

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

ECUACIÓN GENERAL DEL MOVIMIENTO FERROVIARIO

$$Fr = \Sigma R$$

$$Fr = R_o \pm R_i + R_c + R_g$$

$$Fr = (r_o \pm r_i + r_c) \times (P + Q) + 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

Si llamamos R a todas las resistencias menos la de inercia:

$$R = (r_o \pm r_i + r_c) \times (P + Q)$$

$$Fr = R + 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

$$Fr - R = 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt}$$



2° Ley de Newton:

$Fr - R =$ fuerza aceleratriz disponible

$1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} =$ masa equivalente

$\frac{dv}{dt} =$ aceleración

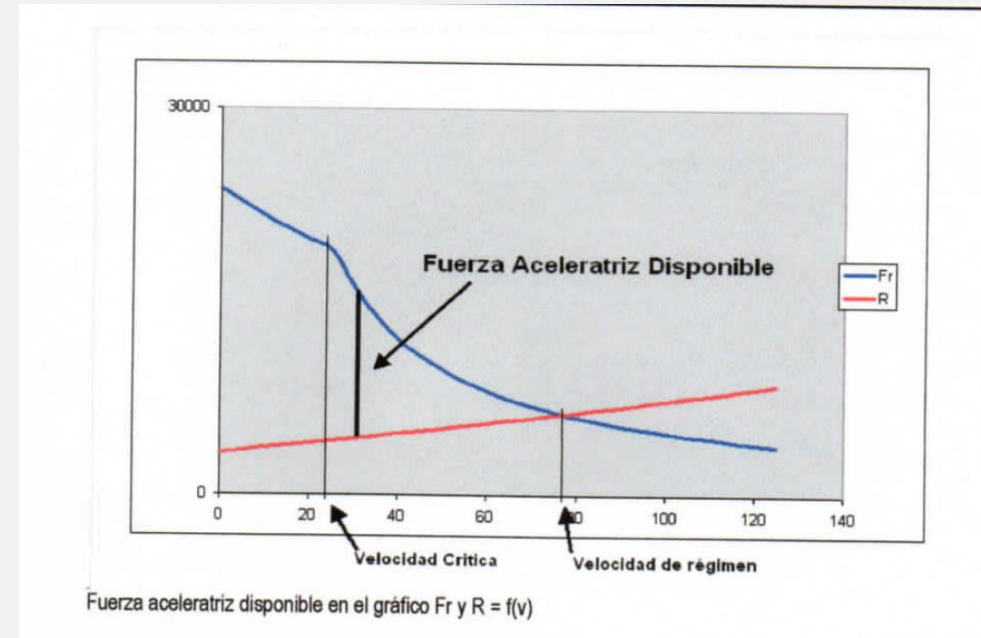
CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO ECUACIÓN GENERAL DEL MOVIMIENTO FERROVIARIO

$$\frac{dv}{dt} = (Fr - R) \times \frac{g}{1000 \propto (P + Q)}$$

La expresión se puede identificar en el gráfico Fza. en la rueda vs. Resistencias como el segmento (Fr-R)

el cual al escalarse por la expresión: $\frac{g}{1000 \propto (P + Q)}$

Se obtiene la aceleración disponible



CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

El cálculo de horario ferroviario es función de:

1- Características de un determinado Tren

2- Características planialtimétricas de un trazado entre dos puntos A y B

A- Potencia de la locomotora

B- Resistencia al avance de la locomotora

C- Peso de la locomotora

D- Resistencia al avance de vagones o coches

E- Peso de vagones o coches

Finalidad:



Determinar cuanto tarda la formación en llegar desde el punto A a B

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

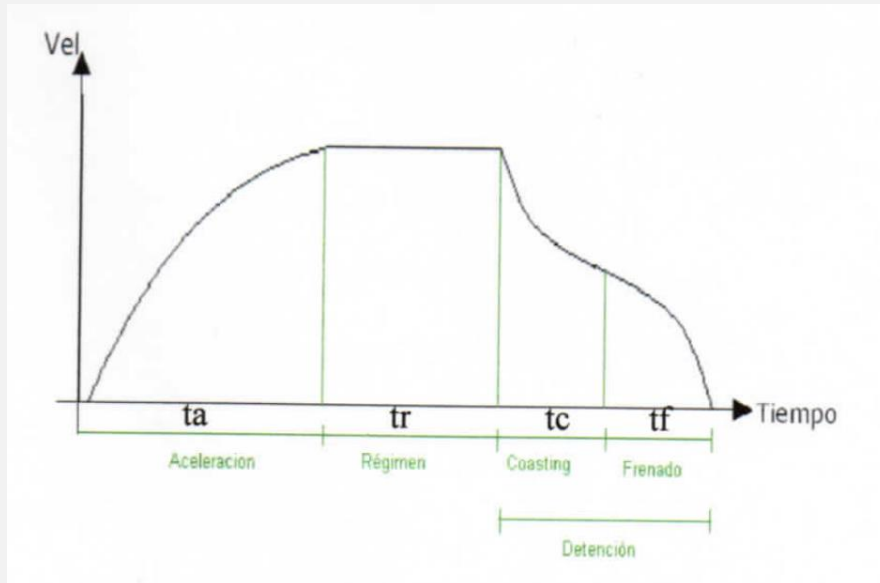
APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Para obtener el tiempo entre el punto A y B se analiza:

Ciclo de Marcha del tren



Conjunto de etapas desde que el tren sale desde un punto A y se detiene en el punto B



Aceleración:



$Fr > 0$ y existe aceleración

Régimen:



$Fr > 0$ y $v = cte.$

Coasting o
Deriva:



