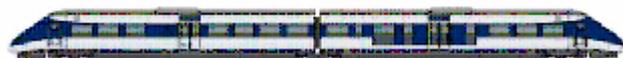
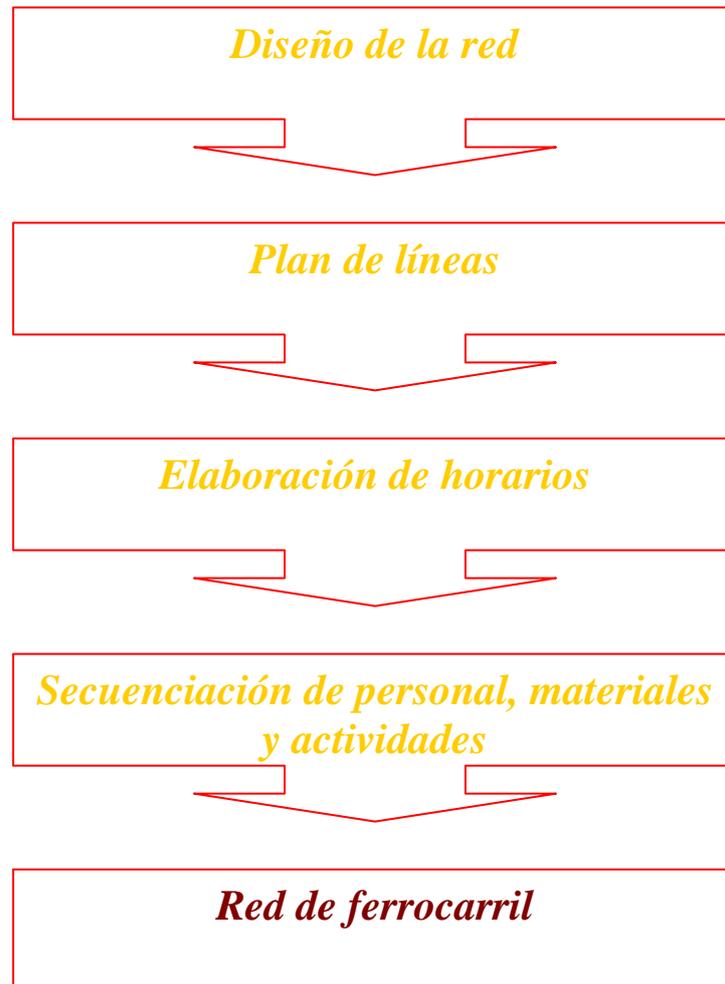


6.- Indicadores de fiabilidad.

Para establecer una cuantificación de la fiabilidad y la robustez de una línea férrea, se van a desarrollar una serie de indicadores que permitan establecer algoritmos matemáticos que permitan establecer valoraciones. Estas valoraciones servirán para poder calificar a los distintos aspectos y fases de la planificación en ferrocarriles, pudiendo establecer comparaciones, facilitando la señalización de puntos débiles y sugiriendo mejoras en su concepción. Para ello, es fundamental que los datos obtenidos sean de carácter universal, pudiendo ser procesados y extrapolados a otros tipos de redes de ferrocarril. Estos indicadores se van a dividir en cuatro grupos diferenciados, establecidos así por ser el orden lógico en las fases de la planificación de la red:

Estimación de la demanda

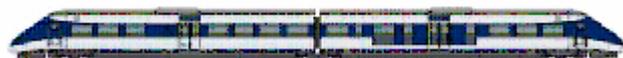




6.1.- Diseño de la red.

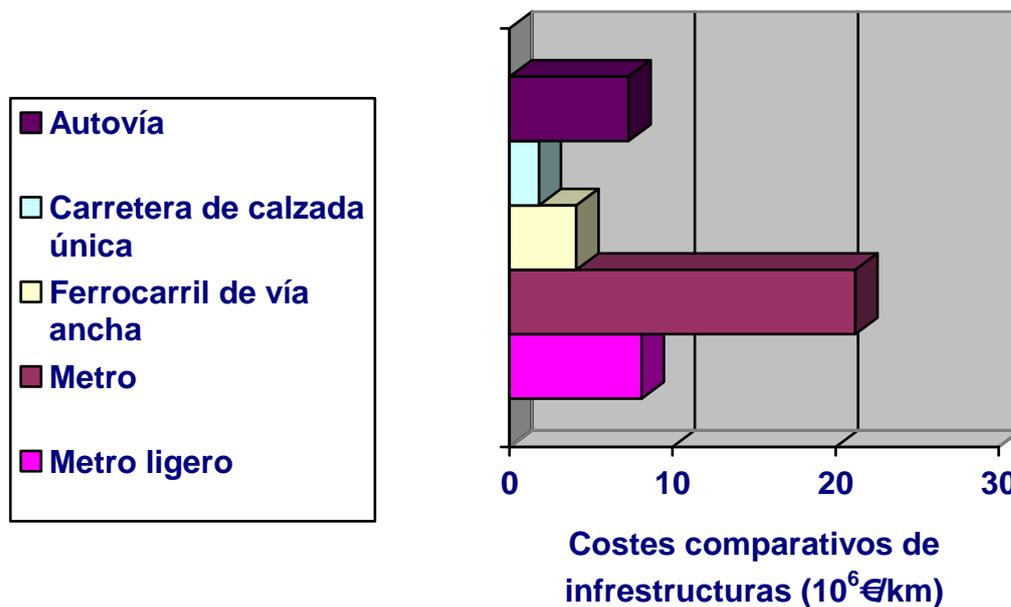
El diseño de la red es uno de los aspectos en los que menos posibilidades de actuación suele haber. Normalmente, en el diseño de una red de transporte, hay que unir una serie de puntos, los cuales ya vienen determinados por intereses demográficos, políticos, económicos o comerciales, por lo que en muchos casos no se considera objeto de estudio. No obstante, si se quiere hacer un diseño que optimice los recursos y que sea lo más eficaz posible, habría que estudiar posibles variaciones de los nodos de la red, de tal manera que satisfagan los intereses antes mencionados, pero intentando obtener el mejor rendimiento posible.

Otro dato a tener en cuenta en el diseño de la red es el horizonte de predicción. Debido al elevado coste de este tipo de infraestructuras, se busca que el diseño realizado tenga una vigencia al menos de veinte años, siendo a veces una cantidad considerablemente mayor, o incluso ilimitada en el tiempo. También es necesario



considerar futuras ampliaciones de la red, o posibles cambios que se puedan dar en ella (principalmente debidos a intereses demográficos) con el objeto de que el diseño inicial facilite estos cambios. No debe olvidarse tampoco, que en el caso de las infraestructuras, la inmensa mayoría de la inversión no podrá ser recuperada para otros usos, por lo que si no resulta útil, se habrán perdido millones de euros por cada kilómetro construido.

Esta parte entra dentro de un enfoque de planificación estratégico, y está estrechamente relacionada con la planificación territorial y urbanística, que es al que genera la movilidad que precisamente se está intentado gestionar.

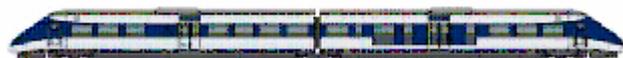


(Fuente: *Planificación de sistemas ferroviarios metropolitanos*, Alfonso Orro Arcay, datos de 2004)

Los métodos para el diseño de redes de transporte son muy variados. Por lo general, la mayoría se basan en las matrices origen-destino, o en algún modelo basado en dicha matriz. Si el estudio es estratégico, se aumentará el tamaño de las zonas de origen/destino, disminuyendo el número general de estas. Es, por decirlo de alguna manera, un diseño un tanto más a grosso modo. En cambio, si el estudio es más detallado, habrá que disminuir el tamaño de las zonas consideradas, aumentando considerablemente el número de ellas, siendo este tipo de análisis más costoso, ya que requiere de más recursos.

Aquí se va a exponer una relación de los principales métodos que se utilizan para el diseño de este tipo de redes:

- I. *Método de cuatro etapas*. Posiblemente sea el más utilizado de todos los métodos de planificación. Este proceso se realiza utilizando la densidad y localización de población o de carga actual para verificar que los volúmenes previstos por el método estén de acuerdo con la realidad. Finalmente, se usan

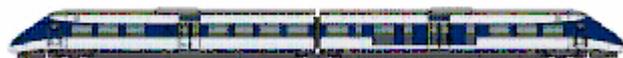


las estimaciones de población futura para recalculer el número de trenes en cada arco de la red que se usará para el diseño, por lo que se trata de un proceso de diseño iterativo. Esta última parte es interesante, ya que se pueden predecir futuras ampliaciones de las líneas, modificando el diseño con el fin de facilitarlas, lo cual es útil cuando no se dispone del suficiente capital para realizar la red completa. Se utiliza principalmente para la planificación del transporte y es exigido por ley en muchas zonas urbanas. Como el propio nombre indica, este método consta de cuatro partes bien diferenciadas:

- Generación de viajes, o número de personas o cantidad de carga que produce un área. Tiene por fin la obtención de los viajes producidos y atraídos por cada zona de la ciudad y su evolución con el tiempo. Se clasifica a la población mediante encuestas, según el número de viajes y la causa de ellos. Se obtienen entonces los ratios de viaje por cada categoría de vivienda y grado de motorización. El número de viajes originado en una zona es el ratio de viajes por el número de viviendas, aunque también se cuantifican los viajes no basados en el domicilio. La atracción de viajes en una zona sale del número de unidades de cada actividad en la zona. Se tiene entonces una estimación de los viajes atraídos y generados por cada zona de la ciudad. La proyección en el tiempo se determina estadísticamente. Se realizan entonces unas curvas de regresión con los datos obtenidos, de las cuales se obtienen los valores de la demanda y generación de viajes que con mayor probabilidad ocurra en un tiempo futuro.
- La distribución de viajes, que permite estimar el número de viajes o cantidad de carga entre cada zona de origen y destino. Se distribuyen los viajes por medio de un modelo gravitatorio tradicional, en el cual:

$$V_{ij} = \frac{P_i A_j F(I_{ij})}{\sum_{j=1}^n A_j F(I_{ij})}$$

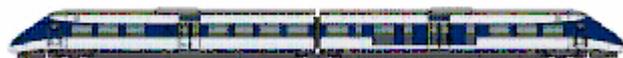
- V_{ij} = Número de viajes producidos por i y atraídos por j.
- P_i = Viajes producidos en la zona i.
- A_j = Viajes atraídos por la zona j.
- $F(I_{ij})$ = Fricción al intercambio entre zonas i y j:
 - $F(I_{ij}) = \alpha I_{ij}^{\beta} \cdot c^{\gamma I_{ij}}$
 - α , β y γ son parámetros de ajuste.
 - c = Coeficiente de conversión de dinero en tiempo.



- I_{ij} = Impedancia entre zonas i y j . La impedancia entre zonas se define como el índice expresivo del coste y del tiempo que el usuario necesita para el viaje entre la zona i y la zona j :
 - $I_{ij} = a T_{\text{and } ij} + b T_{\text{esp } ij} + T_{\text{veh } ij} + T_{\text{tarifa } ij}$
 - T_{and} = Tiempo invertido a pie.
 - T_{esp} = Tiempo invertido en espera.
 - T_{veh} = Tiempo invertido en viaje en el vehículo.
 - T_{tarifa} = Importe de las tarifas en los modos que utiliza el usuario.
 - a = Coeficiente de ponderación del tiempo invertido andando.
 - b = Coeficiente de ponderación del tiempo de espera.

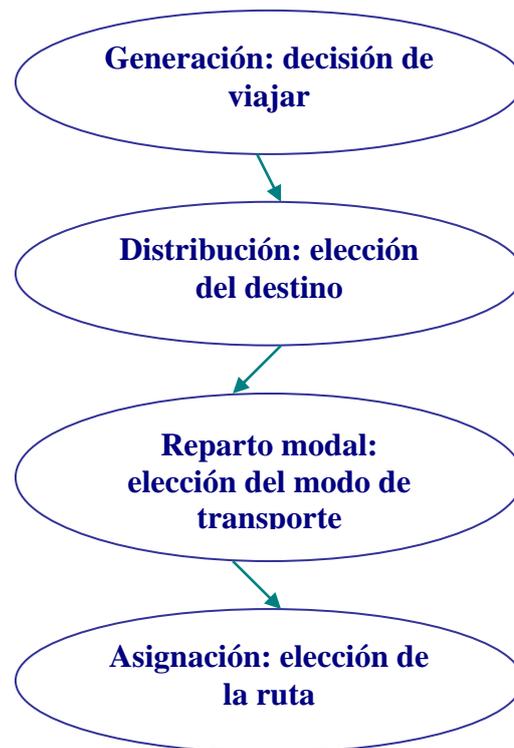
Los valores asignados a la fricción y a la impedancia dependerán del equipo de trabajo asignado, por lo que es posible su variación de manera un tanto subjetiva. El resultado es un conjunto de valores que simbolizan los viajes producidos y atraídos por las diferentes zonas. Sabiendo las localizaciones de las zonas, y las distancias entre ellas, se establecen matrices de tiempo para todos los modos de transporte, seleccionándose los mínimos, que serán los óptimos para el mejor aprovechamiento de los recursos. El proceso final consiste en ajustar la función de fricción para que el modelo reproduzca fielmente los datos obtenidos de las encuestas mediante un proceso iterativo.

- La partición modal, es decir, el cálculo del número de viajes o cantidad de carga que usarán los diferentes modos de transporte y su conversión en número de trenes. Se basa en la probabilidad de que un medio de transporte sea usado por un individuo, lo que está en función del individuo y de la impedancia del modo. La impedancia entre zonas es función del coste del viaje y del tiempo en el que se realiza. Se obtienen matrices de impedancia para cada modo e integrándose se obtiene la matriz de fricción para las fórmulas. Se usan cálculos de la probabilidad basados en los parámetros anteriores de impedancia y número de viajes. Con la probabilidad tenemos ya una estimación del tráfico de personas a transportar.
- La asignación. Este apartado hace referencia a la forma óptima de unir los nodos obtenidos. Se decide cuantos vehículos deben ir por cada arco de la red. La asignación de viajes se realiza proporcional a los caminos

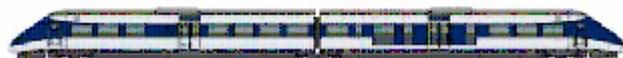


de mínima impedancia, presentado un mayor volumen de viajeros aquellos arcos con menos problemas

A modo de esquema intuitivo, se puede exponer este método de la siguiente manera:



- II. *Método de teoría de colas.* Es una técnica basada en *la investigación de operaciones* para solucionar problemas que se presentan en las situaciones en las cuales se forman turnos de espera o colas para la prestación de un servicio o ejecución de un trabajo. La toma de decisiones en problemas de colas van a tener un distinto peso o valoración en función de la situación planteada. Utiliza la estadística y ciertas asunciones sobre el proceso de servicio. Permite estimar, a partir de las tasas de llegada de los clientes (ya sean vehículos o personas) y de la velocidad de atención de cada canal de servicio, la longitud de cola y el tiempo promedio de atención. La tasa de llegada de los clientes debe analizarse para conocer, no solamente su intensidad en número de clientes por hora, sino su distribución en el tiempo. Se ha hallado, experimentalmente, que la distribución de Poisson y las distribuciones geométricas reflejan bien la llegada aleatoria de clientes y la llegada de clientes agrupados, respectivamente. Se utiliza principalmente para la estimación de número de casetas de peaje, surtidores en estaciones de combustible, puestos de atención en puertos y aeropuertos y número de



cajeros o líneas de atención al cliente requeridas en un establecimiento. Los objetivos de este tipo de análisis son:

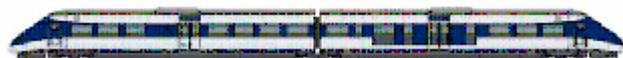
- Plantea una visión amplia del problema de las líneas de espera, o colas, que incluya las percepciones y valoraciones que hace el usuario, o cliente, de la calidad del servicio, así como la búsqueda de la minimización de costos, aplicando las técnicas matemáticas conocidas.
- Establecer los diferentes enfoques que existen para plantear soluciones a las líneas de espera.
- Determinar los aspectos que definen la percepción de comodidad por parte del cliente.
- Definir los factores subjetivos en cuanto a la calidad del servicio, por parte del cliente.
- Plantear un modelo de evaluación global de las condiciones de la línea de espera, en los que incluir los factores enumerados.

