

# Repasando conceptos sobre tracción mecánica - eléctrica

## Mecánica

Los términos usados para describir el rendimiento de las locomotoras, máximo esfuerzo de tracción, potencia sobre la vía, potencia continua son descriptos a continuación para observar cómo influyen en los tiempos de viaje y velocidades.

Unas pocas relaciones físicas básicas vinculan los diversos factores que influyen en la aceleración y la velocidad de un móvil, en este caso un tren. (locomotora + vagones)  
Las notas siguientes se explican las relaciones.

La aplicación de una fuerza sobre una masa hará que esta se acelere de acuerdo a una de la 2ª ley de Newton del movimiento. La relación es que la fuerza necesaria es el producto de la masa por tasa de aceleración.

$$F = \text{masa} * \text{aceleración} \quad (1)$$

Aquí es útil señalar que, en términos estrictamente científicos, el peso es la fuerza que actúa sobre una masa resultante de la influencia de la aceleración de la gravedad (que es constante para todos los objetos).

La energía consumida en el movimiento de un objeto sobre una distancia es el producto de la fuerza requerida y la distancia.

$$\text{Energía} = \text{Fuerza} * \text{distancia}$$

Ahora, la potencia es la tasa de uso de energía

$$\text{Potencia} = \text{Energía} / \text{tiempo}$$

Y la velocidad es la tasa de viajar una distancia

$$\text{Velocidad} = \text{distancia} / \text{tiempo}$$

Estas relaciones se pueden combinar por lo tanto:

$$\text{Potencia} = \text{Fuerza} * \text{velocidad} \quad (2)$$

## Unidades de medida

El sistema estándar de unidades en todo el mundo es el Sistema Internacional (SI), de la que muchas unidades son conocidos coloquialmente como "métrica". Antes de que este sistema se introdujo varias otras unidades que se utilizan, a menudo referido como

"inglés", donde los vínculos entre la sub-unidades no son tan matemáticamente sencilla (por ejemplo, pulgadas, yardas, millas).

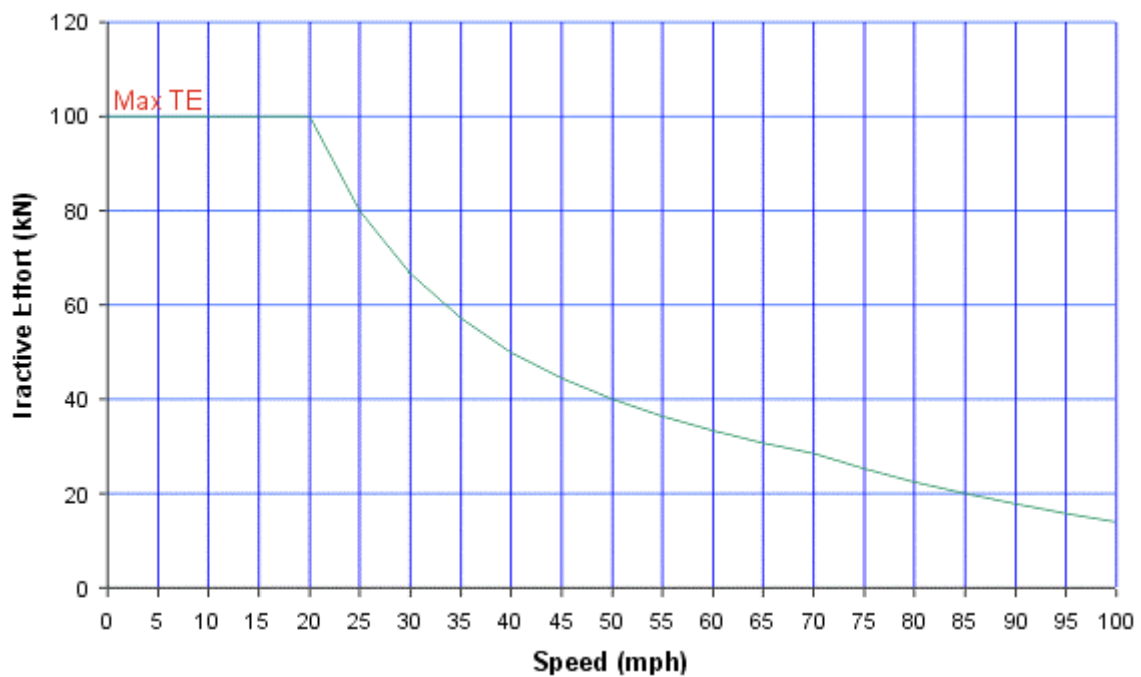
Magnitud	Sistema Internacional	Simbolo	Sistema inglés	Simbolo	Conversión Sistema Internacional (unidad)	Sistema inglés (unidad)
Fuerza	Newton	N	Pound force	lbf	1 N	0.22 lbf
Masa	Kilogram	kg	Pound	lb	1kg	2.2 lb
Distancia	Metro	m	Yard	yd	1 m	1.09 yd
Distancia	Kilometro	km	Mile	mile	1 km	0.62 mile
Tiempo	Segundo	s				
Velocidad	Metros por segundo	m/s	Miles per hour	mph	1 m/s	2.2 mph
Velocidad	Kilometros por hora	km/h	Miles per hour	mph	1 km/h	0.62 mph
Aceleración	Metros por segundo por segundo	m/s/s				
Energía	Joule	J				
Potencia	Watt	W				

## Esfuerzo de tracción

**Esfuerzo de tracción (TE)** es la definición para la fuerza aplicada sobre la vía por la rueda del tren para provocar el movimiento. La magnitud de esa fuerza está determinada por la característica de los equipos de potencia instalado en el tren y cómo se controla su aplicación.

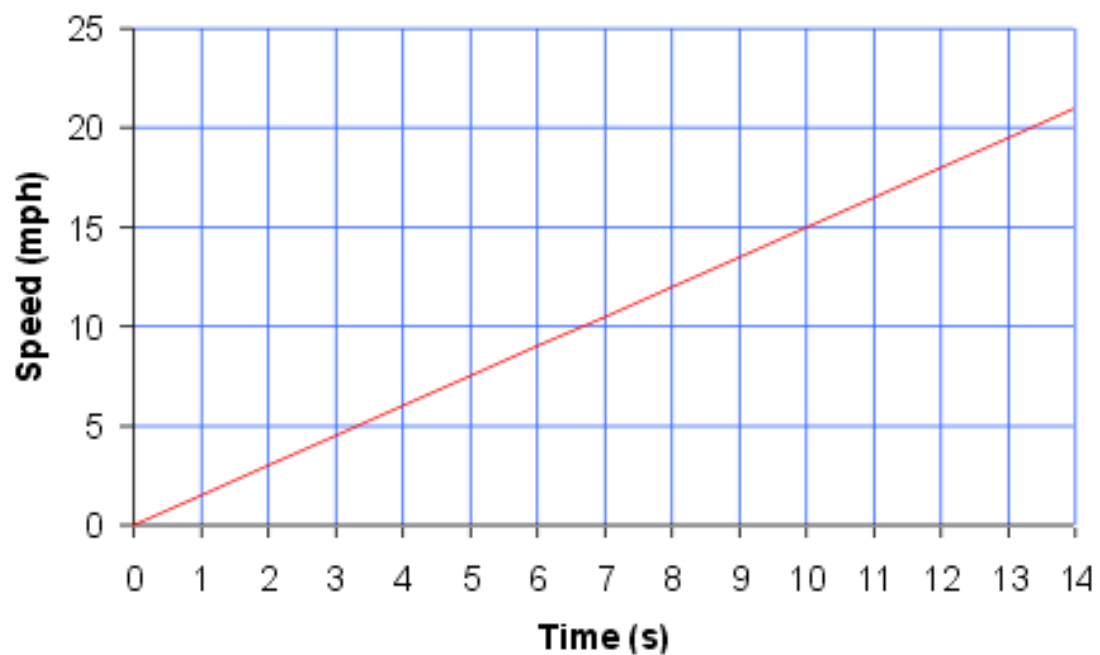
Por características propias del movimiento, este esfuerzo de tracción no es constante en todo el rango de velocidades, la mayoría de las unidades de tracción tienen una característica parecida a la mostrada en la figura 1.

Fig 1:



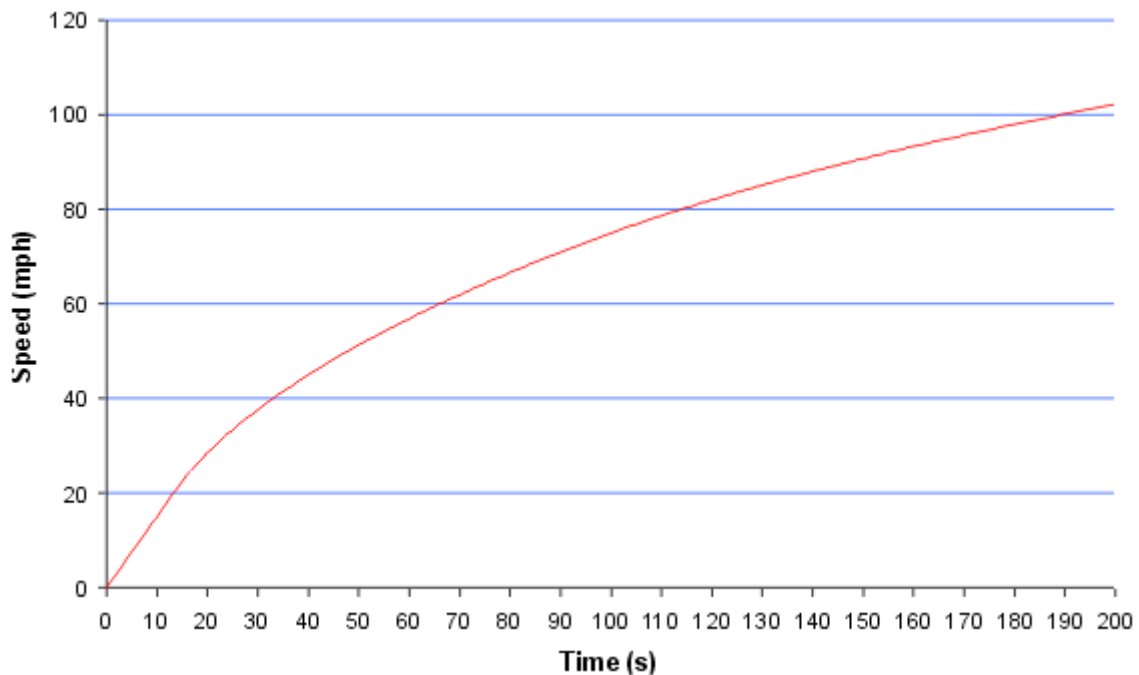
En el ejemplo mostrado la característica del TE es constante hasta 20 mph, por lo tanto, en este rango de velocidad, de la relación (1) anterior, la aceleración será constante. Como resultado de esto, la velocidad se incrementa uniformemente con el tiempo, como se muestra en la figura 2. Esta es la región de máximo esfuerzo de tracción.

Fig 2:



Por encima de esta velocidad, el TE decae, en consecuencia la aceleración comenzará a disminuir y la velocidad no se modifica tan rápido. El gráfico de velocidad con el tiempo, ahora comienza a curvarse como se muestra en la figura 3.