$Fr = 0$ y existe desaceleración

$$R = R_o \pm R_i + R_c + R_g$$

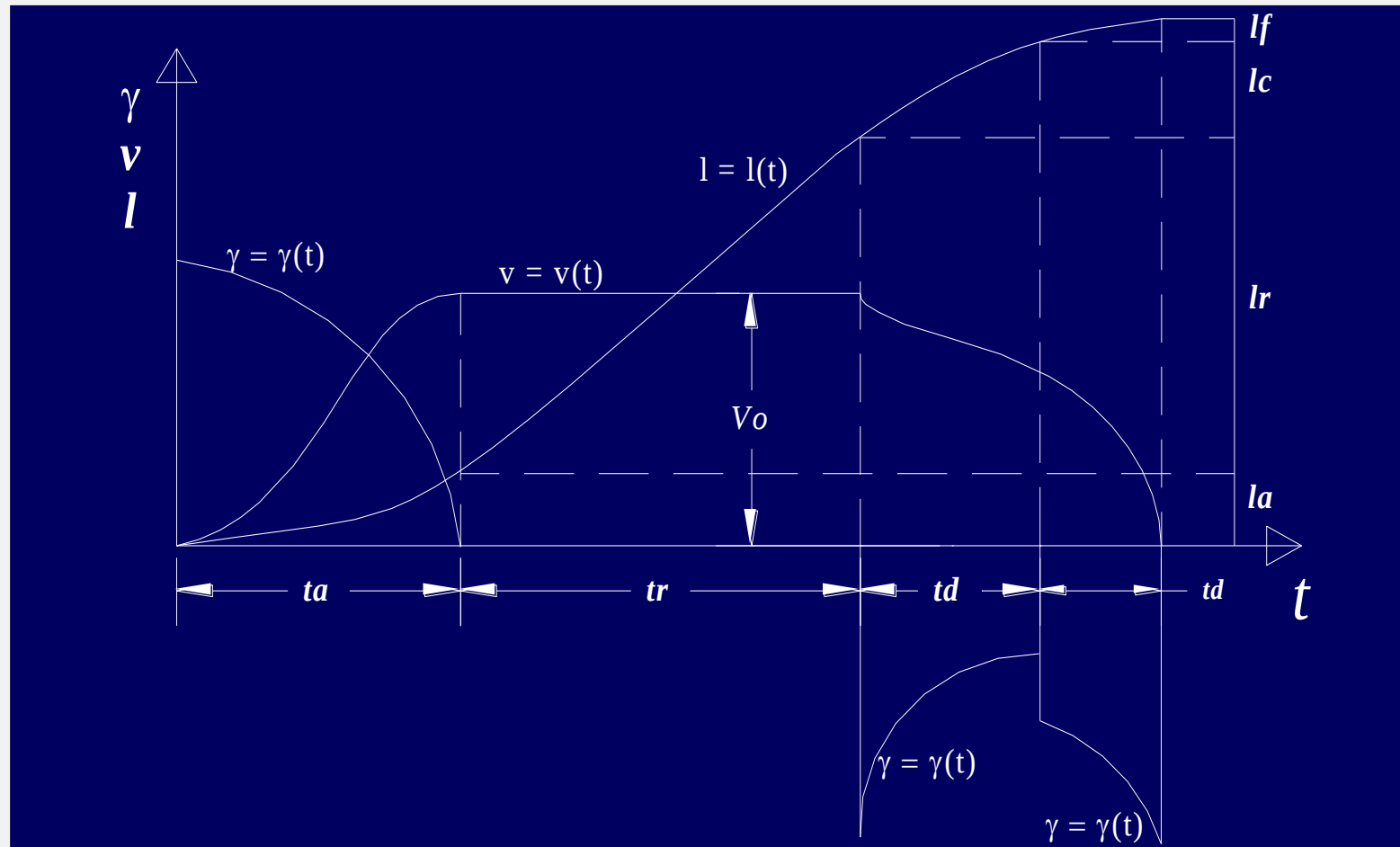
Frenado:



$R_f + R$, se aplica resistencia adicional de frenado

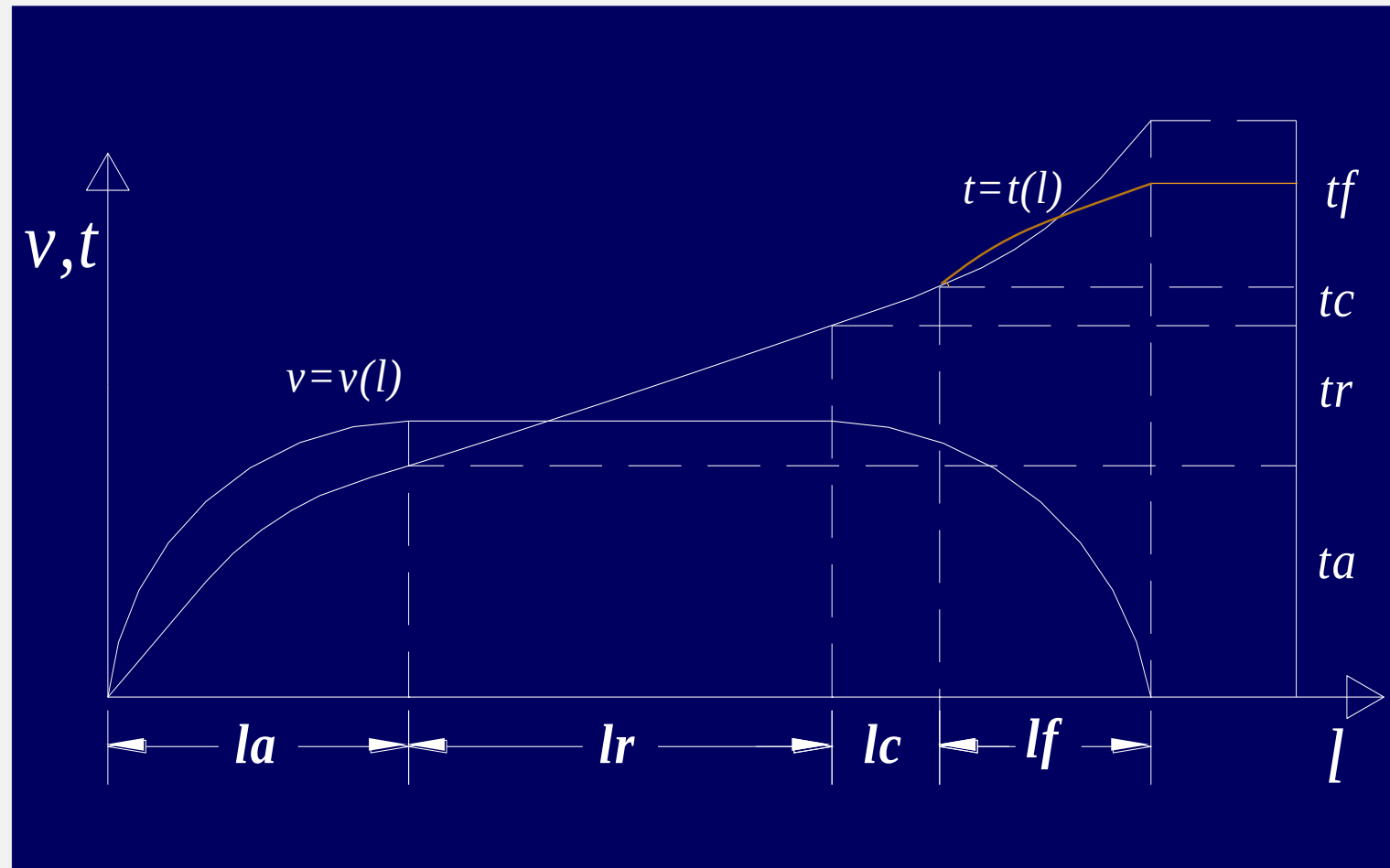
CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL TREN