(Teoría de colas de espera: Modelo integral de aplicación para la toma de decisiones. Rodriga Barbosa, Alfredo Rojas. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte)

III. *Métodos de simulación de transporte.* Existen dos tipos principales de simulaciones en computador utilizadas en la ingeniería de transporte: macrosimulaciones y microsimulaciones. Este método tiene el problema de la cercanía a la realidad que pueda tener la extrapolación de los datos obtenidos ya que tiene excesiva dependencia con la subjetividad del equipo de trabajo encargado de dicho estudio.

- Las macrosimulaciones utilizan ecuaciones que reflejan parámetros generales de la corriente vehicular, como velocidad, densidad y caudal. Muchas de las ideas detrás de estas ecuaciones están tomadas del análisis de flujo de líquidos o gases o de relaciones halladas empíricamente entre estas cantidades y sus derivadas.
- Las microsimulaciones simulan cada vehículo o persona individualmente y hacen uso de ecuaciones que describen el comportamiento de estos vehículos o personas cuando siguen a otro (ecuaciones de seguimiento vehicular) o cuando circulan sin impedimentos.

IV. *Métodos de coeficientes.* Utilizan ecuaciones de tipo teórico en las que se intenta plasmar la realidad. Parten de mediciones que indican la capacidad de una red en condiciones ideales. Esta capacidad, normalmente, va disminuyendo a medida que la red o circunstancias se alejan de ese ideal. Estos métodos proporcionan los coeficientes que indican la capacidad de la red en función de las condiciones. Estos coeficientes son menores que la



unidad, por los que se debe multiplicar la capacidad ideal de la red para encontrar la capacidad en las condiciones dadas. No es muy utilizado.

De todos estos métodos se desprende que, aunque detrás de ellos hay una base analítica, dependen de una cierta subjetividad del equipo de trabajo. Debido a esto, no siempre que se hagan diferentes estudios sobre un mismo problema, se van a llegar a la misma solución, siendo el resultado obtenido siempre discutible, y posiblemente mejorable.

Antes de la elaboración del diseño de la red, es preciso realizar un estudio de la demanda a la que se va a tener que hacer frente. La fuerte inversión necesaria, la gran duración de las infraestructuras, y una cierta irreversibilidad de las mismas, exigen realizar un concienzudo estudio de la demanda, su distribución, y su futura proyección, tanto a corto, como a medio plazo.

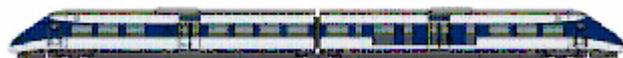
A continuación, se va a comentar una serie de directrices encaminadas a un posible estudio de tipo económico. Las actividades a realizar para llevar a cabo un estudio de este tipo vienen resumidas de la siguiente manera:

- A. Recogida de información, tal como demografía, puestos de empleo por sectores de actividad, etc. Esto sólo es posible hacerlo de manera generalizada, para después utilizar modelos que sirvan para extrapolar los datos obtenidos.
- B. Toma directa de datos de la demanda de viajes por medio de encuestas. Esto sólo se realiza cuando la información encontrada al respecto no se considera suficiente, ya que, por lo general, encuestas de este tipo se encuentran ya hechas y lo único que hay que hacer es encontrar la forma de extrapolar los datos en función de las necesidades.

En términos de marketing, el hecho de realizar encuestas de forma prematura sin haber buscado previamente por otros medios la información que se necesita, se denomina como “impulso del principiante”.

El procesamiento de los datos es una parte fundamental en este tipo de estudios, ya que las conclusiones obtenidas de ellos dependen en gran medida del tratamiento recibido por los datos obtenidos y la forma de analizarlos. La información básica que es interesante utilizar es la siguiente:

- Número de habitantes (a nivel de sección censal). Esto tiene el problema de que en municipios con una gran atracción turística, o con una fuerte inmigración, se obtendrán datos irreales, por lo que será necesario tener en cuenta estos aspectos a la hora de elaborar el estudio, corrigiendo los datos obtenidos si fuese necesario.
- Información urbanística y planes parciales vigentes. Para ello es fundamental revisar el *plan general de ordenación urbana*, que es donde se puede obtener la información necesaria.

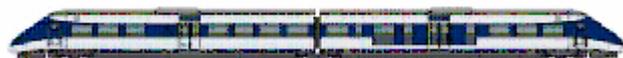


- Parque de vehículos y su distribución por zonas.
 - Puestos de empleo y su distribución por zonas. También en este punto es interesante considerar a los estudiantes, ya que a pesar de su escaso poder económico, ofrecen una gran masa de clientes potenciales.
- C. Análisis del volumen de la demanda de viajes y su definición en función de las variables explicativas socioeconómicas, cuya evolución debe simularse para poder realizar proyecciones a medio y largo plazo. Depende en gran medida de los criterios elegidos para realizar las predicciones futuras.
- D. Distribución de los viajes entre las distintas zonas consideradas.
- E. Prognosis de la demanda y su distribución para los años horizonte que se hayan considerado. Este bloque comprende:
- Definición y evaluación de las diferentes alternativas que se hayan planteado.
 - La determinación de los años óptimos para la realización de las inversiones correspondientes.

Después de este estudio, se realizan una serie de simulaciones para evaluar la red que se acaba de diseñar, tanto en condiciones ideales de la red, como en condiciones adversas.

En estas simulaciones, se suele tratar la red como si de un grafo se tratara, considerando las estaciones como nodos, y las líneas que unen las estaciones como arcos.

El objeto de estas simulaciones es obtener la forma más eficiente de unir los nodos prefijados con el fin de que cualquier perturbación afecte a la red en la menor medida posible. Evidentemente, para esto lo mejor sería un sistema completamente mallado, tal y como ocurre en las redes eléctricas de baja tensión. En el caso del ferrocarril, debido a la infraestructura necesaria y al desembolso económico necesario para ello, hacen que un mallado total de la red sea inviable, y sólo sea rentable un mallado parcial en las líneas de metro de las grandes urbes. Por ello, la mayor parte de las líneas ferroviarias tienen un sistema de red de tipo árbol, y es aquí donde cobra importancia el estudio.



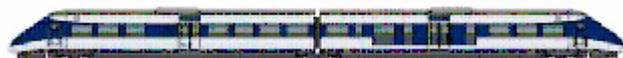


(Detalle de la red de cercanías de Madrid. <http://www.renfe.es/cercanias/madrid/>)

6.1.1.- Indicadores para el diseño de la red.

A continuación, se van a exponer los aspectos más relevantes a considerar:

- **Diámetro de una red:** Camino más corto para unir dos puntos que son los más alejados de la red. Este índice sirve para dar una idea de la extensión de la



red. Cuanto mayor sea el diámetro de una red, más tiempo se tardará en recorrerla, y por lo tanto habrá más posibilidades de que haya algún incidente en ella. Para unos nodos dados, evidentemente cuanto más pequeño sea este índice, mejor se habrá trazado el camino entre los nodos, ya que al ser el trayecto más rectilíneo, el ahorro de costes cobra gran importancia. No sólo un ahorro de tiempo es importante por la duración en sí, si no que conlleva ahorro de combustible, menor desgaste de piezas y ahorro en la construcción de la infraestructura necesaria, ya que el hecho de que haya curvas, implica cálculo de peraltes, aceleraciones sin compensar, desgaste de carriles, mayor necesidad de mantenimiento e incomodidad para el pasajero. Se calcula sumando las distancias de la ruta mínima para unir dos puntos, para lo cual se suele utilizar el algoritmo de *Dijkstra*.

$$\text{Diámetro} = \max(\min d_{ij})$$

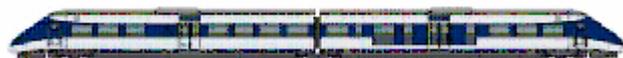
El índice anterior sirve de base para establecer otros índices que cuantifiquen la calidad de la vía:

➤ *Incremento de diámetro al eliminar arcos o nodos:*

$$\frac{\text{Diámetro final}}{\text{Diámetro inicial}}$$

Este índice sólo tiene sentido si al eliminarse un nodo o lazo de la red (o varios), los nodos más alejados siguen conectados entre sí. Este índice hace referencia al incremento de la distancia que existe entre estos nodos cuando algún tramo de la vía o alguna estación, que existía en la ruta más corta para unirlos, queda fuera de uso, obligando a tomar una ruta alternativa. El valor mínimo de este índice es uno, cuando la ruta ha sido inalterada, y sería infinito, en el caso de que la comunicación entre los nodos fuese imposible. Esto también se podría considerar como una cuantificación del mallado de la vía, que sería el caso ideal, aunque el coste de la infraestructura necesaria sería muy elevado.

Cuanto más cercano a uno sea el valor de este índice, mejor estará planificada la red, o se habrá actuado de manera eficiente con el problema que haya surgido. Este índice también puede ser ajustado, ya que el recorrido alternativo puede ser muy rápido, o por el contrario tortuoso, por lo que cabe la posibilidad de incorporar el tiempo que se ha tardado en recorrer el camino extra, lo cual se realiza normalmente en minutos, debido a las cortas distancias de los trenes de cercanías. La evaluación de este tiempo, dependerá de la capacidad del tren que esté disponible para recorrerlo. Otro aspecto más que se puede incorporar a este índice es el número de usuarios que ha sido afectado por el problema, con lo que se obtiene una evaluación completa del daño causado debido a la perturbación. Con estos nuevos aspectos, se lleva a cabo la concepción del siguiente índice:



- *Perjuicio por incremento de diámetro:*

$$\frac{\text{Diámetro final}}{\text{Diámetro inicial}} \cdot (\text{Tiempo extra}) \cdot (\text{Usuarios afectados})$$

Con este indicador se consigue saber con exactitud el grado del perjuicio o daño, causado por el corte de la vía, con lo que se podrá estimar la gravedad del mismo. Los usuarios que se consideran en este índice son todos aquellos que han sido afectados por el hecho de haberse eliminado uno, o varios arcos, o nodos de la red. El tiempo a considerar es el exceso de tiempo medio que han tardado los usuarios en llegar a su destino sobre el tiempo previsto de llegada a su destino, considerado en minutos.

- *Resistencia de la red: mín* $\left[\frac{\text{Nodos conectados}}{\text{Nodos totales}} \right]$

Este índice hace referencia a los nodos que permanecen conectados al quedar una estación fuera de servicio, así como las vías que se dirigen hacia ella. Este estudio se realiza quitando nodos que haya probabilidad de quedar inutilizados, o tramos de vía que puedan quedar cortados. Así se exploran las capacidades de la vía para ofrecer tramos alternativos. Este índice se calcula quitando un número concreto de nodos, y repitiendo la operación para cada nodo de la red. Cuanto más alto sea el valor de este índice, más robusta será la red.

- *Valor medio de la resistencia de la línea:*

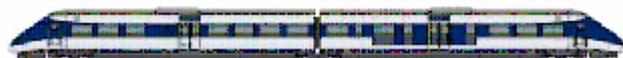
$$\text{mín} \left[\frac{\text{Nodos conectados}}{\text{Nodos totales}} \right]$$

Un posible interés del índice anterior, para evaluar una red, es hallar el valor medio de dicho índice para un número concreto de nodos eliminados, repitiendo la operación para cada nodo de la red. Cuanto más alto sea el valor de este índice, más robusta será la red.

- *Distancia media entre pares de vértices:*

Otro indicador que puede ser interesante a la hora de diseñar la red es la distancia media entre pares de vértices, y la que se tendría en caso de que varios nodos y/o lazos fueran eliminados. La fórmula es la siguiente:

$$\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j \neq i} d(v_i, v_j)$$



Este índice viene a complementar los anteriores, ya que si el anterior decía cuales nodos seguían conectados cuando se interrumpía un enlace, este viene a decir cuanto se ha incrementado la distancia que tienen que cubrir los usuarios. No obstante, es posible que la nueva conexión, que sustituye a la inutilizada, sea tan larga que los usuarios prefieran otro medio de transporte alternativo, por lo que es interesante considerar este índice, dentro de lo posible, ya que como se ha comentado anteriormente, el perfecto mallado de la vía exige una inversión excesivamente cuantiosa. Evidentemente, cuanto menor sea la distancia media entre nodos, mayor comodidad para el usuario, y menor coste de propulsión para el material móvil; así como una mayor economía de tiempo.

- *Incremento de la distancia entre pares de vértices:*

$$\frac{\left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j} d(v_i, v_j) \right]_{\text{Después de suprimir un nodo / arco}}}{\left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j} d(v_i, v_j) \right]_{\text{Grafo inicial}}} \cdot 100$$

Este índice hace referencia al incremento de distancia entre dos vértices, después de que algún nodo o arco haya sido eliminado. Este índice se calcula en tanto por cien, para una mayor comodidad a la hora de interpretarlo. Este índice sólo tiene sentido en el caso de que los nodos sigan conectados. Se pueden hacer las variaciones de este índice:

- *Incremento mínimo de la distancia entre pares de vértices:*

$$\min \left(\frac{\left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j} d(v_i, v_j) \right]_{\text{Después de suprimir un nodo / arco}}}{\left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j} d(v_i, v_j) \right]_{\text{Grafo inicial}}} \right)$$

Este índice se realizaría de la misma manera que el anterior, pero calculando el valor mínimo del incremento de la distancia entre dos pares de vértices, calculado cuando se ha quitado un arco que une dos nodos de la red, y repitiendo la operación para todos los arcos de la red. Al igual que el anterior, sólo tiene sentido este índice mientras sigan conectados los vértices de los que queremos obtener la información.

- *Incremento máximo de la distancia entre pares de vértices:*



$$\max \left(\frac{\left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j} d(v_i, v_j) \right]_{\text{Después de sup rimir un nodo / arco}}}{\left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j} d(v_i, v_j) \right]_{\text{Grafo inicial}}} \right)$$

Este índice se realizaría de la misma manera que el anterior, pero calculando el valor máximo del incremento de la distancia entre dos pares de vértices, calculado cuando se ha quitado un arco que une dos nodos de la red, y repitiendo la operación para todos los arcos de la red. Al igual que el anterior, sólo tiene sentido este índice mientras sigan conectados los vértices de los que queremos obtener la información.

➤ *Perjuicio por incremento de la distancia entre pares de vértices:*

Este índice es complementario al *incremento de la distancia entre pares de vértices*. Se expone de la misma manera que el anterior, pero en tanto por uno y multiplicándose por el número de clientes afectados por dicha medida. Al igual que el anterior índice, sólo tiene sentido si los dos vértices considerados siguen conectados.

$$\frac{\left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j} d(v_i, v_j) \right]_{\text{Después de sup rimir un nodo / arco}}}{\left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{v_i} \sum_{v_j} d(v_i, v_j) \right]_{\text{Grafo inicial}}} \cdot (\text{Pasajeros afectados})$$

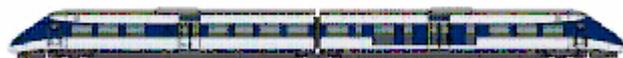
➤ *Conectividad:*

Este índice hace referencia al número medio de arcos que habría que eliminar para aislar un nodo dentro de una red. Se calcula haciendo la media de los arcos que serían necesarios quitar para que cada vértice de la red se quedase desconectado completamente del resto.

Ar cos sup rimidos

También se puede calcular este índice de manera individual para cada nodo, con el fin de comprobar cual es el que cuenta con una situación más delicada.

Arcos suprimidos



En el caso de estudiar cada nodo de manera individual, si se dispone de datos sobre los cortes que tienen los arcos que llegan al mismo, se puede calcular la probabilidad de que dicho arco quede aislado

$$\overline{(Ar \text{ cos suprimidos}_i \cdot P_i)}$$

➤ *Grado de una red:*

Este índice es complementario al anterior, y hace referencia al número mínimo de arcos que sería necesario eliminar para que la red quede dividida en componentes. Normalmente, este índice depende de la *conectividad* de los nodos exteriores de la red, ya que la manera más fácil de dividir una red en dos es eliminar los arcos que unen los nodos exteriores con el resto de la red.

$$\min(\text{Arcos suprimidos})$$

6.2.- *Plan de líneas.*

El plan de líneas incluye a las líneas de tren, su frecuencia, velocidad comercial y la ubicación de las paradas, pero no los horarios. Una línea de tren consiste en una estación de salida y una de llegada, así como las estaciones intermedias por las que transcurre el tren.

Esta parte es considerada dentro de una planificación táctica, que se orienta al medio plazo, y al uso de los recursos existentes.

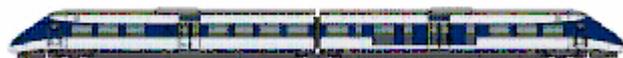
Para ayudar a este cometido, se van a establecer una serie de indicadores que van a exponer la manera de utilizar los equipos de la manera más conveniente. No obstante, el plan de líneas es algo que suele venir ya determinado por la demanda y por la capacidad de pasajeros de los trenes, por lo que estos indicadores básicamente tratarán de que todo funcione correctamente.