**Fig 3:**



### Potencia

La relación (2) anterior nos muestra que la energía es el producto de la fuerza por la velocidad. Ahora, si la fuerza, o TE permaneciera constante con velocidad creciente, el requisito de potencia seguirá aumentando en todo el rango de velocidad.

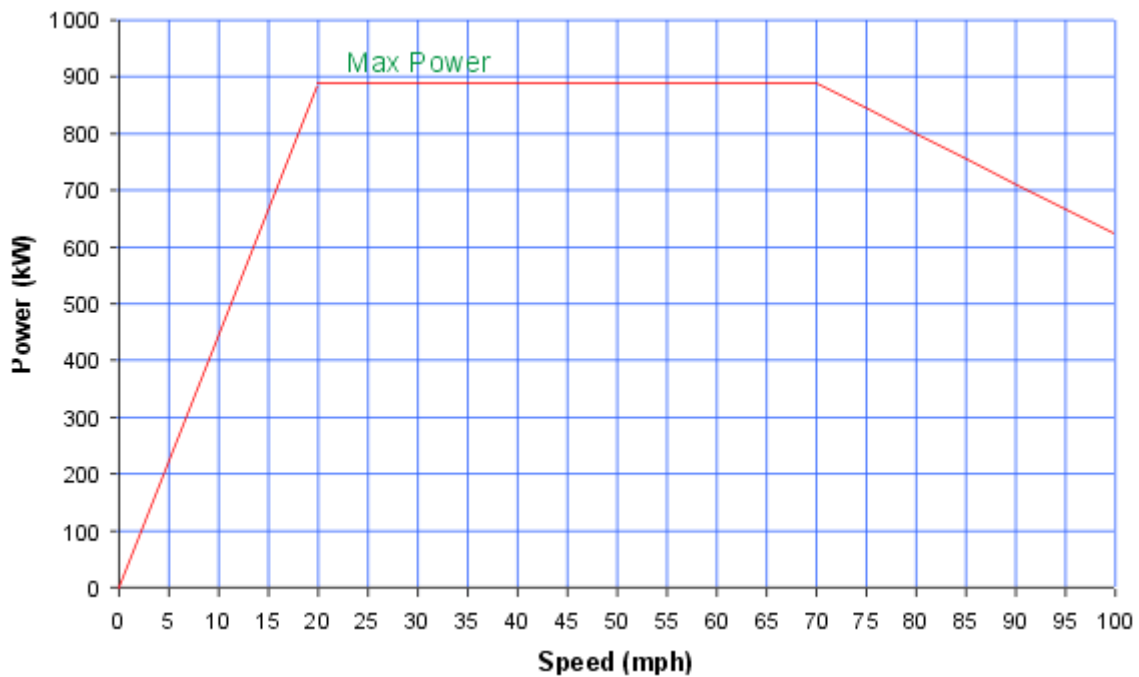
Prácticamente, esto no es posible ya que el equipo necesario se convierte en inviable por grande y costoso, por lo que, cuando se alcanza la capacidad máxima de potencia de los equipos, el TE debe comenzar a reducirse a medida que aumenta la velocidad para compensar la relación (a una potencia dada). Esto ocurre en el "codo" o punto a 20 mph en el ejemplo anterior de TE vs. Velocidad (Fig. 1).

Así, en el ejemplo dado, el TE máximo de la unidad es 100 kN, y por lo tanto la potencia máxima se puede calcular como sigue:

$$\text{Velocidad en m/s de la tabla anterior} = 20/2.2 = 9,1 \text{ m/s} = 20 \text{ mph}$$

$$\text{Potencia} = \text{fuerza} * \text{velocidad} = 100 \text{ KN} * 9,1 \text{ m/s} = 910 \text{ Kw}$$

Fig 4:



Como se trata de la potencia necesaria para mover realmente el tren, se define como la **“máxima potencia sobre el riel”**.

En realidad, la potencia total que se toma de la fuente de suministro de energía (catenaria, tercer riel electrificado, o tanque de combustible) será mayor que 910kW, debido a la necesidad de otras cargas auxiliares (para iluminación, calentamiento, enfriamiento, etc.) y debido a las pérdidas en el proceso de conversión, ya que nada es 100% eficiente.

Además, es muy poco probable que el equipo sea capaz de funcionar a este nivel de potencia de forma continua, y de hecho, para muchos tipos de servicio, sería ofrecer una pequeña ventaja en relación con el coste asociado. Por razones de las características del movimiento el equipo no seguirá la curva de potencia máxima a velocidad máxima, como se indica mediante la pendiente a partir de 70 mph en las figuras 1 y 4.

Esta **potencia nominal continua** puede derivar de un número de factores basados en torno a la característica de equipo e incluirán los supuestos de la proporción de tiempo a una demanda menor de esfuerzo de tracción.

### Resistencia a la tracción

Hay factores que dificultan el movimiento. Por ejemplo: La fricción está siempre presente donde a movimiento se refiere, y de hecho, hay una cierta cantidad mínima de esfuerzo que debe ser superada antes de que cualquier movimiento pueda tener lugar.

La resistencia del aire o “resistencia al avance” (drag), es otro factor importante que se vuelve cada vez más importante con la velocidad.

Estos factores se tienen en cuenta matemáticamente utilizando los resultados encontrados por la medición y la experiencia, dado que el cálculo teórico sería demasiado complejo.

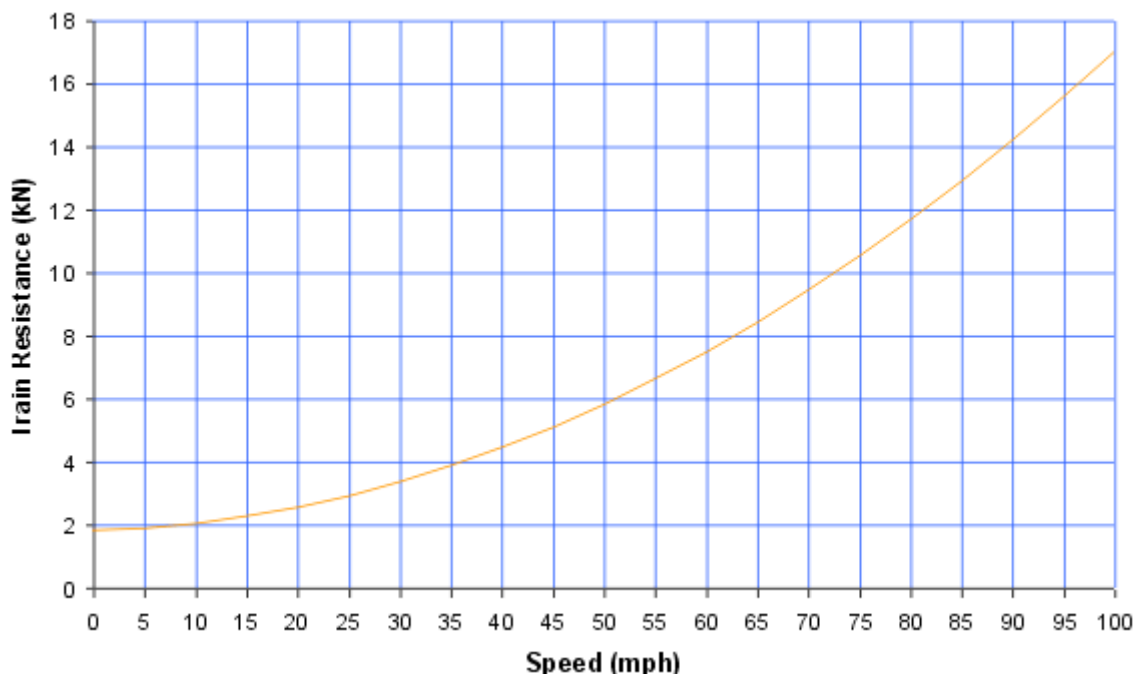
En general, la resistencia del móvil en movimiento se expresa como:

$$R = a + bv + cv^2 \quad \text{donde } v = \text{velocidad}$$

Los factores a, b y c caracterizan un tren particular, con “a” fricción estática mencionado anteriormente, “b” surge de otras consideraciones mecánicas, y “c” es debido a la resistencia del aire.

La resistencia del tren por lo general se ve algo como la que se muestra en la figura 5.

**Fig 5:**



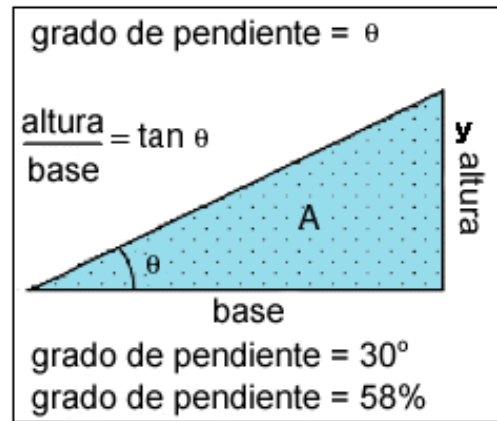
Hay otros factores a tener en cuenta que dependen de la ruta. El principal de ellos es el “gradiente” o pendiente.

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de pendiente.

Gradiente es el ángulo que forma el terreno respecto de un plano horizontal ideal. Puede medirse en porcentajes o grados sexagesimales.

Cuando la recta es creciente (al aumentar los valores de x aumentan los de y), su pendiente es positiva.

Cuando la recta es decreciente (al aumentar los valores de x disminuyen los de y), su pendiente es negativa.



$$(\text{Distancia en vertical} / \text{Distancia en horizontal}) 100 = \text{Gradiente} \%$$

¿Como se calcula el esfuerzo sobre una pendiente?

Si el tren se desplazaba verticalmente hacia arriba, se incurriría en el pleno efecto de la gravedad sobre el mismo. La aceleración debida a la gravedad es constante. Matemáticamente, se conoce como  $g$  y es de  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Por ejemplo para un tren de 150 toneladas, el esfuerzo gravitacional actuando sobre el es de:

$$\text{Fuerza} = \text{masa} * \text{aceleración} = 150 \times 1000 \times 9,81 = 1471\,500 \text{ N} = 1471,5 \text{ kN}$$

Este es el peso del tren

Si bien no es totalmente exacto, para encontrar el esfuerzo debido a la pendiente, basta con dividir el peso por el gradiente para obtener el valor.