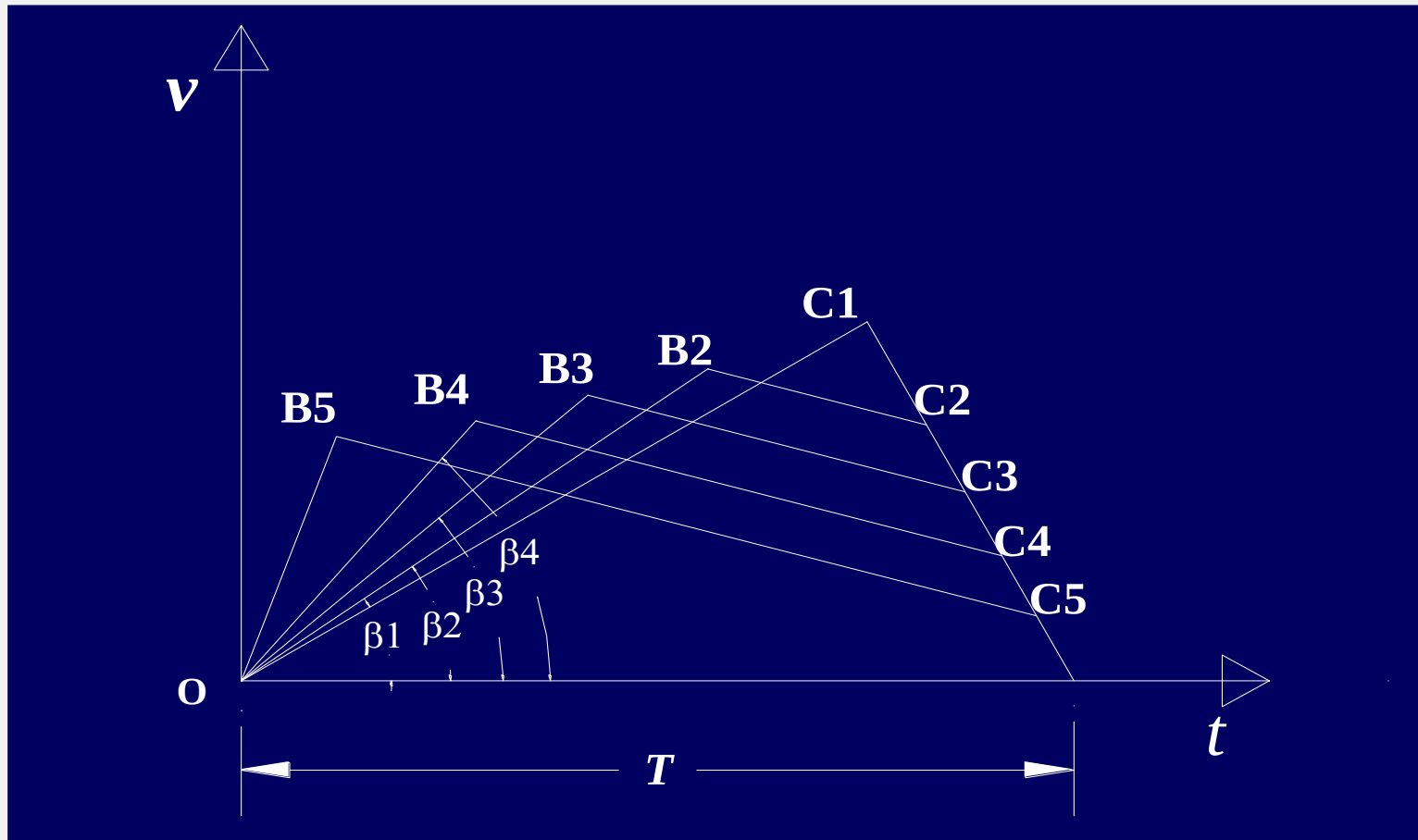
CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL TREN – EN FUNCIÓN DEL RECORRIDO



CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

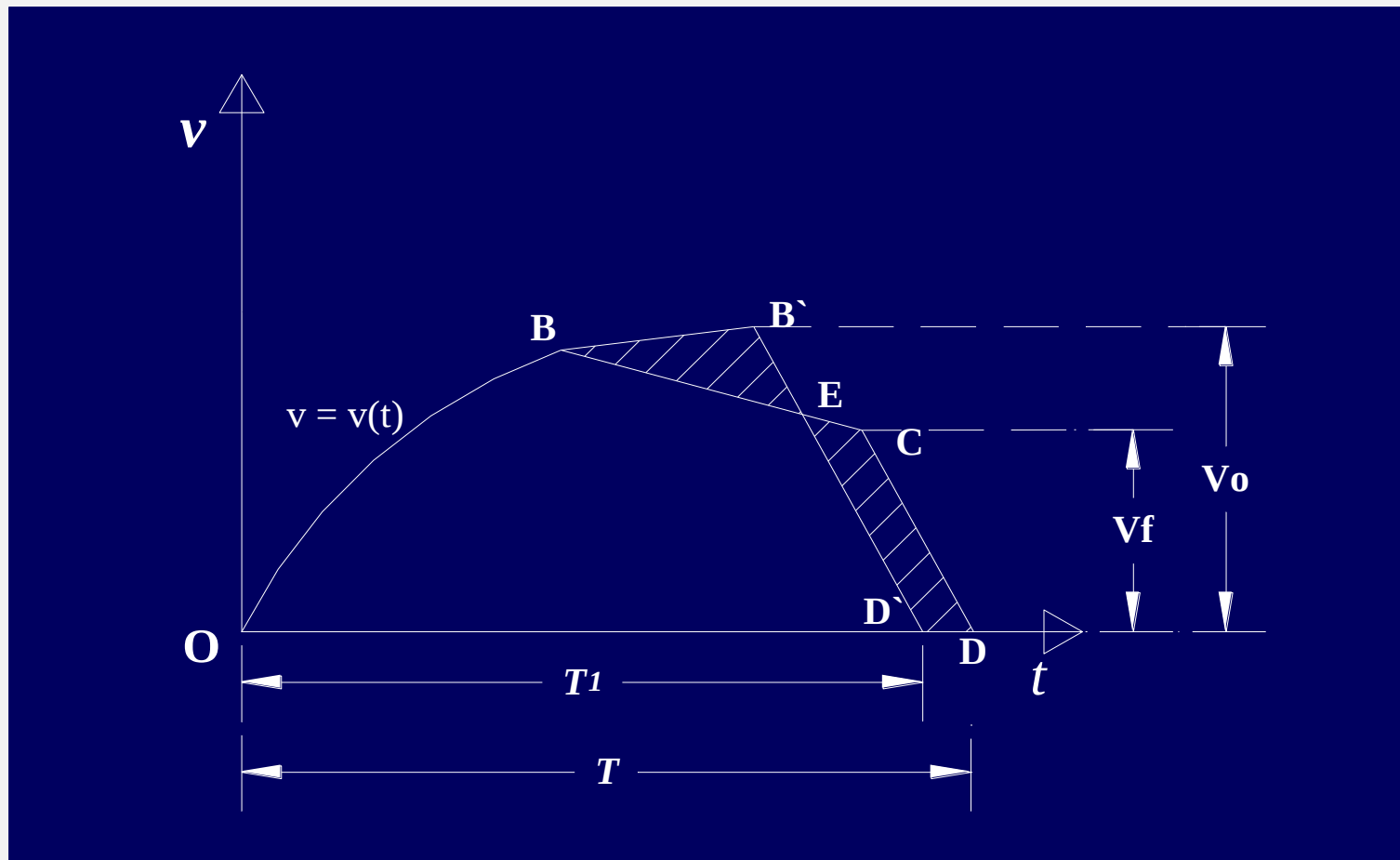
ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL TREN – DIFERENTES TIPOS DE RÉGIMEN DE FRENADO



