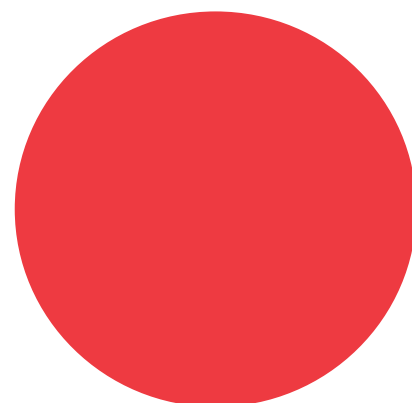


PREMIO COMSA DE FERROCARRILES

VIII Edición 2009



TRABAJO FIN DE CARRERA

50 AÑOS DE ALTA VELOCIDAD EN JAPÓN

RAMIRO PIGEM CAMESELLE
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



COMSA

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería civil, a la hora de referirnos a Japón, es habitual pensar en imponentes e innovadoras obras de ingeniería. Es el caso del túnel de Seikan, que enlaza los 53 kilómetros que separan las islas de Honshu y Hokkaido, siendo el túnel ferroviario más largo del mundo. Otras obras singulares como el Aeropuerto Internacional de Kansai en Osaka, construido íntegramente sobre el mar, o el puente colgante de Akashi-Kaikyo, el de mayor longitud de ésta tipología, son algunos de los ejemplos que sitúan a este país en una posición de referencia.

Pero es, sin duda, la construcción del tren de alta velocidad en 1964 el hito que confirmó la revolución innovadora que iba a llevar a cabo Japón en la segunda mitad del siglo XX. Japón logró mucho más que alentar el crecimiento de su propia economía cuando abrió la línea Tokaido Shinkansen entre Tokio y Osaka en los días previos a los Juegos Olímpicos de ese mismo año. Además dio inicio a una era completamente nueva del transporte por ferrocarril, impulsando la creación de líneas de alta velocidad en otros países e inyectando esperanzas a una industria que empezaba a declinar. En octubre de 1903, un tren experimental ya había alcanzado los 210 km/h entre Marienfelde y Zossen en Alemania. Tendrían que pasar sesenta años para ver un tren de estas características operar comercialmente de forma regular. Sin duda el Shinkansen supuso un antes y un después en la historia ferroviaria mundial.



Figura 1. Algunos de los trenes que han circulado por la red Shinkansen desde 1964. De izquierda a derecha: Series 0 (1964), Series 500 (1997) y Series E4 (1997).

Desde que el Shinkansen empezó con los servicios comerciales, las líneas principales han transportado a más de 8.000 millones de pasajeros. Desde entonces no ha habido ningún accidente debido a colisión, descarrilamiento o fallo estructural. No hay que olvidar que se trata de un territorio frecuentemente castigado por terremotos y tifones. Otra particularidad es la gran puntualidad del servicio, siendo el retraso medio respecto a la hora de llegada inferior al minuto. Estas características son impactantes, por lo que cabe preguntarse cómo es posible, cómo funciona este sistema por dentro. Por eso en esta tesina se estudia la evolución de la red desde sus inicios, enfatizando las diferencias entre las etapas de su crecimiento y concluyendo el porqué de esta seguridad y fiabilidad.

Para llevar a cabo este análisis, se reflexiona sobre el proceso de expansión de la red. Se distinguen varias etapas de crecimiento, resaltando sus causas y consecuencias. También es crucial analizar los avances tecnológicos que han permitido el aumento progresivo de la velocidad de los trenes, sin afectar al confort y a la seguridad de los viajeros. Por otro lado también hay que hacer hincapié en la situación geográfica del país, azotado anualmente por inclemencias climáticas, y dotado de una topografía muy irregular. Por último nos plantearemos cómo puede evolucionar el sistema en el futuro, con qué tendencia está creciendo actualmente y qué posibilidades de futuro está afrontando.

Por último hay que destacar que el Shinkansen tiene un gran significado en la sociedad y cultura niponas. La manera que fue implementada, la forma en que se desarrolló la red y cómo es operada actualmente refleja muchos aspectos de la sociedad japonesa y de la forma de actuar de sus ciudadanos. Este es un detalle muy importante que no debe menospreciarse en un estudio de este calibre. Es por eso, que no debemos tomar el modelo japonés como uno universal, sino que habría que estudiar en cada caso qué posibilidades y qué condiciones existen, si quisiéramos copiar el modelo en otro país.

