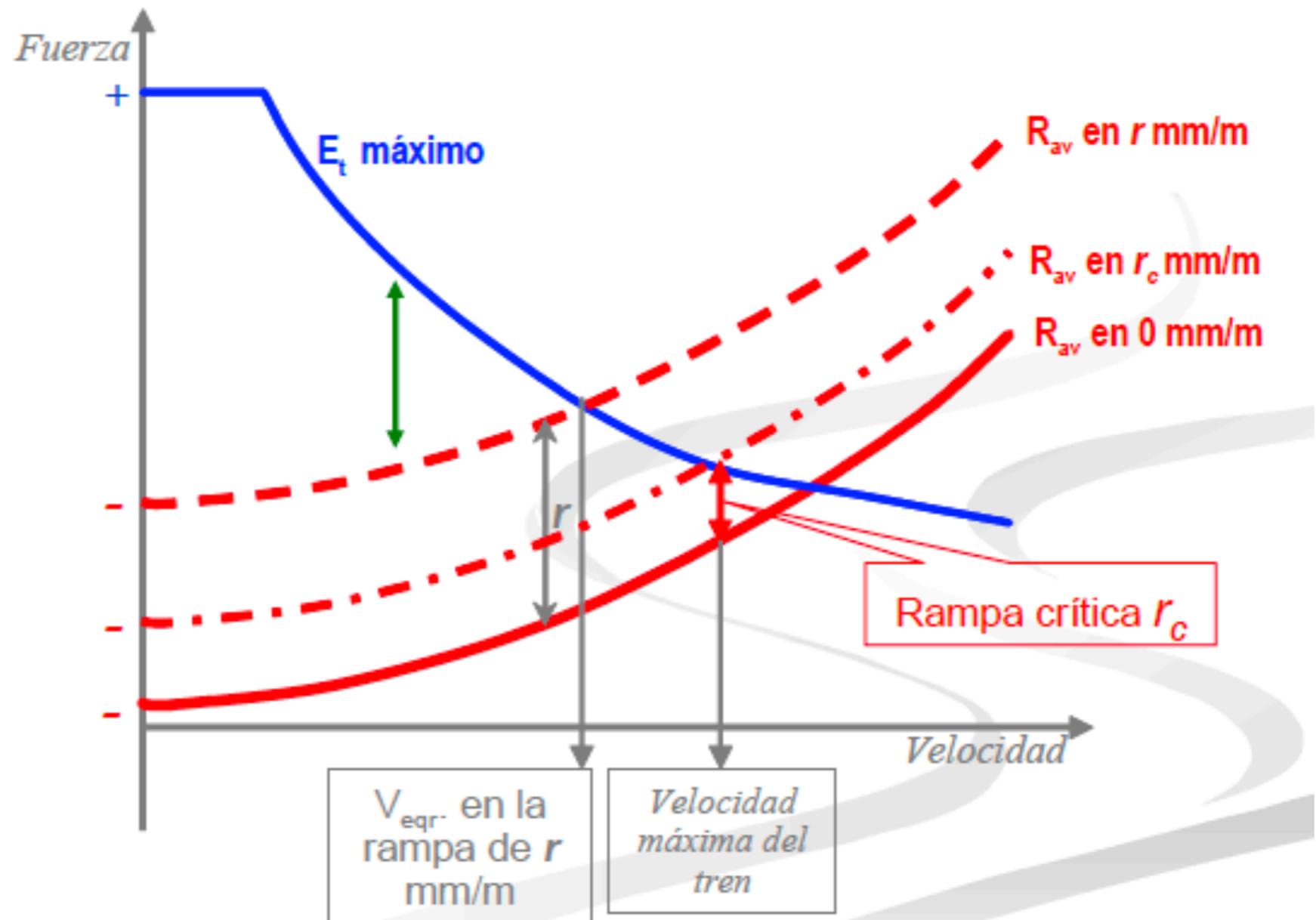
Curva de tracción

- El movimiento del tren comienza a velocidad nula desde el punto A, moviéndose por la curva de adherencia, va aumentando su velocidad, llegando al punto B. A continuación, corta por esta curva hasta llegar al punto C donde corta la curva de resistencia global del tren, llegando a su **velocidad máxima**.



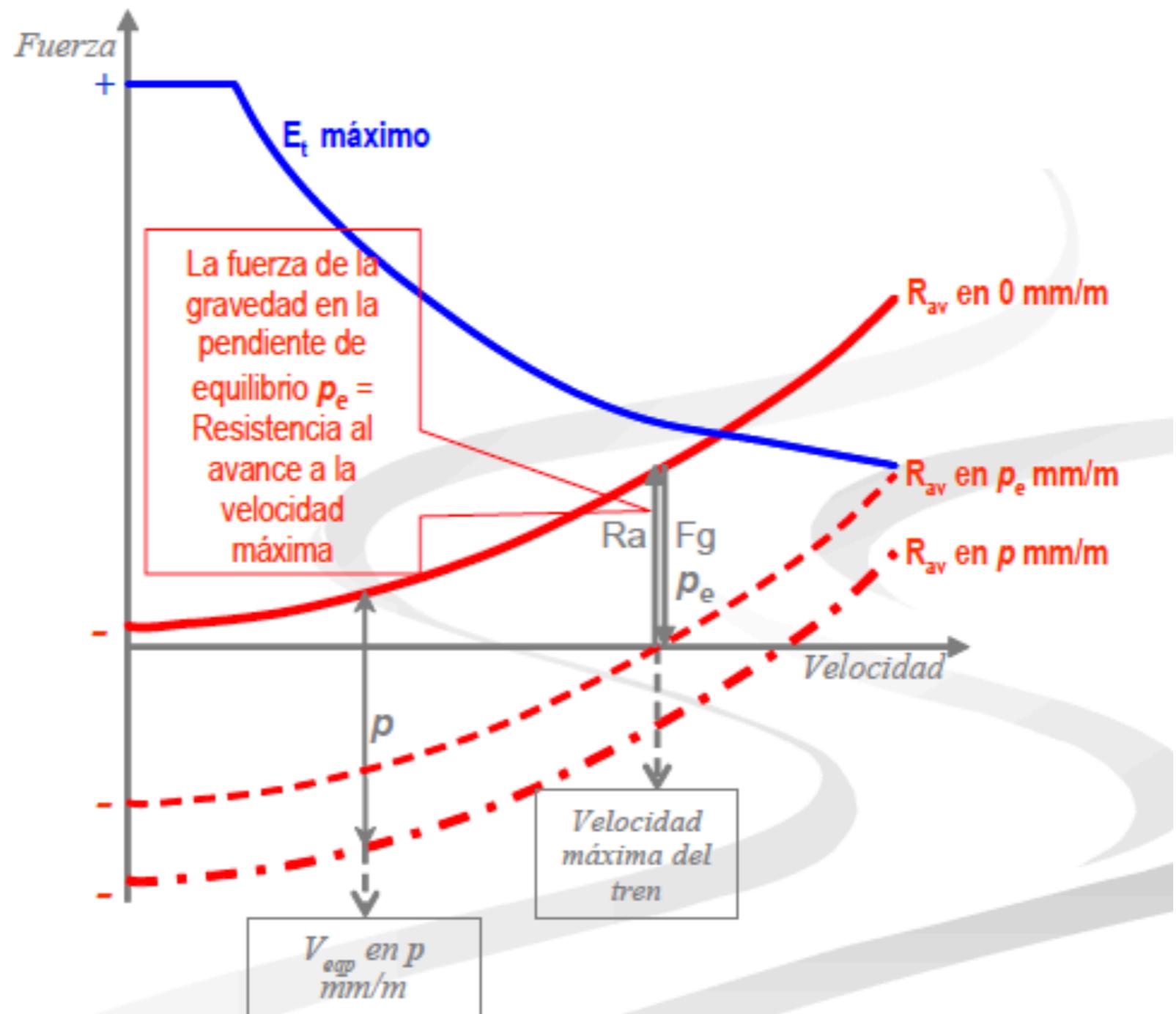
Dinámica en rampas y pendientes

- En **rampas**, la resistencia gravitatoria se suma a la resistencia al avance:
- La **velocidad de equilibrio** para una rampa es la máxima que puede alcanzarse en ella.
- La **rampa crítica** es la mayor en la que puede alcanzarse la velocidad máxima



Dinámica en rampas y pendientes

- En **pendientes**, las resistencia gravitatoria se resta a la resistencia al avance:
- La **pendiente de equilibrio** es aquella en la que el tren en deriva mantiene la velocidad máxima.



Resistencias en el arranque

- A priori, se podría suponer que las resistencia al arranque se obtiene haciendo $v=0$ en las expresiones anteriores. Sin embargo, la resistencia es notablemente más elevada.
- Para arrancar un vehículo, es necesario un esfuerzo del orden de 10 Kg/t, en lugar de 1-1,5 Kg/t cuando el tren está ya en movimiento.
- Hay que añadirle el esfuerzo de aceleración (inercia)

Tren	Aceleración mínima de arranque
Trenes mercancías	2 a 5 cm/s ²
Trenes pasajeros	8 a 10 cm/s ²
Automotores	50 a 100 cm/s ²
AVE	80 a 100 cm/s ²
Metro	110 a 120 cm/s ²

- Adif toma como resistencia específica de un tren al arranque horizontal y recta 7 daN/t (daN/t), de los que 4 daN/t inician el movimiento y el resto, 3 daN/t, son el esfuerzo acelerador mínimo para arrancar en un tiempo aceptable.

Resistencias en el arranque

- El punto más crítico será durante el arranque en rampa. Para ello, se suelen adoptar los siguientes valores:

r_a (daN/t)	i (mm/m)
7	< 15
8	15 - 20
9	21 - 25
10	26 - 29
11	30 - 33
12	34 - 37
13	38 - 41
14	42 - 45
15	> 45

- Al aumentar la rampa aumenta la resistencia específica porque los enganches entre coches o vagones están más tensados.

Resistencias en el arranque

- La limitación que introduce la adherencia en el arranque viene dada por:

$$E_{\phi_0}(kg) \leq 1000 \cdot \phi_0 \cdot P_{locomotora}(t)$$

- Por otra parte, el esfuerzo que tiene que vencerse a causa de las resistencias en el arranque viene dado por:

$$E(kg) = (P_{loc} + P_{remol}) \cdot (r_a + i)$$

- En consecuencia, debe verificarse:

$$(P_{loc} + P_{remol}) \cdot (r_a + i) \leq 1000 \cdot \phi_0 \cdot P_{loc}(t)$$

- Con la expresión anterior, se puede determinar la **carga remolcable** por la locomotora.

CUADRO 9.2 CARGA REMOLCABLE EN EL ARRANQUE PARA DOS SITUACIONES DE REFERENCIA

Datos	Tren de viajeros	Tren de mercancías
Locomotora	BB (corriente continua) de 80 t	BB (monofásica) de 84 t
Rampa	8‰	10‰
Radio de curva		400m
Resistencia específica al arranque	2da N/t	1,5 da N/t
Aceleración	8 cm/seg ²	2 cm/seg ²
Coefficiente de adherencia global	0,2	0,35
Cálculos		
Esfuerzo máximo al arranque	80t x 0,2= 16.000 daN	84t x 0,35 = 29.400 daN
Esfuerzo específico al arranque	2 (arranque) + 8 (aceleración) + (8 (rampa) = 18 da N/t	1,5 (arranque) + 2 (aceleración) + 10 (rampa) + 2 (curva) = 15,5 da N/t
Carga total al arranque (Q + L) (material remolcado + locomotora)	$(Q + L) = \frac{16.000}{18} \approx 880t$	$(Q + L) = \frac{29.400}{15,5} \approx 1.896t$
Carga arrancable (Q) por la locomotora	Q=880-80 t = 800 t	Q = 1.896 - 84 = = 1.800t

Esfuerzo en gancho

- **Esfuerzo en gancho:** es el esfuerzo que proporciona la locomotora menos el esfuerzo necesario para vencer las resistencias que se oponen al movimiento de la propia locomotora, considerada como un vehículo más del tren.
- Los vehículos ferroviarios van provistos de enganches para su enlace con los vehículos contiguos o con la locomotora. La resistencia habitual de estos enganches oscila entre las 70 y 85 t.
- Para no sobrepasar su límite elástico. se trabaja con coeficientes de seguridad de 2,4, por lo tanto, los esfuerzos admisibles en tracción serán:
 - 30 t para enganches de 70 t.
 - 36 t para enganches de 85 t.
- Por lo tanto, la condición de no rotura de los enganches en el momento de arranque:

$$30 | 36 \cdot 10^3 \geq = P_{remol} \cdot (r_a + i)$$

Carga remolcable

	ABIERTOS	CERRADOS	PLATAFORMAS			TOLVAS	CISTERNAS
			NORMALES	COCHES	CONTENEDORES		
L MÁX. (m)	14	22	28	26	27	18	17
MÁX. PESO (t)	80	90	90	40	120	90	90
MÁX. VEL. (km/h)	100	120	120	160	120	120	120

Carga remolcable

MERCANCÍAS (12 ‰)

LOCOM.	V. MÁX.	PESO	LONG.	MÁX. CARGA REMOLCADA	ABIERTOS	CERRADOS	PLATAFORMAS			TOLVAS	CISTERNAS
							NORMALES	COCHES	CONTENEDORES		
601.E	120	130	22,41	2125	371	509	642	1318	470	421	398
601.D	120	130	22,41	2159	377	517	653	1340	478	427	405
335	120	123	23,02	1890	332	454	572	1171	420	376	356
269.85	100	176	17,27	2220	374	516	652	1345	476	425	403
252	220	90	20,40	1200	214	291	365	741	269	242	229
253	140	87	18,90	1530	271	371	467	956	343	307	291



Carga remolcable

MERCANCÍAS (18 ‰)

LOCOM.	V. MÁX.	PESO	LONG.	MÁX. CARGA REMOLCADA	ABIERTOS	CERRADOS	PLATAFORMAS			TOLVAS	CISTERNAS
							NORMALES	COCHES	CONTENEDORES		
601.E	120	130	22,41	1517	264	361	453	923	334	299	283
601.D	120	130	22,41	1522	265	362	455	926	335	300	284
335	120	123	23,02	1340	235	320	401	814	296	266	252
269.85	100	176	17,27	1580	262	360	453	929	332	297	282
252	220	90	20,40	880	158	213	265	533	197	178	169
253	140	87	18,90	1080	192	261	327	664	242	217	206