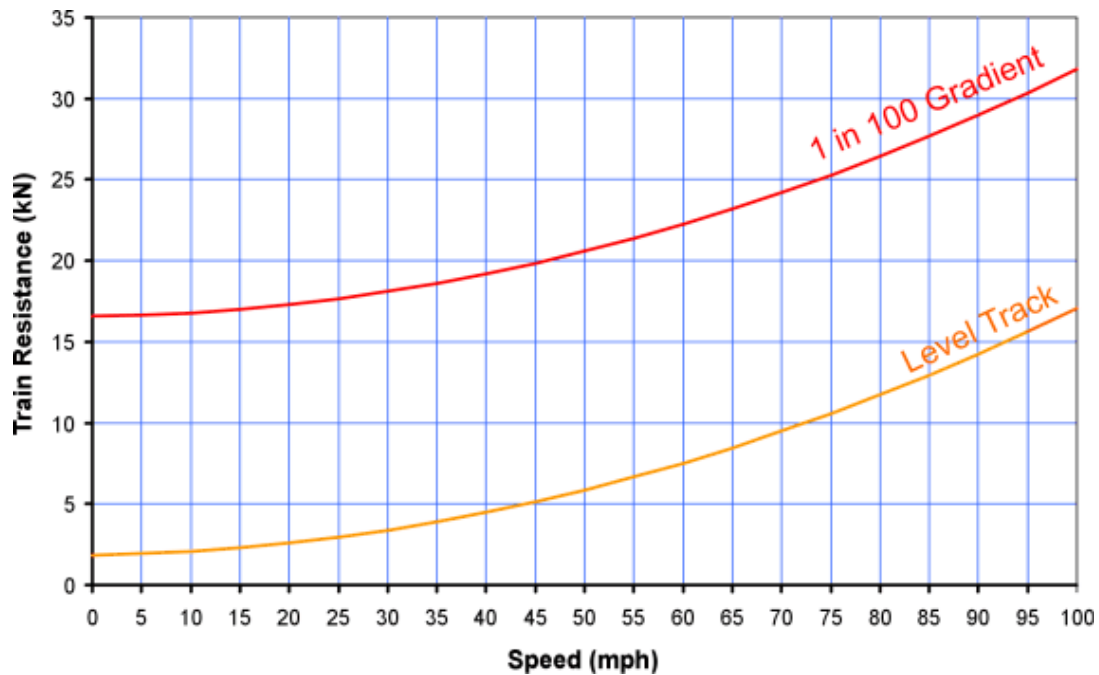
Por ejemplo, si el tren anterior sube un 1 en 200 (0,005) gradiente, el esfuerzo debido a la pendiente es:

$$1471,5 / 200 = 7,35 \text{ kN}$$

Esta resistencia es constante, independientemente de la velocidad y por lo tanto simplemente se suma a la resistencia al avance sobre el tren. Cuando el tren está transitando cuesta abajo (pendiente negativa), esta cifra se resta de la resistencia del tren, es decir, que asiste al movimiento del tren.

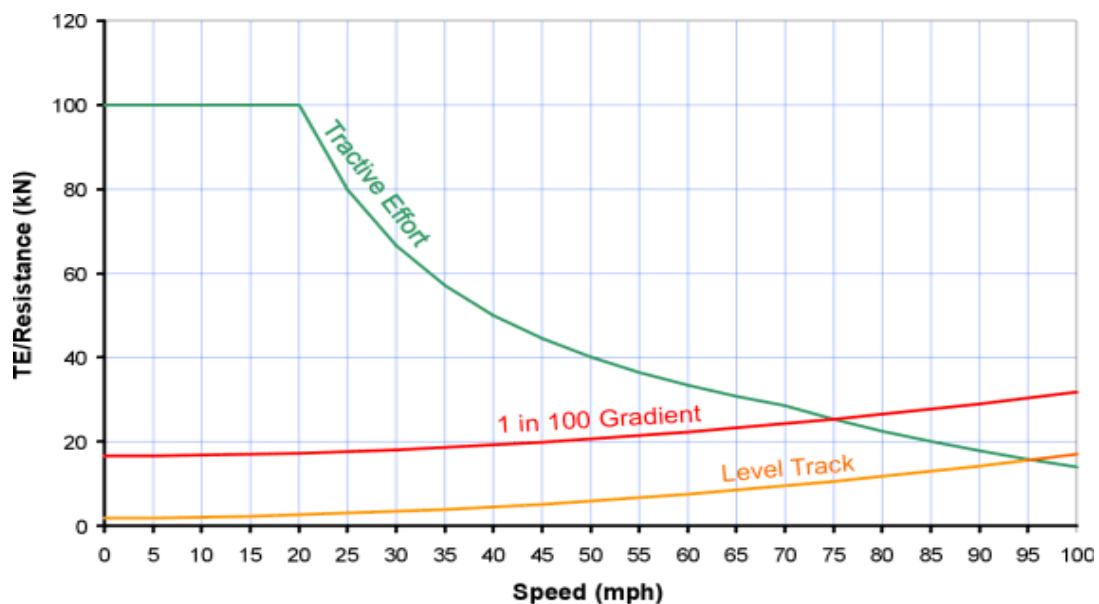
El efecto del gradiente se observa en la Fig. 6

Fig 6:



Ahora, ¿cómo estas fuerzas se ven en comparación con el esfuerzo de tracción desarrollado por el tren??

Fig 7:



Mientras el tren produce un Esfuerzo de Tracción mayor que la resistencia global del mismo, entonces se acelerará. El punto en el que las dos curvas se cruzan es cuando dejará de acelerar y se conoce como la velocidad de equilibrio y es la velocidad máxima que puede alcanzarse en una determinado trayecto.

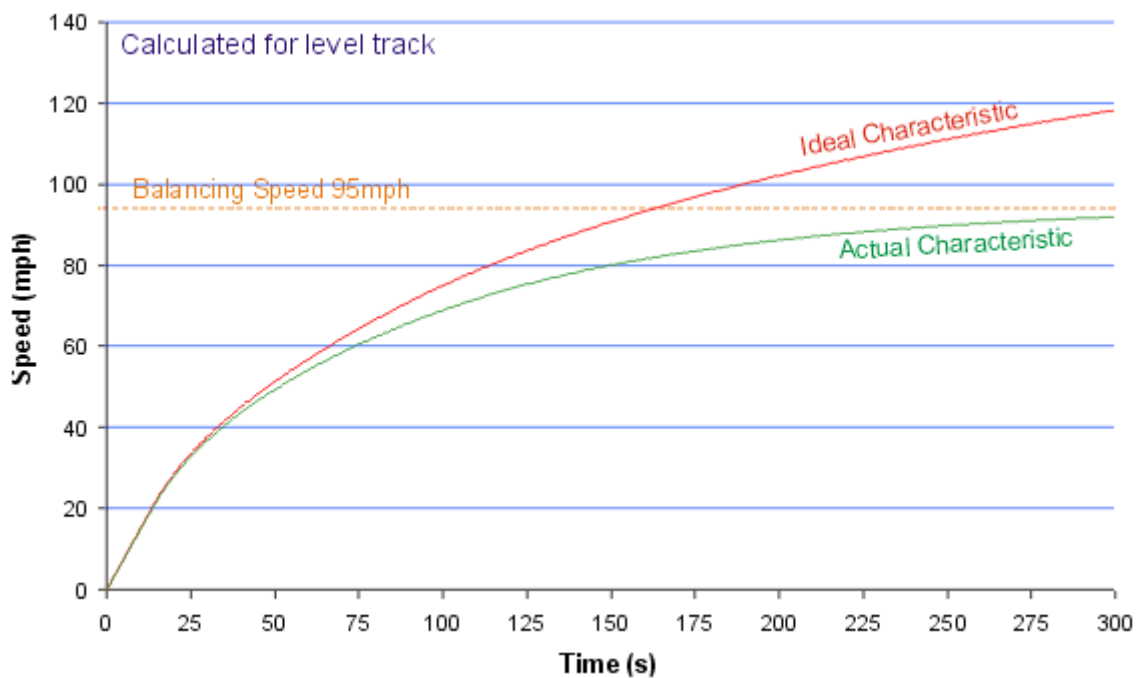
En este ejemplo, es de 95 kilómetros por hora a nivel, pero 75 millas por hora en un gradiente de 1 en 100.



La fuerza disponible para acelerar el tren es la diferencia entre la fuerza de tracción y la resistencia del tren. Por lo tanto, se comprenderá que una definición anterior acerca de una aceleración constante, cuando el TE es constante, no es estrictamente correcto. En la práctica la aceleración se reduce con el aumento de la resistencia al avance y a su vez esta aumenta con el incremento de la velocidad.

La siguiente curva muestra la construcción en velocidad que permite la resistencia del tren (característica real) en comparación con el teórico basado en la velocidad visto anteriormente en la Fig. 3 (característica ideal):

Fig 8:



#### Relación de engranajes (caja de velocidad)

En todos los debates anteriores, la relación de transmisión no se ha mencionado. Una caja de cambios une el eje motor de tracción al eje del tren con el fin de intensificar la velocidad de rotación desde motores funcionan mucho más rápido que los ejes! Como potencia = fuerza x velocidad, y suponiendo que no hay pérdidas en la caja de cambios, como la velocidad de rotación en el eje se reduce, el par en el eje se incrementa.

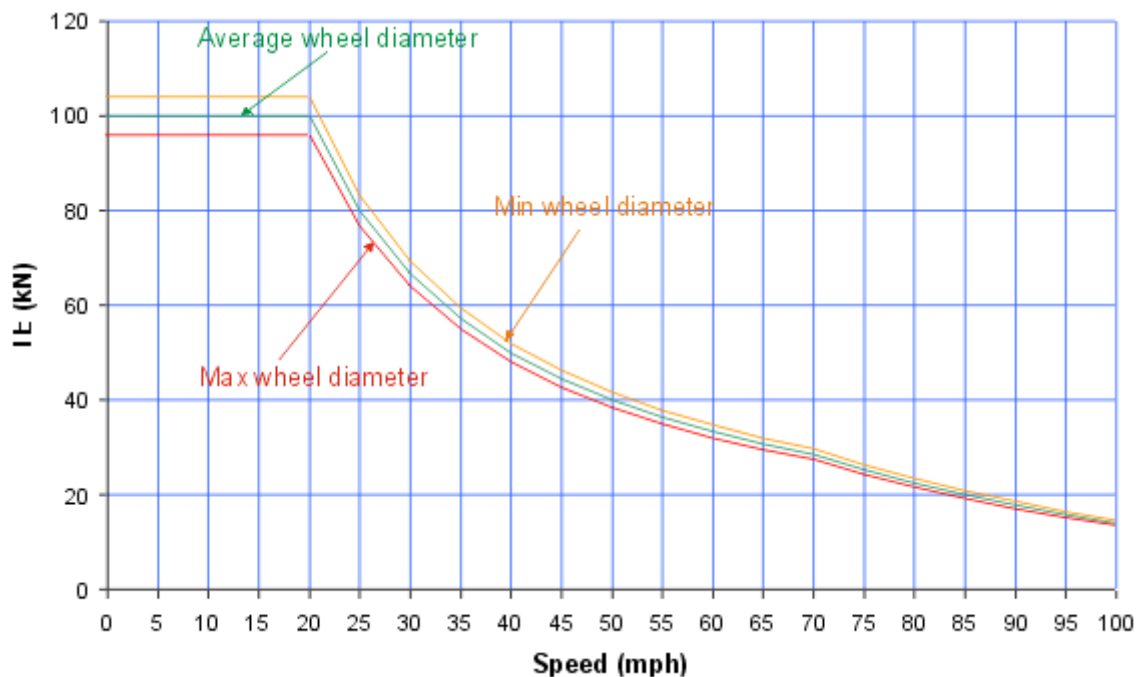
Por consiguiente, se modifica la relación de transmisión mecánica a menudo como un medio de obtener una característica de tracción diferente para adaptarse a los patrones alternativos de servicio sin otro cambio significativo del equipo de tracción.

### Diámetro de rueda

Es también digno de mención que este rendimiento no se mantiene durante toda la vida útil del tren, ya que, como las ruedas se desgastan, la característica de la fuerza de tracción va a cambiar. Un cambio en el diámetro de la rueda es efectivamente un cambio de relación de transmisión, y por consiguiente, que las ruedas se hacen más pequeños de la partida TE aumentará. Sin embargo, como esto también significa que la velocidad de eje se hace más alta para cualquier velocidad dada de tren, el TE a velocidades más altas se caerá más rápidamente. Cuando el funcionamiento de tren se está prediciendo, es normal asumir el promedio medio gastado diámetro de la rueda.