2. EVOLUCIÓN DE LA RED

Para comenzar con nuestro análisis es imprescindible describir la situación del ferrocarril japonés antes de la inauguración del Shinkansen. Para ello habrá que destacar la llegada tardía (finales del siglo XX) de la revolución industrial a Japón. En 1868, bajo influencia inglesa, se decide extender las primeras líneas ferroviarias con ancho métrico.

Tras la Guerra Ruso-Japonesa en los años 30, se plantea por primera vez la posibilidad de conectar los territorios bajo dominio japonés en China y Corea (**Expansión Imperial 1938-1944**) mediante un tren que alcanzaría los 200 km/h, el *dangan ressha* (tren bala). Sin embargo este proyecto se ve detenido por el estallido de la Segunda Guerra Mundial y los posteriores años de crisis en el país (**Época de recuperación económica 1944-1957**).

Será en los inicios de los años 50 cuando varios indicios muestran la necesidad de un nuevo sistema de transporte. Pero es sin duda el incremento de la demanda de la línea entre los dos motores económicos del país (Tokio y Osaka) lo que acaba de dar el impulso definitivo. Siendo solamente el 3% de la red, esta línea transportaba un cuarto del volumen total (**Génesis del Shinkansen 1957-1964**). Además las predicciones alertaban que en 10 años la demanda se iba a doblar. De este modo, como solución a un problema de demanda nacía la primera línea Shinkansen, la línea Tokaido. Trenes circulando más rápido permiten una mayor frecuencia y, con ello, una mayor capacidad de transporte. El resultado fue que el viaje se redujo a la mitad, de 6 horas y media a unas 3 horas.

A partir del éxito de esta primera línea se ideó la posibilidad de extender la red por todo el territorio (**Nacimiento fulgurante 1964-1973**). Este anhelo quedó plasmado en la Ley Nacional de Desarrollo del Shinkansen de 1970 con unas previsiones de 20 nuevas líneas a finalizar antes de 1985 (7.000 km aproximadamente). De todas ellas se inauguró en 1972 la línea Sanyo desde Osaka hasta Okayama, y en 1975 su extensión hasta Fukuoka en Kyushu. Además se aprobó la construcción de las líneas Joetsu y Tohoku desde Tokio hacia el norte de Honshu. Sin embargo, enseguida se comprobó la imposibilidad de llevar a cabo este plan tan ambicioso y se redujeron las pretensiones a una red de unos 3.400 km, los *Seibi Shinkansen* (**Estancamiento 1973-1987**). Esta etapa coincide con un periodo de casi 20 años de anquilosamiento en los que no se aprueba la construcción de ninguna línea nueva, no se evolucionan los trenes manteniéndose las velocidades iniciales de 210 km/h y la compañía pública Japan National Rail (JNR) entra en crisis financiera.