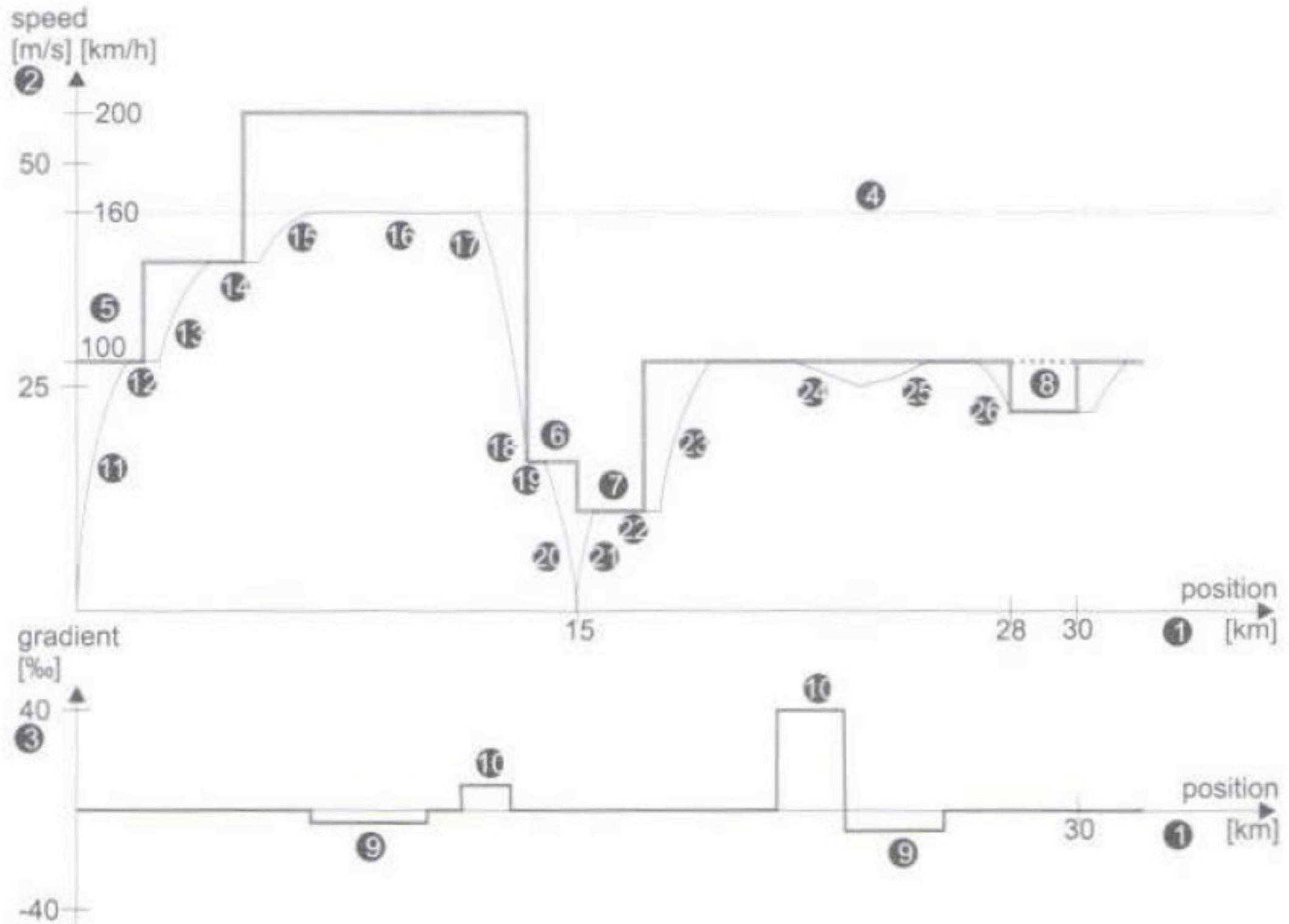
Índice

- Dinámica longitudinal
- **Cálculo de perfiles de velocidad**
- Cálculo de tiempos de viaje
- Cálculo de energía consumida

Perfiles de velocidad

- La velocidad de recorrido depende de múltiples factores: acelerado, frenado, tipo de tren, tipo de tracción, trazado, meteorología, etc.
- Incluso en “condiciones ideales”, el maquinista puede alterar la marcha del tren con el fin de ahorrar energía, jugando con los márgenes de operación.
- Además es necesario tener en cuenta las limitaciones de velocidad que se establecen en aparatos de vía, túneles de dimensiones reducidas (para evitar el efecto émbolo), puentes metálicos y zonas con obstáculos próximos a la vía.
- Una herramienta indispensable es el **diagrama o perfiles de velocidad**. Se suelen representar con diagramas velocidad-espacio. También suele ser empleado junto con un diagrama de pendientes para ver la influencia del trazado.
- A partir de los diagramas de velocidades pueden estudiarse los esfuerzos transmitidos a la vía por el paso de un tren y los parámetros de comodidad del viajero.
- A continuación se analiza un diagrama de velocidades:

Perfiles de velocidad



Perfiles de velocidad

- En el diagrama anterior se puede ver:
 1. Eje horizontal que mide la ruta en kms.
 2. Eje vertical del primer diagrama muestra la velocidad en km/h y m/sg.
 3. Eje vertical del segundo diagrama muestra la inclinación (en milésimas): positiva para rampas y negativas para pendientes.
 4. Max velocidad del tren: 160 km/h
 5. Velocidad límite del tramo cambia varias veces: comienza en 100 km/h, y sube hasta 140 km/h y 200 km/h
 6. En el km 15, hay una estación donde la velocidad de entrada es de 60 km/h. En esta simplificación, la velocidad es independiente de la vía usada.
 7. Velocidad de salida de la estación: 40 km/h
 8. En el km 28 hay una restricción especial de 80 km/h.
 9. En el otro diagrama, dos tramos de descenso de 5 y 8 milésimas. Dependiendo de los esfuerzos de frenado, pueden haber restricciones de velocidad.
 10. Dos tramos ascendentes de 40 milésimas.

Perfiles de velocidad

- En el diagrama anterior se puede ver:

11. Al principio, acelera desde 0 hasta alcanzar el límite de velocidad de 100 km/h.

12. Se mantiene con velocidad constante.

13. Cuando el límite sube, vuelve a acelerar otra vez hasta el nuevo límite de 140 km/h. Notar que empieza a acelerar más tarde: el límite de la señal se refiere al tren completo (se representa la cabeza del tren). El maquinista (y el ordenador de a bordo) debe esperar para acelerar hasta que la cola del tren haya pasado el punto.

14. Movimiento constante

15. Aceleración hasta el límite de velocidad del tren (inferior al límite de la vía).

16. Movimiento constante

17. El tren empieza a frenar. Este punto depende de:

18. En el punto de entrada al tramo de reducción de velocidad, el tren deberá ya estar circulando a la velocidad inferior. Para ello se deberá calcular el punto de intersección de la curva de frenado (punto 17).

Perfiles de velocidad

- En el diagrama anterior se puede ver:

19. Movimiento constante.

20. Frenada hasta detención (aquí se debería añadir el tiempo de parada)

21. Aceleración a la velocidad de salida

22. Movimiento constante

23. Aceleración hasta el límite de velocidad; luego, movimiento constante.

24. En la subida, el tren pierde velocidad: el esfuerzo del tren no compensa la suma de resistencias al avance. Como se verá más adelante, el esfuerzo tractor aumenta cuando disminuye la velocidad, por eso se llega a un tramo de velocidad estable.

25. Cuando la rampa termina, el tren acelera de nuevo.

26. El tren reduce su velocidad debido a la limitación existente en el tramo.

Proceso de aceleración

- En las secciones de aceleración, se usan todas las fuerzas tractoras disponibles. Además, las resistencias expuestas trabajan en contra de dicho esfuerzo.
- Los diferentes esfuerzos y la aceleración no son constantes, por ello, la formulación de Newton para aceleraciones constantes no debería ser aplicable → el problema se debe resolver por ecuaciones diferenciales.
- Además, el tren tiene en su interior gran cantidad de masas e inercias giratorias. Esto hace que la masa del tren sea superior a la real (“masa ficticia”) dada por.

$$M' = M \cdot f_p$$

- f_p suele tener valores entre 1,10 y 1,30 para material motor y entre 1,02 y 1,09 para material remolcado.

$$F - R = \frac{P}{g} \cdot \gamma \rightarrow F(v) - R(v) = M' \cdot \frac{dv}{dt} \rightarrow F(v) - R(v) = M \cdot f_p \cdot \frac{dv}{dt}$$

Proceso de aceleración

- Partiendo de la expresión anterior, y asumiendo el tren como un punto, o cuya masa está concentrada en un punto:

$$\frac{(F(v) - R(v))}{v} = M \cdot f_p \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} \rightarrow \frac{(F(v) - R(v))}{v} = M \cdot f_p \cdot \frac{dv}{ds}$$

- La ecuación anterior se puede transformar en:

$$\frac{dt}{dv} = M \cdot f_p \cdot \frac{1}{F(v) - R(v)} \quad \frac{ds}{dv} = v \cdot M \cdot f_p \cdot \frac{1}{F(v) - R(v)}$$

- Integrando, se obtiene el tiempo y longitud necesarias para pasar de v_0 a v_1

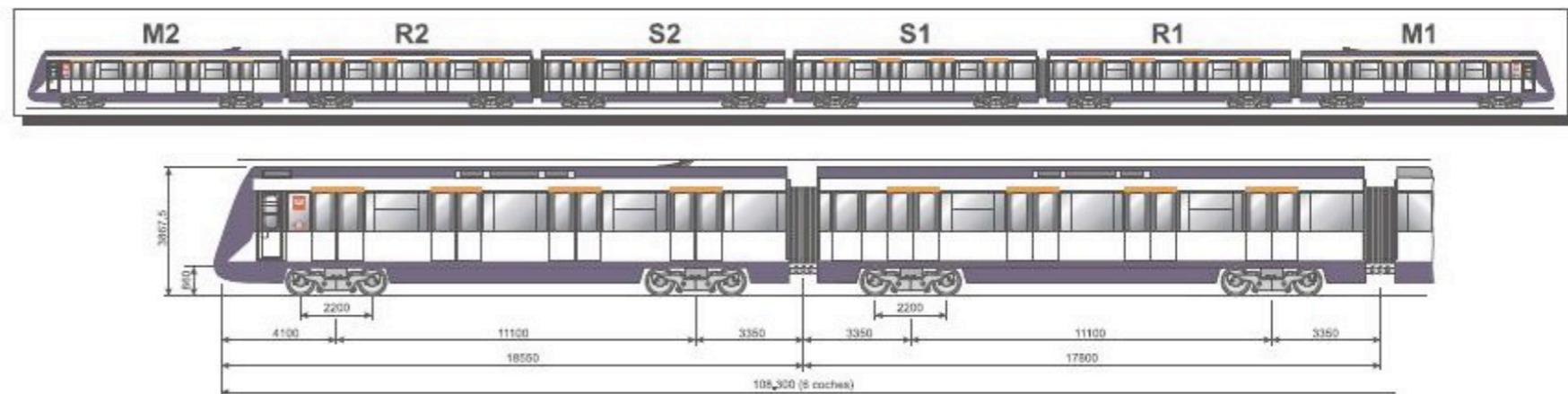
$$t = \int_{v_0}^{v_1} M \cdot f_p \cdot \frac{1}{F(v) - R(v)} dv \quad s = \int_{v_0}^{v_1} v \cdot M \cdot f_p \cdot \frac{1}{F(v) - R(v)} dv$$

Proceso de aceleración

- En la práctica, se trabaja dividiendo el tiempo en sub-intervalos (cada 1 m/s por ejemplo), calculando para cada uno de ellos los datos necesarios suponiendo que para todo él es válida la velocidad media correspondiente:
 - Paso 1: Se calcula la velocidad media.
 - Paso 2: con ésta, se calcula el esfuerzo adherente y la resistencia total.
 - Paso 3: La diferencia de esos esfuerzos es la fuerza que puede acelerar el tren.
 - Paso 4: con todos los datos, se emplea la formulación de Newton para resolver cada sub-intervalo.

Proceso de aceleración: ejemplo

- Supóngase un tren de la serie 7000 de Metro de Madrid.
 - Peso total del tren cargado: 298.340 daN
 - Peso de los ejes motores: 207.120 daN
 - Potencia total del tren: 3168 kW (3.168.000 julios/sg)
 - Potencia útil en llanta 90%
 - Coeficiente rozamiento rueda-carril $\phi_0 = 0,3$
 - $f_p = 1.07$ $r_a(\text{daN/t}) = 1,5 + 0,01 \cdot v + 3 \cdot 10^{-4} \cdot v^2$
- Se pide determinar el tiempo que tardará, partiendo del reposo en llegar a los 100 km/h, así como distancia empleada.



Proceso de aceleración: ejemplo

- En primer lugar se calculan los puntos A y B del diagrama esfuerzo-velocidad:
 - Punto A: Esfuerzo de arranque
 - Punto B: Punto límite de adherencia
- En el arranque:

$$E_{adh} = P_{adh} \cdot \phi_0 \rightarrow 207.120 \cdot 0,3 = 62.136 daN$$

- Límite adherencia: intersección de las curvas de adherencia con la de potencia de la locomotora

$$E_{adh} = P_{adh} \cdot \phi_v \rightarrow P_{adh} \cdot \phi_0 \cdot \frac{1}{1 + 0.01 \cdot v} \rightarrow 207.120 \cdot 0,3 \cdot \frac{1}{1 + 0,01 \cdot v}$$

$$F(daN) = 100 \cdot 3,6 \cdot Pot(kW)/v(km/h) \rightarrow 100 \cdot 3,6 \cdot 3168 \cdot 0,9/v$$

$$E_{adh} = F \rightarrow v \quad \boxed{v_B = 19,8 \text{ km/h} = 5,5 \text{ m/s}}$$

Proceso de aceleración: ejemplo

- Se discretiza el proceso en intervalos de 1 m/s desde el punto A ($v=0$ km/h) al punto B ($v=19,8$ km/h). Haciendo el primer tramo como ejemplo: de 0 a 1 m/s

$$E_{adh} = 207.120 \cdot 0,3 \cdot \frac{1}{1 + 0,01 \cdot 1,8}$$

$$R = (1,5 + 0,01 \cdot 1,8 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 1,8^2) \cdot 298.340 \cdot 10/9,8$$

$$F_{util} = E_{adh} - R = 60.575 \quad F_{util} = M \cdot f_p \cdot a \rightarrow a$$

$$a = \frac{36177 \cdot 10}{298340 \cdot (10/9,8) \cdot 1,07} = 1,860$$

$$v_1 = v_0 + a \cdot t \rightarrow 1 = 0 + 1,860 \cdot t \rightarrow t = 0,54$$

$$l = v_0 \cdot t + 1/2 \cdot a \cdot t^2 \rightarrow 0 \cdot 0,54 + 1/2 \cdot 1,860 \cdot 0,54^2 = 0,27 \quad Energia = F_{adh} \cdot l = 61037 \cdot 10 \cdot 0,27 = 164.113$$

v0 m/s	v1 m/s	vmedia m/s	vmedia km/h	Fadh daN	Resist daN	Futil daN	a m/s ²	tiempo s	longitud m
0	1	0,5	1,8	61037	462,4	60575	1,860	0,54	0,27
1	2	1,5	5,4	58953	475,7	58477	1,795	0,56	0,84
2	3	2,5	9	57006	491,4	56514	1,735	0,58	1,44
3	4	3,5	12,6	55183	509,5	54673	1,678	0,60	2,09
4	5,5	4,75	17,1	53062	535,4	52527	1,613	0,93	4,42
Total								3,20	9,05

Proceso de aceleración: ejemplo

- A partir de este momento abandonamos la limitación por adherencia y entramos en la parte de limitación por potencia de locomotora (tramo B-C), por lo que habrá que calcular si el punto C permite una velocidad de 100 km/h, esto es: $F \geq R$

$$F(daN) = 100 \cdot 3,6 \cdot Pot(kW)/v(km/h) \rightarrow 100 \cdot 3,6 \cdot 3168 \cdot 0,9/100 = 10.263 daN$$

$$R = (1,5 + 0,01 \cdot 100 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 100^2) \cdot 298.340 \cdot 10/9,8 = 1.674,5 daN$$

- Cumple. Ahora se plantea nuevamente la tabla, igual que la anterior, reemplazando el esfuerzo de adherencia por el de potencia:

v0	v1	vmedia	vmedia	Ftrac	Resist	Futil	aceleración	tiempo	longitud	Energía
m/s	m/s	m/s	km/h	daN	daN	daN	m/s ²	s	m	N·m
5,5	10	7,75	27,9	36790	612,7	36177	1,111	4,05	31,40	1155252
10	15	12,5	45	22810	778,6	22031	0,676	7,39	92,41	2107814
15	20	17,5	63	16293	1010,9	15282	0,469	10,66	186,51	3038760
20	25	22,5	81	12672	1302,4	11370	0,349	14,33	322,31	4084351
25	27,78	26,39	95,004	10804	1570,2	9234	0,283	9,81	258,80	2796118
Total								46,23	891,44	13182296