Las formas más importantes de organizar el plan de líneas son las siguientes:

❖ *Carrusel continuo con ramas fijas:*

Los trenes del servicio urbano suelen comenzar su recorrido a partir de una estación terminal, a intervalos de frecuencia y composición prefijados, siendo ambos invariables. Siempre circulan los mismos trenes por las mismas vías, a la misma hora.

Las “ramas” a las que se refiere esta forma de organizar el plan de líneas son tramos de la red de ferrocarril.



Este método exige un volumen de tráfico homogéneo a lo largo de la jornada de servicio, lo cual no suele ser real.

❖ *Carrusel continuo con ramas variables:*

Este método se emplea en numerosos servicios urbanos con el objeto de adecuar la demanda al servicio, de modo que en las horas puntas, el servicio se realiza con el método anterior, mientras que en las horas valle, se suprimen una serie de ramas en las estaciones terminales.

Una de las ventajas de este método es la adecuación más ajustada de la oferta a la demanda.

Los inconvenientes de este método son variados, como la variación de la frecuencia, alteración de los turnos, etc.

❖ *Carrusel continuo con alteración de composición de ramas:*

Es análogo al anterior, pero se caracteriza por el mantenimiento del número de trenes a lo largo de la jornada, lo cual produce la constancia de la frecuencia de servicio y la adecuación a la fluctuación de la demanda mediante la supresión de un número determinado de cajas en cada rama del servicio, durante las horas valle. Tiene la ventaja de que al ser la frecuencia constante, hay menos variación en los turnos de trabajo, con la consiguiente simplificación en la organización de los mismos.

❖ *Métodos para líneas especiales:*

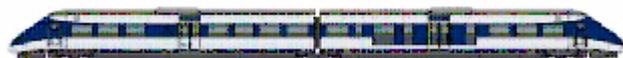
Aquí tiene cabida cualquier otro sistema que se haya considerado necesario, y que no puede ser calificado como ninguno de los anteriores. Es también el elegido en caso de tener líneas circulares, líneas con bifurcación, etc.

6.2.1.- Indicadores para el plan de líneas.

Los índices a considerar para el buen funcionamiento del plan de líneas son los siguientes:

➤ *Porcentaje de servicios operados:*
$$\frac{\text{Servicios Realizados}}{\text{Servicios totales}}$$

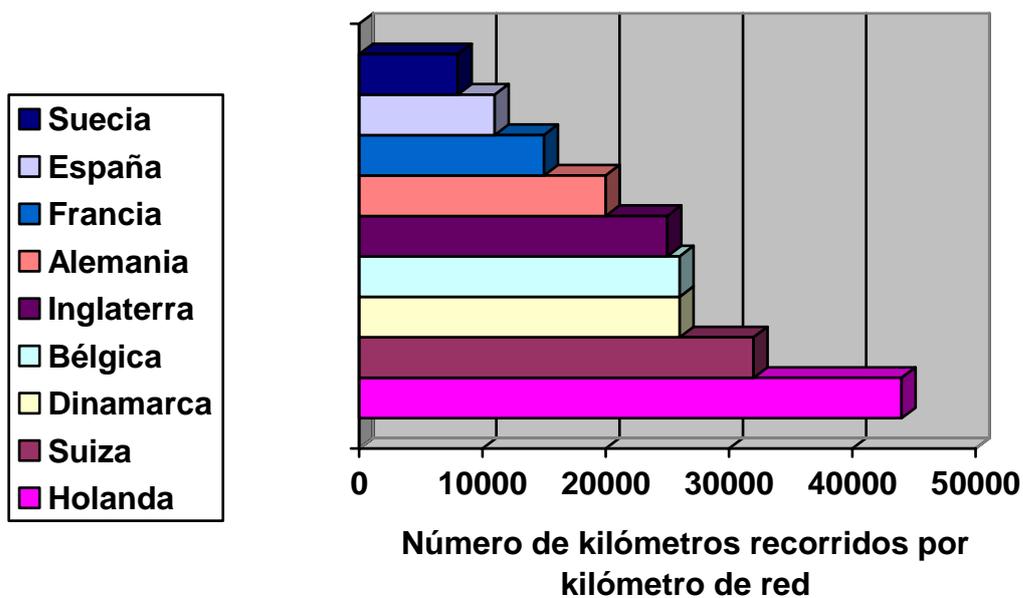
El primer índice que se va a tratar es el indicador de servicios operados. La misión de este indicador es cuantificar el número de servicios que se han realizado respecto a los que se habían ofertado. Normalmente, pocos servicios son anulados, por lo que un valor bajo de este índice denotará una baja calidad del plan de líneas. Este índice se encuentra formulado en tanto por uno, siendo



evidente su paso a tanto por cien, para poder cuantificarlo de la manera más conveniente.

➤ *Utilización de la vía:*
$$\frac{\sum N^{\circ} \text{ kilómetros recorridos}}{\text{Kilómetros totales de vía}}$$

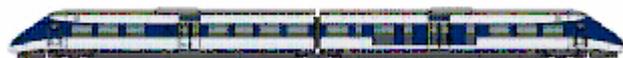
Este índice se considera para cuantificar la densidad de tráfico en la red. Dentro de Europa, en este índice hay un rango entre los 40000 kilómetros recorridos por trenes, por kilómetro de vía en Holanda, hasta los 7000 kilómetros de Irlanda, quedando España en unos 12000 kilómetros por kilómetro de vía (*Reliability of railway systems, Michiel Johannes Cornelius Maria Vromans*). Las implicaciones de este índice son importantes, ya que cuanto mayor sea la ocupación de la vía, más posibilidad hay de propagar los retrasos. Para evitarlos, se suelen ampliar los márgenes de regularidad entre trenes, lo que obliga a disminuir la velocidad de los mismos, con lo que se acaba mermando la calidad del servicio.



(Aad Veenman, CEO NS, Seminar Preceding the First Annual Arrival Workshop, Utrecht, April 18th, 2007).

Se puede hacer desde el punto de vista del número de trenes, o desde el punto de vista del número de pasajeros:

➤ *Utilización de la vía por pasajeros:*



$$\frac{\sum (N^{\circ} \text{ kilómetros recorridos} \cdot N^{\text{a}} \text{ pasajeros})}{\text{Kilómetros totales de vía}}$$

Este índice nos da una idea de la importancia de la vía en función del número de usuarios que la recorren y los kilómetros realizados en ella. Es algo más exacto que el anterior al incluir el número de pasajeros, ya que puede que en un tramo de vía no quepan más trenes por razones de infraestructura, y estos vayan hacinados de pasajeros. No obstante, si la infraestructura es capaz, el número de trenes irá acorde con el número de pasajeros, por lo que este índice y el anterior deben dar resultados parejos. Un resultado muy distinto de estos dos últimos índices implica que los trenes no están bien distribuidos.

Para que el plan de líneas funcione correctamente, es imprescindible el buen funcionamiento de dos aspectos técnicos de los que no se ha hablado hasta ahora: Las locomotoras y el suministro eléctrico a éstas. Los índices que se han elaborado para tal efecto son los siguientes:

- *Disponibilidad de la locomotora:*

$$\frac{\text{Tiempo total funcionando}}{\text{Tiempo total funcionando} + \text{Tiempo total averiada}}$$

Con este dato ya se puede tener una referencia de cuando podemos esperar un fallo de la locomotora y actuar en consecuencia. El mantenimiento preventivo es muy importante en estos casos para evitar fallos inesperados que puedan suponer un corte en la red. Evidentemente, cuanto mayor sea el índice, la locomotora será más fiable, y por lo tanto, más rentable. Los tiempos que se introducen para calcular este índice, se establecen por días. Si se supone que la variación de tiempo funcionando y averiada es constante, lo cual se suele hacer hallando la media de las locomotoras que se utilizan, se puede establecer un ciclo de uso:

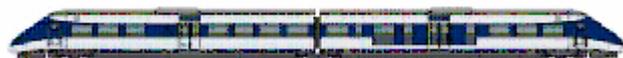
- *Ciclo de una locomotora:*

$$\text{Tiempo hasta el fallo} + \text{tiempo reparación}$$

Este ciclo es útil para tratar la fiabilidad de la locomotora mediante métodos estadísticos. Lo ideal es alargar todo lo posible el ciclo de la locomotora, pero acortando en lo posible los tiempos en reparación, que pueden ser debidos a fallos, o simplemente mantenimiento preventivo.

- *Margen de locomotoras:*

$$\text{Locomotoras activas} - \text{mantenimiento} - \text{utilizadas} - \text{averiadas}$$



Este índice se utiliza para saber cuantas locomotoras están disponibles para ser utilizadas, y así saber de cuantas se pueden utilizar para establecer el plan de líneas. Cuanto mayor sea el margen, más flexibilidad se tiene a la hora de hacer la planificación. En cambio, si el índice es muy bajo, puede que no haya locomotoras suficientes para satisfacer las necesidades de la demanda, siendo necesario suprimir servicios. Una práctica habitual que se realiza cuando este índice es bajo es suprimir las locomotoras que están en mantenimiento preventivo, lo que origina fallos en el transcurso del servicio, con la consiguiente propagación de retrasos, cortes en la línea y demás perturbaciones, que suelen acabar en grandes cantidades económicas a desembolsar para arreglar daños y abonar indemnizaciones. Por lo tanto, es importante contar con un alto margen de locomotoras.

- *Índice de fiabilidad total locomotoras:*

$$P(\text{averiadas} \leq \text{activas} - \text{mantenimiento} - \text{utilizadas})$$

Este indicador expresa la probabilidad de que una locomotora pueda estar lista para ser utilizada en cualquier momento. Para ello, tiene que cumplirse que no está averiada, ni esté en mantenimiento, ni esté siendo utilizada en ese momento. La forma de calcular el índice es calcular las locomotoras totales de que se dispone, y restarles las averiadas, las que están en reparación o mantenimiento, y las que están siendo utilizadas en ese instante (*índice margen de locomotoras*), y calculas la probabilidad de que ese número es mayor a las que se suelen averiar de manera aleatoria. Para utilizar este índice se aplica el llamado “algoritmo recurrente”, muy habitual en estudios de fiabilidad eléctrica, siendo “ P ” “la probabilidad del suceso anterior:

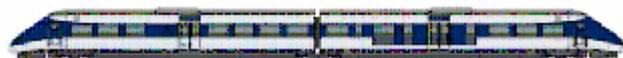
$$P(k) = P'(k)p + P'(k-1)(1-p)$$

Otro aspecto importante en el plan de líneas es la capacidad de suministrar energía eléctrica suficiente a las locomotoras. Cuando se demanda más potencia de la que admite la línea se dan cortes del suministro que provocan retrasos en la línea. Otros motivos de cortes del suministro eléctrico son muy variados, por lo que se van a proponer los siguientes índices para cuantificarlos:

- *Cortes de suministro:* $\frac{\text{Número de cortes}}{\text{Tiempo}}$

El tiempo a considerar puede ser variable, pero lo normal es considerar un año. Si se considera oportuno establecer otro período en función de los problemas que haya en cada caso, es necesario señalarlo con claridad. Por supuesto, cuanto menos cortes haya y este índice sea más bajo, mejor será.

- *Duración media de los cortes de suministro:*



$$\frac{\text{Tiempo total de cortes}}{\text{Número de cortes}}$$

A veces es importante conocer la duración de las faltas, ya que no es lo mismo que un fallo tenga una duración de un día que de unas pocas milésimas de segundo. Para ello se establece este índice que se utiliza para complementar a los demás, estableciendo un valor medio de la duración de las faltas de suministro eléctrico. La duración de este índice se va a contabilizar en minutos.

➤ *Número medio de caídas de tensión:*
$$\frac{\text{Número de caídas de tensión}}{\text{Tiempo total}}$$

Este índice hace referencia a posibles caídas de tensión que afecten a la catenaria. En principio el tren debe seguir poder circulando (si el par ofrecido por el motor es superior al conjunto de pares resistentes al movimiento del material rodante), pero no podrá desarrollar todas sus prestaciones, por lo que se provocará un retraso. El tiempo en el que se consideran las caídas de tensión puede ser variable, pero por lo general se considera un año. Si en vez de tener una caída de tensión, hubiese un corte total del suministro, no se contaría en este índice, si no en el indicador “*cortes de suministro*”. Para poder clasificar mejor las caídas de tensión, se van a desarrollar los siguientes índices, con el fin de acotar mejor el origen del problema.

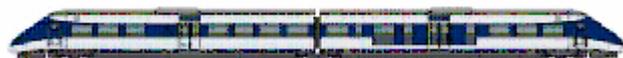
➤ *Duración media de las caídas de tensión:*

$$\frac{\sum (\text{Número de caídas de tensión} \cdot \text{Tiempo de cada caída})}{\text{Número de caídas de tensión}}$$

Con este índice se pretende establecer una cuantía de la caída de tensión, ya que cuanto mayor sea la duración de la disminución de la tensión, más retrasos causarán. Por lo general, estas duraciones no suelen ser prolongadas, por lo que si esto ocurriese, sería indicativo de que existe un problema en la instalación eléctrica.

➤ *Porcentaje de la caída de tensión:*
$$\frac{\text{Tensión total}}{\text{Tensión no min al}}$$

Aquí se va a tratar de establecer unos valores para establecer cuanto baja la tensión respecto a lo requerido. Como se ha comentado antes, es necesario que el par motor que suministra el motores o motores eléctricos de la locomotora sea superior al par resistente al desplazamiento del material móvil para que se pueda producir el movimiento. Si la caída de tensión es lo suficientemente acusada, podría ocurrir que el tren no pudiese avanzar, cosa que cobra especial relevancia en tramos de cuestas o en túneles, donde sería más complicado prestar la ayuda

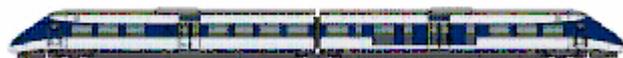


necesaria a dicho tren. Otra consecuencia menos catastrofista y que ya se ha comentado antes, es que la caída de tensión puede provocar una disminución de la velocidad comercial del tren, con el consiguiente retraso. En este retraso influirá la diferencia que exista entre la velocidad máxima de la locomotora, y su velocidad comercial ya que siempre se podrá recurrir a ese margen para paliar estos efectos. También es importante tener en cuenta que al tener menos tensión, no es posible acelerar la locomotora tan rápido como haya sido previsto, por lo que tardará más en alcanzar su velocidad comercial, provocando nuevos retrasos. Por ejemplo, una caída en el voltaje de la catenaria en torno al 10%, hace perder cerca de 15 segundos en el registro de aceleración de 0 a 140 km/h.

Con esto índices es posible tener una idea de los posible problemas que puedan ocurrir como consecuencia de problemas derivados del suministro eléctrico.

Por lo general, el suministro de la energía consumida por el material móvil, así como el resto de las instalaciones eléctricas que se pueden encontrar en una estación de ferrocarril, se aporta desde las subestaciones eléctricas distribuidas a lo largo de la línea, ya que dicho suministro es lo suficientemente importante como para no depender de la red eléctrica general. Las subestaciones eléctricas de este tipo tienen tres funciones: distribuidoras, transformadoras y rectificadoras. Es decir, su cometido es el siguiente: Distribuir la energía que llega de las acometidas de las compañías suministradoras y, por otro lado, transformar y rectificar la energía al voltaje necesario para alimentar a los trenes a corriente continua, ya que este tipo de motores no funciona con corriente de tipo alterna.

El criterio de fiabilidad exigido a las compañías para dimensionar las acometidas eléctricas en España, es el N-1 para el escenario final de explotación. Es decir, ante el fallo de una de las acometidas, la distribución de cargas resultante, debería poder ser absorbida por las restantes acometidas.



(Imagen de las subestaciones ubicadas en “Nuevos ministerios”, pertenecientes al metro de Madrid)

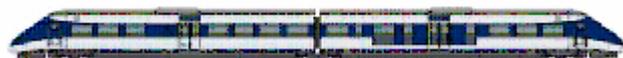
6.3.- Elaboración de horarios.

Una vez establecido el plan de línea se pasa a elaborar los horarios. Esto consiste en establecer los horarios de salida y llegada por todas las estaciones que transcurre el ferrocarril. El tiempo mínimo técnico para ir de *A* a *B* es el tiempo en el que el 95% de las veces que se recorre el trayecto de *A* a *B* se emplea, eliminando las medidas de seguridad. En la práctica, es difícil definir lo que son condiciones normales para establecer ese 95%, por lo que este tiempo es calculado en función de las características técnicas del tren. No obstante, este valor tampoco está tan claro, ya que son muchas las circunstancias que pueden influir. Aunque la velocidad máxima comercial casi siempre es factible, hay varios aspectos que pueden influir en la capacidad de aceleración del tren, que podrán ser paliados en mayor o menor medida dependiendo de la diferencia que haya entre la velocidad máxima del tren, y su velocidad máxima comercial.