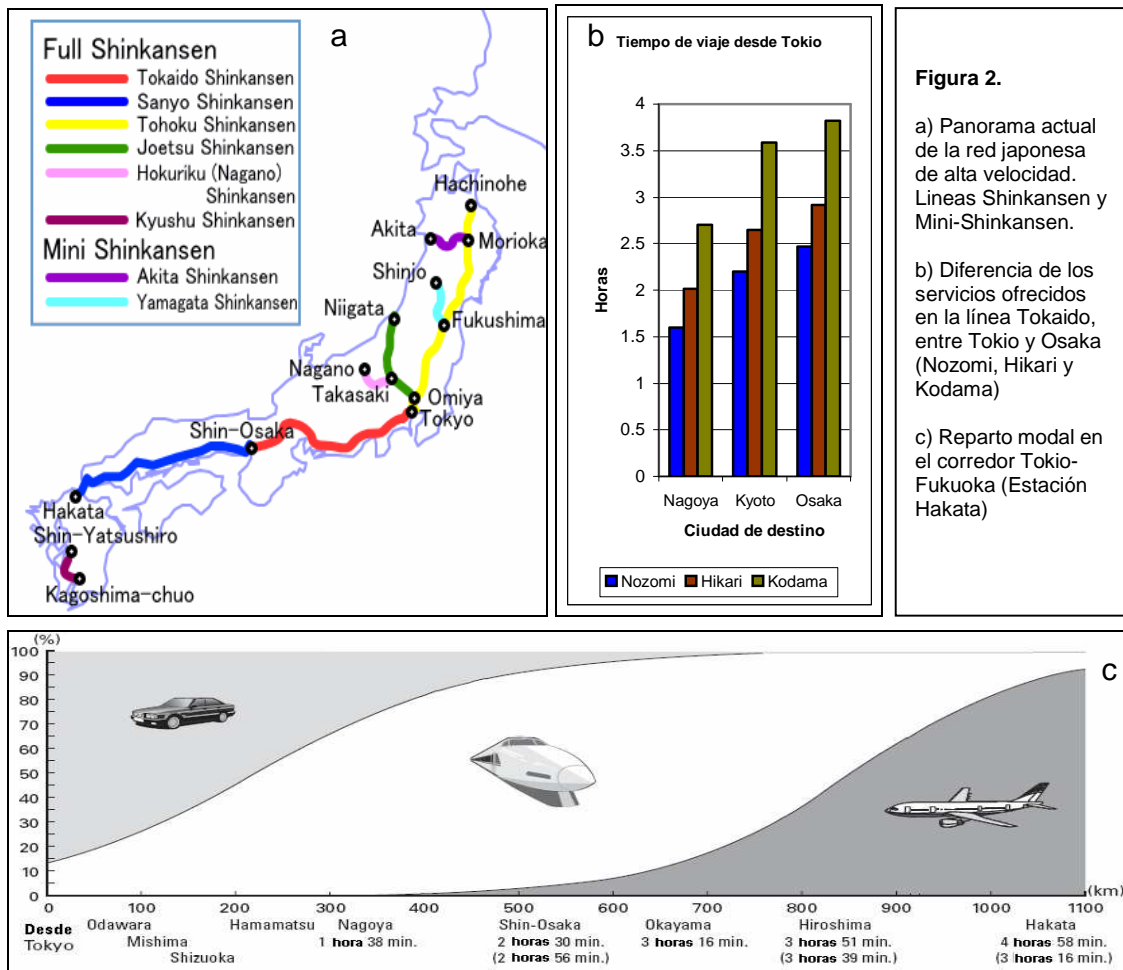
Este periodo gris acaba con la privatización de la empresa pública en 6 compañías privadas repartidas en el territorio: JR Central, JR East, JR West, JR Kyushu, JR Shikoku y JR Hokkaido (**Nuevas esperanzas 1987-1992**). Así pues se revitaliza el panorama ferroviario y tras 18 años se aprueba la construcción de una línea nueva: el Hokuriku Shinkansen. Las empresas privadas buscan soluciones eficientes para localidades de menor peso demográfico. Nacen así los Mini-Shinkansen, en los que se mantienen los trazados de las líneas convencionales, ensanchando la vía a ancho internacional. En 2004 se inaugura el Kyushu Shinkansen, la primera línea que no parte desde Tokio. Además en esta última etapa se han aumentado las velocidades hasta los 270-300 km/h, un gran salto de calidad para el servicio (**Época dorada 1992-2008**).

Hemos visto que los cambios e innovaciones más significativos se dan entre los inicios en los años 60 y tras la privatización de JNR. Por eso centraremos nuestro análisis en las principales diferencias entre estas dos etapas.

3. ANÁLISIS DE LA RED

En la actualidad existen en Japón 6 líneas de alta velocidad y otras 2 de Mini-Shinkansen al norte donde se permiten unas velocidades máximas de 130 km/h (*Figura 2.a*). A destacar la complejidad del servicio en las líneas principales, donde se ofrecen tres tipos de servicios: por un lado el servicio express con paradas sólo en las localidades más importantes, el servicio normal con un mayor número de estaciones intermedias y, por último, un servicio que se detiene en cada

estación. El ejemplo más conocido es el de la línea Tokaido, con los servicios *Nozomi*, *Hikari* y *Kodama*.



Analizando este abanico de posibilidades, es evidente que los trayectos express ofrecen velocidades comerciales mucho más elevadas (Figura 2.b). En la Línea Tokaido, por ejemplo, hablaríamos de 220 frente a 140 km/h. Con esta diversidad, el *Nozomi* puede competir contundentemente con el avión en los trayectos de menos de 3 horas, acaparando la mayoría del tráfico entre Tokio y Okayama (Figura 2.c).