Proceso de aceleración: ejemplo

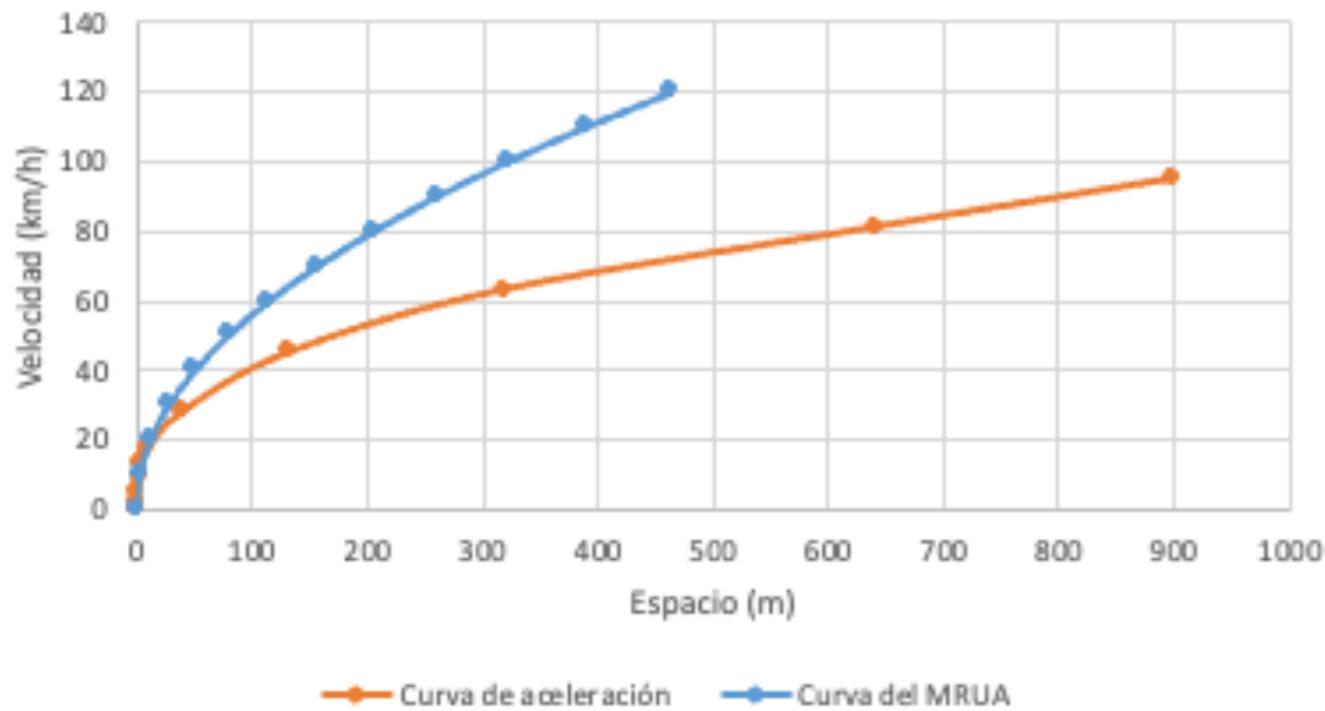
- Por lo tanto, el tren alcanza los 100 km/h en 49 sg y recorre 892 metros.

v0 m/s	v1 m/s	vmedia m/s	vmedia km/h	Fadh daN	Resist daN	Futil daN	a m/s ²	tiempo s	longitud m
0	1	0,5	1,8	61037	462,4	60575	1,860	0,54	0,27
1	2	1,5	5,4	58953	475,7	58477	1,795	0,56	0,84
2	3	2,5	9	57006	491,4	56514	1,735	0,58	1,44
3	4	3,5	12,6	55183	509,5	54673	1,678	0,60	2,09
4	5,5	4,75	17,1	53062	535,4	52527	1,613	0,93	4,42
Total								3,20	9,05

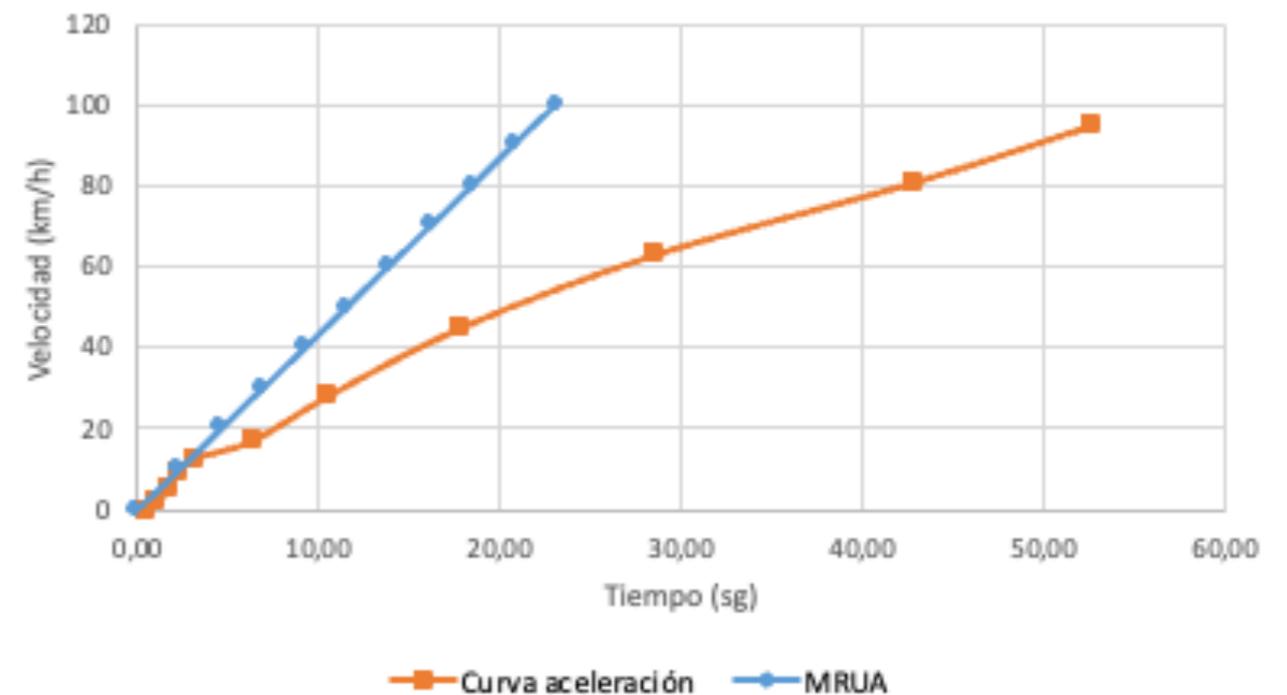
v0 m/s	v1 m/s	vmedia m/s	vmedia km/h	Ftrac daN	Resist daN	Futil daN	aceleración m/s ²	tiempo s	longitud m
5,5	10	7,75	27,9	36790	612,7	36177	1,111	4,05	31,40
10	15	12,5	45	22810	778,6	22031	0,676	7,39	92,41
15	20	17,5	63	16293	1010,9	15282	0,469	10,66	186,51
20	25	22,5	81	12672	1302,4	11370	0,349	14,33	322,31
25	27,78	26,39	95,004	10804	1570,2	9234	0,283	9,81	258,80
Total								46,23	891,44

Proceso de aceleración: ejemplo

Perfil de velocidades



Velocidad-tiempo (acelerado)



Movimiento a velocidad constante

- Cuando el tren ha alcanzado su velocidad límite y cambia a movimiento constante, las ecuaciones de Newton son válidas mientras el esfuerzo de tracción menos las resistencias se mantengan positivas:

$$s = v \cdot t$$

- Es importante notar que, en el caso de empezar una rampa, las resistencias pueden incrementarse y puede ser necesario calcular esta sección como una sección de aceleración con aceleración negativa.
- En el caso de descensos por pendientes, puede incluso ser necesario el empleo de los frenos para mantener el tren en la velocidad máxima.
- En ocasiones, el movimiento constante se puede calcular como una sucesión de aceleraciones y marchas sin propulsión.

Proceso de frenado

- Para la hipótesis de frenado constante, se puede emplear la ecuación:

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_0^2}{\gamma}$$

- Normalmente, los valores de γ vienen dados por defecto para el frenado de servicio (confortable):
 - $\gamma = 0.525 \text{ m/sg}^2$ para trenes suburbanos
 - $\gamma = 0.375 \text{ m/sg}^2$ para trenes de pasajeros (frenado confortable)
 - $\gamma = 0.225 \text{ m/sg}^2$ para trenes de mercancías
- Para el cálculo de las secciones de frenado es necesario conocer la máxima velocidad de la siguiente sección, que determinará la máxima velocidad de salida de la sección actual.

Proceso de frenado

- La distancia de frenado necesaria para reducir la velocidad se puede determinar como:

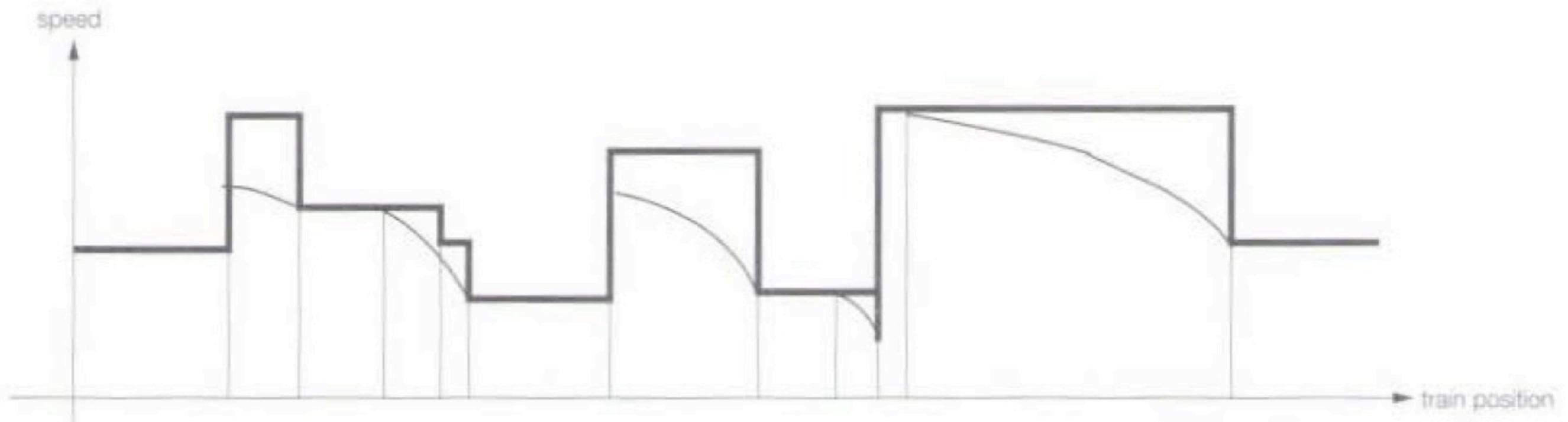
$$s_b = \frac{v_{max}^2}{2 \cdot \gamma} - \frac{v_{exit}^2}{2 \cdot \gamma}$$

- Si la distancia s_b es menor que la longitud de la sección, se divide en dos partes: una con velocidad constante (v_{max}) y otra donde se aplica la curva de frenado desde v_{max} hasta v_{exit} , de longitud s_b .
- Si la distancia de frenado s_b es, al menos, tan larga como la sección (s_{sec}), se debe determinar la velocidad de entrada a la sección actual s (v_{entr}). Esta debe ser la máxima velocidad permitida para poder salir con una velocidad $v_{exit}(s) \leq v_{max}(s + 1)$.

$$v_{entr} = \sqrt{2 \cdot \gamma \cdot s_{sec} + v_{exit}^2}$$

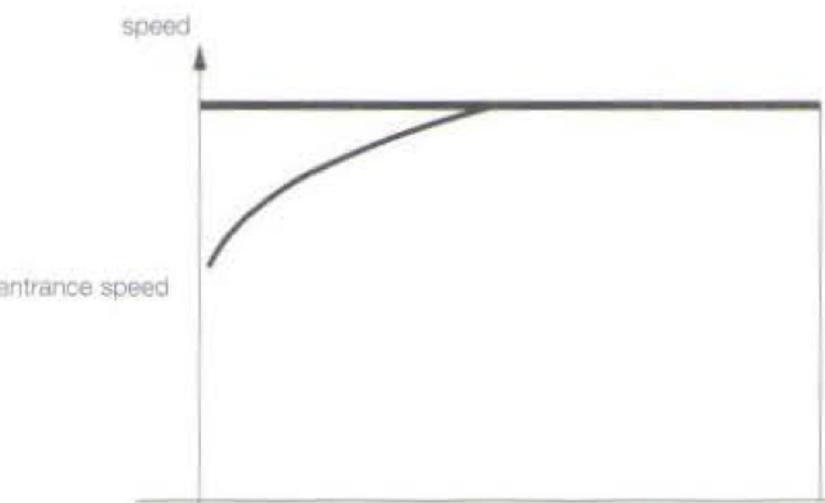
Proceso de frenado

- Si la velocidad máxima v_{max} de la sección actual es mayor que la velocidad de entrada calculada anteriormente, v_{entr} entonces la velocidad máxima de salida de la anterior sección v_{exit} debiera ser igual a v_{entr}
- Por este motivo, es conveniente determinar las secciones de frenado en orden inverso al sentido de la marcha: empezando por la última sección y avanzando hacia atrás.