Los ejemplos de tiempo perdido y tiempo ganado están basados en la capacidad de aceleración de 0 a 140 km/h, sin ningún tipo de medida que obligue a frenar el tren. Por ejemplo, una caída en el voltaje de la catenaria en torno al 10%, tal y como se ha comentado anteriormente en los indicadores sobre caída de tensión, hace perder cerca de 15 segundos en el registro de aceleración de 0 a 140 km/h. Un viento frontal en torno a 40 km/h provoca un retraso de unos 5 segundos. Cada 25 pasajeros que vayan en el tren, sin contar el equipaje, hacen perder otro segundo en el mencionado registro. Esta pérdida de aceleración hace que la velocidad a la que transcurre el ferrocarril sea más lenta, con el consiguiente retraso. A una velocidad de unos 140 km/h, el hecho de perder 20 km/h hace que por cada kilómetro se pierda algo más de 4 segundos. En el caso de velocidades bajas, como puede ser en desvíos, escapatorias y cambios de dirección, la diferencia de ir a 30 km/h en vez de 40 km/h implica que se ha invertido cerca de 30 segundos más por kilómetro. Esta pérdida de aceleración se hace más patente entre trayectos cortos, donde apenas hay espacio para que el ferrocarril pueda acelerar hasta su velocidad máxima comercial, lo que obliga a ir constantemente a una velocidad más baja de lo previsto, lo que provoca los retrasos ya mencionados. Todos estos cálculos se hacen suponiendo que la locomotora se encuentra en perfectas condiciones, ya que si no es así, también habría que considerarlo.

Con el fin de paliar estos problemas a la hora de establecer los horarios, se suma al tiempo mínimo técnico márgenes de regularidad. Estos márgenes no son más que un margen de seguridad que se añade al tiempo previsto debido a todas las circunstancias que pueden influir en la velocidad del tren y son desconocidas. Con la suma de las dos se tiene el tiempo de trayecto previsto. Este margen también se suele utilizar para absorber posibles pequeños retrasos que se puedan producir por otros motivos.

Los suplementos, aunque son necesarios, también pueden ser una fuente de problemas debido a que lo que se está haciendo con ellos es incrementar el tiempo de trayecto, que es justamente lo contrario a lo que en un principio se pretende. Al aplicar estos márgenes de seguridad, se puede echar por tierra mejoras técnicas o de eficiencia que se hayan hecho con el objetivo de ganarles unos minutos al reloj. Por lo tanto, estos



suplementos han de establecerse con cuidado, y ajustándolos de la manera más precisa posible, con el objeto de no empeorar la calidad del trayecto debido a retrasos innecesarios.

Por lo general, estos suplementos son menos perjudiciales en las largas distancias, ya que el tiempo extra que se añade es poco significativo si se compara con el tiempo total del trayecto. En cambio, si estos suplementos son utilizados en trayectos cortos, pueden limitar la capacidad de la vía para hacer circular por ella cierto número de trenes, por lo que es en estos casos cuando el tiempo extra se vuelve más crítico.

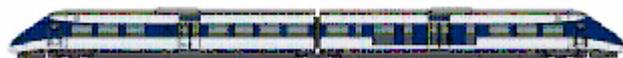
Las medidas de seguridad también suponen restricciones a la hora de establecer horarios. Existe una separación mínima de seguridad entre trenes que van en un mismo sentido. La distancia mínima que se suele dejar entre el final de un tren y el principio del siguiente es de kilómetro y medio, por lo que dependiendo a la velocidad a la que transcurran los trenes en ese tramo, habrá que dejar un tiempo extra de seguridad entre la salida de cada tren, lo que limita la capacidad de la vía. También hay que considerar casos de trenes que vayan en la misma dirección, pero en sentidos opuestos. Si hay una vía para cada sentido, no hay problema. En el caso de que haya que compartir la misma vía para ambos sentidos, hay que esperar a que el tramo sea abandonado por un tren para que otro pueda circular por él.

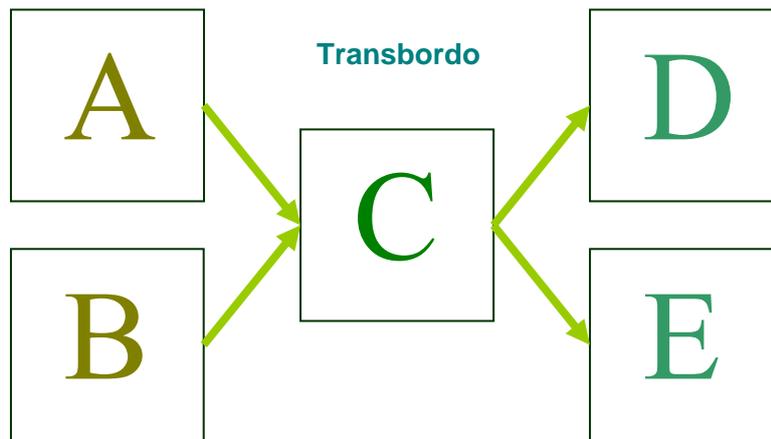
Otro enfoque práctico a la hora de establecer los horarios es el caso de los enlaces. Es aconsejable que si una estación sirve de enlace entre dos direcciones, la hora de salida de los trenes de esa estación esté condicionada por la hora de llegada de los mismos. Si un pasajero necesita coger un tren en esa estación, y viene en otro tren, lo más lógico es que se establezcan los horarios para que dicho pasajero tenga que esperar en la estación el menos tiempo posible y se suba a su tren cuanto antes. Por lo tanto, hay que coordinar la hora de llegada del tren con la hora de salida del otro. No sería lógico que el tren que ha de tomar el pasajero en dicha estación salga antes de que llegue el suyo, obligándole a esperar al siguiente. Esto puede ser más o menos problemático dependiendo de la frecuencia de salida de trenes en dicha estación.

Enlace tipo

Origen

Destino





Otro aspecto con el que hay que contar es el tiempo que debe permanecer el tren en su correspondiente plataforma, dentro de la estación. Este tiempo dependerá de la cantidad de pasajeros que suelen ir en él, así como la cantidad de equipaje que lleven para cargar y descargar. Muchas compañías para evitarse problemas en este aspecto, impiden a los usuarios llevar bultos de gran tamaño, con lo que se ahorran el calcular este problema. Este tiempo a veces se contabiliza en parte como los suplementos que antes se han mencionado, obligando a que el tren esté más o menos tiempo en la plataforma dependiendo de la hora en la que ha llegado. No obstante, por mucho retraso que lleve acumulado el tren, siempre hay un tiempo mínimo necesario para que los pasajeros puedan subir a bordo.

Los ferrocarriles organizan sus horarios mediante dos sistemas: *dispatching* y método rígido de horarios.

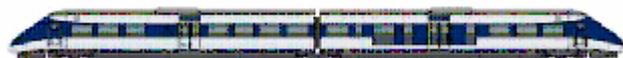
El *dispatching* consiste en la circulación con un horario determinado por las necesidades diarias que atañen a la explotación comercial de la línea. Básicamente, en función de la circulación que se estime que va a haber ese día, se fijan los horarios. El puesto de mando cumple aquí la función de establecer el itinerario del tren además de las paradas técnicas y comerciales, pero optimizando a la vez los recursos de material motor y remolcado. Este es un sistema que principalmente se utiliza en el transporte de mercancías, el cual no es objeto de estudio este proyecto. No obstante, debido a que en la mayoría de países desarrollados se está privatizando el transporte ferroviario, separando lo que es la infraestructura necesaria de lo que es el material móvil, y pudiéndose dividir este en varias compañías diferentes, es posible que este sistema se adapte en el futuro al transporte de pasajeros. El hecho de que se trabaje así en el transporte de mercancías es que cada tren interesa a una empresa determinada, por lo general, cosa que será parecida cuando se liberalice el mercado ferroviario y varias empresas de transporte de pasajeros compartan una línea. Por lo tanto, este es un tipo de sistema que posiblemente se implante, ya que se suele preferir utilizar fórmulas conocidas que dan buen resultado, que investigar nuevas.

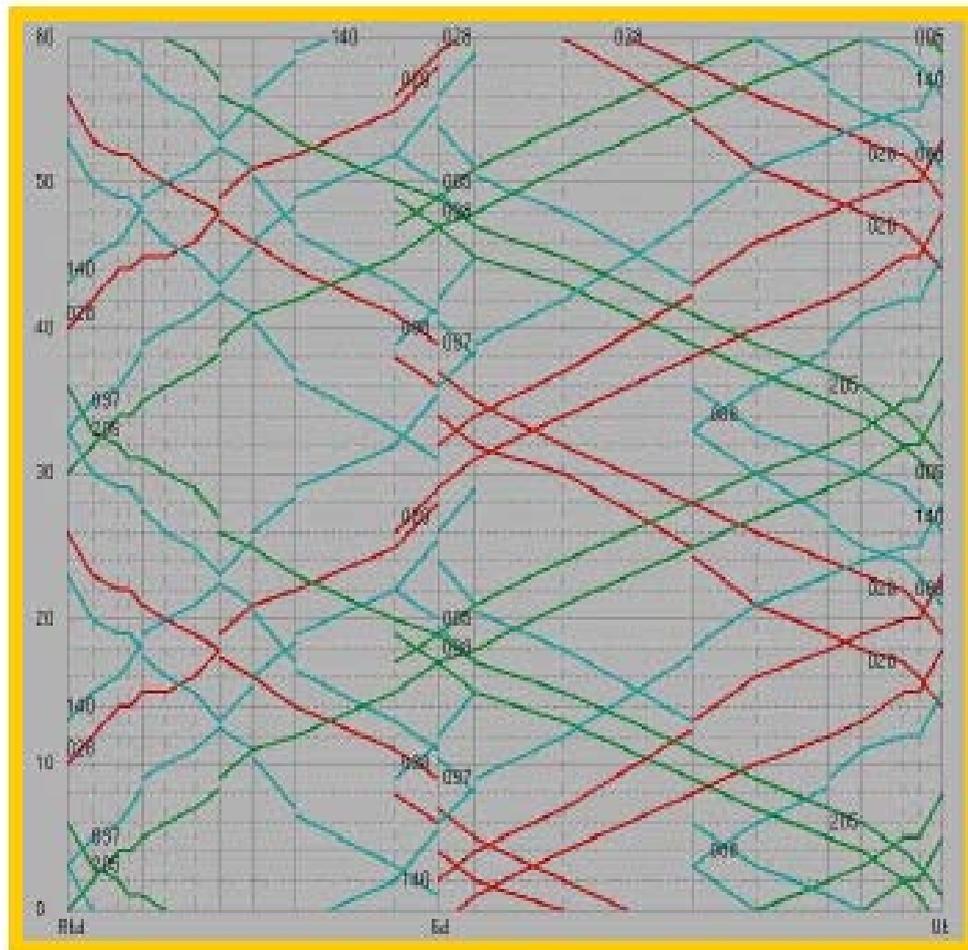


El método rígido de horarios es el que se suele utilizar para el transporte de pasajeros. La circulación se organiza mediante un horario rígido de salida, llegada y paso por cada una de las estaciones intermedias por las que transcurre la vía. La herramienta principal de este método es el gráfico horario de circulación o de marcha, donde se encuentran compatibilizados horarios y desplazamientos de los trenes en una línea. La integración de los horarios de todos los trenes que circulan por una línea se denomina gráfico horario de circulación o de marcha. En él, se encuentran todos los trenes de cada línea, con sus marchas compatibilizadas entre si, según el equipamiento y las instalaciones de cada línea. Este gráfico se repite cada veinticuatro horas. Con el gráfico de marcha se consigue organizar el horario de circulación de los ferrocarriles, lo cual hace que se pueda coordinar todo el trabajo en esa línea, incluyendo las estaciones, los depósitos, el mantenimiento, y demás aspectos destacables. La organización horaria también sirve para obtener las horas de salida, de llegada, de paso por las estaciones intermedias, y el tiempo de permanencia del tren en un determinado tramo. Todo esto serían horarios estimados, o sea, el tiempo de trayecto previsto, que tal y como se ha comentado anteriormente, puede sufrir retrasos debido a perturbaciones no deseadas. Debido a que esta forma de control se puede comparar posteriormente el efecto de las perturbaciones en las estimaciones hechas.

La forma mas común de presentar el gráfico horario de circulación, o de marcha, es en un gráfico cartesiano, con las longitudes de los tramos en el eje y , y en el eje x los tiempos de marcha en un periodo de veinticuatro horas. El movimiento del tren se representa en una curva $t-s$. La circulación del tren se representa con líneas rectas entre estaciones, lo cual se produciría si el tren fuese ahí a velocidad constante. En la realidad, el tren tiene aceleraciones y paradas, siendo su movimiento no uniforme, por lo que la pendiente de la recta representa la velocidad media del tren. A más pendiente, más velocidad. También se representan en el gráfico las paradas en las estaciones intermedias.

En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de gráfico de marcha de una línea:





(At the Departure of Arrival. Aad Veenman, CEO NS. *Seminar Preceding the First Annual Arrival Workshop, Utrecht, April 18th, 2007*)

La función principal de este gráfico es organizar las redes para que la demanda sea totalmente satisfecha, intentando que el coste sea el menor posible.

Entre las indicaciones que deberían constar en el gráfico de marcha, o que se podrían deducir de él, se incluyen aspectos como:

- ❖ *Indicación de todas las estaciones, apartaderos, desvíos en plena vía, cambios de rasante, etc.; de forma sucesiva según su posición relativa en la línea.*
- ❖ *Horas de paso del tren por cada uno de los puntos anteriores.*
- ❖ *Velocidades máximas que el tren, según su tipo, debe respetar en cada trayecto.*
- ❖ *Velocidad de itinerario en cada trayecto, que es la velocidad media del mismo.*



- ❖ *El tiempo real que el tren invierte en cada trayecto.*
- ❖ *Paradas comerciales y técnicas del tren.*

Los parámetros en los que se basa la confección del gráfico de marcha se pueden resumir en los siguientes puntos:

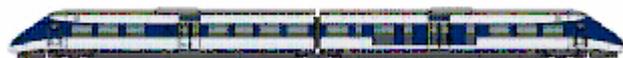
- ❖ *Carga remolcada de la composición de los trenes.*
- ❖ *Tiempos de marcha de los trenes en cada tramo.*
- ❖ *Intervalos de estación, según el sistema de explotación de la línea y los enclavamientos de las estaciones.*
- ❖ *Intervalos de bloqueo entre trenes.*
- ❖ *Parada de los trenes en las estaciones.*
- ❖ *Márgenes de regularidad, o suplementos.*

Los principales condicionantes para la realización de este gráfico son los siguientes:

- ❖ *Seguridad de la circulación.*
- ❖ *Mayor velocidad de desplazamiento posible.*
- ❖ *Aprovechamiento óptimo del material rodante.*
- ❖ *Aprovechamiento óptimo de la capacidad de la vía en cada tramo.*
- ❖ *Normativa interna de cada empresa sobre los horarios de personal.*
- ❖ *Tratamiento operativo de trenes y materiales en las estaciones.*
- ❖ *Margen de actuación en caso de imprevistos.*

El orden de preferencia que se establece en el gráfico de marcha para los trenes es el siguiente:

- ❖ *Trenes de cercanías en el caso de líneas con tráfico urbano y suburbano de carácter preferente en horas punta.*
- ❖ *Trenes de largo recorrido de viajeros.*
- ❖ *Trenes de mercancías acelerados.*
- ❖ *Trenes de mercancías ordinarios.*



❖ *Trenes colectores, o de dispersión.*

Una vez obtenido el gráfico teórico, hay que confeccionar el gráfico real, adaptándolo a las circunstancias de vía por la persona encargada a tal efecto, por lo general, con ayuda de simuladores.

Otro factor importante a la hora de elaborar el gráfico es la configuración de la infraestructura. No es lo mismo si es de vía sencilla, que si hay doble vía o hay más (no es usual). Evidentemente, cuantas más vías haya, más posibilidades de organización hay, ya que la capacidad se incrementa notablemente.

