

7.- Características diferenciales de las redes de metro.

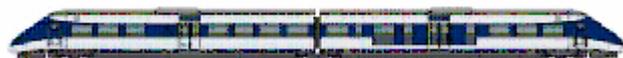
Las redes de metro tienen una serie de peculiaridades que las hacen diferenciarse de las demás tipos de ferrocarriles. Por lo general, son redes densamente pobladas de estaciones; en su mayoría, el trayecto se realiza bajo tierra, con frecuentes paradas cada pocos kilómetros y una gran cantidad de pasajeros.

Otra característica interesante es que suelen ser redes exclusivas para las líneas de metro. El tipo de trenes que circulan por estas líneas es siempre el mismo, salvo contadas ocasiones en las que se comparte la línea con trenes de cercanías. Esto implica que no van a ser líneas utilizadas por trenes de alta velocidad, trenes de recorrido nacional, ni trenes de mercancías. El hecho de utilizar carriles exclusivamente para dicho transporte, posibilita que las características de los raíles, plataforma y balasto estén adecuados a trenes de relativo poco peso y relativa baja velocidad. Es en estos casos, cuando los carriles pueden ser más ligeros, baratos y no necesitan ser tan perfectos como en la alta velocidad.

La planificación de este tipo de líneas suelen ser el gran caballo de batalla de los ayuntamientos de las ciudades, ya que el hecho de disponer de un sistema de transporte rápido y fiable, posibilita una mejora de la calidad de vida de los usuarios, además de ser un reflejo del nivel económico y tecnológico de la ciudad. Por este motivo, se hacen estudios de fiabilidad y robustez dedicados a las especiales características de utilización de este tipo de redes.



(Detalle del metro de Bilbao)



7.1.- Diseño de redes de metro.

El diseño de una red de metro se puede realizar por cualquiera de los cuatro métodos expuestos anteriormente: *Método de cuatro etapas*, *método de teoría de colas*, *métodos de simulación de transporte* y *métodos de coeficientes*. En los tipos de metro en los que se ha podido obtener información, el método más empleado para la planificación de sus estaciones ha sido el método de las cuatro etapas, si bien, en todos ellos ha habido una influencia de gran peso en cuanto a intereses políticos y comerciales.

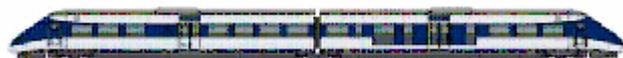
Entre los índices expuestos anteriormente cobran especial relevancia en este tipo de líneas los siguientes:

- *Grado de una red.* Es esencial que la red no se quede cortada, y si algún arco se interrumpe, que pueda haber caminos alternativos para que todas las estaciones de la red sigan comunicadas entre si. Cuantos más arcos sean necesarios eliminar para que la red quede dividida en dos grupos, más robusta será, ya que tendrá más recursos ante problemas que puedan surgir.
- *Conectividad.* De las tres definiciones de conectividad que se han dado en el apartado anterior, es más interesante para este tipo de redes la última, la cual hace referencia a la posibilidad de que un nodo quede desconectado de la red. Para ello, cuantos más arcos paran de dicho nodo, menos posibilidad habrá de quedar aislado. Esto hace referencia a la definición de fiabilidad sobre que la probabilidad de que algo deje de funcionar debe ser baja para ser considerado fiable.
- *Perjuicio por incremento de diámetro.* Con este índice se puede valorar la cantidad de usuarios afectados, y el tiempo extra que han de emplear para llegar a su destino debido a que uno o varios arcos, o nodos de la red, han sido eliminados, o no están disponibles para su uso. Esto hace referencia a la fiabilidad de la red, y al agrado de uso del sistema de metro por parte de los usuarios.

Es importante comparar este índice con el resultado que se obtendría realizando el mismo trayecto en automóvil, ya que es el gran competidor del transporte ferroviario dentro de la ciudad para el transporte de personas. Si este índice es muy alto, quizás merezca la pena realizar el trayecto en automóvil, por lo que este índice puede ser una valoración de la validez de la línea de metro.

7.2.- Plan de líneas en redes de metro.