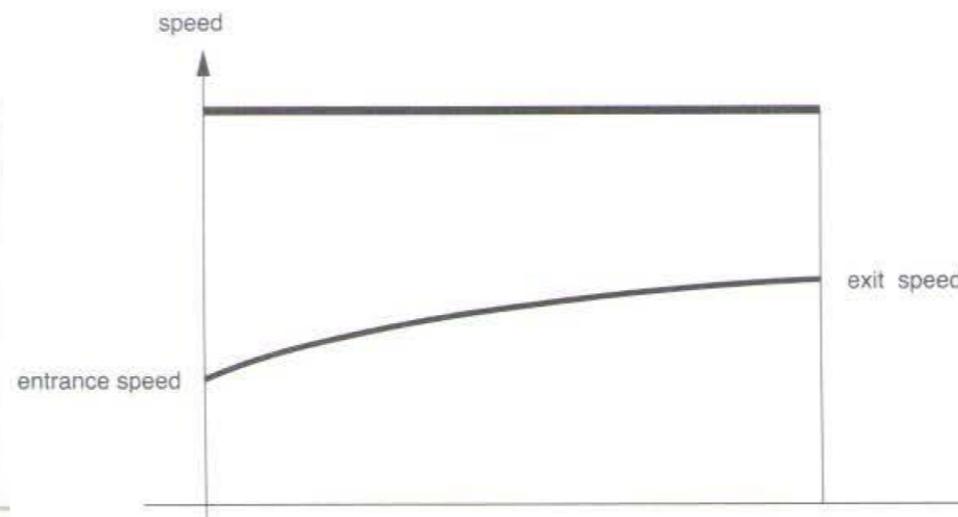


Proceso de frenado

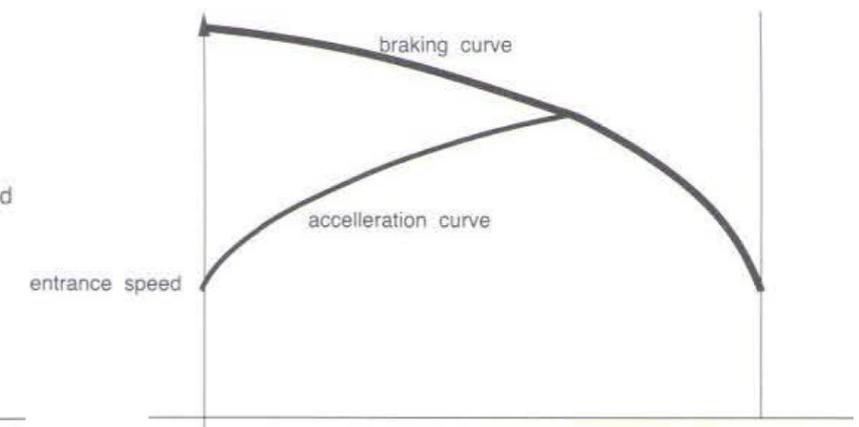
- **CASO 1:** Sección con velocidad máxima constante y la velocidad máxima se alcanza en dicha sección:



- **CASO 2:** La velocidad de salida es menor que la máxima velocidad; la distancia de aceleración es superior a la de la sección):

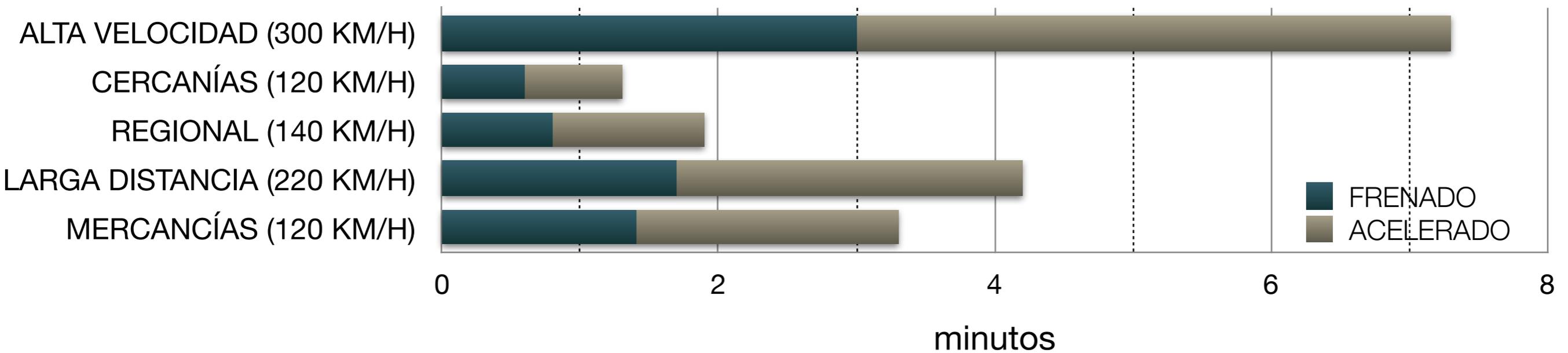


- **CASO 3:** La sección es una sección de frenado y ambas curvas interceptan:

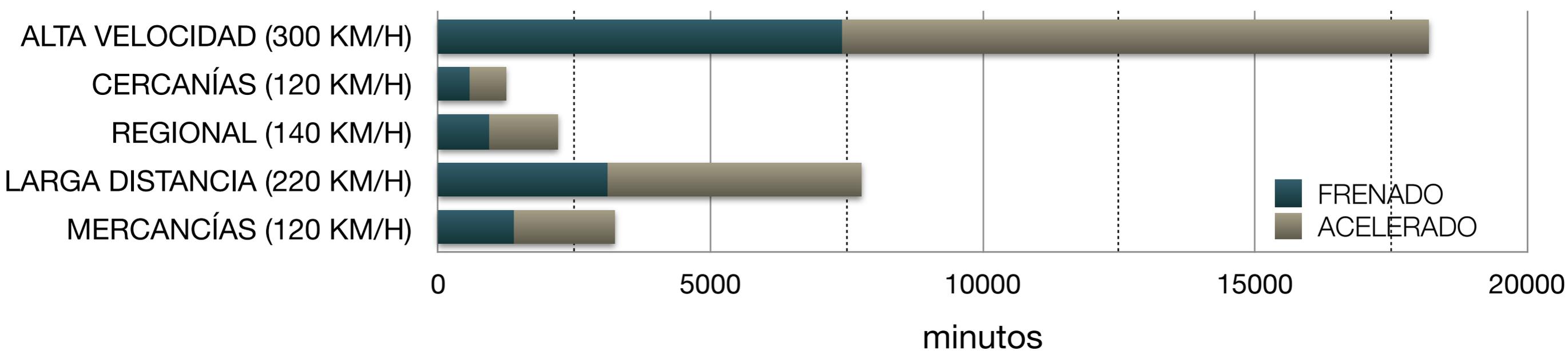


Perfiles de velocidad

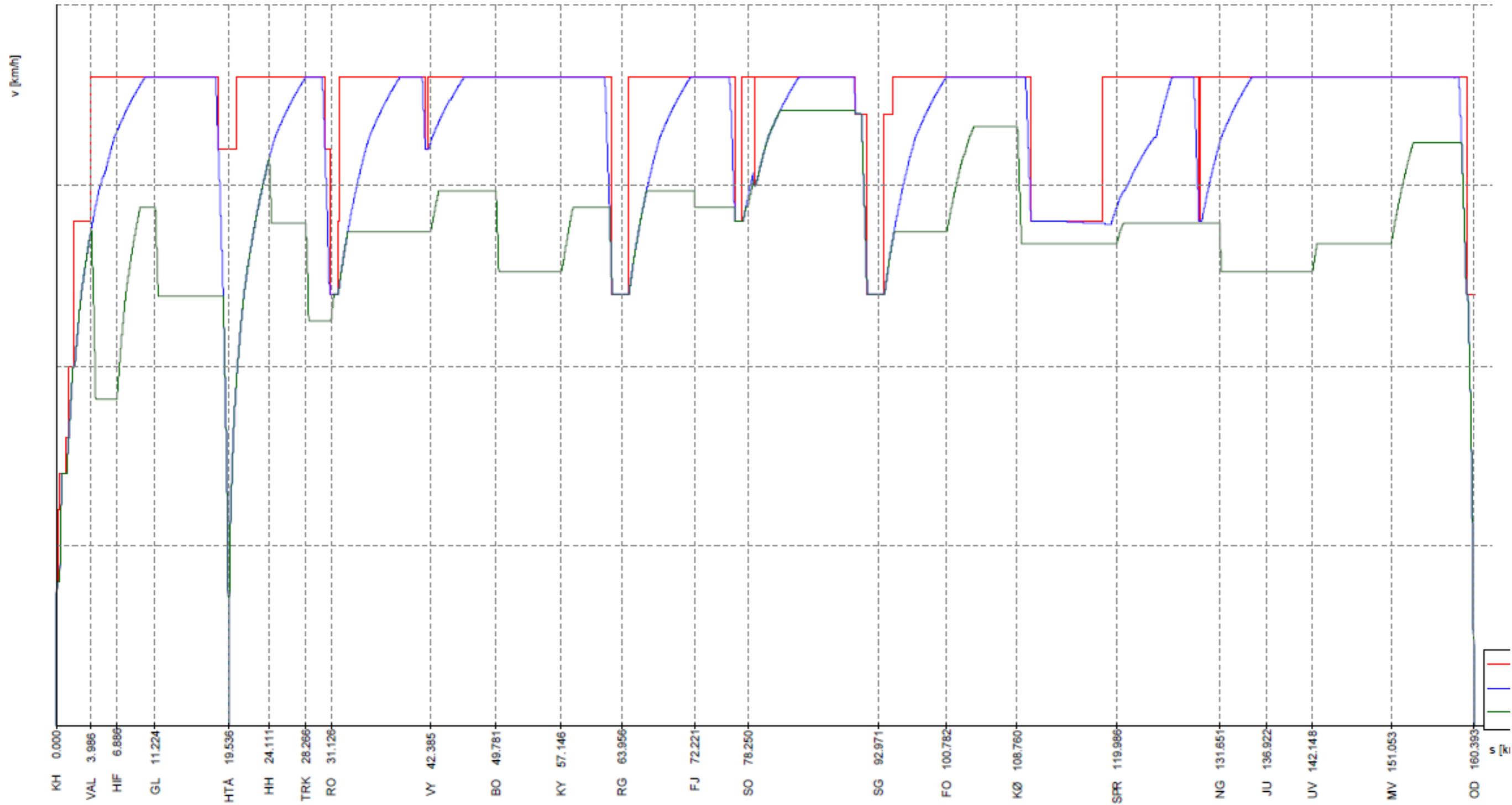
Tiempo necesario para acelerar y frenar (min)



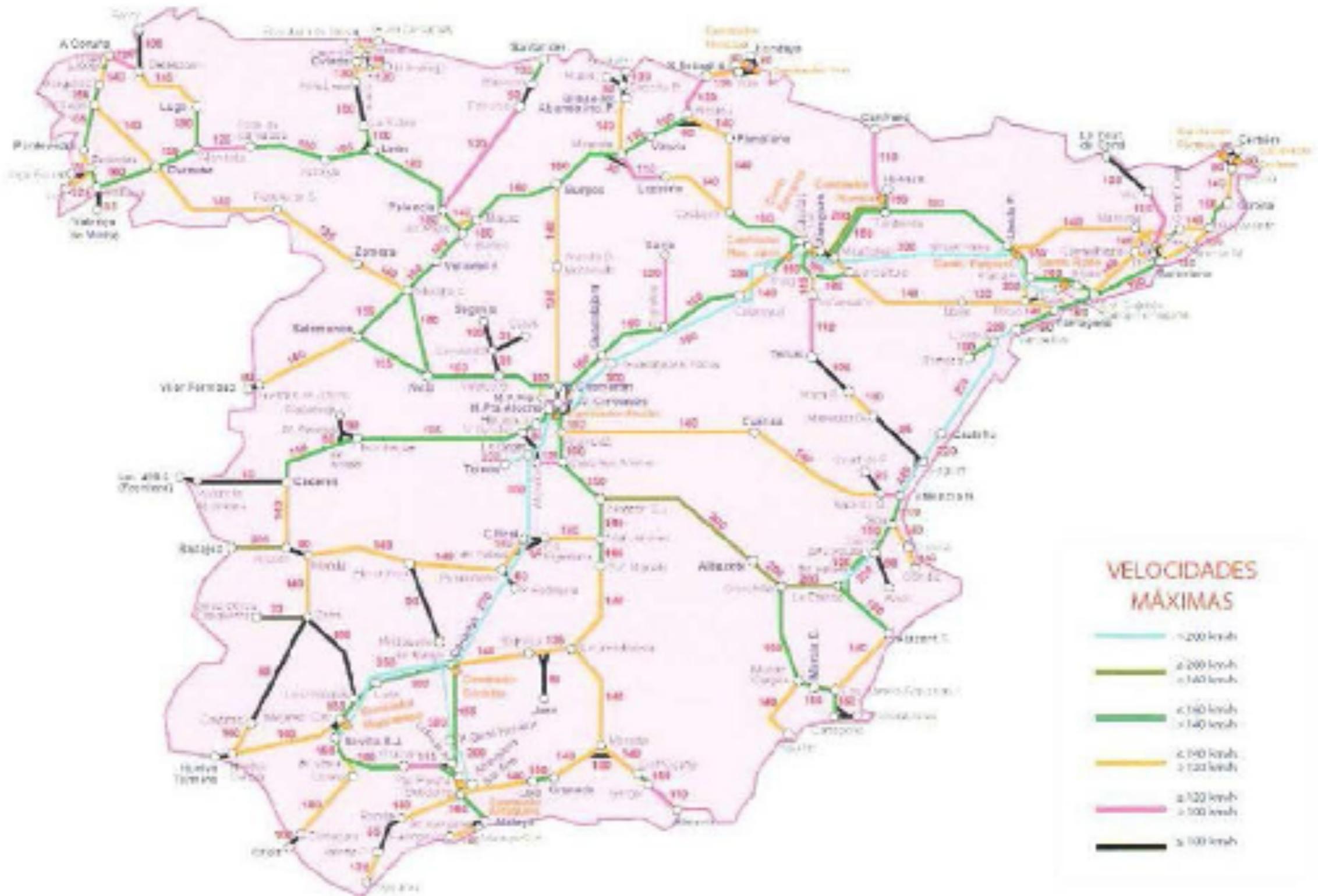
Distancia necesaria para acelerar y frenar (m)



Perfiles de velocidad



Velocidades máximas



Índice

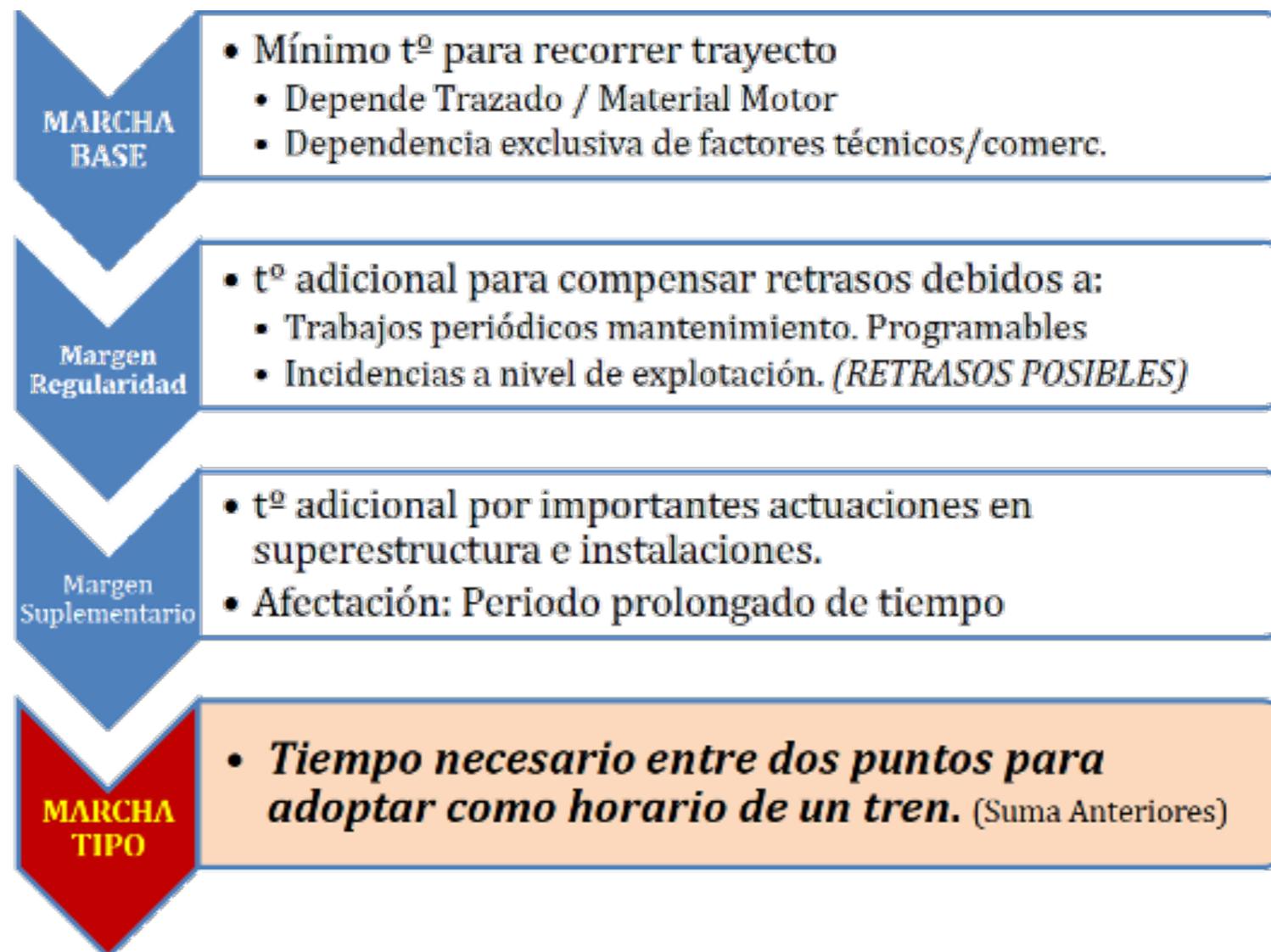
- Dinámica longitudinal
- Cálculo de perfiles de velocidad
- **Cálculo de tiempos de viaje**
- Cálculo de energía consumida

Marcha base

- **Marcha base:** Es el tiempo más corto posible para recorrer una sección determinada de línea remolcando una cierta carga, a partir de la consideración de los valores medios referidos a:
 - La conducción del tren por parte del maquinista
 - Las prestaciones técnicas ofrecidas por el material motor
 - La alimentación de la corriente de tracción
 - La adherencia
 - La resistencia ofrecida por el material remolcado y por las secciones de línea (rampas, curvas, etc.)
 - La velocidad permitida por el trazado
- Para el cálculo de la marcha base, indispensable para el diseño de horarios, es necesario disponer de las velocidades por tramo, que determinan a su vez el tiempo de viaje.