Los gráficos se suelen clasificar de dos maneras, en función de la velocidad que tengan los trenes reflejados en el gráfico:

- ❖ *Homogéneos*: Todos los trenes que están incluidos en el gráfico marchan a la misma velocidad. En este caso, se da la circunstancia de que todas las líneas incluidas en el gráfico, son paralelas.
- ❖ *No homogéneos*: Cuando la circulación de los diferentes trenes es a distintas velocidades. En este caso, las líneas tienen una orientación dispar, lo que implica una mayor complejidad a la hora de hacer posibles cambios, ya que cualquier variación afectará a cada servicio de manera diferente.

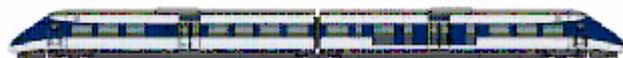
El gráfico óptimo es aquel que permite la máxima capacidad de la línea representada, estando optimizadas todas las velocidades, y la circulación de los trenes. Los gráficos saturados son aquellos en los que los trenes tienen todas paradas técnicas por cruce en todas las estaciones.

Con todo esto, ya se puede tener una idea de la complejidad que resulta la tarea de elaborar y planificar horarios. Ahora se va a exponer que todo aquello que hace que no se puedan cumplir los horarios: Las perturbaciones.

Las perturbaciones son errores del personal necesario para la marcha del ferrocarril, mal funcionamiento de algún sistema mecánico, informático o eléctrico, accidentes... Las causas de las perturbaciones son muy diversas. Se pueden caracterizar en dos tipos de perturbaciones:

- ❖ *Perturbaciones internas*: Son todas aquellas que puedan originar algún retraso en el horario previsto y tienen su origen en una causa interna del propio tren. Por ejemplo, un descarrilamiento debido a la rotura de una rueda, o un retraso debido a un fallo en el sistema eléctrico de la locomotora, serían una perturbación interna.
- ❖ *Perturbaciones externas*: Son todas aquellas que puedan provocar algún retraso en el horario previsto y tienen su origen en una causa externa. Por ejemplo, el corte de la vía debido a una riada sería una perturbación externa.

Las perturbaciones tienen una importancia diversa en función del daño que puedan causar. Algunas, únicamente retrasan unos segundos, pero otras provocan el



corte de la línea durante varias horas o incluso días. A veces, el grado de importancia de una perturbación viene dado en función de su origen.

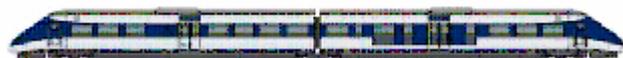
Como ya se ha comentado antes, las causas pueden ser muy diversas, pero se va a tratar de hacer una relación de ellas:

- ❖ *Organización:* A veces, el hecho de que la mayoría de los horarios se organicen de manera informática hace que los posibles errores sean descubiertos hasta que el retraso se haya producido, ya que como por lo general suele funcionar bien, no se le presta atención.
- ❖ *Asignación de locomotoras:* En ocasiones las locomotoras son asignadas sin saber concretamente sus características, por lo que se sobrestima sus capacidades. Otras veces se sobre-utilizan las locomotoras en vez de asignarles un mantenimiento preventivo, por lo que acaban fallando.
- ❖ *Material rodante:* Aunque ya se ha hablado de las locomotoras, el resto del material rodante puede sufrir algún tipo de problema, como por ejemplo, la rotura de una rueda. Otro tipo de problemas en el material rodante, suelen ser menos catastrofistas y la mayoría no tienen incidencia en el tiempo recorrido. Normalmente, el material rodante se suele preparar para que pueda seguir funcionando aunque no esté en perfectas condiciones.



(Centro Tecnológico IDEKO. Sistema de medición automática de la geometría de las ruedas de ferrocarril) (<http://www.ideko.es/noticias/ver.php?id=es&Nnoticia=1178700314>)

- ❖ *Infraestructura:* Problemas que haya podido haber en la infraestructura, ya sea en los raíles, catenaria, traviesas, balasto, plataforma, desvíos... pueden provocar por lo general largos retrasos. Normalmente, estos problemas suelen provocar la cancelación de varios servicios debido a la dificultad para su reparación. Otras veces la infraestructura no está bien calculada, tal y como ocurrió con el “Intercity” en Inglaterra, en el cual, las vías estaban a demasiada poca distancia, y cuando los

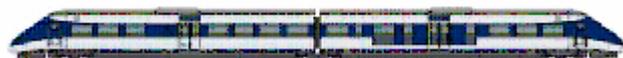


trenes se cruzaban en alguna curva a alta velocidad, se producían choques entre los laterales de los vagones, causando accidentes.

❖ *Factores humanos:* Al contar los ferrocarriles con mucha mano de obra, están expuestos a posibles problemas debido a errores humanos, que pueden venir dados por distracciones, desconocimiento, falta de preparación, retrasos, excesivo tiempo de reacción, problemas físicos o enfermedades. Parte de estos problemas se han eliminado utilizando un sistema automático que funciona en paralelo con el operario, por lo que es más improbable que los dos se equivoquen a la vez. Un ejemplo de este sistema son las aspas de frenado de un tren cuando la vía está ocupada. En otros casos, la solución que se ha adoptado para evitar este tipo de problemas es la sustitución total del personal encargado por sistemas automáticos que son controlados desde un “centro de control”.

❖ *Problemas con los trabajadores:* Otro aspecto son los trabajadores que llegan tarde a su puesto de trabajo, o que simplemente, se encuentran enfermos y transcurre un tiempo desde que la compañía de ferrocarril es avisada, hasta que hay un sustituto del empleado enfermo. Los servicios que dependen de ese trabajador no pueden realizarse, por lo que se van acumulando retrasos. Este último caso suele ser crítico en determinadas circunstancias en las que la frecuencia del paso de trenes es muy alta, como en las redes de metro, en los que la frecuencia entre trenes llega a ser a veces de hasta 1.5 minutos entre cada tren. Otro problema que acarrea esta circunstancia es que a veces el sustituto no tiene suficientes conocimientos para la tarea encomendada, ya que en muchas ocasiones es algo que se improvisa, por lo que carece de la suficiente preparación y no consigue realizar correctamente su tarea.

❖ *Accidentes con otro tren:* Evidentemente, un accidente con otro tren provocaría no sólo la no llegada de estos dos trenes a su destino, sino que también el corte de la vía durante varias horas. Este último aspecto, depende en gran medida de la ubicación del accidente, ya que hay zonas como puentes o túneles que son especialmente delicadas a la hora de reparar los desperfectos provocados por un accidente. Este tipo de catastrofes suelen ser bastante graves y normalmente implican víctimas mortales. Los trabajos necesarios para restablecer la normalidad en el servicio de ferrocarril suelen ser tremendamente laboriosos y complicados, tal y como se puede comprobar en la fotografía expuesta a continuación, en la que dos trenes quedan totalmente destrozados después de un choque frontal:

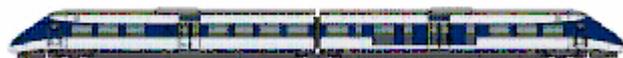




(Accidente en Chinchilla (España), 3 de junio de 2003. Fuente: <http://www.todotren.com.ar/grandescatastrofes/>)

❖ *Accidentes de otro tipo*: Es posible que haya algún obstáculo en la vía debido a un desprendimiento, la caída de un árbol, o un automóvil que esté interrumpiendo la vía. Este último es frecuente en pasos a nivel, por lo que la tendencia general es eliminarlos y sustituirlos por puentes o túneles. Este tipo de accidente también provoca grandes retrasos, ya que es necesario llevar una grúa hasta el lugar del problema para poder retirar el obstáculo. Otro problema de este tipo son los suicidios, ya que varios de ellos se cometen en los raíles del ferrocarril. En países como Holanda se producen una media de 200 suicidios al año en las vías del tren, por lo que es un factor a tener en cuenta. También provocan grandes retrasos, ya que la tarea del levantamiento del cadáver implica la presencia de un juez y un forense, por lo que puede implicar que la vía quede inutilizada durante varias horas.

❖ *Vandalismo*: Otro tipo de problemas es el vandalismo que ataca a las vías férreas. Muchas veces hay objetos en la vía que son dejados ahí por personas que buscan divertirse viendo un accidente de tren. A veces estos objetos no son advertidos hasta que el accidente es inevitable. Esto suele provocar daños tanto en el material móvil como en la vía, por lo que su reparación lleva más tiempo del deseado. Adicionalmente, las monedas que pueda haber en juntas de la vía pueden provocar serios problemas. Otro tipo frecuente de vandalismo son las pintadas en los trenes cuando hacen una parada en alguna estación o cruce. Esto no causa desperfectos técnicos, pero obliga al tren a pasar por el taller para eliminar la pintura, lo que obliga a tener material rodante de repuesto. Como ejemplo, hay una “leyenda urbana” sobre que se paga un millón de euros al grupo que consiga hacer un graffiti en el AVE.



❖ *Pasajeros*: Hay un dicho que dice que el cliente siempre tiene la razón. Aunque no se suelen atribuir retrasos a los clientes, la verdad es que las personas que suelen subirse al tren justo cuando es la hora de salir, provocan un cierto retraso, ya que hay medidas de seguridad para que una puerta se abra si nota el contacto de una persona. Este tipo de retrasos son especialmente importantes en trenes de cercanías donde hay que hacer varias paradas, ya que los retrasos se acaban acumulando. También es posible que ocurra vandalismo dentro del tren, o en los propios andenes de la vía, lo que a veces obliga a llamar a la policía, con el consiguiente retraso. Esto es evitable contando con una fuerte seguridad interna en la vía.



(Finding and evaluating robust train timetabling solutions Matteo Fischetti, Domenico Salvagnin, Arrigo Zanette. *Seminar Preceeding the First Annual Arrival Workshop, Utrecht, April 18th, 2007*)

❖ *Condiciones climatológicas*: Esto es algo que en España no suele pasar, pero lluvias torrenciales, vientos huracanados y fuertes nevadas pueden dejar la vía completamente bloqueada, por lo que es necesario esperar a que mejore el tiempo para hacer los correspondientes servicios de reparación, o de despeje de la vía, antes de reanudar el tráfico rodado por la misma.

❖ *Terremotos*: Casi se podía incluir este apartado en el de las condiciones climatológicas, ya que es igual de impredecible e incontrolable. Tiene gran influencia en países como Japón. Su nivel de gravedad depende en gran medida de la intensidad del seísmo, y de la diferencia de esa intensidad, con la que haya habido en terremotos anteriores, ya que los cálculos sísmicos suelen ser en función de la historia del lugar.



❖ *Atentados terroristas*: No es frecuente, pero como han ocurrido, hay que tomarlo en consideración. El trabajo de prevenirlos no es competencia de las compañías ferroviarias, por lo que no es posible evitarlos. Lo único que se puede hacer al respecto es tener planeados sistemas de emergencia para actuar en estos casos. Es importante para ello los simulacros, ya que preparan al personal para dichas circunstancias.

Una vez expuestas las posibles causas de las perturbaciones, se va a definir que es un retraso:

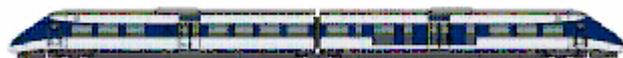
→ *Retraso*: Demora sobre el tiempo previsto de llegada, más un margen permitido. Normalmente, existe un margen de tiempo en el cual, si existe un retraso, no hay ninguna penalización por ello. Este margen suele estar comprendido entre los 3 y los 5 minutos en Europa. Este margen a veces viene impuesto por el gobierno correspondiente.

En algunos países, el gobierno autoriza a la compañía ferroviaria a subir sus tarifas sólo si un determinado porcentaje de sus trenes en sus diferentes servicios, han llegado puntualmente. Esto implica que los costes originados por conseguir una mejor puntualidad pueden ser paliados, o incluso pueden ser rentables, ya que, dependiendo del aumento de las tarifas y de la consiguiente disminución de la demanda (por lo general, a mayor precio, menor demanda, en caso de que la demanda sea elástica) se puede aumentar el beneficio de la empresa, además de mejorar la calidad percibida por parte del usuario, lo cual es un aspecto importante que se sale de la temática de este proyecto. Otras veces, este margen viene dado por el *margen de estabilidad*, que se va a definir a continuación:

→ *Margen de estabilidad*: (*Tiempo disponible – Tiempo necesario para recorrer la red viaria*). Este margen depende básicamente de la capacidad de la locomotora para ir a una velocidad por encima de la velocidad comercial, su capacidad de aceleración, y de la capacidad de la vía para soportar dicha velocidad. Cuanto más capaz sea la locomotora de ir deprisa, y cuanta mayor capacidad de aceleración tenga, menor será el tiempo que necesite invertir para cubrir el tramo requerido. En el caso de la velocidad, influyen los aspectos comentados anteriormente sobre posibles vientos en contra, o caídas de tensión en la catenaria, que provocarían que no se alcanzase la velocidad máxima, o que se tardase más en alcanzarla, por lo que el tiempo necesario a invertir se incrementa.

En el caso de la infraestructura, es importante para ello eliminar todas las causas que necesiten medidas extra de seguridad, lo que implica el hecho de que el tren tenga que disminuir la velocidad. Como aspectos importantes, si el tren no comparte la vía con otro, no tiene porqué tener distancia de seguridad.

También, en el caso de que el trayecto comprenda cruces, es importante la calificación de estos, ya que la velocidad a la que se puede transitar por ellos depende de si son del tipo *A*, *B* o *C*. Otro aspecto que es importante es el peralte con el que cuente el tramo del desvío, ya que obligará a ir a una



determinada velocidad. Dependiendo de cada país, cambia la normativa, pero, por lo general, la aceleración lateral máxima que pueden experimentar los pasajeros debido a la insuficiencia de peralte, está comprendida entre 1.05 m/s^2 y 0.65 m/s^2 . Para evitar estos inconvenientes, lo mejor es evitar todos los desvíos en la medida de lo posible.



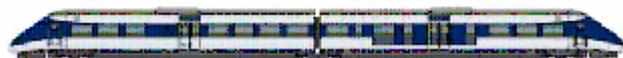
(Detalle de un cambio de dirección sin peraltar)

6.3.1.- Indicadores para la elaboración de horarios.

Una vez que se han expuesto los aspectos referentes a la elaboración de horarios, y se ha hecho una relación de los problemas con que se enfrenta para que todo funcione correctamente, se van a exponer una serie de indicadores con el fin de delimitar y cuantificar los problemas causados por los retrasos, con el objetivo de poder eliminarlos. Los indicadores son los siguientes:

➤ $\text{Retrasos: } \frac{\text{Número retrasos}}{\text{Servicios}}$

Este índice sólo considera el sumatorio de todos los retrasos totales, producidos en todos los servicios realizados por todos los trenes de la compañía, durante un período de tiempo determinado (suele ser un año), respecto al número de servicios totales. En este índice no se considera relevante ni las causas, ni la gravedad de los mismos, ya que lo que pretende es dar una idea general del funcionamiento de los trenes en ese período de tiempo. Si un tren no consigue llegar a su destino, no se considera un retraso, ya que se contabilizaría como un servicio realizado menos, considerándose entonces en el indicador *porcentaje de servicios operados*, que está dentro del plan de líneas. Cabe recordar que sólo se considerará retraso aquellos que excedan de un cierto número de minutos, prefijado por la compañía o el gobierno.



➤ *Duración media del retraso:*
$$\frac{\sum(\text{Tiempo de retraso})}{\text{Número de retrasos}}$$

Aquí se pretende evaluar la cuantía de los retrasos en función de su valor medio. Por lo general, el tiempo del retraso se suele cuantificar en minutos, ya que el margen que da al retraso la compañía, suele venir en esta unidad, por lo que no tiene sentido cuantificarlo en segundos. Por otra parte, retrasos de horas provocarían graves problemas, por lo que no se suele llegar a tanto tiempo, salvo en graves accidentes, cuya catástrofe eclipsa el hecho del retraso. Como es evidente, cuanto más bajo sea el valor de este índice, mejor calidad tendrá el servicio prestado por la compañía.

➤ *Perjuicio del retraso:*
$$\frac{\sum(\text{Tiempo retraso} \cdot \text{Personas afectadas})}{\text{Servicios totales}}$$

Es interesante comprobar el daño causado por los retrasos. Para ello se ha elaborado este índice, que no es más que la multiplicación de los dos índices anteriores (*retrasos y duración media del retraso*), multiplicándolos además por el número de personas afectadas con cada retraso. Con esto se evalúa un cómputo global de los retrasos ocurridos, su duración, los clientes perjudicados, y se le puede dar un valor concreto, por lo que es muy fácil con este sistema establecer niveles de categorías en función de la calidad del servicio.