El área bajo la curva
representa la
distancia recorrida

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

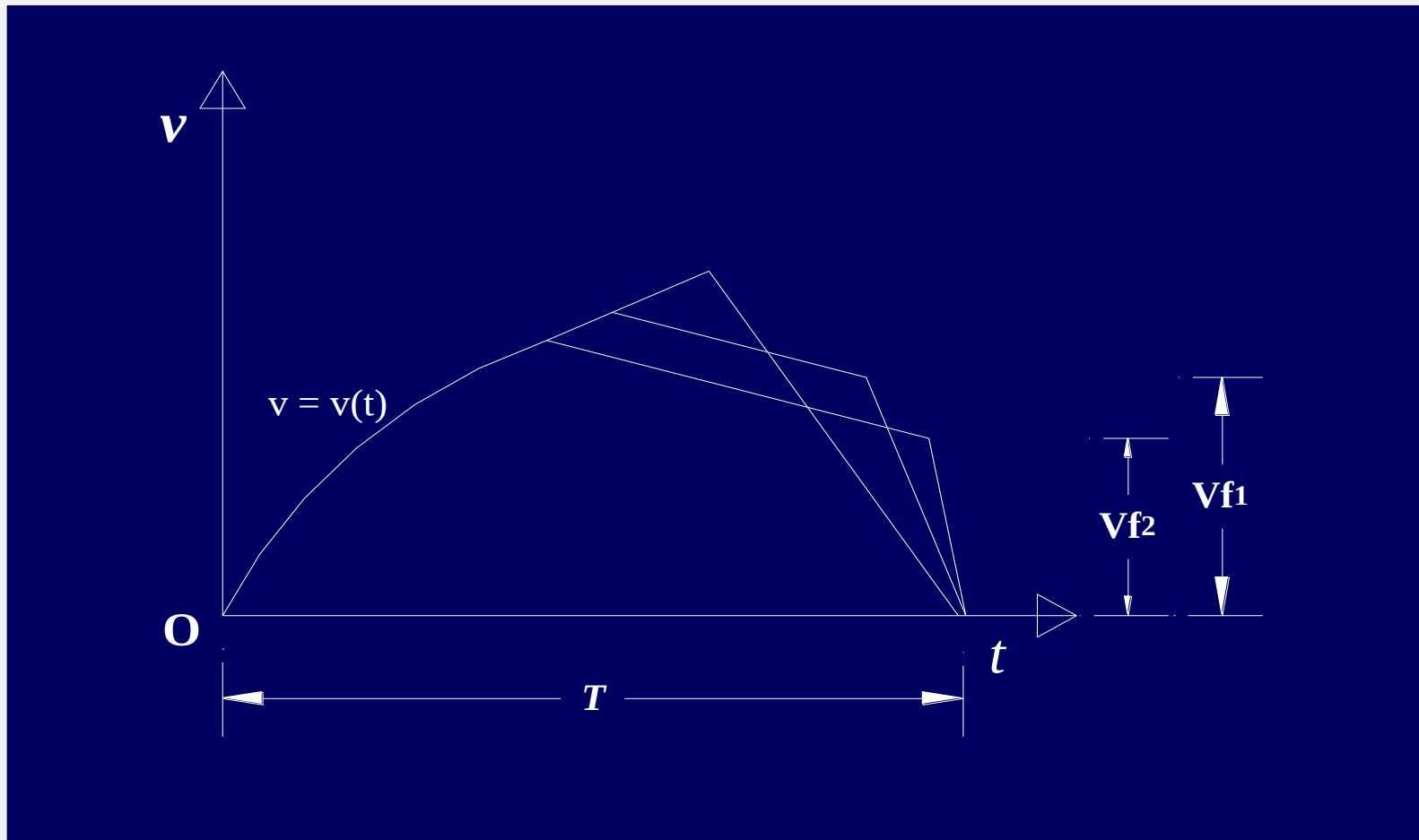
ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL TREN – ANÁLISIS DE RECORRIDO Y ENERGÉTICO