Marcha tipo

- De acuerdo con la ficha UIC 451-1 (2000), se define el concepto **Tiempo de marcha-tipo** como el tiempo necesario entre dos puntos para adoptar como horario de un tren. Es la suma del tiempo deducido de la marcha de base más los márgenes de regularidad y suplementarios que se le incorporen.



Marcha tipo

- **Margen de regularidad:** Representa un tiempo suplementario al tiempo de recorrido calculado (marcha base) para compensar los retrasos debidos a:
 - Los trabajos periódicos de conservación de las instalaciones, que son susceptibles de ser planificados y modulados.
 - Los posibles tiempos perdidos a causa de incidentes técnicos a nivel de explotación, condiciones meteorológicas adversas, estacionamientos elevados en estaciones por una elevada afluencia de viajeros, etc.
- **Margen suplementario:** Representa un incremento de tiempo destinado a compensar los retrasos debidos a la realización de importantes trabajos en las instalaciones durante un periodo prolongado de tiempo. También se incluyen los retrasos que se producen en grandes nudos ferroviarios por causa de las operaciones de maniobra que se derivan de la configuración de su infraestructura.

Marcha tipo

- **Margen de regularidad:**

A) TRENES DE VIAJEROS NO AUTOMOTORES

– Un mínimo de 1,5 minutos/100 km mayorado en base al siguiente criterio

V. límite	≤140 km/h	141-160 km/h	161-200 km/h	>200 km/h
≤ 300 t	3%	3%	4%	5%
301-500 t	4%	4%	5%	6%
501-700 t	4%	5%	6%	7%
> 700 t	5%	5%	6%	7%

– Un mínimo de al menos 3,5 minutos/100 km

B) TRENES DE VIAJEROS AUTOMOTORES

– Un mínimo de 1 minuto/100 km mayorado en base al siguiente criterio

V. límite	141-160 km/h	161-200 km/h	201-250 km/h	>250 km/h
	3%	4%	5%	6%
				7%

– En líneas de alta velocidad donde solo circulen ramas autopropulsadas, el porcentaje suplementario respecto al tiempo de recorrido puede variar entre el 3 y el 7% para $V > 200$ km/h

C) TRENES DE MERCANCIAS

– Para $V \leq 120$ km/h, una de las tres opciones siguientes:
1 minuto/100 km mayorado del 3%; 3 minutos/100 km; 4%

– Para $V > 120$ km/h, como en el apartado A

■ 1 min/100 km + X%·marcha base

Marcha tipo

- **Margen Suplementario:** A diferencia del Tiempo de recuperación regular no se calcula como un porcentaje del tiempo de viaje.
 - Se calcula como un intervalo fijo a añadir al tiempo de viaje en una determinada sección de línea.
 - En caso de tratarse de un margen debido a un nudo ferroviario, es deseable que no supere los 3 minutos.
 - Aplicable solamente a circunstancias no habituales de explotación
- **Tiempo de espera programado :** Se añade por razones de programación de horarios para:
 - Sincronizar los horarios de diferentes líneas de viajeros en puntos de intercambio.
 - Sincronizar la programación de expediciones en una programación a horario.
 - Esperar para llevar a cabo un cruce o un adelantamiento.

Libro de horarios/itinerarios



Dirección de Viajeros Urbanos e Interurbanos

EJEMPLO LIBRO HORARIO

12222.- REGIONAL				Tipo: 120				
Itinerario	St. Km	VME	Dependencia	Carr	Hora	Tiempo	Coste	Puede
	177.8		VIGO		19.42			
		95					6	
BAU cto	172.5		CHAPELA		19.48	2		
							2	
	171.0		CHAPELA-AGUJA KM. 171.0		19.52			
JBAB cto		85					5	
	166.8		REDONDELA		19.57	2		
							6	
	166.9		LOUREDO-VALOS		20.05			
		115					3	
	156.0		C. DE R.		20.08			
							3	66
	151.6		O PORRINO		20.12			
BAU cto				1			3	
	150.1	120	C. DE R.		20.15			
							3	
	145.4		AS GANDARAS (CGD)		20.18			
							3%	
	141.6		GUILLAREI-AG. KM. 141,6		20.21			
							1%	
	1.0	75	GUILLAREI-AG. KM. 0,9		20.23			
BAU cto							2	
	2.8		TUI		20.25			

12223.- REGIONAL				Tipo: 120				
Itinerario	St. Km	VME	Dependencia	Carr	Hora	Tiempo	Coste	Puede
	2.8		TUI		21.30			
BAU cto								2%
	0.9	75	GUILLAREI-AG. KM. 0,9		21.32			
								1%
	0.0		GUILLAREI-AG. KM. 141,6		21.34			
							3	
	145.4		AS GANDARAS (CGD)		21.37			
							3	
	150.1	120	C. DE R.		21.40			
BAU cto							2	
	151.6		O PORRINO		21.42			
								4%
	156.0		C. DE R.		21.45			
		115					2%	
	159.9		LOUREDO-VALOS		21.49			
							6	
	166.8		REDONDELA		21.56			
JBAB cto		85		1			4	
	171.0		CHAPELA-AGUJA KM. 171.0		22.00			
							3	
BAU cto	172.5		CHAPELA		22.03		3	
		95					6	
	177.8		VIGO		22.12			

Índice

- Dinámica longitudinal
- Cálculo de perfiles de velocidad
- Cálculo de tiempos de viaje
- **Cálculo de energía consumida**

Introducción

- El análisis del consumo de energía en los trenes en su movimiento puede realizarse de dos formas:
 - **Integrando** el consumo en cada instante (velocidad uniforme en horizontal, subida, bajada, reducción y aumento de velocidad, etc.)
 - Sirve para la toma de decisiones “instantáneas” (conducción económica, devolución a red, etc.)
 - No explica bien las razones del consumo
 - Analizado el **balance energético** del tren en el conjunto de un recorrido (Normalmente con origen y final en paradas y a la misma altitud)
 - Sirve para cálculos globales (diseño de infraestructura, de trenes o de servicios)
 - Explica bien desagregadas las causas del consumo (qué parte se debe a las curvas, a los túneles a las entradas de aire...)

Introducción

- Un ejemplo del primer caso se obtiene multiplicando, para el ejemplo visto anteriormente de cálculo de aceleración, la fuerza de tracción por la distancia:

v0 m/s	v1 m/s	vmedia m/s	vmedia km/h	Fadh daN	Resist daN	Futil daN	a m/s ²	tiempo s	longitud m	Energía N·m
0	1	0,5	1,8	61037	462,4	60575	1,860	0,54	0,27	164113
1	2	1,5	5,4	58953	475,7	58477	1,795	0,56	0,84	492583
2	3	2,5	9	57006	491,4	56514	1,735	0,58	1,44	821428
3	4	3,5	12,6	55183	509,5	54673	1,678	0,60	2,09	1150709
4	5,5	4,75	17,1	53062	535,4	52527	1,613	0,93	4,42	2344544
Total								3,20	9,05	4973377

v0 m/s	v1 m/s	vmedia m/s	vmedia km/h	Ftrac daN	Resist daN	Futil daN	aceleración m/s ²	tiempo s	longitud m	Energía N·m
5,5	10	7,75	27,9	36790	612,7	36177	1,111	4,05	31,40	11552520
10	15	12,5	45	22810	778,6	22031	0,676	7,39	92,41	21078135
15	20	17,5	63	16293	1010,9	15282	0,469	10,66	186,51	30387605
20	25	22,5	81	12672	1302,4	11370	0,349	14,33	322,31	40843513
25	27,78	26,39	95,004	10804	1570,2	9234	0,283	9,81	258,80	27961182
Total								46,23	891,44	131822956

- Según esto, la energía consumida de tracción en el trayecto es de $136,8 \cdot 10^6$ N·m, esto es 38 kWh .

Introducción

- La energía para **acelerar** el tren puede proceder:
 - del motor de tracción
 - de la pérdida de energía potencial (al bajar una pendiente).
- Cuando se reduce la **energía cinética** (se decelera el tren) la energía puede emplearse:
 - en vencer la resistencia al avance;
 - en subir una rampa;
 - disiparse en el freno (ésta es la que verdaderamente se pierde).

Introducción

- **Si el tren pudiera almacenar energía sin restricciones**, el consumo de energía en llantas sería sólo el necesario para vencer la resistencia al avance, porque:
 - Toda la energía consumida para acelerar el tren se almacenaría al reducir la velocidad.
 - La totalidad de la E_{pot} recibida en las subidas se podría recuperar en las bajadas: no habría consumo neto de energía exterior por este concepto.
- **Si no se pudiese almacenar**, ni aprovechar nada de la E_{cin} ni de la E_{pot} , el consumo de energía de un tren sería:
 - energía para vencer la resistencia al avance (R_{av}) +
 - + energía para acelerarlo todas las veces en que deba aumentar su V +
 - + energía para subir todas las rampas del recorrido.

Introducción

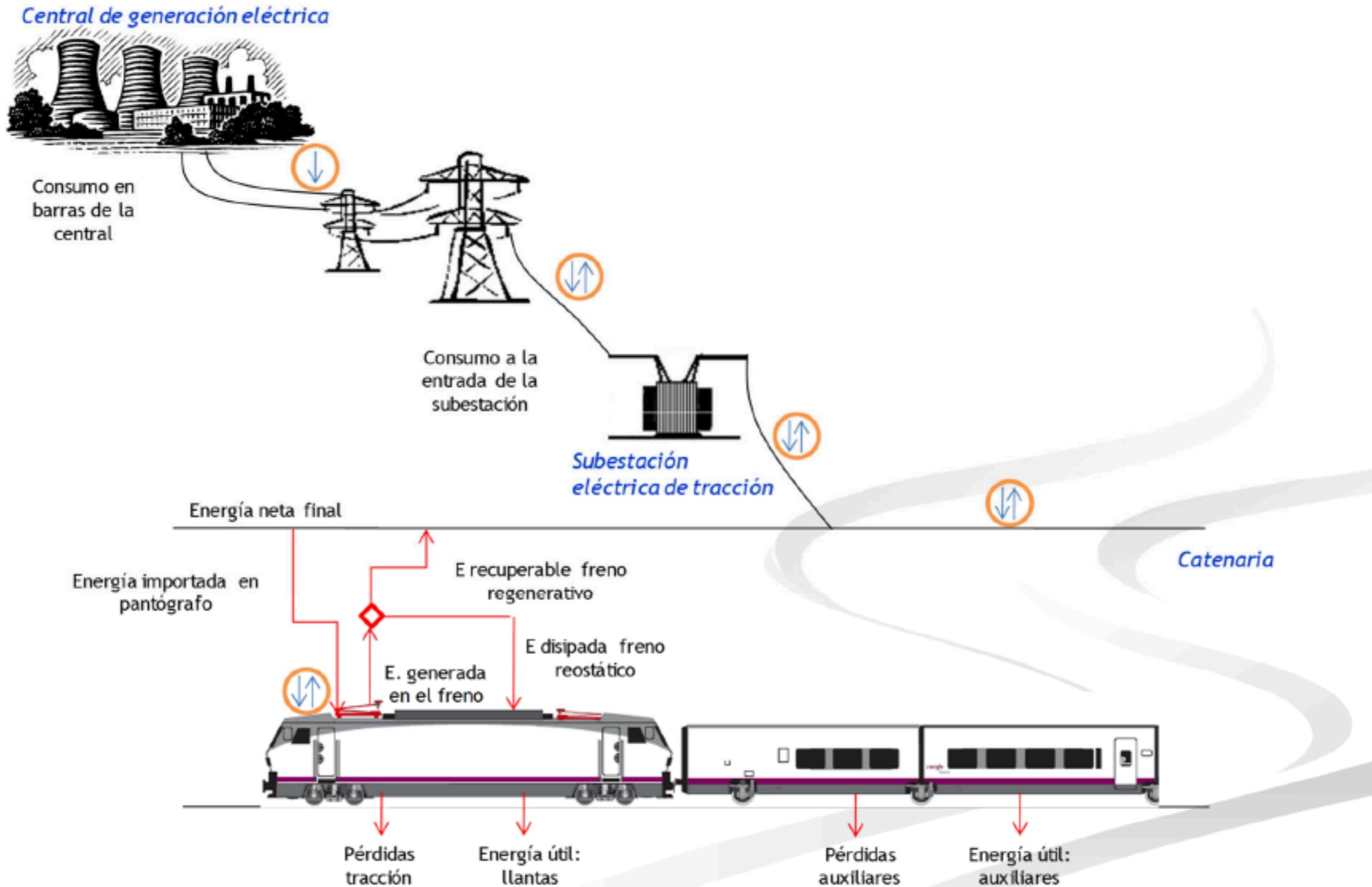
- La **energía** que **sale** del tren es la suma de:
 - La empleada para **vencer la resistencia al avance** (E_{ra}). Ésta, a su vez, se compone de:
 - Resistencia mecánica, incluyendo las de las curvas.
 - Resistencia a la entrada de aire en el vehículo
 - Resistencia de la aerodinámica al avance (presión y fricción)
 - La **disipada o regenerada en el freno** (E_{fr}). El uso del freno puede ser:
 - Para decelerar el tren (en una parada o en un punto de reducción de velocidad)
 - Para no rebasar la velocidad máxima en una pendiente muy pronunciada
 - La empleada para alimentar los **servicios auxiliares**.