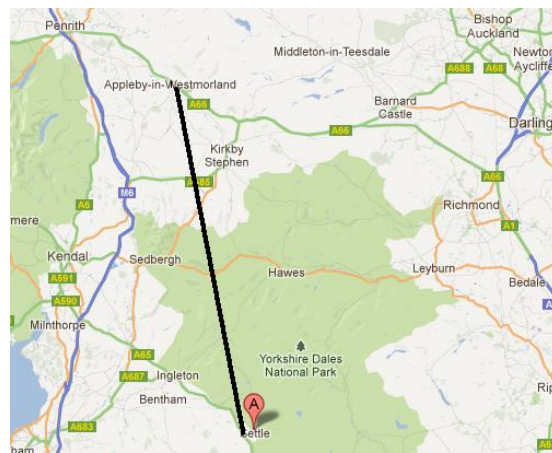
La figura 9 ilustra el efecto del diámetro de la rueda en la característica TE.

Fig 9:



Con toda esta información, por lo que es posible calcular el rendimiento de un tren en un trayecto dado.

## Ejemplo del calculo de la performance en un trayecto - Appleby a Settle



Para proporcionar un ejemplo de un cálculo que ilustra las diversas influencias, un tren con la característica anterior TE (basado en el promedio de diámetro de la rueda) se muestra corriendo sobre el Appleby a Settle sección de la ruta Settle y Carlisle (Fig. 10), con paradas en cada una de las estaciones intermedias. En este ejemplo, el límite de velocidad de la línea se ha ajustado a 85 mph falsamente entre Kirkby Stephen Garsdale y con el fin de ilustrar el efecto del gradiente de la velocidad (ver perfil expandido Fig. 11).

En los dos diagramas siguientes, la velocidad del tren se indica por la línea roja en negrita, con las restricciones de velocidad de línea indicada por la línea rosa. El perfil de gradiente se ilustra por la línea verde, y no a cualquier escala.

Fig 10:

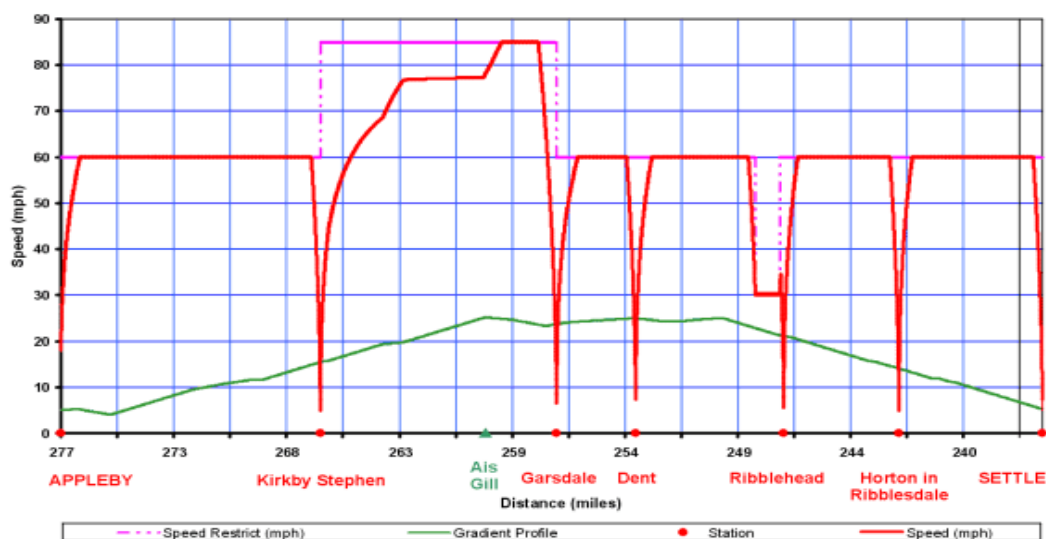
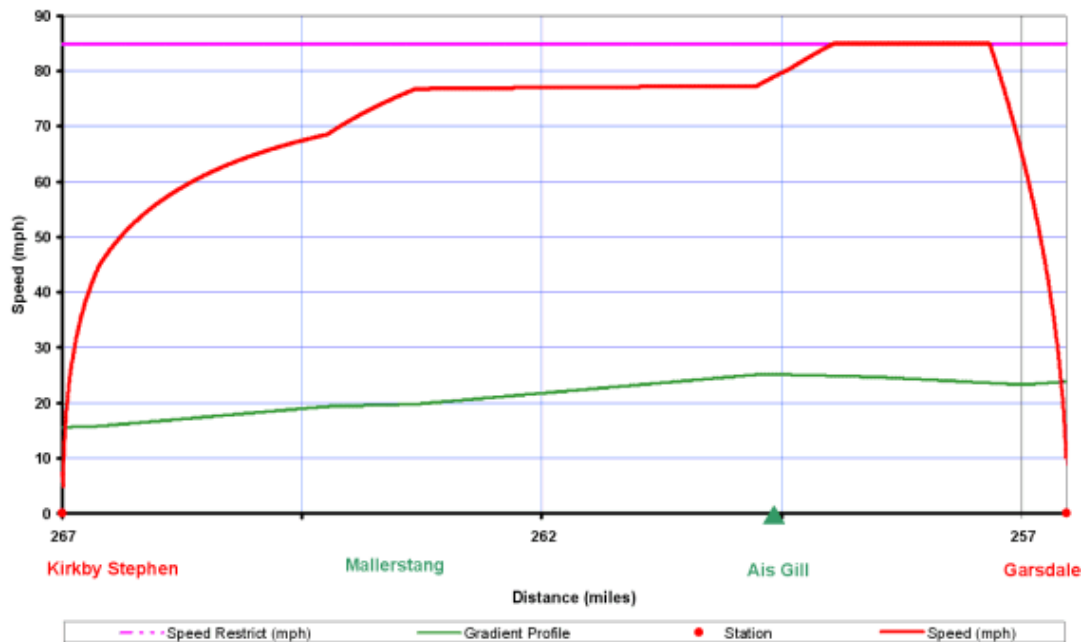


Fig 11:



El tren es capaz de alcanzar y mantener el límite de velocidad de 60 mph línea incluso cuando se sube el gradiente de 1 de cada 100 poco después de la salida de Appleby (Fig. 10). Al salir de Kirkby Stephen (Fig. 11) la velocidad aumenta con la curva clásico ilustrado en la figura 8, aunque el gradiente de 1 en 100, antes de golpear un corto tramo de subida menos arduo alrededor Mallerstang. En este punto, el tren acelera más (es decir, velocidad se acumula más rápidamente) a alrededor de 75 mph hasta que un estiramiento adicional de 1 en 100 se alcanza. Como se ha visto anteriormente en la Fig. 7, la velocidad de equilibrado en un gradiente de 75 mph y es por lo tanto la velocidad se mantiene constante hasta la cumbre en el AIS Gill y se alcanza un corto tramo de descenso se encuentra lo que permite aumentar la velocidad de la línea de límite 85 mph poco antes de frenado para Garsdale.

Consecuentemente con esa información, los tiempos de viaje se puede calcular, aunque los márgenes y previsiones por otros factores, tales como la técnica de conducción, curvatura de la vía y el viento deben ser incluidos.

### Nota

Todas las curvas anteriores han sido elaborados para los fines ilustrativos de este artículo.

La información del gradiente en el perfil de la ruta Settle y Carlisle se basa en información de " British Rail Main Line Gradient Profiles" - Ian Allan

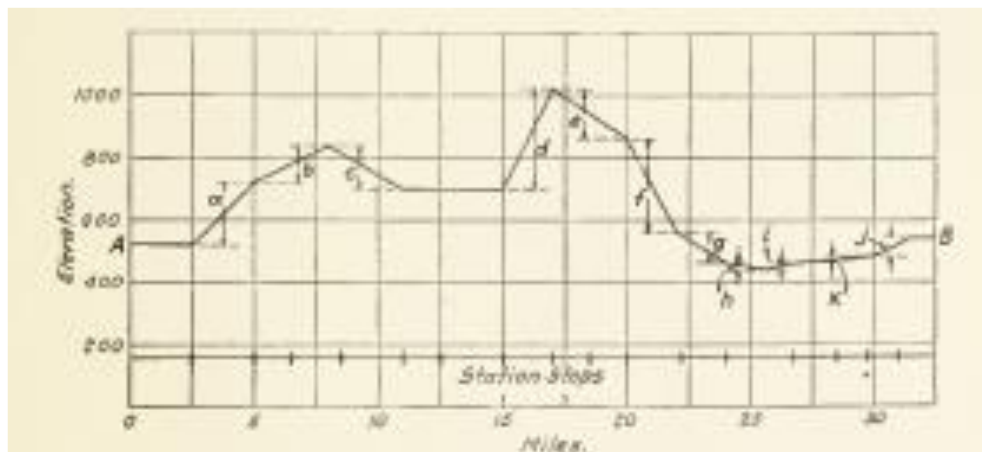
## Eléctrica

Traducido del libro: Railroad Electrification and the electric locomotive  
Arthur J. Manson Westinghouse Electric & Manufacturing Company - Año 1923

### La curva tiempo- velocidad

La potencia eléctrica requerida para hacer arrancar y mantener la velocidad de un tren es expresada en términos de “esfuerzo de tracción” en las llantas de accionamiento. Este esfuerzo de tracción es usado para superar ciertos factores que son adversos al movimiento, por ejemplo, la resistencia a la tracción, la aceleración, pendientes y resistencia en las curvas.

Supongamos que tenemos el siguiente sistema:  
El perfil de la línea donde opera el tren eléctrico



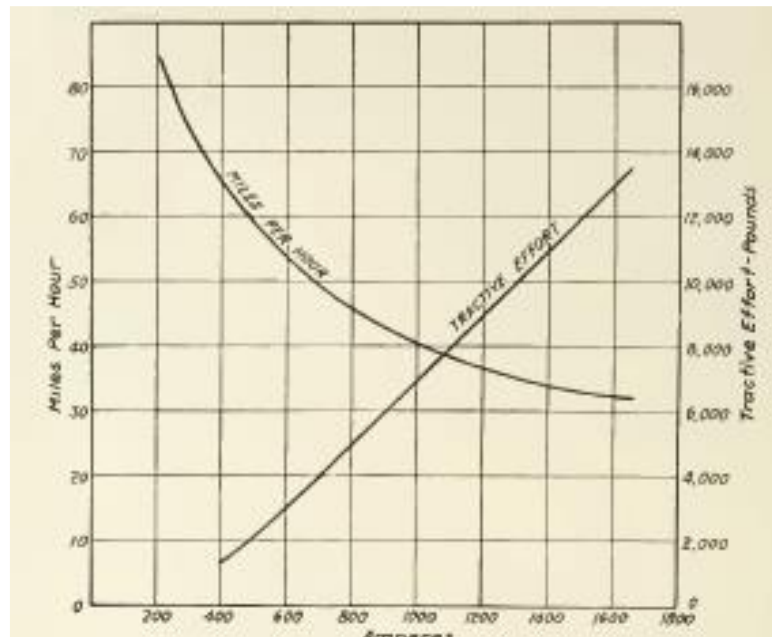
Longitud del tramo: 32.5 millas

Número de estaciones(paradas): 16

Tiempo de recorrido: 1 hora y 8 minutos

Tiempo de parada: 40 segundos

El tren consiste en una locomotora eléctrica y ocho vagones, cada vagón pesa 60 toneladas sin carga, el promedio de carga de pasajeros por vagón ser toma iguala 60. La locomotora pesa 120 toneladas. Esta equipada con cuatro motores que operan con 600 volts de corriente continúa, siendo la curva del motor la siguiente:



Los motores de corriente continua arrancan en conexión serie y finalizan en conexión shunt.