Lo más característico del plan de líneas en las redes de metro es la alta frecuencia de paso de los trenes. Ésta puede variar desde los *1.5 minutos* entre trenes en el metro de Moscú, hasta los *10 minutos* del metro de Berlín.



La forma más habitual de tratar las variaciones de demanda en las redes de metro es mediante el *carrusel continuo con alteración de composición de ramas*, que como ya se ha expuesto anteriormente, consiste en variar la frecuencia de trenes que pasan por una estación, pero manteniendo siempre todas las líneas. En otras ocasiones, también se recurre a suprimir alguna línea, pero esto sólo se realiza cuando los usuarios de la misma son prácticamente anecdóticos. Este último es muy utilizado en el caso de líneas de metro nocturnas o de fines de semana, en las que la mayoría de las líneas se suprimen, manteniendo sólo unas pocas con alta previsión de ocupación.

Entre los índices expuestos anteriormente cobran especial relevancia en este tipo de líneas los siguientes:

- *Porcentaje de servicios operados.* Para verificar la fiabilidad de la red es necesario comprobar cuantos trenes han cumplido el objetivo de llegar a su destino. Si la red queda cortada a menudo, la red de metro no será un sistema válido de transporte, y por lo tanto no será una alternativa válida al uso del automóvil.
- *Utilización de la vía por pasajeros.* Es importante comprobar la utilización de cada tramo de la red para establecer la frecuencia necesaria de trenes que deben circular por cada arco de la red, así como la cantidad de vagones que debe incluir cada tren.

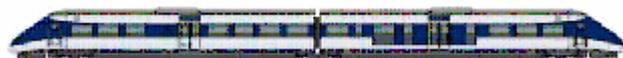
Este índice también tiene implicaciones a la hora de decidir si es rentable mantener todas las ramas de la red en horas valle, o si es recomendable suprimir alguna de ellas. También es utilizado, tal y como se ha expuesto anteriormente, para establecer las líneas nocturnas y las líneas de fines de semana.

7.3.- Elaboración de horarios en líneas de metro.

Este tema es el más complicado de todas las fases de planificación de una red de metro. Las variables implicadas en este aspecto son tantas y tan dispares que es imposible encontrar un modelo que las satisfaga todas en su máxima expresión, por lo que es necesario llegar a un compromiso entre ellas.

Son completamente antagónicos aspectos como los suplementos y la rapidez exigida en este tipo de líneas. En casos extremos como el metro de Moscú, en el que la frecuencia de salida y llegada de trenes a las estaciones llega a *1.5 minutos* entre cada tren (fuente www.urbanrail.net), hace que no exista apenas márgenes de maniobra, y exige que la fiabilidad y la ausencia de alteraciones sobre el horario previsto sea total.

Otro aspecto destacable es que la distancia entre estaciones ronda una media de 1000 metros, por lo que el tren está todo el tiempo acelerando y frenando. Si se tiene en cuenta que según los datos de la tabla del apartado 5.3 la desaceleración media en caso de emergencia es aproximadamente $1.3 m/s^2$, se necesita empezar a frenar bastante antes del punto de llegada, máxime si se tiene en cuenta que no se puede estar utilizando continuamente la máxima capacidad de frenado del sistema, ya que se podría provocar



la fatiga del mismo. Esto hace que en casos como el metro de Moscú esté llegando un tren a la estación en el instante en el que está saliendo el anterior, por lo que la compenetración debe ser máxima. También el hecho de que gran parte del trayecto el tren esté en fase de aceleración, implica que el suministro de electricidad debe ser óptimo, ya que cualquier disminución de la tensión disponible va a provocar que la aceleración disminuya considerablemente (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) y aparezcan retrasos.

El número de pasajeros es extremadamente importante, ya que cada 25 pasajeros que vayan en el tren se pierde un segundo en el registro de aceleración de 0 a 140 km/h. También hay que tener en cuenta que el tren debe estar un tiempo mínimo parado en la estación para dar tiempo a subir a todos los pasajeros. Estos aspectos se solucionan sobredimensionando los motores y bajando la aceleración cuando las exigencias de operación son menores. Otro aspecto en el que influyen de manera decisiva los pasajeros 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.