Introducción

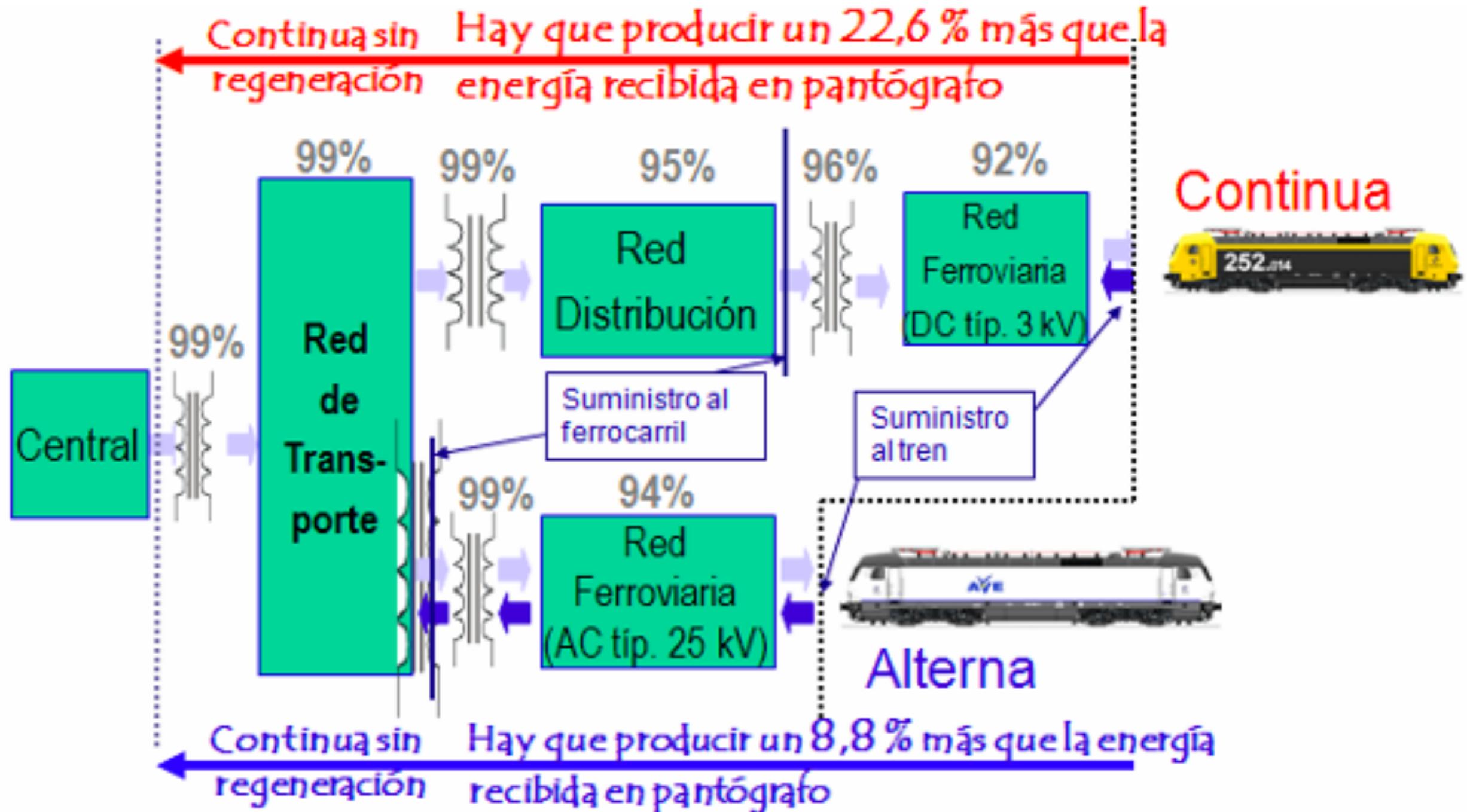
- A los consumos del vehículo (energía útil) hay que añadir:
 - Pérdidas por el **rendimiento de la locomotora** y de los equipos auxiliares....
 - Y se obtiene la **energía (final) en pantógrafo** (o boca de carga).
 - Pérdidas en el **transporte** y en la **conversión**.
 - Se obtiene la energía eléctrica comprada.
 - Pérdidas en el **proceso de producción** del vector energético.

Se obtiene así la **energía primaria consumida**.

Introducción



Pérdidas en transporte y conversión



Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica

- Energía por **resistencia mecánica al avance** en recta:

$$E_{rAvanceR}(kWh) = A(daN) \cdot L(km_{linea}) \cdot \frac{1}{360}$$

donde: $A(daN) = (M_{carg}(t) \cdot 0,25) + (N_{ejes} \cdot 7)$

- Energía por resistencia en curvas de radio R:

$$E_{rAvanceCurv}(kWh) = L(km_{linea}) \cdot M(t) \cdot a_{cur} \cdot \frac{1}{360}$$

donde:

$$a_{cur}(daN/t) = \frac{1}{L_{linea}(m)} \cdot \sum_c (l_c(m) \cdot \frac{600 \text{ o } 800}{R_c(m)})$$

Longitud del tramo considerado (m)				5000
Radio(m)	Longitud(m)	Lon. ac. (m)	Coef. Curva	
1.076	300	251	447,21	
863	100	201	349,02	
690	600	216	897,39	
500	250	258	919,20	
Coef. de curvas			0,523	

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica

- Energía por **entrada de aire**:

$$E_{entradaAir}(kWh) = B(daN/km/h) \cdot V(km/h) \cdot L_{linea}(km) \cdot \frac{1}{360}$$

$$\text{donde: } B(daN/km/h) = Q(m^3/s) \cdot \rho \cdot \frac{1}{36} \approx 0,034 \cdot Q(m^3/s)$$

EJEMPLO !!!!

En un recorrido de un 103 de Madrid a Barcelona (con consumo total de unos 11.561 kWh) la entrada de aire (99,70 m³/s) supone:

$$3,39 \text{ daN/(km/h)} \times 198 \text{ km/h} \times 620 \text{ km} \times 1/360 = 1.155 \text{ kWh (9,99\%)}$$

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica

- Energía para vencer **resistencia aerodinámica** a cielo abierto:

$$E_{aAbierto}(kWh) = C(daN/(km/h)^2) \cdot (V_{media}^2 + \sigma(V)^2)(km/h)^2 \cdot L_{linea}(km) \cdot \frac{1}{360}$$

donde:

$$C(daN/(km/h)^2) \cong c_p \cdot S_f(m^2) + c_f \cdot p_{moj}(m) \cdot L_{tren}(m)$$

- Energía para vencer resistencia aerodinámica adicional en túnel:

$$E_{tunel} = E_{aAbierto}(kWh) \cdot \frac{L_{tunel}}{L_{linea}} \cdot (T_f - 1)$$

	C _p	C _f
AV	0,00096	0,000021
Convencional	0,0022	0,0003

- Energía para vencer resistencia aerodinámica debida al viento exterior:

$$E_{viento} = C \cdot (V_{viento} \cdot 0,43)^2 \cdot L_{linea}(km) \cdot \frac{1}{360}$$

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica

- Energía cinética disipada en **reducciones de velocidad** (desde V_{op} a 0 km/h)

$$E_{cinRedV}(kWh) = N_{paradas} \cdot 0,5 \cdot (M_{carg} + M_{rot}) \cdot V_{op}^2 \cdot \frac{1}{3,6^3 \cdot 10^3}$$

- Y hay que restar la energía empleada para vencer la resistencia al avance en los tramos de deceleración

$$E_{ravn}(kWh) = N_{paradas} \cdot \left[\frac{A \cdot V_{op}^2}{2 \cdot \gamma} + \frac{B \cdot V_{op}^3}{3 \cdot \gamma} + \frac{C \cdot V_{op}^4}{4 \cdot \gamma} \right] \cdot \frac{1}{3,6^3 \cdot 10^5}$$

- Cada reducción de velocidad (debida al perfil de velocidades estáticas de la línea) que no sea para realizar una parada comercial o técnica, equivale a una “fracción de parada”

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica

- Cálculo de la “fracción de parada equivalente” por reducción de velocidad:
 - Si un tren cuya velocidad máxima está limitada por la infraestructura a 200 km/h realiza una reducción de velocidad de 160 km/h, el “Número de paradas equivalentes” de esta reducción es:

$$f_p = \frac{200^2 - 160^2}{200^2 - 0^2}$$

- El “Número de paradas” (a efectos de calcular la energía disipada por ellas) sería:

Nº Paradas comerciales + 1 (final) + Nº Paradas técnicas + Σ de fracciones de paradas equivalentes por reducción de velocidad

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

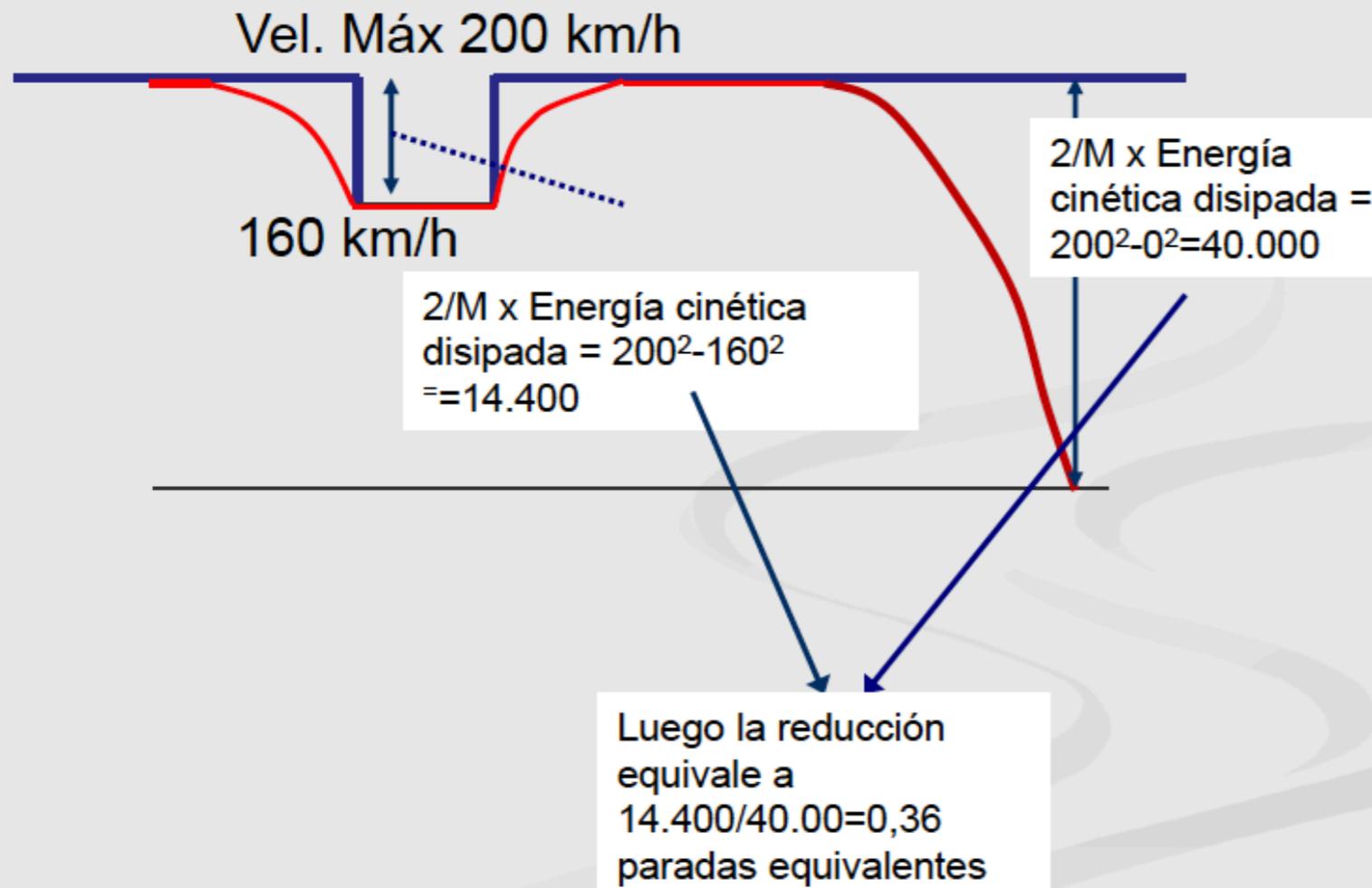
Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica



	km	Velocidades N (max 300km/h)	Reducciones (max300km/h)
Madrid P. Atocha	0,000	30	0,0000
	1,000	60	0,0000
	1,500	90	0,0000
	2,800	100	0,0000
	4,400	140	0,0000
	5,700	200	0,0000
	13,100	230	0,0000
	20,300	270	0,0000
	99,300	290	0,0000
	103,400	300	0,0000
	112,000	290	0,0656
	115,100	270	0,1244
	170,200	190	0,4089
Ciudad Real	170,500	190	0,0000
	173,100	240	0,0000
	178,100	270	0,0000
	206,800	200	0,3656
	208,800	80	0,3733
Puertollano	209,400	70	0,0167

Paradas equivalentes por reducción de velocidad

1,3544

Paradas comerciales equivalentes

0,4556

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica

- Energía potencial disipada por el **freno en pendientes**:

$$E_{potF}(kWh) = M_{carg}(t) \cdot 9,81 \cdot excPend \cdot L(km) \cdot \frac{1}{3600}$$

- **Pendiente de equilibrio:** Para una velocidad es aquella en la que la fuerza de la gravedad se iguala (en valor absoluto) a la fuerza resistente y el tren está en equilibrio.

$$excPend = \frac{\sum (p_{real} - p_{equilibrio}) \cdot l_{pendiente}}{L_{linea}}$$

- Si el valor anterior es positivo, es el exceso de pendiente. Si es negativo, se toma 0 como exceso de pendiente (no se frena)

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

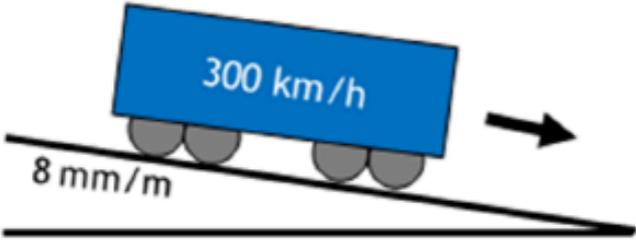
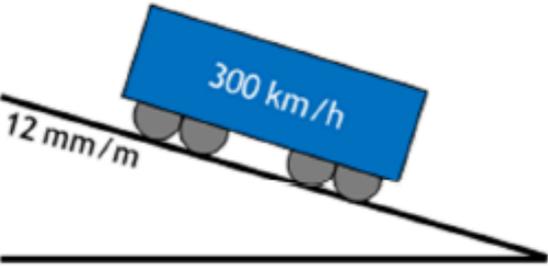
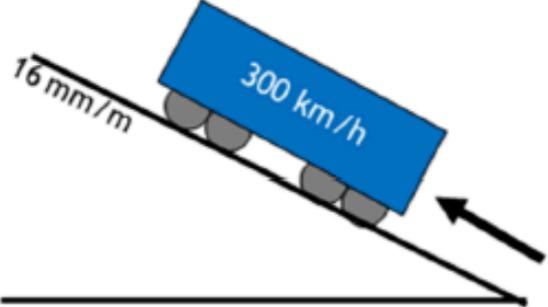
Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica

- Energía cinética disipada por el **freno en pendientes:**

	<p>❶ Si $p < pe_{V_{max}} = a + bV_{max} + cV_{max}^2$</p> <p>Es necesario traccionar para mantener V_{max}</p>
	<p>❷ Si $p = pe_{V_{max}} = a + bV_{max} + cV_{max}^2$</p> <p>Mantiene V_{max} sin traccionar ni frenar</p>
	<p>❸ Si $p > pe_{V_{max}} = a + bV_{max} + cV_{max}^2$</p> <p>Es necesario frenar para no rebasar V_{max}. → Entonces se pierde energía</p>

Pendiente de equilibrio

-9,875

km inicio	Valor (mm)
0,000	-1,46
0,266	-2,99
0,505	-0,59
0,556	-8,05
0,826	-14,02
1,113	-9,99
1,388	-10,05
1,755	-7,71
1,815	-10,09
1,920	-12,36
1,985	-8,83
2,472	-9,19
3,823	-1,13
4,097	-11,99
4,546	11,7
5,075	-6,14
5,756	9,17
6,122	-12,46

Exceso de altura (mm/km)

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

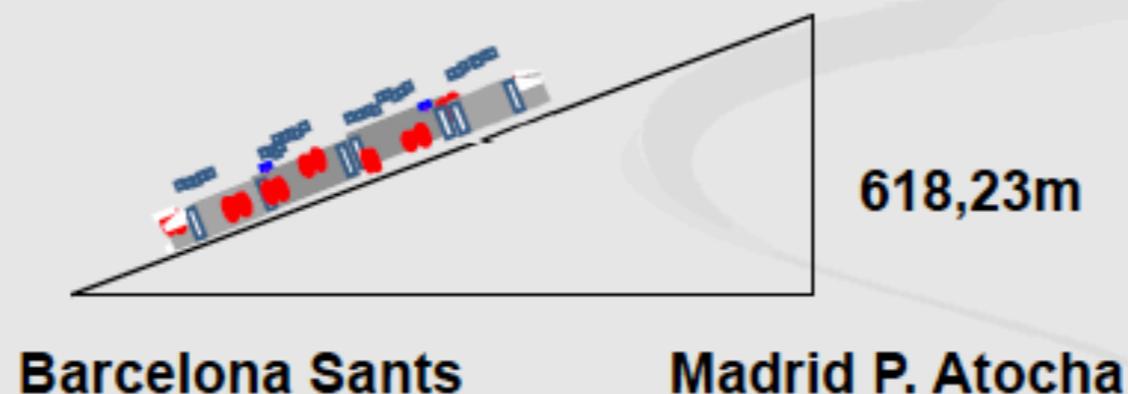
Entrada de aire

Aerodinámica

- **Energía potencial** consumida por la diferencia de altitud en los extremos:

$$E_{potExt}(kWh) = M_{carg}(t) \cdot 9,81 \cdot difAlturas(m) \cdot \frac{1}{3600}$$

Por ejemplo: para un tren de 360 toneladas que realiza el trayecto Barcelona-Madrid



La energía potencial absorbida para subir es **606,48 kWh (5,2%)**

REGLA APROXIMADA: Un tren medio de 360 t, necesita aproximadamente 1 kWh por cada metro que sube.