En cuanto a las tarifas, se mantienen los precios establecidos en octubre de 2003. Las diferencias no son muy significativas dependiendo del servicio por el que optemos. Esta política tiene como objetivo evitar competencia entre los servicios y colapsar así el más económico. Se trata de repartir a los usuarios en cada tipo de servicio dependiendo del tipo de viaje que hagan. El *Nozomi* para viajes de largo recorrido, el *Hikari* para los de media distancia y el *Kodama* para conectar ciudades de menor peso.

Si examinamos las poblaciones conectadas a la red, resulta que se ha desarrollado el proceso más lógico, enlazamos las zonas más densas con las primeras líneas (*Tokaido* y *Sanyo*) (Figura 3.a). En las líneas más recientes se ha dado paso a ciudades menos pobladas (*Tohoku* y *Joetsu*). Además se buscan trazados estratégicos, como por ejemplo, arribar en un futuro a Sapporo en la isla septentrional de Hokkaido.

Fijándonos en el volumen de tráfico, se debe señalar el incremento meteórico en los primeros años, cuadruplicándose en los 10 años iniciales (Figura 3.b). Por otro lado notar que las líneas nuevas no disponen de una demanda potencial tan elevada como las líneas Tokaido y Sanyo. Además valorar las diferencias con los países europeos, con un volumen de tráfico de un tercio del japonés en Francia y de un cuarto en Alemania.

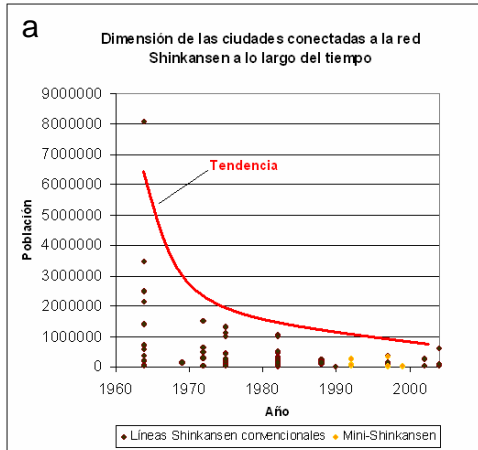
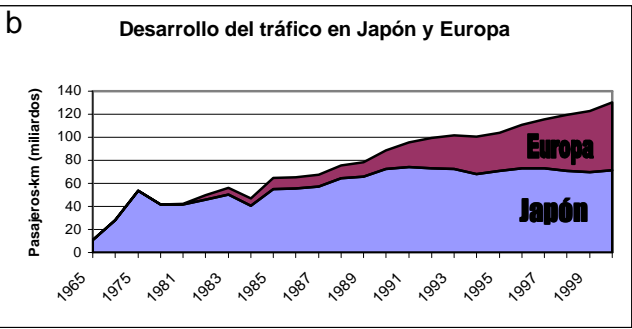


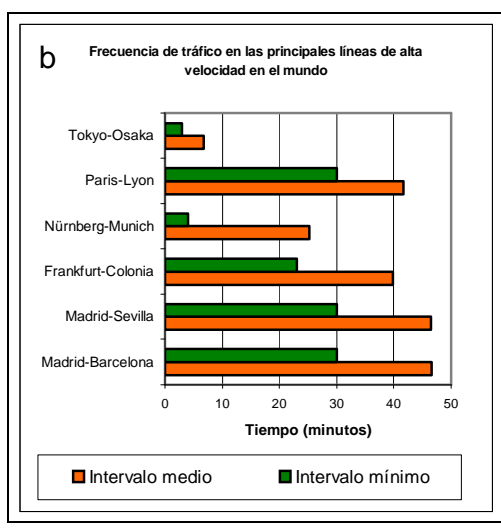
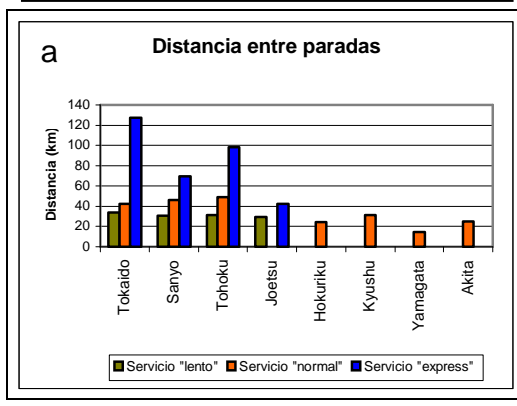
Figura 3. a) Poblaciones conectadas a la red Shinkansen a lo largo del tiempo. b) Evolución del tráfico ferroviario de alta velocidad en Europa y Japón.