También hay que destacar el aspecto que implica el retraso permitido. En anteriores apartados, se ha comentado que se permite un cierto retraso a la llegada de los trenes, que puede estar en torno a 3 o 5 minutos. En este caso, en el tiempo de 3 minutos pueden haber salido 3 trenes de la estación, por lo que ese retraso no es aceptable. El *índice de calidad del retraso permitido* debe estar en torno a 1 para que todo funcione correctamente, lo cual exige una precisión muy superior a la de cualquier otro medio de transporte.

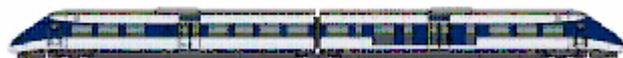
Por último se va a comentar el tema de los suplementos, que en casos tan rigurosos como los que se dan en las líneas de metro, sólo pueden ser de unos segundos, ya que a los trenes apenas les da tiempo a acelerar y frenar para llegar a la estación en el horario fijado, por lo que no hay tiempo para implementar estos suplementos.

Todo esto hace que sea extremadamente fácil que ocurran retrasos, ya que como el margen de tiempo es prácticamente nulo, el sistema es muy sensible a cualquier perturbación, por lo que la robustez del sistema es baja.

También aparece el hecho de que debido a la alta frecuencia de trenes, es casi imposible que un retraso primario no se traduzca en retrasos secundarios, los cuales serán muy difíciles de solucionar, por lo que la estabilidad del sistema no es un punto fuerte de las redes de metro.

Entre los índices expuestos anteriormente cobran especial relevancia en este tipo de líneas los siguientes:

- *Retrasos.* Es imprescindible comprobar este punto para establecer si la red de metro es o no fiable.
- *Duración de los retrasos.* Con este índice se puede comprobar si los retrasos en los que incurre el metro son “molestos”, o llegan al punto de ser desastrosos.



- *Perjuicio del retraso.* Sirve para comprobar la cantidad media de personas afectadas y el retraso que han tenido que sufrir. Es necesario que este índice esté lo más próximo a cero si se quiere que el sistema de la red de metro no sea un caos.
- *Índice de calidad del retraso permitido.* En este tipo de trenes no se permite retraso, así que este índice debe ser 1.

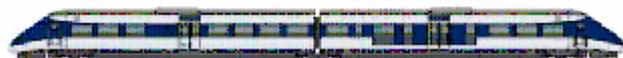
7.4.- Secuenciación de personal, materiales y actividades en líneas de metro.

Este punto está supeditado las características de operación de este tipo de trenes. En el caso de las redes metro, todos los trabajos y actividades han de realizarse cuando el funcionamiento del metro se lo permite. Debido a la altísima frecuencia de uso, las operaciones de manejo de los trenes, mantenimiento y elaboración de programas necesitan ser realizados en un tiempo mínimo.

Para paliar estas circunstancias, cobran especial importancia aspectos como el mantenimiento preventivo, ya que no se puede permitir que haya fallos en el tren. Las operaciones de limpieza, confort e imagen de los vehículos son igualmente necesarias para un agrado de uso por parte de los pasajeros.

La auscultación de la vía queda relegada a la noche, en las horas en las que no circula ningún tren, ya que durante las horas en las que el metro está circulando, es imposible introducir otro tren más para este fin. Esto normalmente no es gran problema en este tipo de trenes, ya que debido a la baja velocidad y a la poca carga que llevan, no son especialmente sensibles a los defectos de la vía. Lo que si que puede ser relevante en este aspecto son los problemas que se puedan dar en las vías que van por la superficie a través de la ciudad debidos al vandalismo, o la suciedad que se pueda depositar en los carriles. Según estos problemas, que en principio sus causas son ajenas a la compañía, puede que sea necesario un mayor mantenimiento de las vías para garantizar la seguridad en las mismas.