El tren opera arrancando desde el punto A y haciendo paradas en todas las estaciones. En total acelera y para 17 veces. Por lo tanto hay 17 ciclos de operación.

En términos de tracción eléctrica se denomina “corrida típica ó trayecto típico” a la siguiente distancia promedio:

$$32,5 \text{ millas} * 5280 \text{ pies/milla} / 17 = 10100 \text{ pies (3,030 Km)}$$

Siendo el tiempo promedio para cubrir esta distancia promedio:

$$60 \text{ seg/ min} * 68 \text{ min} / 17 = 240 \text{ segundos}$$

Una mirada sobre el perfil nos indica que los dos terminales de la línea están próximos en la misma altura ( A y B ). No obstante el trayecto indica que hay subidas y bajadas en el recorrido. Para determinar la energía aproximada consumida vamos a considerar una resistencia constante a la rodadura y determinaremos la “ pendiente equivalente ” de la siguiente manera:

$$\text{Pendiente equivalente (en \%)} = 100 * S / 2 * L$$

Siendo: S: la suma de todas las pendientes positivas en ambas direcciones

L: la longitud del trayecto recorrido

Referido a la figura, tenemos que:

$$(a+b+c+d+e+f+g+h+i+j+k) * 100 / (2 * 65 * 5280) =$$

$$(200+120+140+320+160+300+100+20+20+20+60) * 100 / 686400 = 0,213 \%$$

Se ha establecido un trayecto típico ( 10000 pies en 240 segundos), incluyendo la parada de 40 segundos y operando contra una pendiente equivalente de 0.213%.

El peso total del tren es:

$$8 \text{ coches} * 60 \text{ Ton / coche} = 480 \text{ Ton}$$

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ de pasajeros} &= 60 \text{ pass/ coche} * 8 \text{ coches} * ( 480 \text{ a } 140 \text{ libras/coche}) \\ &= 33,6 \text{ Ton} \end{aligned}$$

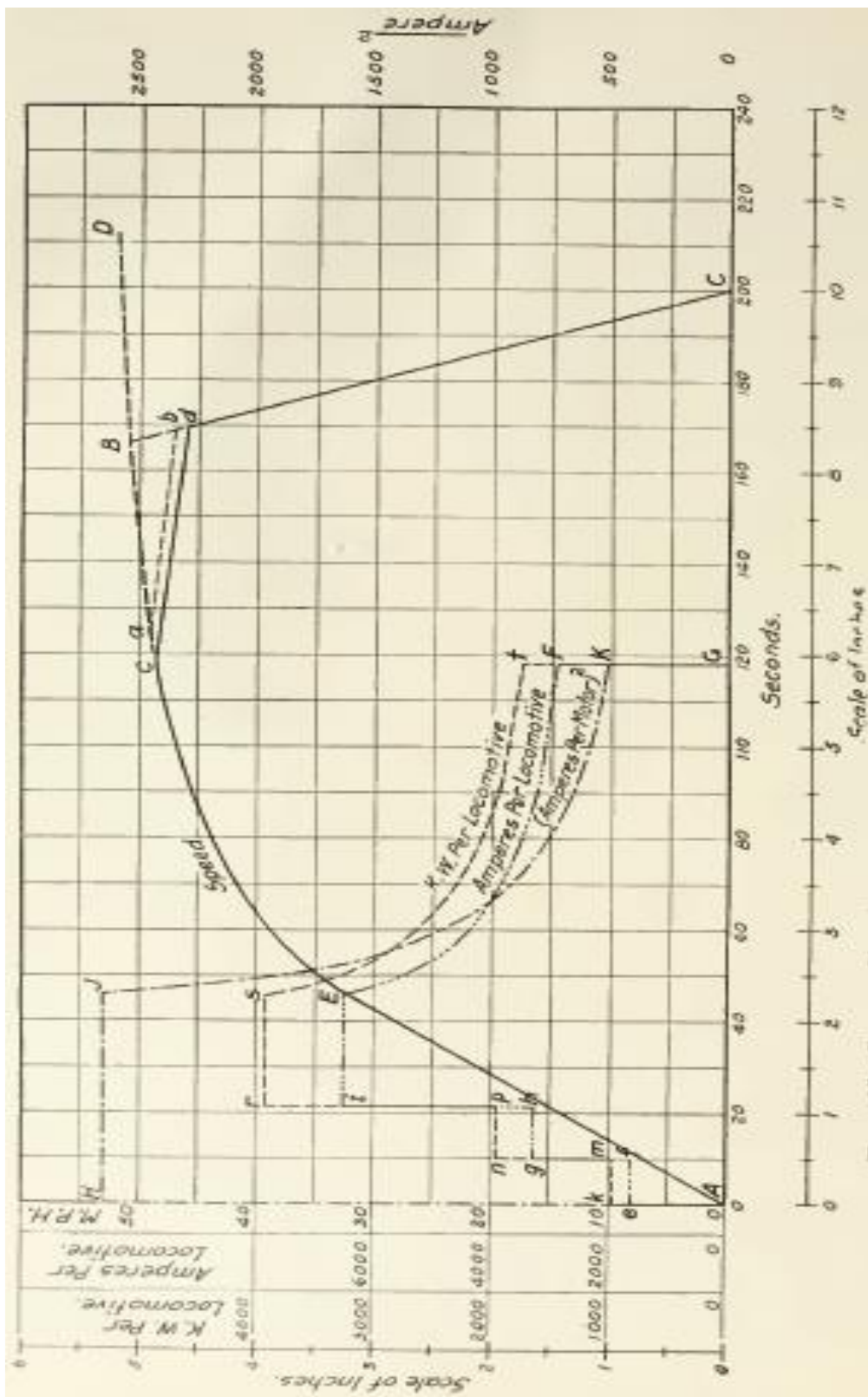
$$\text{Peso locomotora} = 120 \text{ Ton} \qquad \text{Total} = 633,6 \text{ Ton}$$

Considerando una aceleración de 0,7 millas por hora y por segundo.

$$\text{El esfuerzo de tracción requerido para acelerar es: } 0.7 * 100 * 633.6 = 44352 \text{ libras}$$

La velocidad que alcanza y que es el final de la aceleración en línea recta, se encuentra por ensayo.

La curva de velocidad – tiempo mostrada en la siguiente figura sigue una línea recta desde cero a 32 mph y luego se inclina hacia la horizontal, debido a que la aceleración disminuye y el tren se aproxima a una velocidad constante alrededor de 52 mph en este caso.





Cuando se trabaja con problemas de esta clase es muy útil conformar la siguiente tabla:

1	2	3	4	5	6
Miles Per Hour	Total Tractive Effort	Train Res.	Grade Res.	Net Tractive Effort	Accel.
0.....	13,320	1,555	685	11,090	0.7
32.....	13,320	1,555	685	11,090	0.7
33.....	12,710	1,625	685	10,410	0.647
35.....	10,400	1,690	685	8,125	0.505
37.....	8,800	1,765	685	6,315	0.392
39.....	7,800	1,840	685	5,275	0.328
41.....	6,600	1,925	685	3,990	0.248
43.....	6,000	2,000	685	3,315	0.206
45.....	5,200	2,075	685	2,440	0.153
47.....	4,600	2,140	685	1,775	0.110
49.....	4,000	2,210	685	1,105	0.069
51.....	3,400	2,275	685	440	0.027
52.....	3,300	2,300	685	315	0.019
53.....	3,020	2,335	685	0	0

	7	8	9	10	11	12
Miles Per Hour	Time Increment (Sec.)	Total Time (Sec.)	Amp.	Amperes Squared	Amp. Per Loco.	K.W. Per Loco.
0.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
32.....	.....	45.71	1,630	2,650,000	6,520	3,910
33.....	1.48	47.19	1,560	2,440,000	6,240	3,740
35.....	3.47	50.66	1,320	1,740,000	5,280	3,170
37.....	4.46	55.12	1,180	1,390,000	4,720	2,830
39.....	5.56	60.68	1,080	1,170,000	4,320	2,590
41.....	6.95	67.63	980	960,000	3,920	2,360
43.....	8.82	76.45	900	810,000	3,600	2,160
45.....	11.13	87.58	820	672,000	3,280	1,970
47.....	15.22	102.80	760	578,000	3,040	1,850
49.....	22.35	125.15	700	490,000	2,800	1,680
51.....	41.70	166.85	650	423,000	2,600	1,560
52.....	43.50	210.35	625	391,000	2,500	1,500
53.....	105.00	315.35	600	360,000	2,400	1,440

Los datos de esta tabla corresponden a un motor de corriente continua conexión serie, las dos últimas columnas se refieren a la corriente y potencia por locomotora.

Columna 1: muestra los valores de velocidad elegidos.

Columna 2: muestra el esfuerzo de tracción por motor correspondiente a la velocidad en la Columna 1; estos valores se obtienen de las curvas de motor.

Columna 3: se muestra el esfuerzo a la resistencia al avance del tren por motor, por ejemplo de un tren de 633,6 toneladas, que se aplica en cada velocidad, y se obtiene de las curvas de resistencia.

Columna 4: muestra la resistencia de grado, que es, en este caso, constante para todas las velocidades. El grado equivalente típico es 0,213 por ciento en lo que a lo largo de la ejecución típica del tren debe ser considerado, en contra de este grado. La tracción esfuerzo requerido por el motor es 685 Libras.

Columna 5: muestra el esfuerzo de tracción neta disponible para aceleración y se obtiene restando la resistencia del tren más la resistencia de grado, desde el esfuerzo de tracción.

Columna 6: muestra la tasa de aceleración en millas por hora por segundo. Los valores se obtienen, por ejemplo, como sigue:

A 33 millas/hora el esfuerzo neto de tracción es de 10410 libras, el peso del tren por motor es  $633,6 / 4 = 160$  Tons

Se sabe que el esfuerzo de tracción es de 100 lb / Ton y produce una aceleración de 1 milla / hora seg . Cuando el tren alcanza las 33 millas/hora hay 10410 lb de esfuerzo de tracción por cada 160,9 tons para producir la aceleración. O dicho de otra manera,  $10410 / 160,9 = 64,7$  Lb / Ton que dá un rango de aceleración de 0,647 millas/hora seg.

Columna 7: Para alcanzar los 32 Millas/ hora en 45,71 segundos será necesario ya que la tasa de aceleración sea 0,7 Millas/hora seg.