El área bajo la curva
representa la
distancia recorrida

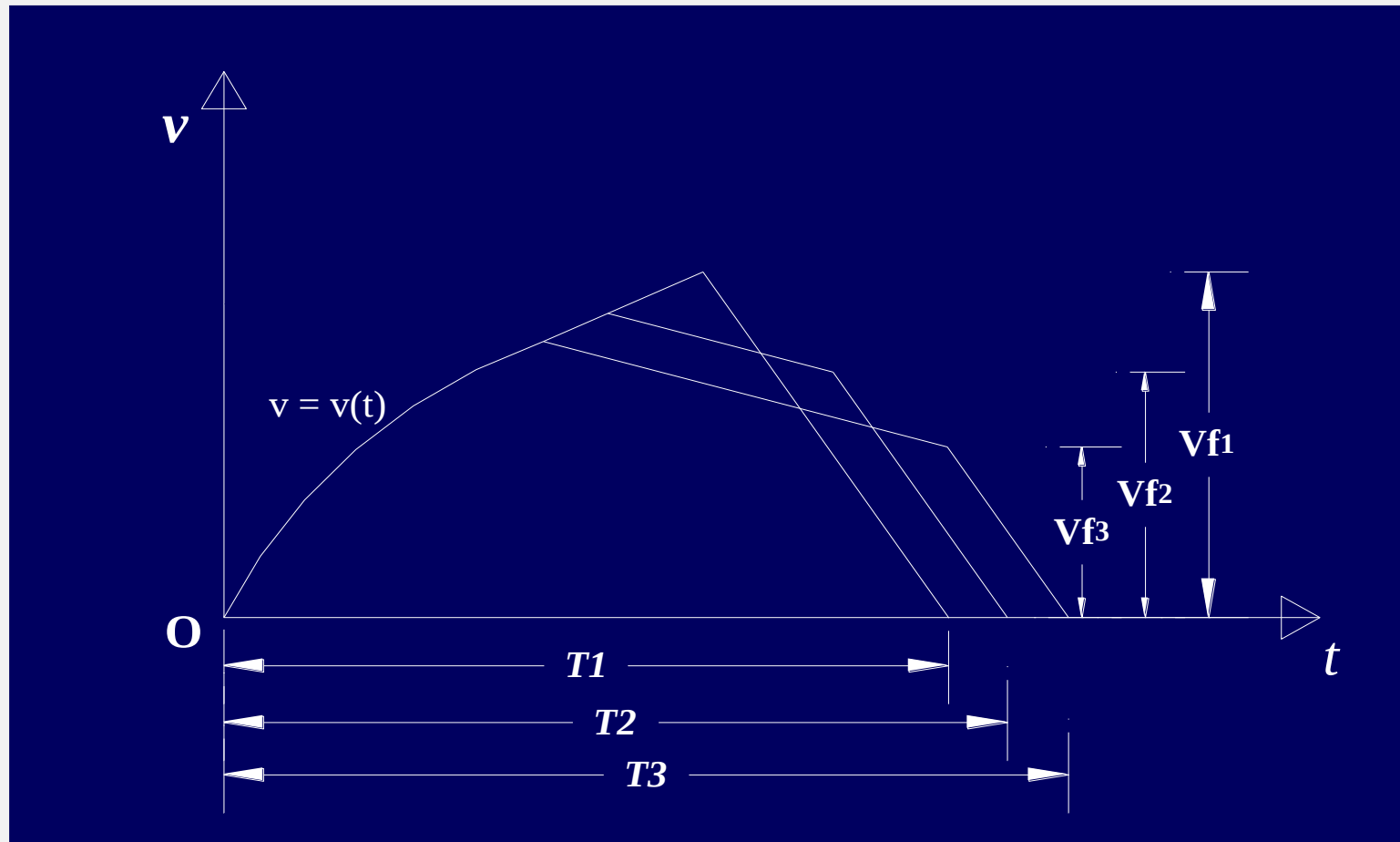
CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL TREN – VARIACIÓN DE ACELERACIÓN Y FRENADO



CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL TREN – VARIACIÓN DE ACELERACIÓN Y COASTING CONSTANTE



CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Etapas de aceleración

$$Fr = R + 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt} \quad \Rightarrow \quad Fr - R = 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

$$dt = 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{(Fr - R)} \quad \Rightarrow \quad dt = \psi \times \frac{dv}{(Fr - R)} (1) \quad \Rightarrow \quad t = \psi \int_0^{vf} \frac{dv}{(Fr - R)} (2)$$

Fr y R son función de la velocidad
Vf es desconocida

Para obtener vf se plantea la ecuac. de veloc: $v = \frac{dx}{dt}$

Reemplazando en (1): $dx = \psi \times \frac{v dv}{(Fr - R)} dv \quad \Rightarrow \quad x = \psi \times \int_0^{vf} \frac{v dv}{(Fr - R)}$

x es conocida, es hasta donde se mantienen las mismas condiciones planialtimétricas



vf



Se reemplaza **vf** en 2 y se obtiene **t**

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Inconvenientes de resolución

$$Fr = \frac{Pot}{v}$$

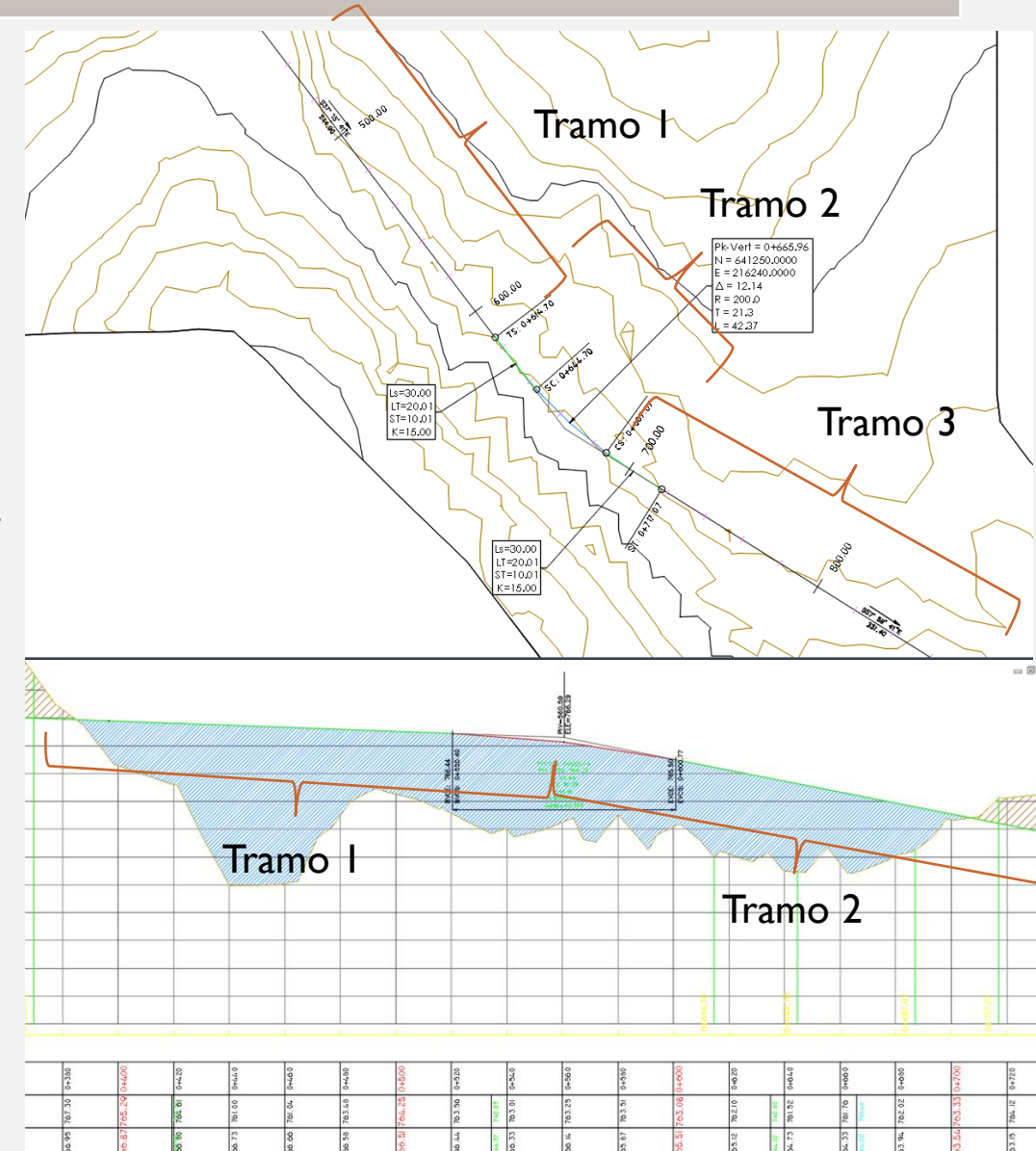
$$t = \psi \int_0^{vf} \frac{dv}{\left(\frac{k}{v} + a + bv + cv^2\right)}$$