Habiendo la disparidad de servicios en las líneas Tokaido, Sanyo y Tohoku, la distancia entre paradas abarca desde los 40 a los 120 km (Figura 4.a). En las líneas nuevas, al atravesar poblaciones de importancia muy pareja, interesa que todas las ciudades estén conectadas, por lo que los trenes se detienen cada 40 km aproximadamente. Estos valores contrastan con las líneas europeas, donde en Francia, por ejemplo, la distancia media es de 140 km.

Por último recalcar una de las grandes características del Shinkansen: su elevadísima frecuencia de servicio (Figura 4.b). Para poder transportar a tanta gente es necesario reducir al máximo el intervalo entre trenes sucesivos. Es el caso del Tokaido Shinkansen, donde, como media, un tren parte cada 6 minutos desde Tokio. Para ello es imprescindible una puntualidad espectacular, como la que se da en esta línea: se estima un retraso medio de 6 segundos por tren. En cambio, en las nuevas líneas, careciendo de una demanda tan elevada, se trabaja con frecuencias más parecidas a las europeas.

Figura 4. a) Distancia entre paradas según el tipo de servicio en las líneas japonesas. b) Diferencia en la frecuencia de la línea Tokaido y el resto de líneas de alta velocidad en el mundo.



4. AVANCES TECNOLÓGICOS

La velocidad de circulación es un buen indicador para analizar los avances tecnológicos logrados en los trenes japoneses desde 1964. Vemos que en los primeros 25 años apenas se incrementó la celeridad en las líneas principales, pasando de 210 a 220 km/h. Tuvo que llegar la privatización de JNR para que las compañías privadas dieran el impulso necesario (*Figura 5*). Así, las Series 300 (*Tokaido*) aumentaron la velocidad hasta los 270 km/h y las Series 500 (*Sanyo*) alcanzaron los 300 km/h por primera vez en territorio japonés. Ahora cabe preguntarse qué cambios en la configuración de los trenes han permitido estos aumentos, asegurando siempre el confort y la seguridad de los viajeros.

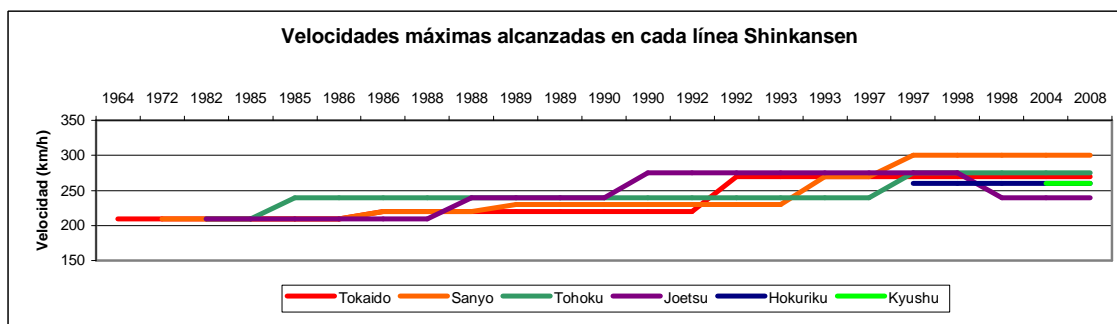


Figura 5. Velocidades máximas alcanzadas en cada línea Shinkansen a lo largo del

Si observamos varios elementos del sistema vemos el porqué de estas mejores prestaciones. En cuanto a los bogies, los primeros eran robustos y pesados (10 t), mientras que los actuales son más ligeros (6 t) y estables para mayores velocidades. Los frenos también han vivido un cambio con la entrada de las Series 300. Si los primeros trenes compaginaban los frenos reostáticos, los de fricción y los de corrientes de Foucault, los actuales introducen el freno eléctrico regenerativo, que permiten recuperar la energía disipada a la catenaria. En lo que se refiere a los motores, ya desde inicio se optó por tracción distribuida. Al aumentar la velocidad también es necesario incrementar la potencia. Para ello se ha elevado la potencia unitaria de cada motor o se ha ampliado el número de ejes motorizados. Además se han abandonado los motores de corriente continua para dejar paso a los asíncronos. Si estudiamos la resistencia al avance, notamos que se han aligerado los trenes, se ha reducido su sección transversal y se ha ido buscando un perfil cada vez más aerodinámico (*Figura 6.a*), con el objetivo de facilitar una circulación cada vez más veloz.