Esto le da el primer punto de la curva de tiempo de velocidad, y antes de que los puntos adicionales se pueden determinar es necesario conocer el número de segundos que transcurren mientras el tren se está acelerando desde 32 hasta 33 kilómetros por hora, etc, el número de segundos requeridos se muestra en esta columna y se determina como sigue: en 32 mph la tasa de aceleración es de 0,7 mphps, y en 33 mph es 0,647 m.p.h.p.s. entonces:

$$\frac{1 \text{ (m.p.h.)}}{\text{average rate acceleration}}$$

Cuando el incremento de velocidad es pequeño, como lo es en este caso, el tasa media de aceleración puede ser tomada como la numérica promedio de las aceleraciones instantáneas, columna 6, de modo que el tiempo requerido para acelerar 32 a 33 mph es:

$$\frac{1 \text{ (m.p.h.)}}{\frac{0,7 + 0,647}{2}} = 1,48 \text{ seconds,}$$

y de 33 a 35 millas/hora es:

$$\frac{2}{\frac{0,647 + 0,505}{2}} = \frac{4}{1,152} = 3,47 \text{ seconds.}$$

Se puede observar que las fracciones anteriores muestran que el incremento de tiempo puede ser rápidamente obtenido dividiendo el doble de la velocidad del incremento por la suma de las aceleraciones. En este problema particular cuando el incremento de velocidad es 2, los valores se obtienen dividiendo 4 por la suma de las aceleraciones.

Columna 8: El número de segundos en esta columna se obtiene añadiendo el incremento de tiempo al número anterior de segundos.

Columna 9: Muestra la corriente del motor correspondiente a la velocidad en la Columna 1 los valores se obtienen directamente a partir las curvas de motor.

Columna 10: Esta cifra es el cuadrado del valor de la corriente. Sirve para determinar en el gráfico a que porcentaje del rango del motor, este está trabajando en cada tramo.

Columna 11: Estos valores son cuatro veces las de la columna 9, ya que la locomotora de este ejemplo está equipada con cuatro motores, todos conectados en paralelo. Al arrancar, los motores se podrían conectar los cuatro en serie de modo que la corriente por locomotora será sólo 1.630 amperios.

Columna 12: En la determinación de la potencia necesaria, hemos asumido en este ejemplo que la tensión en la locomotora es constante y es 600 voltios.

Los datos contenidos en la tabla anterior son los necesarios para realizar el gráfico. Nótese que los kilovatios por locomotora, amperios por locomotora, millas por hora y amperios al cuadrado las escalas están dispuestas con referencia a los segundos. Una escala de pulgadas también se ha presentado para ambas coordenadas.

Los datos contenidos en las columnas 1 y 8 determinan la curva AD.

Por ejemplo, arrancando en 240 segundos en la línea cero, describe 40 segundos al punto C. Arrancando en el punto C, la línea de frenado corta a la curva de velocidad, AD, en el punto B.

El área encerrada por ABC es una medida de la distancia cubierta.

La curva amperes por locomotora determina la curva EF a través de los valores de la columna 11.

La curva de los Kilowatts está descripta por k m n p r s t G.

La curva del valor de corriente al cuadrado está descripta en el gráfico para un solo motor y mostrada por AHJKG. El objeto de su trazado es determinar a que porcentaje de su capacidad total el motor está trabajando. La capacidad del motor está limitada por la máxima temperatura que se puede permitir en sus arrollamientos. El calor es proporcional al promedio de los valores de corriente, al cuadrado.

La potencia eléctrica necesaria para poner en funcionamiento el tren esta expresada en Kilowatts-hora, y es de práctica general en tracción eléctrica especificar la potencia requerida para un cierto servicio en términos de “ kilowatts-hora / milla “ ó “ Watt - hora / tonelada”

Actualmente, el proceso descrito mas arriba para determinar los valores de la tabla como el gráfico correspondiente se realiza de manera informática obteniéndose mayor precisión y velocidad en los cálculos. No obstante se ha visto, periféricamente, como históricamente se trabajaba toda la información del servicio.

La curva velocidad-tiempo

La potencia requerida para poner en marcha un tren es expresada en términos de “ esfuerzo de tracción” sobre las llantas de las ruedas de accionamiento o tracción. Estos esfuerzos de tracción son aplicados para superar ciertos factores, tales como, resistencia a la tracción, aceleración, resistencia a las curvas y elevaciones etc.

### \* Hoja de tren

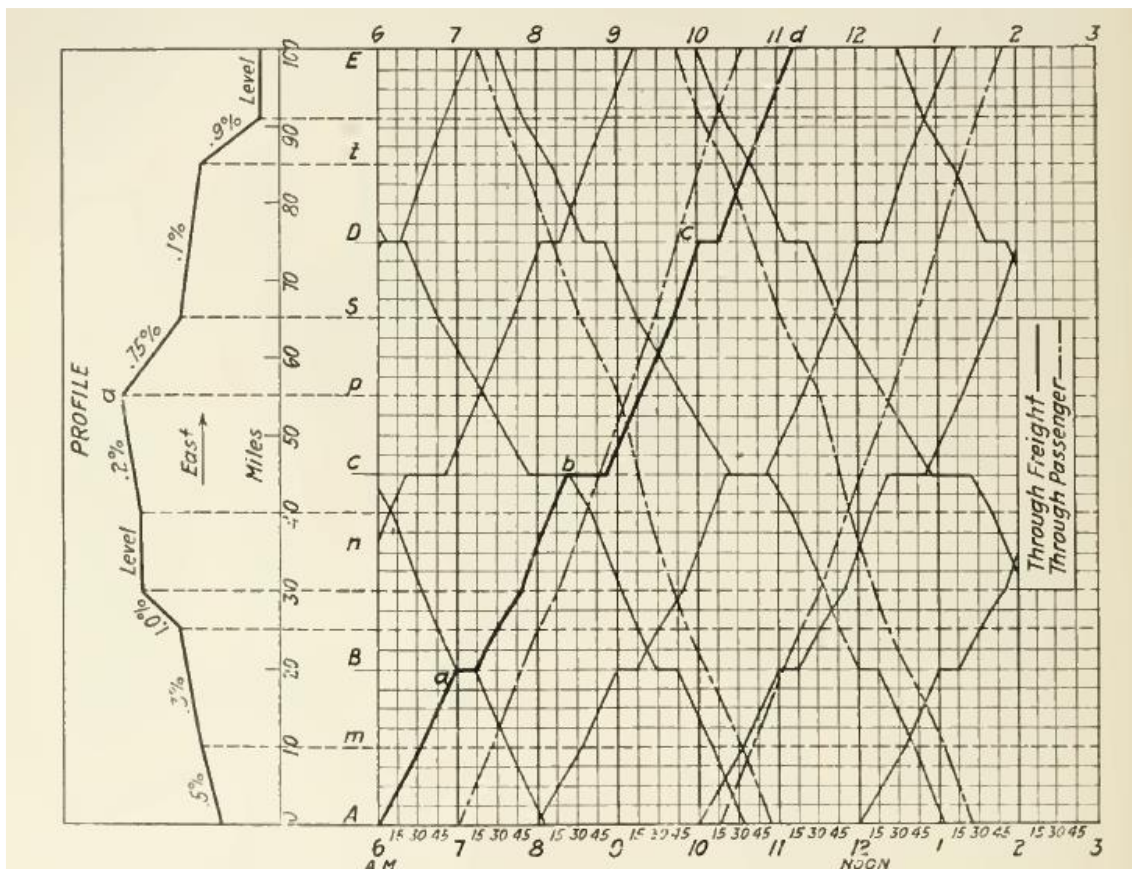
El valor máximo y el promedio del día esta representado por un diagrama conocido como la "hoja de tren".

La hoja de tren, con el tiempo como una base y la distancia como el eje de ordenadas, muestra gráficamente el servicio manejado sobre el ferrocarril.

Por ejemplo, supongamos la hoja que se muestra en la siguiente figura, la misma representa parte de la operación promedio del día, con una locomotoras eléctricas, en el ferrocarril bajo consideración.

La hoja de tren Diesel-Eléctrico de la operación promedio de un día sería similar, por lo que esta hoja en particular podría representar la operación de la Diesel, asumiendo que fue capaz de ejercer la misma extracción de barra de tracción a la misma velocidad como la locomotora eléctrica por el servicio elegido.

En esta hoja de tren la distancia entre las terminales de la división en cuestión es de 100 millas (160 Km). Entre los terminales A y E, son los puntos intermedios, B, C y D, donde hay paradas en los puntos adicionales, m, n, p, s y t.



Perfil longitudinal del trayecto.

Antes que la hoja de tren pueda representar para una operación eléctrica, el perfil de la vía férrea debe ser conocido y las curvas características de la locomotora eléctrica elegida debe estar disponible. El perfil utilizado no es el perfil real de la ruta, es el perfil de grado medio.

Explicación: sobre una distancia de 100 millas (160 Km) habría, por lo general, una multitud de grados y curvas de corta distancia. El uso de la hoja de tren es tal, que no es necesario tener en cuenta todos los grados pero sí el promedio de grados. Un estudio del perfil mostrará que puede ser dividido promedios de grados.

Aunque puede haber muchos grados entre dos puntos, existe un grado medio entre estos dos puntos, por lo que grado medio se utiliza en la construcción de la hoja de tren.

El grado medio de un tramo de vía que conecta dos puntos es la razón de la diferencia de altura de estos dos puntos y su distancia, medida en la misma unidad, por lo general esto se expresa en porcentaje. Aquí puede, sin embargo, una fuerte grado de longitud suficiente para determinar o influir en al menos la elección de la locomotora eléctrica.

Si es así, estos grados se utilizan por separado, no se promedia con los otros grados.

Un arreglo muy conveniente, es dibujar el promedio del perfil a la izquierda de la hoja de tren, utilizando como base la distancia como en la figura. Con el perfil tan localizado, se puede ver rápidamente dónde está el tren cualquier en cualquier momento y también ayuda en la elaboración de la hoja de tren.

#### \* **Curvas de carga**

La discusión necesariamente, debe ser de carácter general ya que cada problema es diferente en los detalles, pero se mostrará como el método descrito se puede aplicar para cualquier problema relacionado con la electrificación de los ferrocarriles.

En la aplicación de este método, son importantes los datos recogidos en los trabajos previos, la descripción de los cálculos para esfuerzo de tracción, la resistencia al avance del tren, etc., ya que los mismos serán empleados.

Supongamos un ferrocarril que opera con una locomotora Diesel-eléctrica, con pasajeros y cargas, se estudiará con el propósito de su electrificación.

Ciertos datos son necesarios para determinar el diseño más adecuado de la locomotora eléctrica, la potencia eléctrica requerida de la estación transformadora para mantener el diagrama horario, la carga máxima de la estación transformadora, etc.

Es una cuestión fácil elegir una locomotora que va a ser del tamaño suficiente para realizar un servicio determinado, pero para elegir una que sea el tamaño justo, que significa un de costo inicial mínimo y peso mínimo, requiere un estudio cuidadoso.

Los motores de una locomotora eléctrica debe ser capaz de ejercer un cierto esfuerzo de tracción en las ruedas motrices para arrastrar una carga de arranque de un cierto número de toneladas. Se ha establecido que se requiere un esfuerzo de tracción de quince (6,75 Kg) a veinticinco (11,25 Kg) libras por tonelada de carga final para iniciar el trayecto de un tren y llevarlo a la velocidad final; alrededor de siete libras (3,15 Kg)

es la fuerza de tracción requerida por tonelada para mantener este tren a velocidad constante.

El real esfuerzo de tracción que una locomotora, para un servicio en particular, debe ser capaz de ejercer depende de la condición de la tracción, de las curvas y peso de los coches en el tren.