Energía que sale del tren

Energía que sale del tren

Resistencia al avance

Freno

Servicios auxiliares

Mecánica y en curvas

Entrada de aire

Aerodinámica

- Energía consumida por los **auxiliares técnicos**:

$$E_{auxTecnicos} = pot_{AuxTec} \cdot T_{viaje} \cdot 0,7$$

- Energía consumida por los **auxiliares comerciales**:

$$E_{auxcom} = [0,3 \text{ a } 0,45] \cdot S_{ub}(m^2) \cdot t_{trenencendido}(h)$$

- Ojo, el consumo en un recorrido, disminuye con la velocidad.
- Ejemplo: Supongamos que en un tren de 300 plazas el consumo es de 200 kWh/h.
 - Si el viaje de Madrid a Barcelona se hace en velocidad convencional en 5 horas, el consumo es de $200 \times 5 + 200 \times 0,75$ (rotación) = 1.150 kWh
 - Si el viaje se hace en alta velocidad (2,5 horas), el consumo pasa a ser de $200 \times 2,5 + 200 \times 0,75 = 650$ kWh

Ejemplo: línea de alta velocidad Madrid-Barcelona

		AVE MPA-BAR 300	AVE MPA-BAR 250	AVE MPA-BAR 120
Características de la línea				
Longitud	<i>km</i>	621,00	621,00	621,00
Longitud de túneles	<i>km</i>	47,45	47,45	47,45
Factor de túnel (Tf)		1,50	1,50	1,50
Tensión de alimentación	<i>kV</i>	2x25kV CA	2x25kV CA	2x25kV CA
Diferencia del altitud (Hd-Ho)	<i>m</i>	0,00	0,00	0,00
Coeficiente de curvas	<i>daN/t</i>	0,12	0,12	0,12
Exceso específico pendientes	<i>mm / km</i>	1240,97	1824,75	4510,86
Velocidad media del viento exterior	<i>km/h</i>	10	10	10
Características del servicio				
Velocidad máxima (sin paradas)	<i>km/h</i>	300,00	250,00	120,00
Tiempo de viaje en el recorrido	<i>min</i>	158,00	189,60	395,00
Velocidad media (sin paradas)	<i>km/h</i>	235,82	196,52	94,33
% aprovechamiento s/plazas estándar	<i>%</i>	0,65	0,65	0,65
Densidad de plazas y servicios		1,00	1,00	1,00
Paradas comerciales (sin contar la final)	<i>Nº</i>	0,00	0,00	0,00
Paradas comerciales equivalentes		1,00	1,00	1,00
Paradas técnicas programadas	<i>Nº</i>	0,00	0,00	0,00
Paradas técnicas no programadas	<i>Nº</i>	0,10	0,10	0,10
Paradas equivalentes por reducción de	<i>Nº</i>	0,10	0,00	0,00
Tiempo medio parada comercial	<i>min</i>	2,00	2,00	2,00
Velocidad origen de las paradas		258,28	215,24	103,31

Ejemplo: línea de alta velocidad Madrid-Barcelona

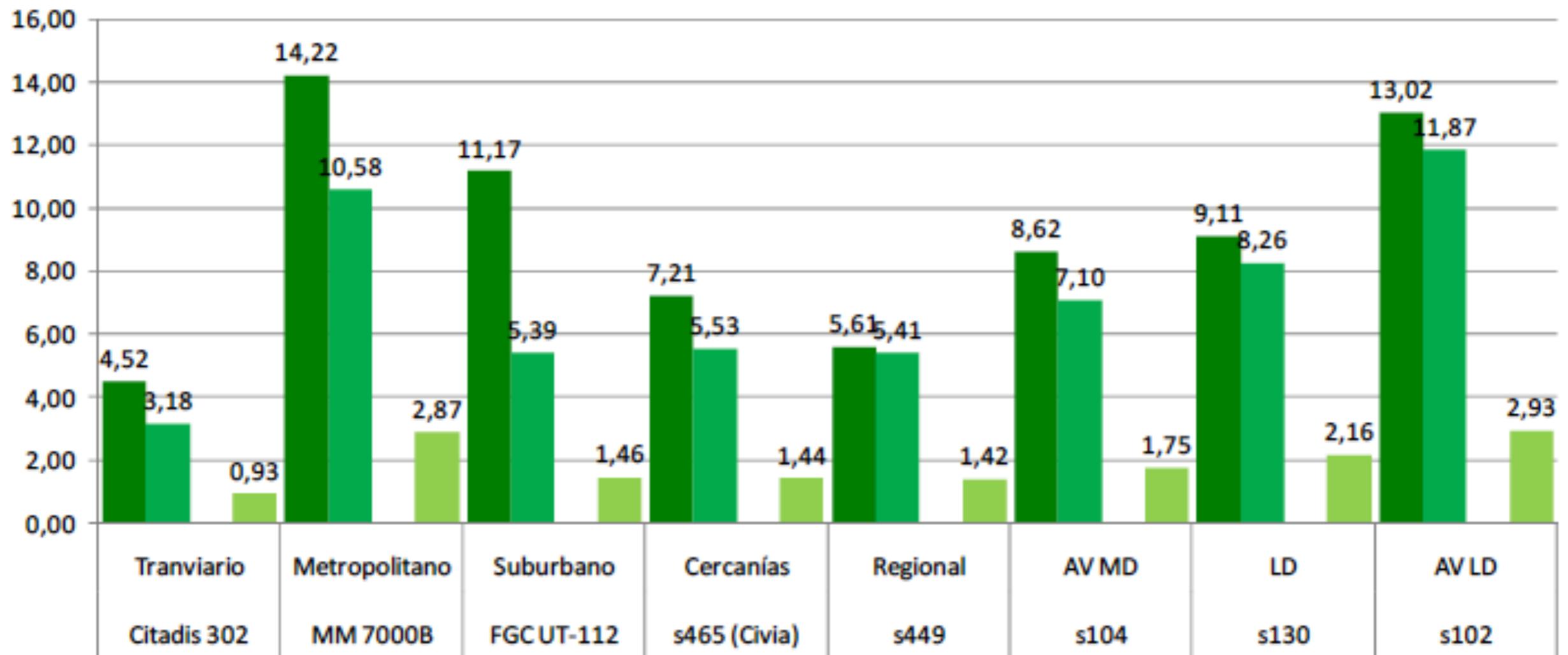
Denominación del tren		s103	s130	s465 (Civia)
Velocidad máxima	<i>km/h</i>	350	250	120
Potencia total del tren	<i>kW</i>	8800	4800	2200
Masa en vacío	<i>t</i>	425	312	157,3
Masas rotativas equivalentes	<i>t</i>	40,05	15,41	11,01
Tensión de funcionamiento	<i>kV</i>	2x25kV CA	2x25kV CA	2x25kV CA
Plazas reales	<i>plazas</i>	404	298	997
Coeficiente A (resistencia mecánica)	<i>daN</i>	337,0762	222,6758	126,55
Coeficiente B (resistencia entrada de aire)	<i>daN/(km/h)</i>	3,7603	2,4039	1,5314
Coeficiente C (resistencia aerodinámica)	<i>daN/(km/h)²</i>	0,056361	0,0482798	0,021696
Superficie útil bruta	<i>m²</i>	525,09	359,68	254,05
Tipo de motor		0 Asíncrono AC	Asíncrono AC	Asíncrono AC
Potencia de cada motor eléctrico de tracción	<i>kW</i>	550	632	320
Deceleración del freno de servicio	<i>m/s²</i>	0,54	0,6	0,6
Rendimiento cadena de tracción	<i>kWhs/kWhe</i>	0,87	0,87	0,87
Rendimiento de auxiliares	<i>kWhs/kWhe</i>	0,85	0,85	0,85
Procedencia de la alimentación de auxiliares		Catenaria	Catenaria	Catenaria
Tiene aire acondicionado?	<i>booleano</i>	1	1	1
Coeficiente de transmisión de calor (K)	<i>W/m² °C</i>	1,6	1,6	1,6
Consumo iluminación	<i>kWh/h m²</i>	0,05	0,05	0,05
Consumo climatización	<i>kWh/h m²</i>	0,2	0,2	0,2
Potencia auxiliares técnicos	<i>kW</i>	50	50	50
Masa cargado	<i>toneladas</i>	446,008	327,496	209,144

Ejemplo: línea de alta velocidad Madrid-Barcelona

		AVE MPA-BAR 300	AVE MPA-BAR 250	AVE MPA-BAR 120
Consumo directo de energía final		s103	s130	s465 (Civia)
Energía para vencer resistencia mecánica al avance en recta	<i>kWh</i>	581,46	384,12	218,30
Energía para vencer la resistencia adicional al avance en curvas	<i>kWh</i>	88,94	65,31	41,71
Energía para vencer la resistencia de la entrada aire	<i>kWh</i>	1.529,67	814,91	249,19
Energía para vencer la resistencia aerodinámica en cielo abierto	<i>kWh</i>	6.485,83	3.858,24	399,47
Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica en túnel	<i>kWh</i>	247,78	147,40	15,26
Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica debida al viento exterior	<i>kWh</i>	1,80	1,54	0,69
Energía cinética	<i>kWh</i>	416,13	187,27	27,70
Energía cinética empleada en vencer la resistencia al avance	<i>kWh</i>	45,41	15,35	0,73
Energía cinética disipada en reducciones de velocidad (-empleada resistencia al avance) sin conducción económica	<i>kWh</i>	370,71	171,92	26,97
Energía potencial disipada en el freno en pendientes sin conducción económica	<i>kWh</i>	936,62	1.011,27	1.596,48
Energía potencial consumida por dif. de altitud entre extremos	<i>kWh</i>	0,00	0,00	0,00
Energía consumida por los aux. comerciales (iluminación)	<i>kWh</i>	69,14	56,83	83,62
Energía consumida por los aux. comerciales (climatización)	<i>kWh</i>	276,55	227,32	334,50
Energía consumida por los auxiliares técnicos	<i>kWh</i>	92,17	110,60	230,42
Energía (útil) consumida en llantas y auxiliares	<i>kWh</i>	10.680,65	6.849,46	3.196,61
Perdidas en la locomotora tracción (por rendimiento)	<i>kWh</i>	1.530,53	964,50	380,75
Pérdidas en la alimentación de auxiliares	<i>kWh</i>	77,27	69,66	114,45
Energía (final) importada en pantógrafo (o boca entrada depósito gasóleo)	<i>kWh</i>	12.288,45	7.883,61	3.691,80

Consumo energético

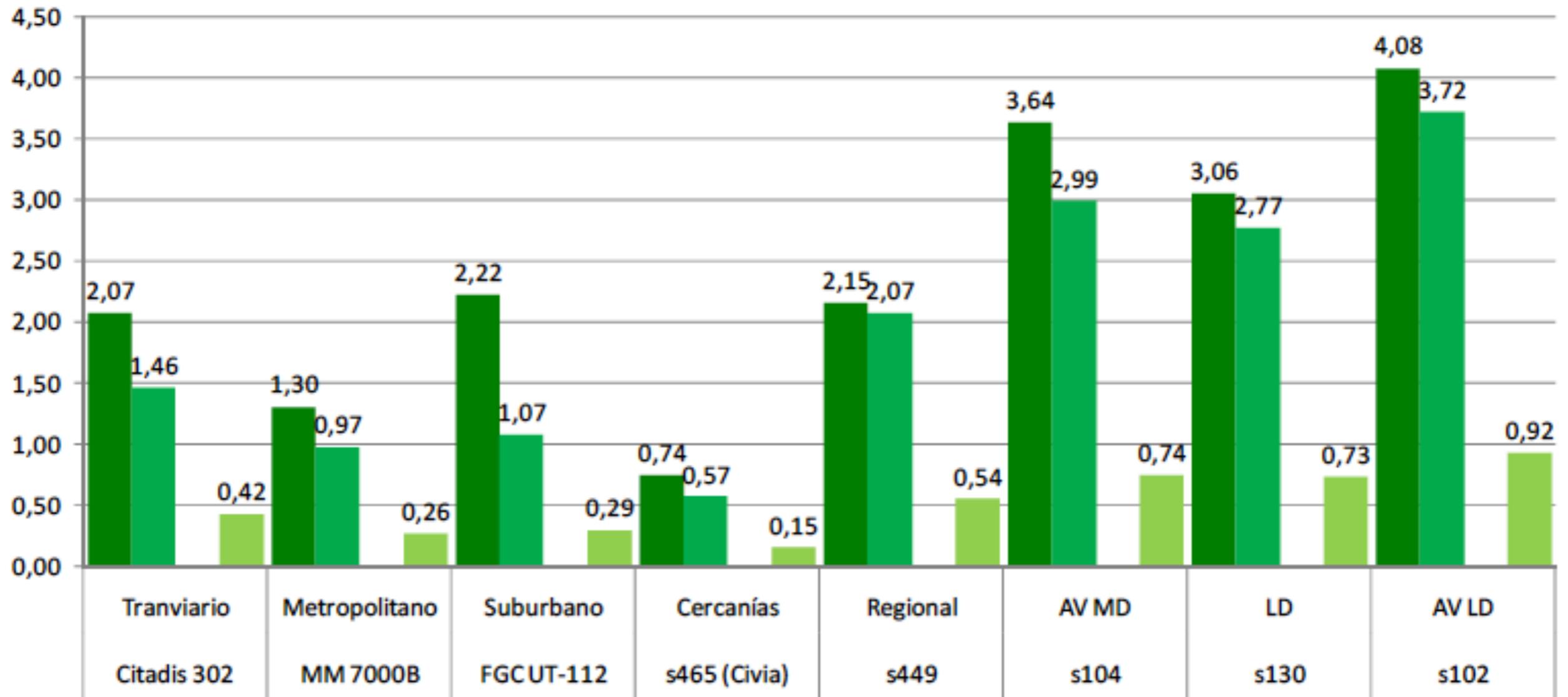
Consumo y emisiones por tren y kilómetro