Por último comentar brevemente los modelos más recientes en el panorama japonés, Las Series N700, implementadas en 2007, buscan sortear curvas de 2.500 m a velocidades máximas de 270 km/h mediante un dispositivo de caja inclinable (*Figura 6.b*). Se permite así reducir el tiempo de viaje entre Tokio y Osaka y aumentar ligeramente la frecuencia del servicio. En cuanto al futuro, JR East pretende aumentar las velocidades máximas a 360 km/h para poder competir con el avión en viajes de largo recorrido al norte de la isla de Honshu. Para ello tendrá que solucionar el problema del elevado ruido generado a esas velocidades. Como principal innovación destacar los frenos aerodinámicos que se están probando y que sobresalen en la parte superior del tren (*Figura 6.c*).

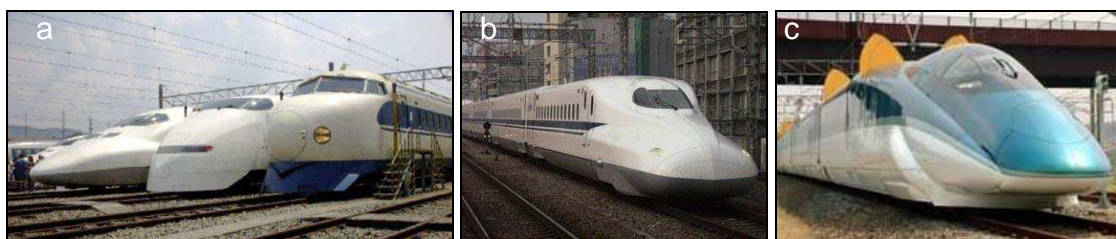


Figura 6. a) Evolución del perfil aerodinámico en JR Central (Series 0, 300 y 700). b) Vista frontal del Series N700. c) Frenos aerodinámicos del Fastech 360.

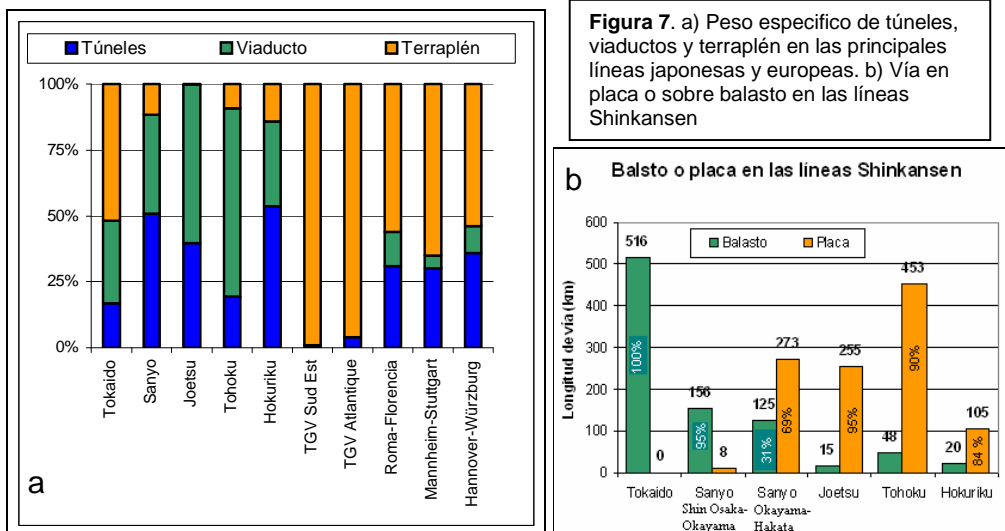
5. CONSTRUCCIÓN

La línea Tokaido se construyó con curvas con radio mínimo de 2.500 m. Debido a esto, la velocidad en curva está limitada excepcionalmente a 250 km/h si no se dispone de trenes con caja inclinable. Por eso, en las siguientes líneas se incrementó el radio mínimo hasta los 4.000 m. Esto, empero, lleva consigo una difícil adaptación del trazado al terreno natural y con ello la mayor necesidad de obras auxiliares como los puentes y los túneles, encareciéndose así en gran medida los costes de construcción (Figura 7.a).