Los automatismos se hacen muy necesarios, ya que el tiempo de actuación se reduce de forma considerable respecto a lo habitual en otros tipos de trenes. Esta dependencia de la automatización hace que el sistema sea muy sensible ante fallos de este tipo, exigiendo sistemas en paralelo que actúen como medida de seguridad en caso de fallo del primero. Otro aspecto por el que son necesarios los automatismos es la baja dependencia del funcionamiento del tren respecto a posibles bajas de personal, ya que el tren no puede dejar de realizar su recorrido por motivos de esta índole. Por ello se crean puestos de dirección, que constituyen los centros neurálgicos desde los cuales se realiza el control completo de las instalaciones de las estaciones, el tráfico ferroviario, la distribución de la energía, la información al viajero y la seguridad de las estaciones y dependencias. Disponen además de equipos para comunicarse verbal y visualmente con los conductores y los usuarios.



Entre los índices expuestos anteriormente cobran especial relevancia en este tipo de líneas los siguientes:

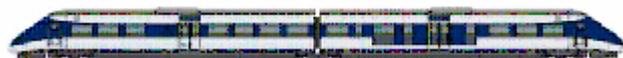
- *Retrasos por avería en las vías.* Es necesario controlar este índice para saber si el mantenimiento de la vía está siendo el adecuado.
- *Retrasos por avería en el material rodante.* Al igual que el anterior, debido al intenso uso que sufre el material rodante, hay que tener referencias de si el mantenimiento preventivo que se está aplicando al material rodante, es correcto o insuficiente.
- *Accidentes por fallo informático.* Sirve para comprobar la eficiencia de los sistemas informáticos, y la necesidad de implantar sistemas que actúen en paralelo.
- *Puntualidad en el puesto de trabajo.* Como se ha expresado antes, este aspecto es crítico cuando la frecuencia en el paso de los trenes es elevada, ya que se pueden acumular retrasos de manera importante.

7.5.- Conclusiones sobre las líneas de metro.

En los anteriores apartados se han comentado los aspectos más relevantes en las líneas de metro. Debido a su alta frecuencia en el paso de trenes, la robustez y la estabilidad en los retrasos están seriamente comprometidas, por lo que es en estos puntos donde hay que hacer hincapié.

Por supuesto que la fiabilidad es también muy importante, pero en este caso hay situaciones que son difícilmente controlables en el margen de tiempo que se dispone (por ejemplo 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), por lo que hay que planificar la red pensando que las perturbaciones van a existir.

El mejor camino para que una red de metro sea robusta frente a los retrasos es aumentar los suplementos. Hay que recordar que el tiempo total de trayecto estaba formado por el tiempo de trayecto técnico más los suplementos, que son tiempo extra que sirve como margen de regularidad. Como el tiempo entre trenes es extremadamente corto (hasta 1.5 minutos), la única forma de contar con suplementos es reducir el tiempo de trayecto técnico. Esto se consigue mediante el sobredimensionamiento de los motores y los frenos. La medida no siempre es factible, ya que encarece el material rodante, por lo que hay que tener en cuenta la rentabilidad y la capacidad de financiación. El porcentaje de sobredimensionamiento que es necesario en cada caso, habrá que estudiarlo de manera individual. Hay que tener en cuenta en este aspecto, que si los trenes van a ir más rápido, han de contar con una vía adecuada, ya que por ejemplo, los raíles deben ser de mejor calidad cuanto más velocidad se alcance en ellos.



Otro aspecto importante es el retraso permitido, que en caso de las líneas de metro debe ser obligatoriamente nulo, ya que debido a la alta frecuencia, se propagarían los retrasos de forma irremediable.

Los automatismos deben ser protagonistas en este tipo de trenes, ya que de otra manera no sería posible reducir el tiempo de actuación hasta el nivel exigido para el cumplimiento de los horarios.

En cuanto al diseño de la red, es importante que la probabilidad de que un trayecto quede anulado, sea lo más baja posible. También hay que considerar el hecho de que cuanto más mallada sea la red, y más arcos confluyan a cada nodo, más fiable será el sistema.

Por último, lo más importante en las redes de metro es la cantidad de usuarios que tenga, ya que esta es la base a partir de la cual se realizan todos los cálculos que desembocan en el diseño y planificación final de la red.