$$x = \psi \int_0^{vf} \frac{v dv}{\left(\frac{k}{v} + a + bv + cv^2\right)}$$

Deben mantenerse las
condiciones planialtimétricas

Las ecuaciones son válidas mientras no hayan cambios planimétricos o altimétricos:

- La planimetría se debe dividir en Tramos rectos y tramos curvos
- La altimetría debe dividirse en tramos de pendiente constante



CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Etapa de Régimen

$$v = cte.$$

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

A) Se agota la capacidad de aceleración:

B) Se llega a velocidad máxima de itinerario

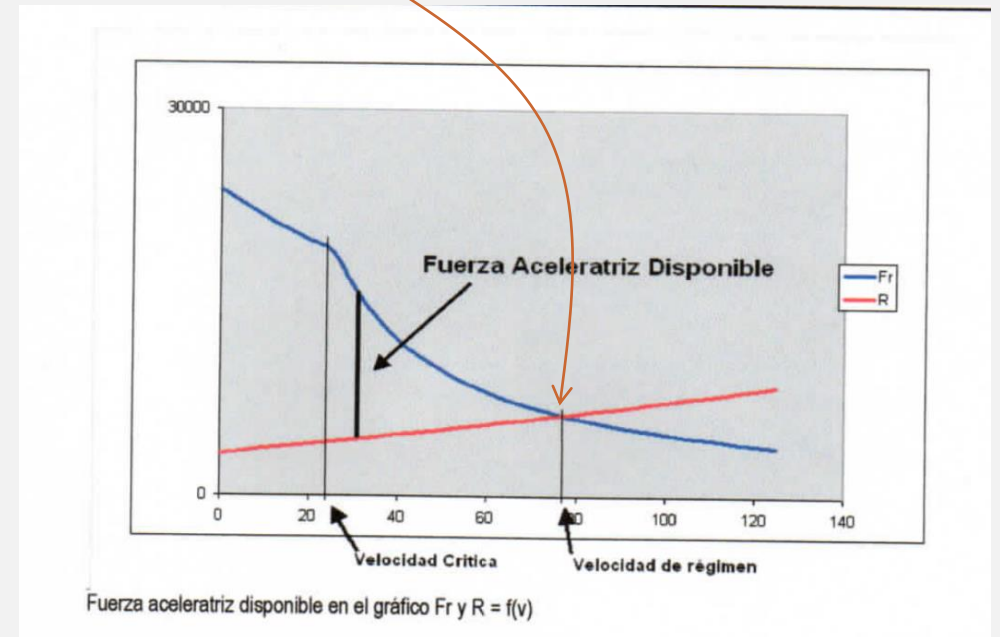
-El tramo x es conocido (condiciones planialtimétricas ctes).

-La velocidad de régimen (v_r) es conocida

$$\rightarrow v_r = \frac{x}{t}$$

$$\rightarrow t = \frac{x}{v_r}$$

$$\frac{dv}{dt} = \overbrace{(Fr - R)}^{= 0} \times \frac{g}{1000 \propto (P + Q)}$$



CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Etapa de detención

Coasting (o deriva)

Frenado

Coasting (o deriva)

$$Fr = R + 1000 \times \alpha \times \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt} \quad \longrightarrow \quad 0 = R + 1000 \times \alpha \times \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

Resolviendo como en la etapa de aceleración :

$$x = \psi \times \int_0^{vf} \frac{v dv}{(-R)}$$

$$t = \psi \int_0^{vf} \frac{dv}{(-R)}$$

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Frenado

Zapata - llanta
 Mordaza – discos de freno
 Freno dinámico

$$Fr = R + 1000 \times \alpha \times \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt} \quad \longrightarrow \quad 0 = R + Rf + 1000 \times \alpha \times \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

Resolviendo como en la etapa de aceleración :

$$x = \psi \times \int_0^{vf} \frac{v dv}{(-R - Rf)}$$

$$t = \psi \int_0^{vf} \frac{dv}{(-R - Rf)}$$

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Frenado mecánico

Q: Peso sobre las ruedas con freno (peso adherente)

μ : Coef. De rozamiento zapata - llanta

ϕ : Coef. De adherencia llanta - riel

B: Fuerza de frenado que se transmite a la zapata de freno

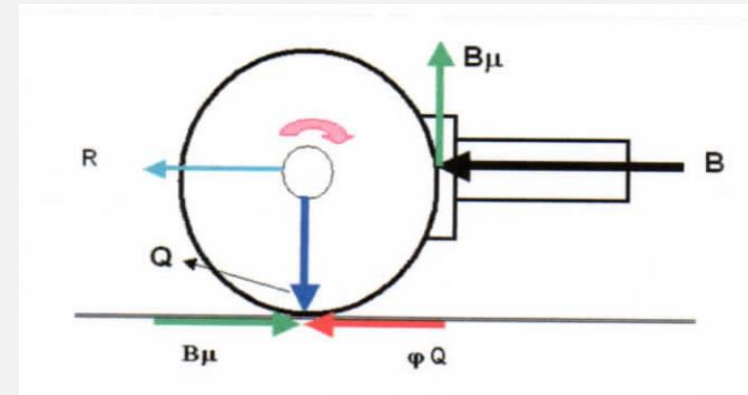
R: Resistencia al avance aplicada sobre el eje