El peso de una locomotora debe ser tal que la adherencia de las ruedas a las vías sea suficiente para que los motores ejecuten su normal esfuerzo de tracción. Si la locomotora es demasiado liviana, las ruedas se patinan cuando se intenta iniciar la marcha.

El máximo esfuerzo de tracción de la locomotora está limitado por su peso y no está determinado totalmente por el par que pueden aplicar sus motores. La locomotora debe, sin embargo, no ser demasiado pesada en relación a sus motores si el peso de los conductores es excesivo, los motores se sobrecargan antes de los conductores se deslicen.

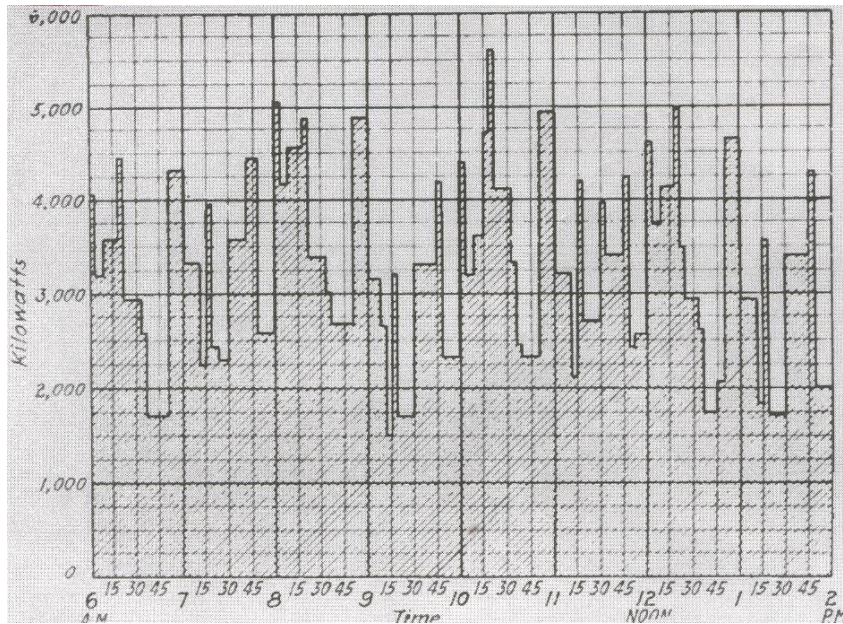
Por lo tanto el peso de la locomotora debe ser adecuadamente proporcional en relación con la potencia de los motores y las condiciones de servicio, de modo que el accionamiento de las ruedas patinará si se hace un esfuerzo para sacar una carga excesiva.

Con esta relación, los motores están protegidos automáticamente de una sobrecarga excesiva en el inicio. A partir de estos conceptos, es obvio que un estudio cuidadoso se debe hacer de la calidad y condiciones de tráfico con el fin de seleccionar la locomotora más adecuada.

Son importantes los factores que ha tener en cuenta en el problema de la potencia requerida para operar una sección electrificada como así también la localización de las subestaciones transformadoras de alimentación.

Para determinar la capacidad de la potencia suministrada o los requerimientos de carga, es necesario determinar lo que se conoce como "curva de carga". Esta curva nos muestra la potencia requerida por los trenes de una carga especificada y corriendo según un horario preestablecido de acuerdo a lo que se llama "grafico de marcha". Esta hoja es una representación continua de la potencia requerida.

Para construir la curva de carga se hace referencia al grafico de marcha y a los datos indicados en la siguiente tabla.



Curva de carga

	Grade Per Cent	Amperes per Train	Power K. W.		Speed M. P. H.	Minutes
			Amp. × 1000	$\frac{3000 V}{1000}$		
Through Freight 3000 Tons, East	+0.5	690	2070		19	32
	+0.3	570	1710		21.5	42
	+1.0	990	2970		16.5	18
	Level	370	1110		26.5	23
	+0.2	500	1500		23	39
	-0.75	...	...		25	24
	-0.1	290	870		30	40
	-0.9	...	...		25	14
Level	370	1110		26.5	20	
Through Freight 3000 Tons, West	Level	370	1110		26.5	20
	+0.9	925	2775		17	21
	+0.1	440	1320		24.5	50
	+0.75	830	2490		17.5	34
	-0.2	110	330		18	50
	Level	370	1110		26.5	23
	-1.0	...	...		25	12
	-0.3	60	180		22.5	40
-0.5	...	...		25	24	
Through Passenger 800 Tons, East	+0.5	240	720		23	26
	+0.3	200	600		26	35
	+1.0	325	975		20	15
	Level	140	420		31	20
	+0.2	180	540		27	33
	-0.75	...	...		30	20
	-0.1	110	330		35	34
	-0.9	...	...		30	12
Level	140	420		31	18	
Through Passenger 800 Tons, West	Level	140	420		31	18
	+0.9	310	930		20	18
	+0.1	160	480		29	42
	+0.75	285	855		21	29
	-0.2	90	270		37.5	24
	Level	140	420		31	19
	-1.0	...	...		30	10
	-0.3	33	99		22	41
-0.5	...	...		30	20	

Datos para determinar la curva de carga

Con pocos trenes corriendo, en el gráfico de marcha es fácil establecer un diagrama de carga completo de una operación. Sin embargo, con un gran número de trenes en diferentes direcciones este método puede ser extremadamente difícil, entonces es conveniente determinar primero la energía necesaria para trenes rodando en una dirección solamente y luego para los trenes en la otra dirección.

La suma de ambas curvas nos dará la energía total demandada por el sistema electrificado.

El gráfico muestra la curva de carga en la cual tenemos el tiempo en abscisas y la potencia eléctrica en Kw en ordenadas.

Nos referiremos al gráfico de marcha y el problema de la electrificación con el siguiente ejemplo.

En el gráfico de marcha vemos a las 6 a.m. un tren de carga corriendo hacia el este con un grado de 0,5% , y en otro nivel otro corriendo hacia abajo con un grado 0,1%.

La tabla muestra estos trenes tomando una potencia de 2070 Kw, 1110 Kw y 870 Kw respectivamente.

La totalidad de potencia requerida a las 6 a.m. por trenes corriendo hacia el Este es entonces 4050 Kw

( 2070 + 1110 + 870). La totalidad de potencia requerida es mostrada en la curva de carga a las 6 a.m.

La carga eléctrica permanecerá constante hasta que uno de los trenes modifique su velocidad, pare o encuentre una pendiente diferente. El diagrama de carga representa la actual carga de las locomotoras pero no se considera las pérdidas por transmisión, para un cálculo con seguridad se puede considerar una eficiencia del 80%.

En este gráfico, el diagrama de carga es particularmente irregular, la carga en Kilowatts puede variar en un intervalo de tres minutos en un 50%.

Esta variación, es excesiva, pero debe tenerse en cuenta que la hoja de tren, desde donde el gráfico de carga se construyó, se basa en suponer datos, y sólo se muestra unos pocos de los trenes, solamente lo suficiente para ilustrar el método; con más trenes operativos, las variaciones serán menos, y la curva de carga mucho más suave.

### Subestaciones

Las subestaciones deben ser suficientes en número y capacidad para manejar el servicio cubierto por la hoja de tren, y deben estar espaciadas a fin de proporcionar una tensión adecuada a la/s locomotora/s en todos los puntos a lo largo de la línea.

Con una condición de carga dada la tensión en las locomotoras es dependiente de la distancia entre las subestaciones y en el tamaño del trole de cobre y cables alimentadores de conexión. La disposición de

el sistema de distribución es un factor importante y requiere atención y estudio.

Las subestaciones deben ser de tal un número y colocados de tal manera como para obtener la distribución más económica.

Si las subestaciones se colocan demasiado separadas, y los alimentadores son demasiado pequeños, el costo de capital de las instalaciones de las subestaciones y el cobre de los alimentadores será bajo, pero el costo de la energía perdida en la distribución será alto, de modo que la suma de los dos puede fácilmente ser mayor que si colocan más subestaciones y la sección de los alimentadores adecuada.

Un buen cálculo implica un costo mínimo de la energía de pérdida en la distribución.

Se indicará un procedimiento que puede ser aplicado a cualquier problema de electrificación para obtener la ubicación de las subestación bastante exacta y una aceptable capacidad de alimentación



### Localización de las subestaciones

El problema de localizar las subestaciones puede considerarse de dos maneras diferentes:

Se establece la ubicación de las subestaciones y luego se determina el tamaño correcto del trolley y los alimentadores, o definir la sección de los alimentadores y a continuación, determinar la localización de la subestación.

Estos supuestos implican que a lo largo de la línea de alimentación existe la posibilidad de tomar energía de una línea de alta tensión para poder alimentar las subestaciones.

Considerando el primer método: para un voltaje de trolley de 3000 volts de corriente continua, la estación transformadora debe estar ubicada de 30 (48 Km) a 35 (56 Km) millas, este es el caso de la distancia entre las subestaciones en la sección electrificada del ferrocarril entre Chicago, Milwaukee & St. Paul. De la experiencia adquirida en el diseño y operación de sistemas eléctricos de ferrocarril, se ha encontrado que la distancia desde la última subestación al final de la línea debe ser de aproximadamente un tercio de la distancia entre las subestaciones con el fin de conseguir un voltaje uniforme, siempre que las dimensiones del trolley y el alimentador permanezcan uniformes a lo largo de toda la longitud de la línea.

Además de la caída de tensión en el trolley y los alimentadores (o el tercer riel si estuviera bajo consideración), hay que tener en cuenta la llamada “caída en el riel” ya que los rieles por donde circula la formación se utiliza como retorno del circuito eléctrico.

El tamaño y forma del riel está determinado por razones físicas, no eléctricas, por lo tanto es necesario conocer el valor de la resistencia para varios tamaños de rieles de acero lo que permitirá calcular la caída de tensión valor requerido para el cálculo del conductor del trolley y alimentadores.

La resistencia del acero con que está construido los rieles varía de acuerdo a las impurezas que este pueda contener, como regla general el valor de resistencia es diez veces mayor que la del cobre a igual sección.

Como los rieles deben ser unidos a través de planchas remachada o atornillada esto suma un valor de resistencia a la propia del riel, de manera que se considera once veces el valor de la resistencia del cobre para la misma sección.



Sobre la base de lo antedicho y de la experiencia, la caída de voltaje por milla y por cada 100 amperes y para un riel de 100 Lb (45 Kg) es de 2,5 Volts.

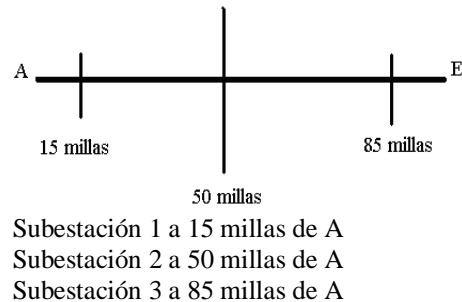
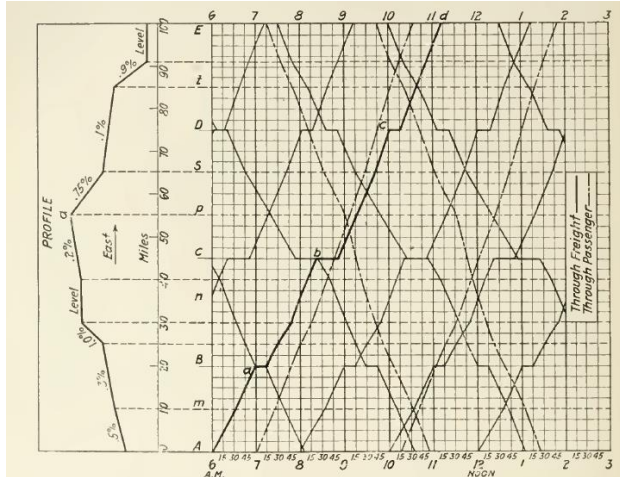
Este valor de 2,5 es llamado “unidad de caída” y es un valor muy útil para trabajar en el diseño de la electrificación, en lugar del valor de resistencia.