- Energía importada en pantógrafo (o boca entrada depósito gasóleo) kWh / km
- Consumo neto en pantógrafo (E) o boca gasóleo (D) (energía neta final) kWh / km
- Emisiones de CO2 kgCO2 / km

Consumo energético

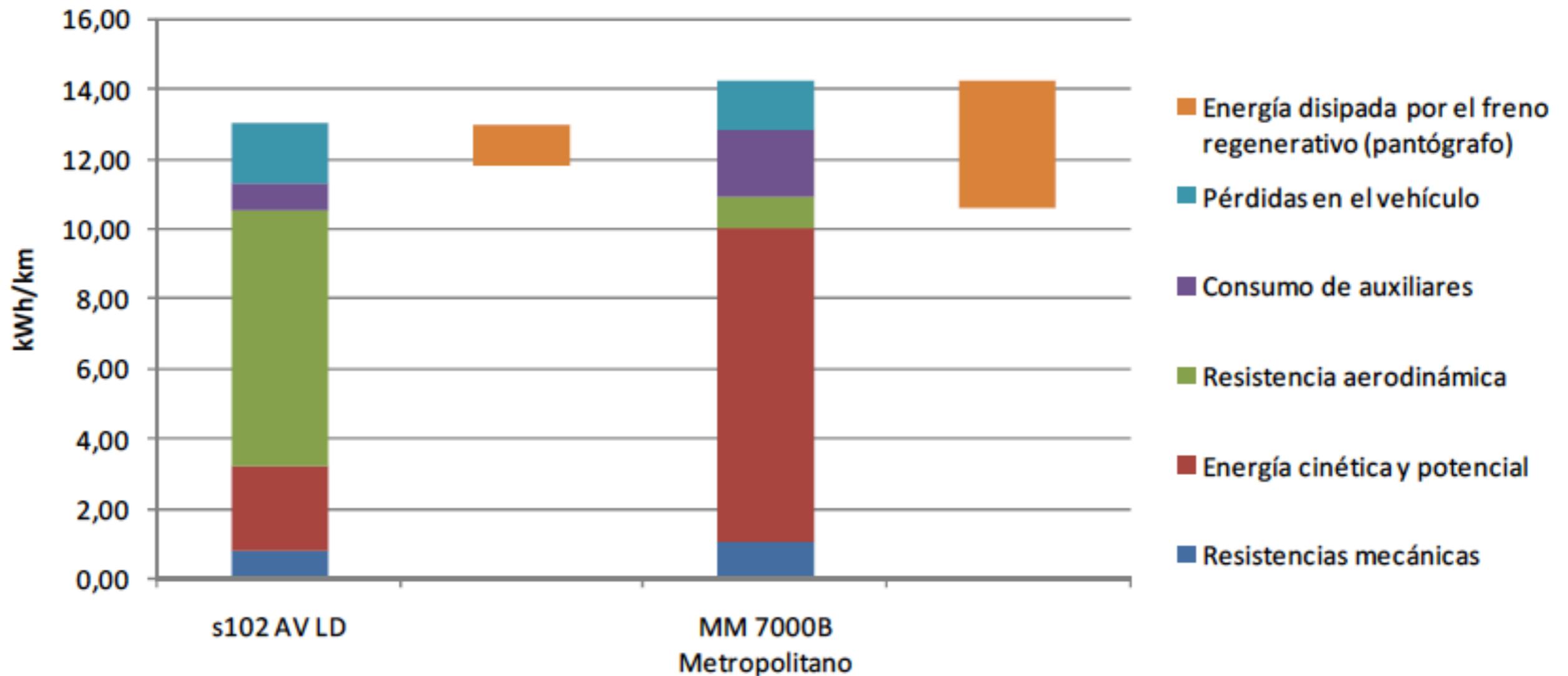
Consumo y emisiones por plaza real a los 100 km



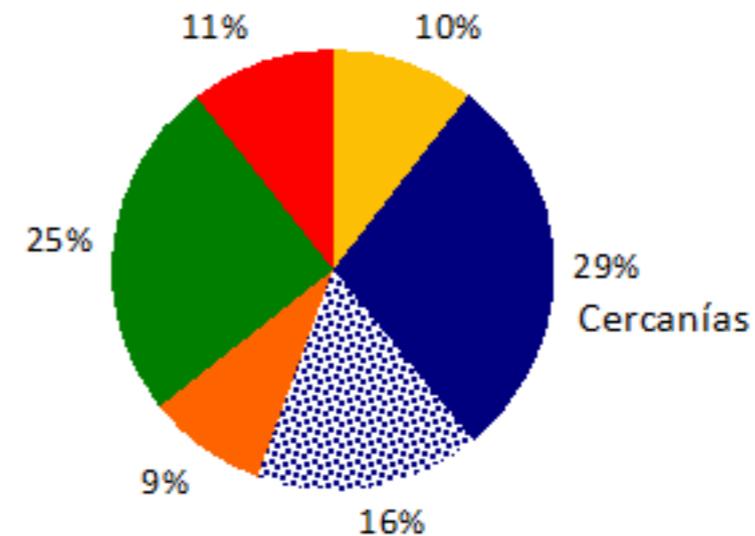
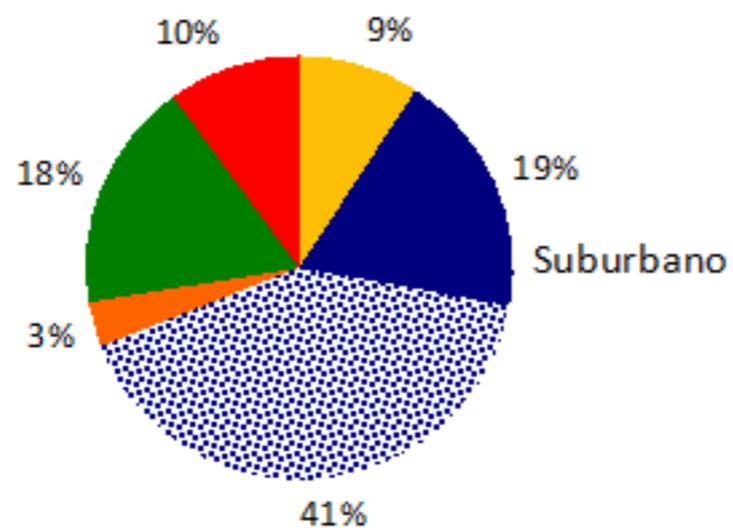
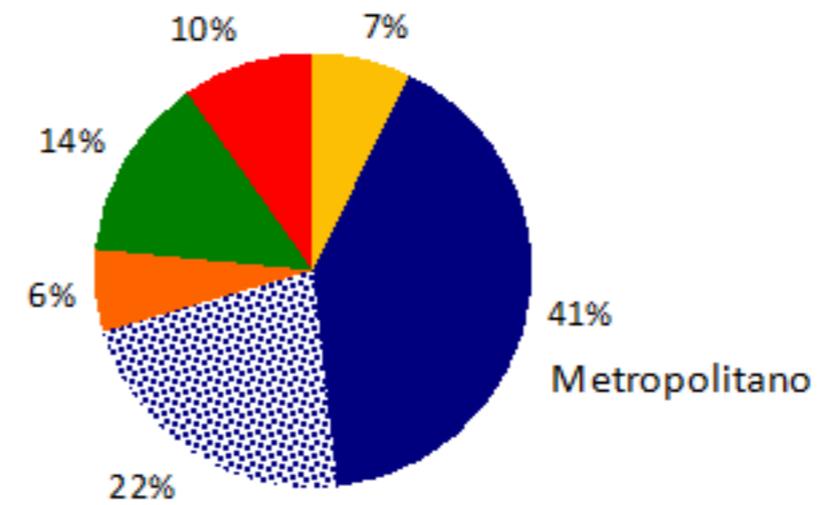
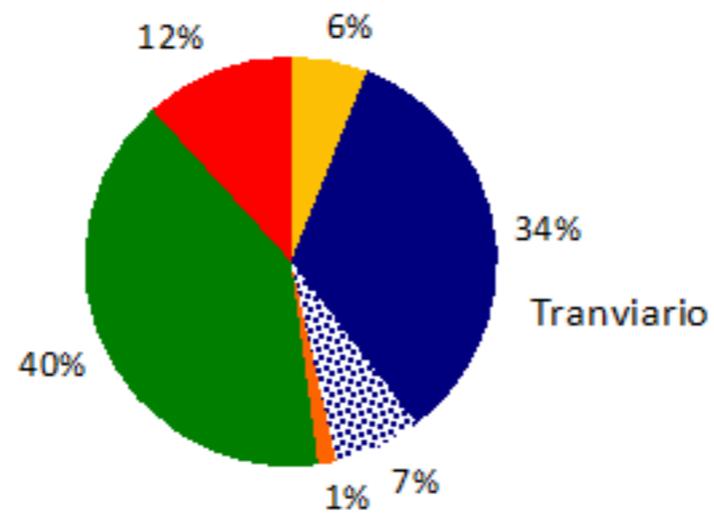
- Energía importada en pantógrafo (o boca entrada depósito gasóleo) kWh/pl. real · 100km
- Consumo neto en pantógrafo (E) o boca gasóleo (D) (energía neta final) kWh/pl. real · 100km
- Emisiones de CO2 kgCO2/m2 · 100km

Consumo energético

Desglose de la energía importada

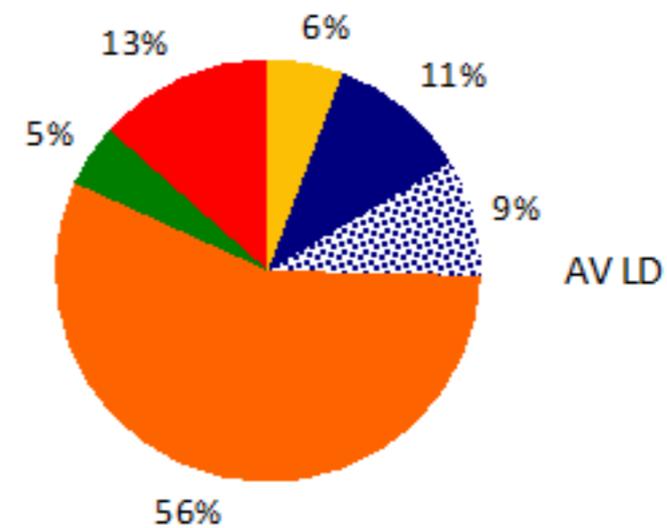
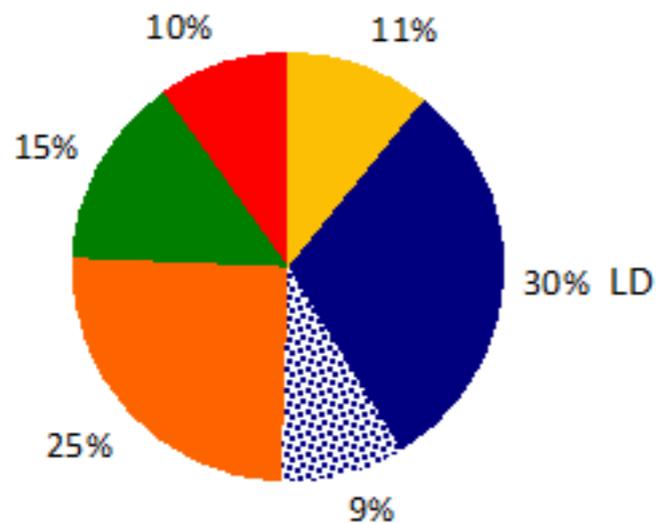
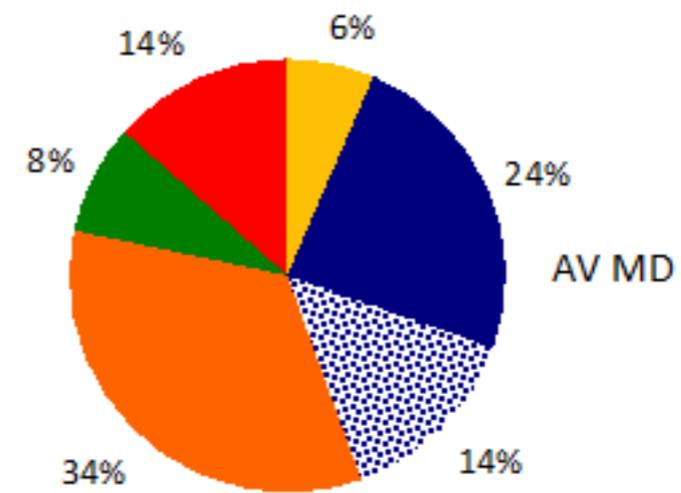
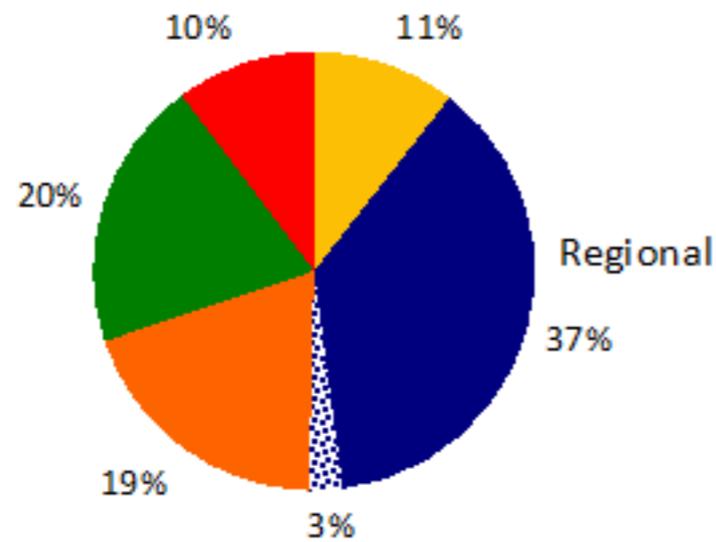


Consumo energético



- Resistencias mecánicas
- Energía disipada en el freno (no devuelta)
- ▨ Energía que se puede devolver por el freno regenerativo
- Resistencia aerodinámica
- Consumo de auxiliares

Consumo energético



- Resistencias mecánicas
- Energía disipada en el freno (no devuelta)
- Energía que se puede devolver por el freno regenerativo
- Resistencia aerodinámica
- Consumo de auxiliares

Consumo energético

- Existe una gran variabilidad en los valores de consumo y emisiones dependiendo del tipo de tren y servicio.
- Para poder comparar diferentes servicios es necesario homogenizar previamente la capacidad y la distancia recorrida por el vehículo.
- El peso de cada uno de los sumandos que componen el consumo del tren es diferente dependiendo del tren y el servicio.

Fuentes bibliográficas

- Díaz de Villegas, J.M. (2003) Ferrocarriles. Apuntes de clase. E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos Santander.
- García Álvarez, A. (2022) Manual de ferrocarriles. El sistema ferroviario español. Ed. Garceta.
- M. Melis y F. Gonzalez, Ferrocarriles metropolitanos. Tranvías, metros ligeros y metros convencionales. 3ªEd., Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., 2008.
- Proyecto ElecRail. [En línea]. Available: http://www.investigacion-ffe.es/elecrail_publicaciones.asp.
- Gonzalez Franco, I. (2021) Apuntes de Dinámica del ferrocarril: Esfuerzos de tracción y resistencias al avance. Modelos de Cálculo de Energía Consumida. Máster en Ingeniería Ferroviaria UC-Mafex.