μB : Fuerza de frenado aplicada en la superficie de rodamiento de la llanta que genera la resistencia adicional de frenado

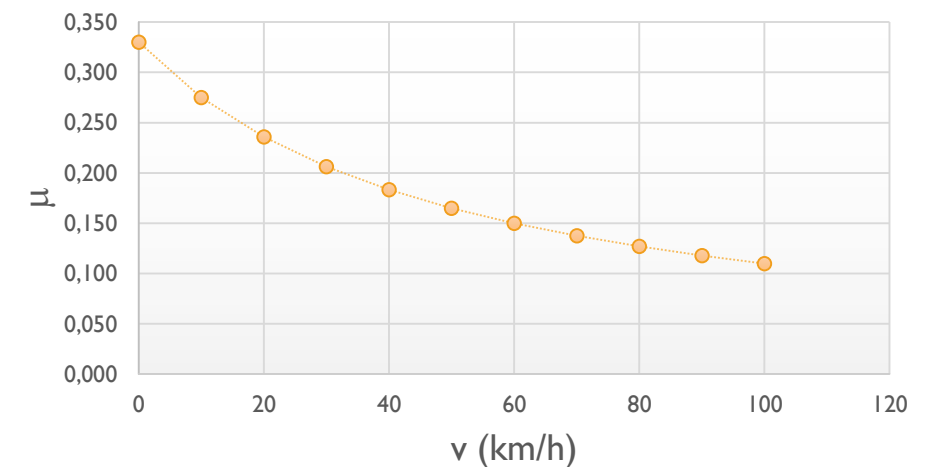
ϕQ : Fuerza de adherencia límite

$R_{f1} = \mu \times B$ Resistencia **máxima** de frenado

$\mu = \frac{0,33}{1 + 0,02 \times v(km/h)}$ Fórmula de Parodi (para aplicaciones de corta duración)



Coeficiente de Parodi



CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Frenado mecánico

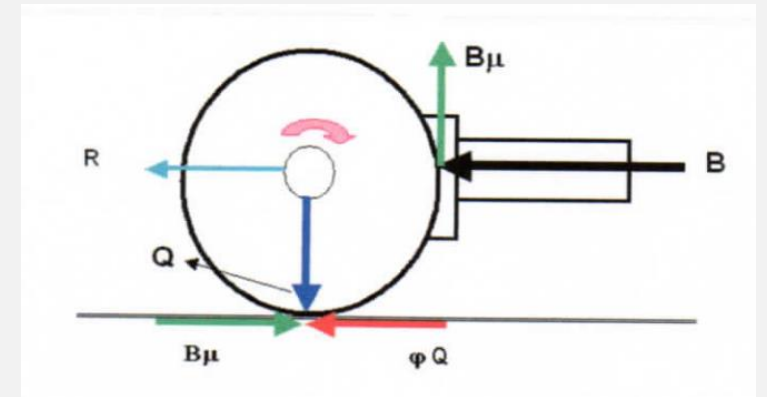
La fuerza B debe tener valores acotados a fin de no romper la adherencia

$$Rf1 = \mu B \leq \varphi Q \quad \Rightarrow \quad B \leq \frac{\varphi}{\mu} Q$$

$$\frac{\varphi}{\mu} = k \quad \text{Coeficiente de frenado}$$

K=0,7 trenes de carga

K=0,8 trenes de pasajeros



Valor máximo de fuerza a proveer por los dispositivos de freno

$$B = k \times Q$$



$$Rf_{max} = \mu \times k \times Q$$

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Frenado mecánico

$$Rf_{max} = \mu B = \mu \times k \times Q$$

Peso de frenado

Para el cálculo de frenado de servicio, se toma algunas condiciones adicionales de manera de no superar la condición de máxima adherencia llanta riel

$$Rf1 = \mu B \leq \varphi Q$$

A- Sólo se considera el peso de tara: en Argentina = $\frac{Q}{3}$

B- En los trenes de carga de llanura se permite que una porción n de vagones sobre un total de N tengan freno:

$$J = \frac{n}{N}$$

C- Coeficiente de seguridad: $Cs = 0,5$

Resistencia de frenado de cálculo:

$$Rf = 0,5 \times \mu \times k \times \frac{Q}{3} \times J$$

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Frenado mecánico

Por lo tanto la resistencia adicional de frenado queda, (aplicando la fórmula de Parodi):

$$R_f(kg) = 0,5 \times \frac{0,33}{1 + 0,02 \times v} \times k \times \frac{Q}{3} \times J$$

La resistencia específica de frenado es:

$$r_f(kg/ton) = 0,5 \times \frac{0,33}{1 + 0,02 \times v} \times k \times \frac{J}{3} \times 1000$$

Luego la sub etapa de frenado queda como:

$$0 = R + R_f + 1000 \propto \frac{Q}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

Por lo tanto la EGMF para el cálculo de horario en esta sub etapa queda:

$$0 = Q(ro_v + r_f \mp i + r_c) + 1000 \propto \frac{Q}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

$$0 = (ro_v + r_f \mp i + r_c) + 1000 \frac{\alpha}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

El método discretiza las integrales deducidas para calcular tiempo de desplazamiento y recorrido

$$t = \psi \int_0^{vf} \frac{dv}{(Fr - R)} \Rightarrow t = 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \int_0^{vf} \frac{dv}{(Fr - R)} \Rightarrow \Delta t = m \frac{\Delta v}{m\gamma_m} = \frac{\Delta v}{\gamma_m} \Rightarrow t = \sum_{i=1}^n \Delta t = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta v}{\gamma_m}$$

$$x = \psi \times \int_0^{vf} \frac{v dv}{(Fr - R)} \Rightarrow x = 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \int_0^{vf} \frac{v dv}{(Fr - R)} \Rightarrow \Delta x = m \frac{v_m \Delta v}{m\gamma_m} = \frac{v_m \Delta v}{\gamma_m} \Rightarrow x = \sum_{i=1}^n \Delta x = \sum_{i=1}^n \frac{v_m \Delta v}{\gamma_m}$$