Vamos a estudiar el siguiente ejemplo:

Un recorrido de 100 millas de

longitud ( 160 Km) con 3 subestaciones separadas 30 a 35 millas ( 48 a 56 km).

Si una subestación se coloca en el centro de la línea de recorrido y una en cada lado, treinta y cinco millas (56 km) de distancia, la distancia de la subestación a las terminales de línea A y E, véase la hoja de tren, serían 15 millas (24 Km), con esta separación sería satisfactoria la regulación del voltaje en la línea de alimentación.

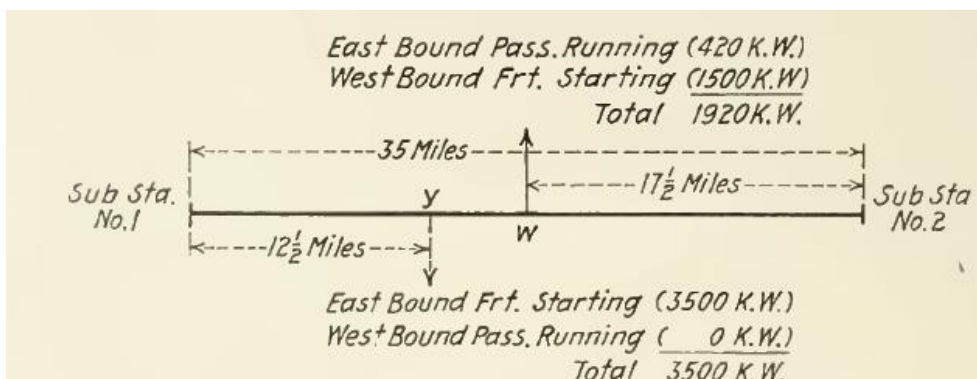


Habiendo situado las subestaciones el problema consiste en determinar la sección del cable conductor y de los alimentadores. Generalmente, el tamaño del cable conductor está determinado por las condiciones mecánicas y por el diseño de construcción del soporte de la catenaria de modo que el problema se va reduciendo hasta el cálculo de la sección de los cables alimentadores.

La peor condición, en lo que respecta carga eléctrica y la caída de tensión, es cuando los trenes se agrupan a medio camino entre dos subestaciones adyacentes. Se observará que entre las estaciones B y N (tramo de 16 millas aprox., de acuerdo a perfil en "hoja de tren"), de 11:20 am a las 12:00 del mediodía (noon) que hay cuatro trenes, dos trenes de carga y dos de pasajeros.

Una distancia conveniente de separación es de cinco millas (8 Km) por lo que fácilmente es posible para los cuatro trenes de ser agrupados en dos grupos separados cinco millas.

La ubicación relativa de las subestaciones 1 y 2 y de los trenes, dos de pasajeros y dos de carga, se muestra en el siguiente gráfico:



Suponemos que en el primer grupo está arrancando un tren de carga hacia el oeste (izquierda) y un tren de pasajeros corriendo hacia el este (derecha) el tren de carga se alojó en un desvío para permitir que pase el de pasajeros. Luego, en el segundo grupo

un tren de carga esta arrancando hacia el este y otro de pasajeros está corriendo hacia el oeste.

De acuerdo a la “**tabla de datos para determinar la curva de carga**”, el tren que va hacia el este, punto W, esta corriendo a nivel y toma de la línea 420 Kw.

Pendiente A nivel	Amperes 140	Power 420	Speed 31	Minutes 20
----------------------	----------------	--------------	-------------	---------------

El tren de carga hacia el Oeste está también en el mismo nivel.

Pendiente A nivel	Amperes 370	Power 1110	Speed 26,5	Minutes 20
----------------------	----------------	---------------	---------------	---------------

De acuerdo a la tabla se requiere 1100 Kw pero como se debe tener en cuenta la potencia requerida para el arranque, se estima en total 1500 Kw.

De igual manera el tren de carga en el punto Y va a arrancar con un 1% de pendiente, manera tal que la potencia necesaria será 2970 + 500 aprox. 3500 Kw.

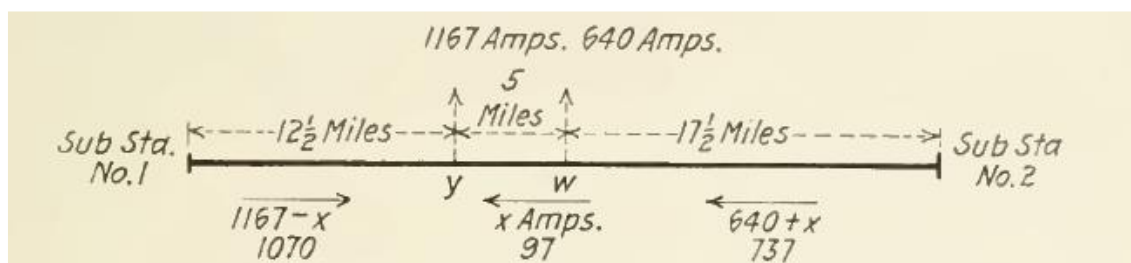
Pendiente Mas 1.0	Amperes 990	Power 2970	Speed 16,5	Minutes 18
----------------------	----------------	---------------	---------------	---------------

El tren de pasajeros hacia el Oeste está en una pendiente negativa del 1% de manera que no consume energía.

Pendiente Menos 1.0	Amperes 0	Power 0	Speed 25	Minutes 12
------------------------	--------------	------------	-------------	---------------

En total, 1920 Kw son requeridos en “ W ” y 3500 Kw en “ Y “. Con una tensión de servicio de 3000 Volts en el trolley , las respectivas corrientes son:

$$1920 \text{ Kw} / 3000 \text{ Volts} = 640 \text{ Amperes} \quad 3500 \text{ Kw} / 3000 \text{ V} = 1167 \text{ Amperes}$$



Localización de las subestaciones y puntos de carga en términos de amperes

El próximo paso es determinar como las corrientes se dividen entre las dos subestaciones.

Hay dos trenes en el punto Y , y dos trenes en el punto W , pero suponemos que por el momento solamente hay una carga eléctrica de 1167 amperes en el punto Y. Entonces con la misma sección de conductor del trolley y de los alimentadores en toda la longitud, la corriente se dividirá entre las dos subestaciones inversamente con las respectivas distancias hacia las mismas.

Entonces la corriente para la Subestación 1:  $22,5 / 35$  de 1167 es decir 750 Amp  
para la Subestación 2:  $12,5 / 35$  de 1167 es decir 417 Amp

Los 640 Amperes tomados en el punto W lo podemos suponer, en la sección de 5 millas, que provienen de la subestación 2. Puesto que la totalidad de la corriente que proviene de la subestación 2 es desconocida, se designará a la diferencia como X. La flecha indica la dirección del flujo de corriente.

Suponiendo que la X-corriente está fluyendo desde la subestación 2 , las otras corrientes pueden ser expresadas en términos de X.

La corriente que viene de la subestación 2 será  $( 640 + X )$  amperes, y la corriente que viene de la subestación 1 será  $( 1167 - X )$  amperes.

Si podemos determinar el valor de X quedará determinado la corriente que proviene de cada subestación.

Dado que dos voltajes no pueden coexistir en el punto Y, la caída de voltaje desde ambas subestaciones en el punto Y es la misma cuando cada subestación esta operando sobre la misma barra de tensión.

Si la disposición de la vías y los alimentadores es uniforme, también lo será la resistencia eléctrica por milla de manera que podemos calcular el valor de X utilizando la distancia en lugar de las resistencias.

La caída de tensión desde la subestación 1 al punto Y es proporcional a 12,5 millas  $(1167 - X) * \text{Amperes}$ .

Y la caída de tensión desde la subestación 2 es 17,5 millas  $(640 + X) + 5 X$

Como los voltajes deben ser iguales:

$$12,5 \text{ millas } (1167 - X) \text{ Amperes} = 17,5 \text{ millas } ( 640 + X ) + 5 X$$

$$\text{Entonces: } 14587,5 - 12,5 X = 11200 + 17,5 X + 5 X$$

$$35 X = 3387,5$$

$$X = 96,8 \text{ Amperes} > 97 \text{ Amps.}$$

Suponiendo que la corriente fluye en el tramo de 5 millas es correcta. La suposición de que el flujo de corriente en el cinco millas sección fue la correcta. Sin embargo, si la suposición era incorrecta no podía afectar seriamente la solución del problema; en este caso, el valor saldría con valor negativo lo que indica que la hipótesis era incorrecta y que debería ser modificada.

Por ejemplo, suponemos que la corriente X fluye en sentido opuesto al tomado anteriormente:

$$12,5 (1167 + X) + 5 X = 17,5 (640 - X)$$

$$35 X = - 3387,5$$

$$X = - 97 \text{ Amperes}$$

El signo negativo indica que la corriente fluye en sentido opuesto al supuesto previamente.

Para determinar la sección de los alimentadores, es necesario elegir la máxima caída de voltaje tolerable.

Cuanto mayor es la caída máxima permisible más pequeño puede ser la sección de cobre, a la inversa cuanto menor será la caída, mayor debe ser la sección de cobre.

Con una tensión de 3000 Volts de corriente continua, como se ha supuesto, una caída máxima de 900 voltios para obtener un funcionamiento satisfactorio.

Aprovechando de la caída permitida de 900 voltios que significaría que la caída de la subestación 1 al punto Y, puede ser 900 voltios. La caída total se compone de la caída en los rieles alimentadores y cables del trolley.

Un método conveniente es resolver el problema utilizando la "unidad de caída", caída de tensión por milla por cada 100 amperios.

La caída de la unidad del trolley, del alimentador y la vía, en el base de 900 voltios de caída permisible desde la subestación al punto Y es:

$900 \text{ Volts} / 12,5 \text{ millas} * 10,5 \text{ cientos de amperes} = 6,73 \text{ Volts de caída por milla cada } 100 \text{ amperes}$

Como se mencionó mas arriba la "unidad de caída" para una vía de 100 libras es de 2,5 Volts.

Restando esta caída de la caída la unidad total de 6.73 voltios que tenemos caída 4,23 voltios por unidad del trolley y del alimentador. La caída para 500 mm<sup>2</sup> de cable es 5,54 por lo que para obtener sólo 4,23 voltios de unidad caída, la sección requerida tendrá que ser:

$$(5,54 / 4,23) * 500 = 654 \text{ mm}^2$$

Todo este proceso y con mayor precisión, actualmente se realiza de manera computarizada. No obstante es interesante dar una idea de la metodología aplicada.

Bibliografía: Material Rodante y Tracción, Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ingeniería. Electric Vehicle Technology Explained, James Larminie  
Oxford Brookes University, Electrical Vehicle Design and Modeling  
Schaltz, Erik