El inconveniente de este índice es que en vías secundarias, donde no hay gran afluencia de pasajeros, no van a parecer muy problemáticos los retrasos que se den en ella, por lo que pueden quedar exentos de medidas de mejora, o tener que esperar a que se mejoren otras vías más concurridas, en las cuales el valor del índice sea mayor. Esto puede provocar protestas entre los usuarios al considerarse discriminados en función de otras vías más concurridas, lo cual debe ser considerado por la compañía. Estas protestas pueden causar tanto una disminución de clientes, como daños en el material móvil o en la infraestructura, en función de lo violentas que pueden llegar a ser. Para evitar esto, no es posible considerar este índice de manera aislada respecto a los dos anteriores. No obstante, en vías de similar afluencia de pasajeros, permite cuantificar de manera rápida y eficaz la calidad del servicio que se lleva a cabo en ellas.

Hay que notar que cuanto mayor sea el valor de este indicador, peor calidad tendrá el servicio que se realiza en dicha vía. También es justo reconocer que cuanto más populosa sea una vía, más difícil es evitar que ocurra un retraso, por lo que serán estas vías las que necesiten un mayor esfuerzo por parte de la compañía correspondiente.

➤ *Índice de calidad del retraso permitido:*

$$\frac{1}{1 + 0.1 \cdot \text{Minutos de retraso}}$$



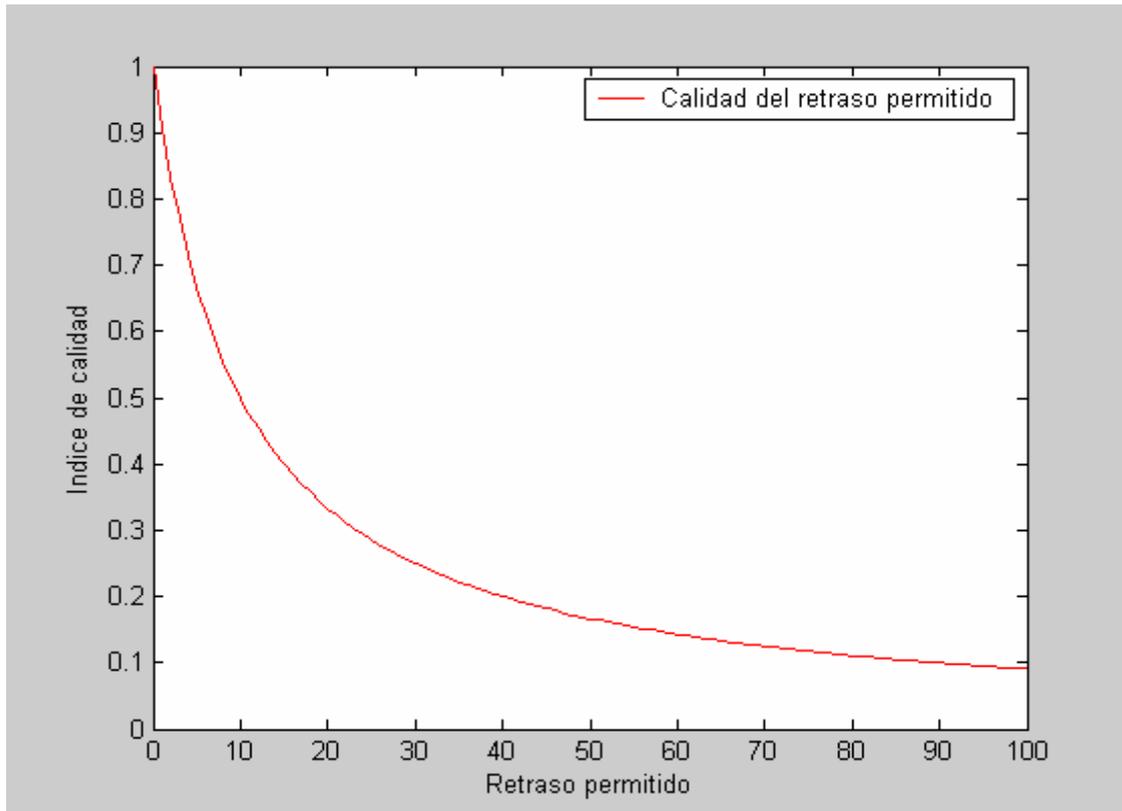
Este índice se ha establecido para valorar lo que la compañía o el gobierno correspondiente, ha establecido como retraso. Esto es importante, ya que en función de este valor, los índices anteriores se verán alterados, por lo que a la hora de comparar los índices anteriores en lugares diferentes, habrá que tener en cuenta este dato. Por ejemplo, en Holanda el retraso permitido es de 3 minutos, mientras que en España es de cinco minutos. Por lo tanto, los trenes que lleguen tarde a su destino entre tres y cinco minutos, en un país serán calificados como retraso, y en el otro se considerará que han llegado a su hora.

Este tipo de cuantificación es hace especialmente relevante en las líneas de corto recorrido, ya que un par de minutos son un gran porcentaje de su tiempo estimado de trayecto, mientras que en las líneas de larga distancia, un par de minutos puede ser considerado insignificante respecto a varias horas de trayecto.

El valor de este índice está comprendido entre uno y cero, siendo mejor cuanto más alto sea su valor. A modo de ejemplo, el valor de este índice en España es de 0.66 , y en Holanda tiene un valor de 0.77 . Un valor de 0.99 puede que no fuese rentable debido a la gran cantidad de problemas que habría que solventar, con el consiguiente desembolso económico; lo cual, a veces no se refleja en la calidad percibida por parte del usuario. Es importante mencionar que el valor de este índice de calidad en España se considera bueno por parte de los usuarios, por lo que posibles medidas encaminadas a mejorarlo, no serían rentables.

Se ha establecido una gráfica con el valor de este índice para comprobar su variación en función del retraso permitido. Como se comprueba en la gráfica, el valor de este índice decrece rápidamente para después volverse casi asintótico, ya que a partir de cierto valor de retraso, este deja de ser importante en su valor. Para la elaboración de la gráfica se ha utilizado el programa de cálculo numérico *MATLAB*:



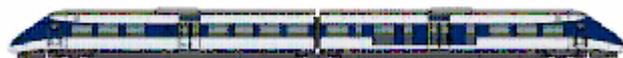


El programa realizado en MATLAB para la elaboración de la gráfica es el siguiente:

```
function [i]=calidad(r)
lista=[];
for r=[0:100]
    i=1/(1+0.1*r)
    lista=[lista; i r];
end
lista
plot(lista(:,2),lista(:,1),'r')
legend('Calidad del retraso permitido')
```

6.3.2.- Otros aspectos en la elaboración de horarios.

A continuación se va a realizar otra división que va a permitir clasificar los retrasos en función de si han sido provocados por un problema, o si simplemente son consecuencia de la propagación de retrasos ya ocurridos. Con esto se va a poder estudiar el grado de implicación que tienen unos retrasos en otros, así como la capacidad de la compañía para actuar cuando se produce un retraso, en función de aislar ese problema del resto de los servicios.



- *Retraso primario*: Retraso no influenciado por un retraso anterior. Como se ha comentado antes, es importante saber qué retrasos son causa directa de un problema determinado. Las causas de estos retrasos son en general, las que se han expuesto anteriormente: *Organización, asignación de locomotoras, infraestructura, material rodante, factores humanos, accidentes con otro tren, accidentes de otro tipo, vandalismo, pasajeros, condiciones climatológicas, terremotos y atentados terroristas.*
- *Retraso secundario*: Retraso provocado por un retraso anterior. Este tipo de retraso es muy importante conocerlo, ya que lo deseable sería que la propagación de cualquier retraso fuese nula. Con este tipo de información se puede calificar la actuación de la compañía frente a un retraso, y su eficacia a la hora de paliar sus efectos.

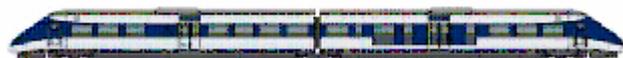
A continuación se va a tratar de exponer las principales razones por las cuales existe la propagación de retrasos, denominados como retrasos secundarios.

- Si el propio tren incurre en un retraso, de una manera más o menos temprana dentro de su jornada de trabajo, y no le es posible recuperar ese retraso, ya sea acortando las paradas o incrementando la velocidad máxima, este retraso lo irá acumulando a lo largo de todos los servicios que realice. Este es uno de los motivos por lo que la mayoría de las empresas dedicadas al sector, establecen una diferencia entre la velocidad comercial de una locomotora, y su velocidad máxima. Así se cuenta con la opción de recortar los retrasos acumulados (hay más motivos por los que la velocidad comercial es inferior a la máxima, entre ellos la conservación del material rodante).

También influye en este tipo de retrasos los suplementos que se hayan considerado para el funcionamiento de esta línea, ya que si el suplemento es grande, se pueden llegar a absorber estos retrasos. Como siempre ocurre en estos casos, es más fácil recuperar posibles retrasos en recorridos de larga distancia que en tramos cortos, ya que en éstos últimos, no hay tiempo material para ello.

- La utilización que permita la infraestructura es determinante en este tipo de retrasos. Lo más habitual es que la capacidad de la infraestructura esté limitada. En función de esta limitación, y lo explotada que esté la capacidad de la vía, los retrasos provocados en un tren se transmitirán a los demás. Para este aspecto, es importante el indicador *utilización de la vía*, que está incluido en el *plan de líneas*, el cual podrá dar una idea de la ocupación que puede tener la vía. En el caso de que esté muy masificada, por razones de seguridad, debe haber una distancia mínima entre tren y tren, por lo que el retraso del primero, obligará a esperar al segundo.

La distancia mínima viene dada principalmente por la capacidad de frenado de este tipo de trenes, que normalmente ronda una capacidad de deceleración en torno a $1m/s^2$. Esto implica que la distancia mínima a la hora



de frenar un tren de estas características, que circula a unos 100 km/h , es de 385.802 metros . A esta distancia, habrá que añadirle el tiempo de reacción del maquinista, por el cual el tren recorrerá unos 27.7778 metros por cada segundo que tarde el maquinista en frenar. Además, habrá que establecer un margen de seguridad por si las condiciones de adherencia no son óptimas, y la distancia de frenado se alarga, como puede ser en días de lluvia (para paliar este fenómeno, se suele proyectar arena sobre el rail en la fase de frenado de emergencia, antes del paso de la rueda, con lo que se incrementa el coeficiente de rozamiento). Por lo tanto, la distancia mínima que debe haber entre cada tren ronda el medio kilómetro, por lo que si un tren se retrasa, el siguiente se verá obligado a esperar a tener dicha distancia de seguridad para arrancar. Si el retraso es lo suficientemente grande, es posible que dicho retraso afecte a un tercer tren, por lo que se seguiría propagando el retraso.

A continuación se van a exponer tres tablas con diferentes velocidades que suelen tener los trenes de cercanías, trenes de redes de metro, y metros ligeros o tranvías de distintos países, con lo que se puede tener una mejor idea de las distancias de seguridad mínimas que se deben tener, y los tiempos de frenado que se manejan. También se expondrá la distancia que recorrerá dicho tren por cada segundo que tarde el maquinista en reaccionar, con el fin de cuantificar la importancia que tiene el tiempo de reacción en la distancia de seguridad entre trenes (última columna).

Como comentario, se puede observar que muchas cifras están muy parejas y es debido a que son pocos los fabricantes de locomotoras, por lo que muchas veces un mismo fabricante suministra a varios países.

● **Trenes de cercanías:**

País	Velocidad máxima (km/h)	Desaceleración de emergencia (m/s^2)	Tiempo de frenado (s)	Distancia de frenado (m)	Distancia por segundo (m)
España	120	1.2	27.7778	462.963	33.333
España	135	1.3	28.8462	540.865	37.500
España	120	1.3	25.6410	427.350	33.333
Inglaterra	176	1.1	44.4444	1086.40	48.889
Inglaterra	160	1.1	40.4040	897.868	44.444
Irlanda	145	1.1	36.6162	737.409	40.278
Finlandia	160	1.1	40.4040	897.868	44.444
Portugal	140	0.88	44.1919	859.287	38.889
Media	128.444	1.0089	32.0362	656.668	35.679



● Trenes de redes de metro:

País	Velocidad máxima (km/h)	Desaceleración de emergencia (m/s ²)	Tiempo de frenado (s)	Distancia de frenado (m)	Distancia por segundo (m)
Italia	90	1.5	16.6667	208.333	25.000
España	80	1.3	17.0940	189.934	22.222
España	80	1.2	18.5185	205.761	22.222
España	80	1.1	20.2020	224.467	22.222
España	110	1.15	26.5700	405.931	30.556
España	70	1.1	17.6768	171.858	19.444
México	80	2	11.1111	123.457	22.222
Brasil	90	1.1	22.7273	284.091	25.000
EE.UU.	120	1.43	23.3100	388.500	33.333
Hong Kong	135	1.3	28.8462	540.865	37.500
Media	91.545	1.2982	20.0822	265.910	25.429

● Metros ligeros y tranvías:

País	Velocidad máxima (km/h)	Desaceleración de emergencia (m/s ²)	Tiempo de frenado (s)	Distancia de frenado (m)	Distancia por segundo (m)
España	70	2.35	8.2742	80.444	19.444
España	65	1.6	10.4167	86.806	16.667
Portugal	65	1.6	10.4167	86.806	16.667
Media	66.667	1.85	9.7025	84.685	17.593

El programa realizado en MATLAB para la elaboración de las tablas es el siguiente:

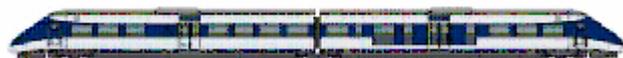
```
function
[e,t,V]=tiempo(a,v)
V=v/3.6
t=-(V/a)
e=(V)*t+(1/2)*a*(t.^2)
```



La fuente de los datos necesarios para la elaboración de las anteriores tablas ha sido el fabricante CAF (<http://www.caf.net/copia/caste/home/index.php>).

El hecho de que el metro de México tenga tanta capacidad de frenado es debido a que utiliza neumáticos de caucho en las ruedas, creados por la firma MICHELIN, con los que se aumenta la adherencia del contacto rueda-carril.

- Otra forma evidente de retraso secundario, es cuando un mismo tren es utilizado para realizar varios servicios consecutivamente. Esta es una práctica normal en cualquier compañía, dado que es lo más barato y el material rodante está perfectamente capacitado para ello. En estas circunstancias es evidente que si un tren llega a su destino más tarde de la hora a la que se supone que debería salir hacia su siguiente destino, el retraso se propagará. También es posible que, aunque no acumule tanto retraso, entre el tiempo que llega tarde, el tiempo necesario para que bajen los pasajeros del tren, y el necesario para que suban los nuevos pasajeros, se haya pasado la hora de salida, por lo que se seguirá propagando el retraso. En estas circunstancias, lo que se suele hacer es avisar a los pasajeros mediante los típicos paneles de información o por megafonía, con lo cual, los usuarios de la línea sabrán a que atenerse.
- Otro aspecto que se tratará posteriormente es el de la secuenciación del personal necesario para el funcionamiento del tren. Si por ejemplo un maquinista o un controlador llegan tarde a su puesto de trabajo, este retraso se verá implementado en los trenes que estén bajo su cargo. Esto puede ser evitado si en la empresa se cuenta con suficiente personal para cubrir momentáneas bajas, pero no es lo habitual debido a su coste. También es posible paliar estas faltas mediante la informatización de la mayor parte del sistema, pero entonces habrá que tener en cuenta los posibles fallos que tenga el ordenador encargado de dicha tarea.
- También hay que tener en cuenta que muchos trenes, que en principio no tienen nada que ver, comparten la vía. Por ejemplo, hay trenes de recorrido nacional que comparten algún tramo de la vía con trenes locales. El retraso de uno de ellos implica que el otro deberá ser retenido en algún cruce o estación, a la espera de que el otro tren abandone la vía. Normalmente, estas decisiones son tomadas por el controlador sobre la marcha, por lo que la posible propagación del retraso será mayor o menor dependiendo del buen hacer y la capacidad de improvisación que tenga el controlador.
- Finalmente, un aspecto que no afecta a la propagación de retrasos en los trenes, pero que afecta en gran medida al usuario son las conexiones. Si un pasajero tiene que utilizar varios trenes para llegar a su destino, necesita llegar a una hora concreta para realizar el transbordo. Este tipo de retraso puede ser más o menos importante en función del intervalo de tiempo que haya entre trenes que tengan el mismo recorrido. Este tiempo suele variar entre los tres minutos y los cuarenta minutos, por lo que en ocasiones este retraso puede ser desesperante. Esto se agrava más cuando es el último



servicio de la jornada, ya que si el usuario pierde el enlace por el retraso de un tren, deberá pasar la noche en la estación hasta que se vuelva a reanudar el servicio, o deberá de buscar un medio de transporte alternativo. Ninguna de las dos opciones es buena para la compañía, ya que genera un profundo malestar entre los clientes. Para paliar esto, a veces cuando un tren se retrasa, el siguiente le espera un cierto tiempo, ya que aunque esto propaga el retraso dentro de la circulación de los trenes, provoca un alivio al usuario, que luego se ve recompensado en una mejora de la calidad percibida por parte de los clientes.