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

El proceso de cálculo se puede ordenar la siguiente planilla

V	v	i	R curv	rc	rol	rov	r0	μ	Rf	R	Fr	γ	γm	Δv_i	Δt	$\Sigma \Delta t$	$\Sigma \Delta t$	vm	Δx	$\Sigma \Delta x$	$\Sigma \Delta x$
km/h	m/s	‰=kg/tn	m	kg/tn	kg/tn	kg/tn	kg/tn		kg	kg	kg	m/s ²	m/s ²	m/s	s	s	h	m/s	m	m	km

V (km/h): Velocidad a imponer de acuerdo a intervalos de integración convenientes

i(‰): valor de rampa(+)/pendiente(-) del tramo de análisis, expresada en ‰ que es equivalente al valor de resistencia al avance en kg/tn

R curv(m): radio de curvatura

rc(kg/tn): valor de resistencia al avance en curva

rol(kg/tn): valor de resistencia unitaria al avance en recta y horizontal de locomotoras

rov(kg/tn): valor de resistencia unitaria al avance en recta y horizontal de coches y vagones

ro(kg/tn): valor de resistencia unitaria al avance en recta y horizontal del tren completo

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

El proceso de cálculo se puede ordenar la siguiente planilla

V	v	i	R curv	rc	rol	rov	r0	μ	Rf	R	Fr	γ	γ_m	Δv_i	Δt	$\Sigma \Delta t$	$\Sigma \Delta t$	vm	Δx	$\Sigma \Delta x$	$\Sigma \Delta x$
km/h	m/s	‰=kg/tn	m	kg/tn	kg/tn	kg/tn	kg/tn		kg	kg	kg	m/s ²	m/s ²	m/s	s	s	h	m/s	m	m	km

μ : Coeficiente de rozamiento zapata – llanta $\mu = \frac{0,33}{1 + 0,02 \times v(km/h)}$ Fórmula de Parodi (para aplicaciones de corta duración)

Rf (kg): Resistencia al avance por aplicación de freno mecánico



$$Rf = 0,5 \times \mu \times k \times \frac{Q}{3} \times J$$

R(kg): valor de resistencia Total al avance

Fr(kg): valor de fuerza de tracción en la llanta (ejercida por material tractivo)

$\gamma(m/s^2)$: Aceleración instantánea, a partir de EGMF $\Rightarrow Fr - R = 1000 \propto \frac{(P + Q)}{g} \times \frac{dv}{dt} \Rightarrow \gamma = (Fr - R) \times \frac{g}{1000 \propto (P + Q)}$

$\gamma_m(m/s^2)$: Aceleración media de cada intervalo de integración $\Rightarrow \gamma_m = (\gamma_i - \gamma_{i-1}) \times \frac{1}{2}$

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

El proceso de cálculo se puede ordenar la siguiente planilla

V	v	i	R curv	rc	rol	rov	r0	μ	Rf	R	Fr	γ	γ_m	Δv_i	Δt	$\Sigma \Delta t$	$\Sigma \Delta t$	vm	Δx	$\Sigma \Delta x$	$\Sigma \Delta x$
km/h	m/s	$\text{‰}=\text{kg/tn}$	m	kg/tn	kg/tn	kg/tn	kg/tn		kg	kg	kg	m/s ²	m/s ²	m/s	s	s	h	m/s	m	m	km

$\Delta v(\text{m/s})$: Intervalo de integración elegido $\Rightarrow \Delta v = v_i - v_{i-1}$

$\Delta t(\text{s})$: Tiempo transcurrido durante el intervalo $\Delta v \Rightarrow \Delta t_i = \frac{\Delta v_i}{\gamma_m}$

$\Sigma \Delta t(\text{s})$: Tiempo acumulado por el tren para recorrer el tramo en estudio

$v_m(\text{m/s})$: velocidad media en el intervalo de integración $\Rightarrow v_m = (v_{i-1} + v_i) \times \frac{1}{2}$

$\Delta x(\text{m})$: Espacio recorrido en el lapso $\Delta t \Rightarrow \Delta x_i = v_{mi} \times \Delta t_i \Rightarrow \Delta x_i = \frac{v_{mi} \times \Delta v_i}{\gamma_m}$

$\Sigma \Delta x(\text{m})$: Espacio recorrido por el tren desde que se inicia el movimiento

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

Entradas de la planilla

1-La variable de integración es la velocidad, se debe interponer intervalos para simular el avance del tren

2- Las rampas/pendientes se establecen con signo

3- Las curvas se incorporan a según de las fórmulas previamente vistas.

4- Condiciones fijadas previamente para el cálculo: Velocidad máxima (régimen) y precauciones

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

Variables que definen la longitud máxima del tramo en análisis

1-Cambio del valor de gradiente (rampa/pendiente)

2- Aparición de curvas horizontales o variación de sus parámetros.

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

Variables que definen la longitud máxima del tramo en análisis

1-Cambio del valor de gradiente (rampa/pendiente)

2- Aparición de curvas horizontales o variación de sus parámetros.

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

Simulación de la corrida del
tren

- 1- Se van imponiendo valores de velocidad (crecientes o decrecientes), según el valor de aceleración media que surja, se deben adoptar intervalos de entre 1 a 5km/h de manera de obtener valores de una buena precisión
- 2- A medida que se imponen valores crecientes de velocidad, tanto Δt , como Δx aumentan
- 3- A medida que se el simulación avanza, las condiciones que rige el movimiento seguirán sin alterarse hasta que cambien las condiciones planialtimétricas.
- 4- La longitud del tramo es conocida, por lo tanto el análisis del tramo termina cuando $\Sigma \Delta x = \text{long. del tramo}$ (se debe realizar un proceso iterativo),

CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

APLICACIÓN DE LA EGMF PARA EL CÁLCULO DE HORARIO FERROVIARIO

Método de Integración Numérica

Situaciones especiales de la simulación:

1- Si $\gamma m = (-)$ (por ejemplo en una rampa de alto gradiente, entonces se debe adoptar un $\Delta v = (-)$ de manera que $\Delta x = \Delta v / \gamma m = (+)$)

2- Si hay una pendiente de gran gradiente, puede ser que el tren supere la v_{max} (régimen) por lo tanto el resto del tramo se fija circulación a v_{max} constante, $t = x_f / v_{max}$

3- Si el tren se encuentra una rampa de gradiente importante tal que este haga que $v = 0 \text{ km/h}$, entonces se llega al límite de capacidad de tracción de la locomotora con el tren dado.