Este desarrollo sobre los retrasos secundarios sugiere la elaboración de los siguientes índices, con el fin de poder evaluarlos:

➤ *Estabilidad del retraso:*
$$\frac{\sum \text{Retrasos secundarios}}{\sum \text{Retrasos primarios}}$$

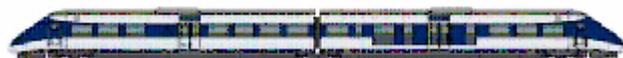
Con este indicador se pretende saber cual es la propagación de los retrasos. En principio, los retrasos secundarios que sean provocados por el mismo retraso primario, se pueden contar como uno y sumar el tiempo total de retraso de todos juntos. Con este índice se puede evaluar la capacidad de actuación ante una pérdida de tiempo, con el fin de volver a la normalidad. Hay que recordar que antes se definió la estabilidad como *la capacidad del sistema para volver a actuar en condiciones normales después de haber sufrido una perturbación.*

La manera habitual de contabilizar este índice es por minutos, ya que, como se ha expresado anteriormente, contabilizar en segundos no tiene sentido, ya que el retraso permitido es mayor, y en horas sería un retraso excesivo. Si un retraso de un servicio provoca que los servicios posteriores a él se cancelen, estos no se contarían como retrasos secundarios, si no como servicios no realizados, y se contabilizarían dentro del índice *porcentaje de servicios operados*. Por lo tanto, para que un retraso sea considerado como tal, es imprescindible que el tren llegue a su destino, por tarde que sea. El tiempo total en el que se evalúa este índice suele ser de un año, aunque se puede alterar en función de las necesidades.

Evidentemente, el deseo es que el valor de este índice sea lo más bajo posible, lo cual indicaría que el sistema medido es estable ante las perturbaciones. En caso de que este valor fuese alto, significaría que el sistema es demasiado sensible a variaciones, con resultado negativo para su funcionamiento, por lo que sería aconsejable realizar los cambios necesarios para su corrección.

➤ *Retrasos por factores internos:*

$$\frac{\sum \text{Retrasos por factores internos}}{\sum \text{Retrasos}}$$



Este indicador es interesante porque es en los factores internos donde hay más capacidad de actuación, ya que son los que dependen íntegramente de problemas internos de la compañía. Con este índice se puede comprobar cual es la situación en la que se encuentra el objeto del análisis en cuanto a cual es la fuente de problemas.

Si este índice es bajo, significará que los asuntos concernientes a la compañía funcionan correctamente, pero son las perturbaciones externas las que provocan la mayoría de los retrasos. Por lo tanto, este indicador expresa de manera adecuada en que dirección deben ir los esfuerzos de la compañía para mejorar el servicio.

- *Retrasos por factores externos:*

$$\frac{\sum \text{Retrasos por factores externos}}{\sum \text{Retrasos}}$$

Este indicador es complementario del anterior. Sirve para expresar lo mismo, pero desde el punto de vista de las perturbaciones externas. En este caso, si el índice tiene un valor alto, implicará que el sistema está fuertemente afectado por factores externos hostiles, por lo que será necesario aplicar la mayor cantidad de esfuerzos en esa dirección para mejorar el servicio ofrecido.

Como se ha comentado anteriormente, en principio los factores externos son los que tienen difícil solución, ya que en muchos de ellos no es posible actuar (por ejemplo, en las condiciones climatológicas, terremotos, etc) o la solución de los problemas es difícil y costosa (por ejemplo vandalismo, pasajeros, atentados terroristas, etc.).

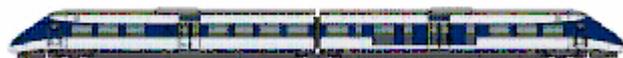
- *Retrasos secundarios provocados por factores internos:*

$$\frac{\sum \text{Retrasos secundarios por factores internos}}{\sum \text{Retrasos secundarios}}$$

Con este indicador lo que se pretende evaluar es la capacidad de propagación de un retraso provocado por una perturbación interna. Con esto se puede comprobar la gravedad media que suelen tener los problemas que ocurren dentro de la compañía. A mayor valor de este índice, más propagación tendrán los retrasos.

- *Retrasos secundarios provocados por factores externos:*

$$\frac{\sum \text{Retrasos secundarios por factores externos}}{\sum \text{Retrasos secundarios}}$$



Este viene a complementar al anterior. Ocurre lo mismo que con el anterior grupo de pares de índices (*retrasos por factores internos* y *retrasos por factores externos*), que se exponen los dos para ofrecer los distintos puntos de vista posibles.

Tal y como explica el anterior indicador, lo que se pretende evaluar es la capacidad de propagación de un retraso provocado por una perturbación externa, que a la postre, son las que tienen menor capacidad de actuación por parte de la compañía.

6.4.- Secuenciación de personal, materiales y actividades.

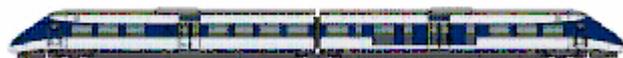
Este punto se refiere básicamente a las actividades de mantenimiento, tanto del material móvil, estructura y superestructura necesaria, así como de los empleados que tienen una relación directa en el funcionamiento diario del ferrocarril. Es evidente que este apartado difiere en gran medida en función de dónde se aplique, así como en función de las pretensiones de la compañía.

Esta parte se incluye dentro de la planificación operativa, que es el día a día de la explotación en una empresa ferroviaria.

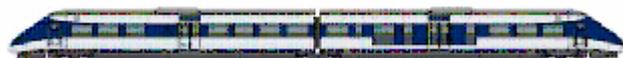
El mantenimiento de los ferrocarriles cada vez está más regulado por la legislación. Éste, debe hacerse en lugares homologados por la administración y contar además con una habilitación por cada intervención de mantenimiento que realice según el vehículo ferroviario que mantenga. Los centros de mantenimiento pueden establecer vínculos o acuerdos entre sí, con empresas ferroviarias y con otras entidades, para hacer uso de sus instalaciones y efectuar en ellas las intervenciones y operaciones de mantenimiento acordadas. Esto cada vez es más utilizado en forma de subcontratas.

Se pueden establecer los siguientes tipos de mantenimiento:

- *Mantenimiento Preventivo*: Es el más importante por cantidad de trabajos. Se diseña un plan de mantenimiento cuyo contenido en cada momento se sigue rigurosamente, pero que está en continuo desarrollo y evolución, para mejorar la fiabilidad y disminuir los tiempos de parada por mantenimiento.
- *Mantenimiento Correctivo*: Mediante la técnica de rotación de piezas de parque, se minimiza el tiempo requerido para las reparaciones, ya que el equipo averiado es sustituido por otro igual, disponible y en perfecto estado, de forma que el tren pueda salir a la explotación en el menor tiempo posible. Una vez que el servicio se ha restablecido, en el taller se revisa y repara el módulo retirado, y se almacena para poder sustituir a otro averiado, cuando sea necesario. Para esto, es importante en indicador *margen de locomotoras*, ya que no siempre se puede disponer de material rodante reservado para ser utilizado en estas circunstancias.



- Operaciones de Limpieza, Confort e Imagen de los vehículos. Cada vez más, la imagen comercial que tienen los viajeros del servicio es una de las mayores preocupaciones de las administraciones ferroviarias, y de ello se derivan las crecientes exigencias al respecto. Se diseñan planes de limpieza y confort que aseguran la calidad deseada, de la misma forma en que se planifican las intervenciones programadas de mantenimiento. Se incluyen en estos trabajos la limpieza antigraffiti (que, realizada inmediatamente, evita la sensación de inseguridad en los viajeros y disuade a los autores de repetirlo), la desinsectación y la desinfectación.
- Servicio de Asistencia en la Vía. Para determinadas explotaciones, como algunas de metro o cercanías, el servicio de asistencia en vía es un arma decisiva para evitar paradas que producen cortes en la línea, en los cuales es inevitable la propagación de los retrasos. Se suele localizar en los túneles, en cabeceras de línea y en determinadas estaciones. El mantenimiento realizado por el grupo que presta este servicio es mantenimiento paliativo. El objetivo no es reparar la avería que ha producido la parada, sino recuperar la funcionalidad del vehículo para que pueda terminar su servicio y llegar al taller, donde se realizará dicha reparación sin causar inconvenientes a los pasajeros.
- Modificaciones. En ocasiones, el operador y el mantenedor llegan a la conclusión de que determinadas modificaciones en el diseño del vehículo pueden generar mejoras en la explotación o en el mantenimiento. Esto sólo es posible realizarlo en etapas de diseño, o cuando esté proyectada la sustitución del material, en el caso de que el coste de la implantación del nuevo diseño sea elevado.
- Soporte Técnico. En algunos casos el operador viene realizando durante años los trabajos de mantenimiento de sus vehículos y, aunque desea mejorar sus resultados, no quiere desprenderse de su personal de mantenimiento. El personal asume las responsabilidades de los resultados obtenidos por el mantenimiento, aunque emplean mano de obra directa del cliente. Su trabajo está soportado por análisis de los resultados y de los métodos empleados, y proporciona al cliente propuestas de mejoras, gestión de los materiales, formación del personal, asistencia en la solución de averías.
- Reperfilado de las ruedas. Es necesario debido a que como consecuencia del desgaste de las mismas, se pierde la conicidad inicial, provocando que la huella del contacto rueda/carril sea diferente a la diseñada inicialmente, lo que implica vibraciones indeseadas por falta de adherencia, así como un mayor desgaste de los carriles. Esto sólo es útil en el caso de ruedas enterizas, ya que en los otros casos el proceso más habitual es cambiar la llanta por una nueva.
- Reperfilado de carriles. Es necesario debido al desgaste de los mismos. Complementa al punto anterior.

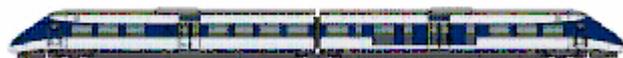




(Esmeriladora de carril tipo MFR.. <http://www.sufetra.es/maquinaria/maquinaria.html>)

- Inspección por ultrasonidos. Es muy utilizado para la localización de defectos ya que es muy útil para la localización de microgrietas, que posteriormente darían lugar a roturas.
- Mantenimiento Predictivo y Proactivo: se implantan rutinas de inspección de determinadas variables que pueden dar información sobre el momento óptimo para realizar una tarea de mantenimiento y sobre las causas que producen la necesidad de dicho mantenimiento. Por ejemplo, se realizan análisis tribológicos (a aceites y grasas de reductoras, cajas de grasa y motores), de vibraciones, de temperaturas, etc.
- Equilibrado del Mantenimiento (Balanced Maintenance): a la vista de los tiempos requeridos para cada tarea y de las interrelaciones entre las distintas operaciones programadas, se redistribuyen las revisiones preventivas, fragmentando cada una de ellas en sub-revisiones, que se repiten con la misma frecuencia pero desfasadas en el tiempo. Se consigue así que, en lugar de puntas de trabajo puntuales, que coinciden con las fechas de ejecución de las revisiones, éstas se distribuyen en el tiempo, con lo que se consigue un perfil uniforme de carga de trabajo en el tiempo, lo que abarata costes de mantenimiento manteniendo una plantilla constante en número en la empresa y optimizando la capacidad de almacenaje.

El deterioro de la vía proviene de muchos factores (tráfico intenso, carga por eje, condiciones ambientales, vejez de los materiales...) afectando a los distintos componentes: baches, defectos de alineación, desgaste de carril, rotura de traviesas y sujeciones, etc. Debido a esto la instalación de vía requiere un plan de mantenimiento



preventivo y correctivo integrado e informatizado, que permita planificar con racionalidad las tareas a realizar evitando llegar a situaciones muy degradadas que puedan provocar retrasos, o incluso accidentes.

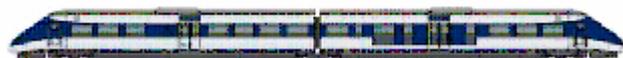
La seguridad de las unidades de ferrocarril al circular por la vía se consigue controlando que tanto los parámetros geométricos que definen su trazado -alineación, nivelación, peraltes, ancho de vía, etc., así como el estado de los materiales que la componen (traviesas, carriles...), se encuentran dentro de la tolerancia fijada en la normativa y especificaciones técnicas. Si esto a veces no es suficiente para evitar el accidente, si es necesario para que la probabilidad de sufrirlo se minimice en lo posible, así como para evitar responsabilidades civiles por no cumplir la normativa vigente en el caso de que haya ocurrido un siniestro.

Con el fin de supervisar la infraestructura, se utiliza un tren de auscultación de las vías. Las principales tareas previstas para este tipo de tren son:

- La auscultación dinámica de la vía.
- La auscultación geométrica de la vía.
- Localización de objetos no deseados en la vía. La eficacia de esta técnica ha sido probada incluso contra actos terroristas.

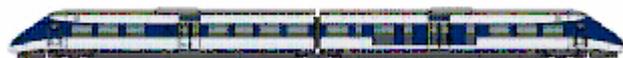


(Detalle de la estación de Berna, Suiza)



- La auscultación de la catenaria.
- La comprobación y supervisión de los sistemas de señalización.
- La comprobación y supervisión de las comunicaciones tren tierra.
- Realizar comprobaciones reales de fenómenos aerodinámicos producidos en los túneles (cuando un tren entra en un túnel, se produce delante de él una onda de presión, y detrás de él una onda de succión, de cuantía variable en función de los conductos de depresión de que disponga el túnel).
- Simulaciones de marcha comercial para mediciones de tiempos. Es importante para la elaboración de horarios. La simulación ayuda a resolver óptimamente el gráfico de marcha para factores como una demanda de viajeros dada, normalizar el tráfico cuando hay un incidente, mejorar la explotación de una línea, etc. Otro uso muy utilizado es el determinar la efectividad de mejoras realizadas en la modernización de las líneas.
- Ensayos para validar nuevos equipos de infraestructura.
- La interacción rueda/carril.

La frecuencia de utilización de este tipo de tren se sitúa entre tres meses (*Euskotren*) y un día (*AVE*), dentro de España, siempre de manera acorde con las posibilidades económicas de la compañía (el desembolso económico debido al equipo necesario es alto), los niveles de calidad que se desean alcanzar (no siempre son los óptimos, si estos no son los más rentables) y el uso que se le dé a la vía (características de los trenes que circulan por ella, su capacidad de carga por eje y su velocidad). La velocidad a la que pueden realizar su trabajo los trenes auscultadores llega a los 330 km/h, como es el caso del último tren de este tipo, que ha sido desarrollado por *TALGO* para la línea de *AVE* (*Talgo 330*, también llamado “*el pato verde*”). Es importante una alta velocidad en este tipo de trenes, ya que se reduce el tiempo de indisponibilidad de la vía.



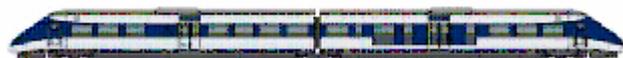


(Automotor auscultador 3.151, de Euskotren)

Otro aspecto importante a considerar es que el hecho de una mayor utilización de la vía, o una mayor velocidad de paso por ella, implica que ha de realizarse un mayor mantenimiento, debido principalmente al deterioro geométrico de la vía.

Se ha comprobado que un incremento de la velocidad se traduce en un incremento de las cargas dinámicas con el consiguiente aumento de las vibraciones y el desgaste por fatiga, las cuales se pueden paliar disminuyendo la carga nominal por eje. Por ejemplo, una velocidad de 100 km/h en vías convencionales, como son las que ocupan este estudio, obliga a tolerar una carga máxima por eje de 22 toneladas. Si la velocidad es aumentada hasta 160 km/h, para tener las mismas cargas dinámicas se ha de reducir la carga máxima por eje a 16 toneladas, lo que implica 6000 kilos menos. Por lo tanto, en función del uso de la vía, será necesaria una mayor frecuencia de uso del tren auscultador, para asegurar la calidad geométrica de la vía, o mayores márgenes de seguridad a la hora de diseñar la infraestructura (sobredimensionamiento de la vía).

La frecuencia de utilización del tren auscultador cobra especial relevancia en aquellas vías en las que conviven distintos tipos de trenes, ya que dependiendo de su carga o de su velocidad, se pueden presentar una mayor cantidad de problemas. Esto se hace más patente en vías que se comparten con alta velocidad (por ejemplo, en España el *Talgo* comparte vías con trenes de cercanías) ya que las irregularidades de la vía les afectarán de sobremanera debido a su especial sensibilidad provocada por la velocidad, o con trenes de mercancías, ya que su elevada carga por eje provocará desperfectos en la geometría de la vía, que luego podrán acusar los trenes de pasajeros. Este es uno de los

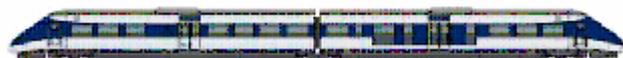


motivos por los que en países como EE.UU. los trenes de mercancías van a una velocidad muy inferior a la de los trenes de pasajeros, asegurando así que el deterioro de la vía sea lo menor posible, y posibilitando que la carga transportada sea mayor.

Hay que tener en cuenta que el hecho de que sea necesaria una mayor frecuencia del tren auscultador, implicara que es necesario realizar un mayor mantenimiento, lo cual obligará a que los cortes de la vía sean mayores en frecuencia o duración, lo que genera mayores costes de uso. Esto es importante dentro del tipo de mercado privatizado que se avecina, donde las compañías de ferrocarriles deberán pagar una tasa por la utilización de la vía.

Dentro de este apartado también se va a comentar la gestión de los recursos humanos. Las nuevas tendencias en el ferrocarril hacen hincapié en la optimización de los recursos humanos y en la especialización por sectores. Esto genera una mayor competencia y profesionalización de los trabajadores de las empresas de ferrocarriles, así como una mayor automatización. Este último presenta las siguientes ventajas:

- Supresión de tareas manuales de cálculo.
- Menos coste de realización del grafico.
- Mayor rentabilidad.
- Mayor rapidez de elaboración.
- Mayor precisión.
- Se puede o reducir el personal o reducir plazos de trabajo.
- Hay un fichero general de horarios para las necesidades de los sistemas de gestión.
- Permite estudiar el caso de que haya que meter un nuevo tren sujeto a un horario fijado.
- Se pueden hace algoritmos para, por ejemplo, que no haya situaciones conflictivas y que los retrasos sean mínimos.
- Facilita el incremento de uso de la línea, gracias al cálculo mas preciso.
- Puede haber modelos que den la capacidad de la línea para distintas hipótesis.
- Cuando hay baterías repetitivas, se puede establecer el orden de trenes que dan la máxima capacidad de la línea.
- Se pueden obtener los libros de itinerarios mediante fotocomposición, con lo que se evitan errores y se reducen los tiempos de revisión.



- Se puede imprimir una previa de los cuadros de horarios para información de los servicios del tren.
- Las computadoras indican a los controladores la mejor forma de corregir el horario de un tren, en la hipótesis de que alguno esté fuera de su plan de ruta.
- Posibilita que los horarios se impriman masiva y rápidamente.
- Facilita el dibujo del grafico de marcha.
- Se puede controlar y localizar a distancia un tren.
- Es posible realizar conexiones automáticas de trenes.
- Se pueden procesar instantáneamente datos referentes al funcionamiento del tren, y transmitirlos. Estos datos pueden ser: Velocidad, circulación, y otros muchos.
- Es posible realizar una línea de pasajeros totalmente automatizada, con trenes sin tripulantes.
- Mejora el servicio al cliente, ya que se controlan todas las actividades de operación y mantenimiento desde un puesto de mando central.

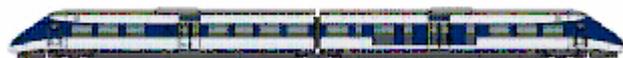
Como inconveniente está una cada vez mayor vulnerabilidad del sistema respecto a errores informáticos que, aunque infrecuentes, necesitan de personal altamente especializado para su reparación; así como la creación de métodos de actuación manual que funcionen en paralelo con los sistemas automáticos, lo cual es necesario para tener una mayor garantía de seguridad.

6.4.1.- Indicadores para la secuenciación de personal, materiales y actividades.

En relación con los anteriores aspectos pertenecientes a este apartado, así como las consecuencias que tienen dichos problemas en cuanto a retrasos, pérdida de capacidad operativa, disminución de la calidad del servicio, e incluso accidentes, se han elaborado los siguientes índices, los cuales, dependen en gran medida del mantenimiento realizado:

➤ *Averías por kilómetro:*
$$\frac{\text{Averías}}{\text{Kilómetros de la red}}$$

Este índice sirve para establecer el número de averías que sufre a lo largo de un año cada kilómetro de la vía, por lo que se tiene un valor claro para cuantificar



su fiabilidad. Evidentemente, este índice dependerá en gran medida del mantenimiento preventivo que se haga sobre dicha vía, así como de la frecuencia con la que el tren auscultador recorra la vía. Como se ha dicho antes, este índice se computa de manera anual. Para establecer el número de averías, no se especifica la gravedad de las mismas. Este índice es interesante también para determinar el número de equipos de mantenimiento que deben estar preparados para posibles eventualidades, en función de su capacidad de trabajo y de la longitud de la vía.

➤ *Averías por kilómetro recorrido:*
$$\frac{\text{Averías}}{\text{Kilómetros recorridos}}$$

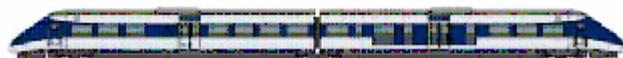
Este es un índice complementario al anterior. Al igual que el que le precede, sirve para establecer el número de averías que sufre a lo largo de un año cada kilómetro, pero en este caso se refiere al material móvil. Este es un índice que se relaciona con los índices *del plan de líneas*, ya que existe cierta similitud entre éste, y el que expresa la posibilidad de que una locomotora se averíe en función del tiempo. Este índice se computa de manera anual. Para establecer el número de averías, no se especifica la gravedad de las mismas, por lo que pueden ser de cualquier índole. Como es evidente, en este índice tendrá mucho que ver el mantenimiento preventivo que se le pueda aplicar al material rodante, ya que a mayor mantenimiento, menores averías experimentará, siempre dentro de un determinado límite, ya que un exceso de mantenimiento, lo único que conseguiría es encarecer los costes innecesariamente y disminuir el beneficio que pueda obtener la empresa.

➤ *Retrasos por avería en las vías:*
$$\frac{\text{Tiempo}}{\text{Averías en las vías}}$$

Este índice expone el perjuicio causado por la avería en función del tiempo. También se computan en este indicador las averías que han ocurrido durante un año. El tiempo de retraso incluye tanto retrasos primarios, como secundarios. Este tiempo es expresado en minutos, ya que, por lo general, los retrasos son de ese orden. Tal y como ocurre en el anterior indicador, para establecer el número de averías, no se especifica la gravedad de las mismas.

➤ *Retrasos por avería en el material rodante:*
$$\frac{\text{Tiempo}}{\text{Averías material rodante}}$$

Se computa este índice para completar la información que se obtiene del índice anterior. Este es un índice que se relaciona con los índices *del plan de líneas*, ya que existe cierta similitud entre éste, y el que expresa la disponibilidad de una locomotora. Al igual que en los anteriores, también se computan en este indicador las averías que han ocurrido durante un año. El tiempo de retraso incluye tanto retrasos primarios, como secundarios. Este tiempo es expresado en minutos, ya que, por lo general, los retrasos son de ese orden. Tal y como ocurre



en los anteriores indicadores, para establecer el número de averías, no se especifica la gravedad de las mismas.

➤ *Retrasos:*
$$\frac{\text{Número retrasos por avería}}{\text{Servicios}}$$

Este índice expone el número de retrasos que han ocurrido como consecuencia de que se haya producido una avería. Aquí se computan el retraso primario provocado por cada avería, así como los posibles retrasos secundarios que hayan podido ocurrir. No importa para este índice la duración de los retrasos, si no el número de ellos. Todo esto se pone en función de los servicios realizados por la compañía, con el fin de cuantificar el número de servicios afectados por alguna avería. El recuento de servicios y retrasos se realiza a lo largo de un año. Como es lógico, este índice dependerá del mantenimiento que se haya realizado en la vía.

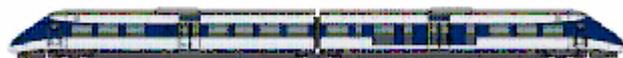
➤ *Accidentes por kilómetro:*
$$\frac{\text{Accidentes}}{\text{Kilómetros}}$$

Este índice expresa la cantidad de accidentes que sufre el material móvil en función de los kilómetros de vía recorridos. En este índice no se especifica la gravedad del accidente, aunque por lo general, suele ser alta. Se cuantifica también a lo largo de un año. Es un índice estándar en compañías ferroviarias ya que es muy fácil cuantificarlo.

➤ *Accidentes según mantenimiento:*
$$\frac{\text{Accidentes}}{\text{Horas de mantenimiento}}$$

Este índice refleja la cantidad de accidentes sufridos por el material móvil, en relación con el mantenimiento realizado. Este mantenimiento puede ser referido tanto al material móvil como a la infraestructura. Se mide por las horas de mantenimiento trabajadas por cada operario a lo largo de un año. La problemática que puede traer este índice es la fiabilidad de los datos obtenidos, ya que en función de la productividad de los empleados algunos trabajos necesitarán más tiempo que otros, por lo que lo mejor es comparar estos datos dentro de un mismo equipo de trabajo. También es posible que los datos obtenidos estén manipulados según diversos intereses, ya sea en el número de horas trabajadas por cada operario, como en el número de operarios. La elaboración de este índice exige un fuerte control de la forma de trabajo y productividad de los empleados, así como la transparencia de la persona dedicada a tal control. Es un índice muy útil para evaluar la efectividad de los trabajos realizados, así como para saber el número de empleados que es necesario contratar, pero exige que se haga de manera veraz, cosa que no siempre es posible llevar a cabo.

➤ *Accidentes según frecuencia del tren auscultador:*
$$\frac{\text{Accidentes}}{\text{Días tren auscultador}}$$



Aquí se pretende evaluar la eficacia del tren auscultador y establecer una referencia para saber la frecuencia de trabajo que se necesita del mismo. La presencia de un tren de este tipo en la vía implica que no es posible su uso, en ese momento, con fines comerciales, por lo que es interesante minimizar los recorridos realizados por este tren. No obstante, es necesario para el buen funcionamiento de la vía, por lo que es primordial establecer la frecuencia más beneficiosa para los intereses de la compañía. La frecuencia del tren auscultador se mide en días, ya que es la medida mínima que se utiliza en este tipo de tren (no se utiliza nunca varias veces al día, a no ser en un estudio aislado, por lo que no computaría para un estudio generalizado como este). La duración de este índice es, al igual que en los anteriores, de un año de trabajo.

- *Accidentes por fallo humano:*
$$\frac{\text{Accidentes por fallo humano}}{\text{Accidentes totales}}$$

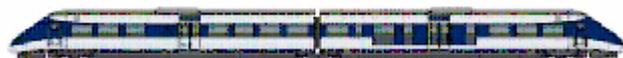
Con este índice se pretende establecer el porcentaje de accidentes causados por motivos de fallos humanos. Con esto se podrá evaluar la capacidad del personal contratado, su capacidad de concentración en el trabajo, así como la conveniencia de una mayor automatización de los sistemas de control. El cómputo de este índice es un año. No se especifica la gravedad de los accidentes ocurridos. El mantenimiento se contabiliza como el número de horas dedicadas a trabajos de mantenimiento, realizadas por cada operario de la empresa, a lo largo de un año.

- *Accidentes por fallo informático:*
$$\frac{\text{Accidentes por fallo informático}}{\text{Accidentes totales}}$$

Este índice es complementario al anterior. Se pretende establecer el porcentaje de accidentes causados por motivos de fallos informáticos. Con esto se podrá evaluar la calidad de los automatismos instalados, así como la confianza que es posible depositar en ellos, o en las personas encargadas de su programación. En este índice también se incluirá todas las veces que el automatismo ha fallado, y es necesario actuar de manera manual para evitar un accidente. Esto servirá también para evaluar la necesidad de la implantación de sistemas manuales que actúen en paralelo con los sistemas informáticos para evitar posibles desastres. Para este último apartado también es necesario un especial seguimiento a la forma de obtener los datos, ya que son manipulables fácilmente. No se especifica la gravedad de los accidentes ocurridos. El cómputo de este índice es también de un año. El mantenimiento se contabiliza como el número de horas dedicadas a trabajos de mantenimiento, realizadas por cada operario de la empresa, a lo largo de un año.

En referencia al personal de trabajo necesario para el buen funcionamiento del ferrocarril en el día a día, se han elaborado los siguientes índices:

- *Índice de bajas personal:*
$$\frac{\text{Jornadas no trabajadas}}{\text{Jornadas totales}}$$



Este índice expresa la cantidad de días laborables no trabajados por cada trabajador de la empresa. Para el cómputo global, hay que incluir a todos los trabajadores de la empresa, así como todas sus jornadas. El hecho de que alguna jornada se trabaje a medias se considerará como si no se hubiese trabajado entera. El tiempo en el que se contabiliza este índice es de un año. Con este índice se puede comprobar el porcentaje de jornadas de trabajo que son cumplidas por los empleados.

➤ *Duración media de las bajas:*
$$\frac{\text{Jornadas no trabajadas}}{\text{Accidentes}}$$

Este índice sirve para obtener una referencia sobre el número medio de jornadas que se encuentra de baja un empleado. Se establece de dos maneras:

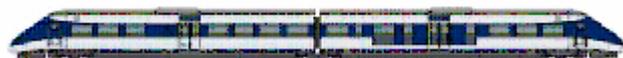
1. De manera individual de cada empleado. Esto sirve para examinar la duración de las bajas de cada empleado. En el cómputo de accidentes se contabiliza todos aquellos percances que sufre el empleado por los cuales le es imposible ir a trabajar. En las jornadas no trabajadas se contabilizan todos los días que ha faltado al trabajo. Con ello se puede establecer un baremo para averiguar qué empleados alargan más los periodos de baja y por lo tanto, son menos productivos. Bajo la responsabilidad del inspector a cargo de este cometido, estará averiguar la necesidad de esas jornadas de baja, o si por el contrario es un intento de evadirse del trabajo.
2. De manera colectiva y, tal y como se ha explicado en el anterior punto, se evalúa el tiempo medio de la duración de las bajas de los empleados, con el fin de obtener una referencia general de la empresa.

El período en el que se contabiliza este índice es de un año.

➤ *Accidentes de personal:*
$$\frac{\text{Accidentes}}{\text{Jornadas totales}}$$

Este índice muestra cada cuantos días laborables se espera que haya una baja laboral, cuya duración la dará el segundo apartado del anterior índice. Sirve para cuantificar la seguridad dentro de la empresa, en función de los incidentes que tengan los empleados. Para contabilizar el índice, en el apartado de accidentes se incluyen todos aquellos problemas que tengan cada uno de los empleados, por los cuales tengan que ausentarse del trabajo. En el número de jornadas totales se incluyen las jornadas que tiene cada empleado a lo largo de un año, por el número de empleados de la empresa. Así se obtiene una valoración de la salud de los trabajadores en función de las bajas que se piden. Aquí no se contabiliza la gravedad de los accidentes.

➤ *Índice de gravedad de las bajas:*



Jornadas no trabajadas diarias
Altas totales

Este índice da una referencia global de la empresa, sobre el porcentaje de trabajadores que no acuden diariamente a su jornada laboral. Viene a completar los anteriores índices. En las jornadas no trabajadas se contabilizan todas aquellas jornadas a las que cada trabajador no ha ido a su puesto de trabajo. En altas totales se contabilizan a todos los profesionales contratados en la compañía, independientemente de su cargo. La duración en la que se contabiliza este índice es también de un año. Este índice tiene la posibilidad de contabilizarse de manera individual. Esto es necesario cuando parte del personal es problemático en este sentido.

➤ *Puntualidad en el puesto de trabajo:*

Jornadas de llegadas con retraso
Altas totales

Con este indicador, se obtiene una valoración de la puntualidad de los empleados en llegar a su puesto de trabajo. Se puede establecer de dos maneras:

1. De manera individual de cada empleado. Esto sirve para examinar la puntualidad de cada empleado.
2. De manera colectiva.

Este aspecto suele ser especialmente crítico cuando la frecuencia en el paso de los trenes es elevada, ya que si es necesario el concurso del empleado para el correcto funcionamiento del tren, no se pueden efectuar los servicios planeados hasta que éste se incorpore a su puesto de trabajo, con lo que los retrasos se acumulan.

Con los índices expuestos, es posible evaluar y cuantificar la fiabilidad de un sistema ferroviario.