Una de las principales características de la red japonesa es el gran número de túneles que existen. En las primeras líneas, al atravesar terrenos menos abruptos, las exigencias eran menores, pudiéndose construir las líneas de forma más rápida. En cambio a medida que se extiende la red hacia el norte las exigencias son mayores, con un mayor número de túneles y de mayor longitud.

En cuanto a la sección transversal, al desconocer los fenómenos aerodinámicos que se dan a la entrada de los túneles, los primeros se construyeron con unas dimensiones demasiado estrechas. Esta decisión provocaba una repentina generación de ruido tanto en el interior como en el exterior del tren y repercutía en la resistencia al avance. Por esta razón los túneles actuales se construyen con una sección más generosa. Para los túneles iniciales se han buscado soluciones como la ya mencionada reducción de la sección de los trenes o la construcción de cubiertas de hormigón a la entrada de los túneles para aminorar el efecto.

Otra decisión importante a la hora de construir una nueva línea es elegir entre vía sobre balasto o vía en placa. La línea Tokaido se erigió íntegramente sobre balasto y, debido a problemas de trituración, tuvo que ser sustituida por completo a los 12 años de vida. Además, este tipo de infraestructura requiere unos trabajos de conservación intensos. Por esta razón, en las líneas posteriores se ha ido eliminando el balasto, dando paso a la vía en placa (Figura 7.b). Esta no necesita un mantenimiento tan frecuente. En cambio, su colocación es más cara. Aún así, en Japón se habla de un periodo de amortización de unos 10 años. Además su instalación exige asientos post constructivos reducidos en terraplén. Es por ello que en la actualidad se están eliminando los terraplenes del panorama japonés, sustituyéndolos por viaductos sencillos.

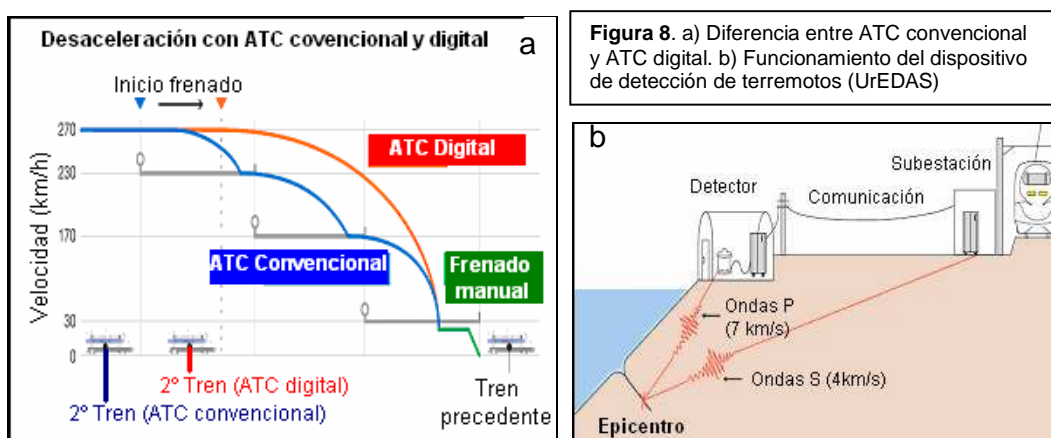


6. SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO

Circular a 210 km/h supuso también asumir una gran responsabilidad. Se eliminaron las señales laterales y se implementó un nuevo sistema de control de trenes, que, mediante circuitos de vía, separaba la red en cantones de 3.000 m y limitaba la velocidad del tren dependiendo del número de regiones que separan dos trenes consecutivos. Al tratarse de un frenado por pasos, se genera

un mayor desgaste de los frenos y se limita la frecuencia de circulación. Como respuesta a ello, en 2002 se instauraba el ATC digital, cuya curva de frenado es continua, mejorando el confort del viajero, reduciendo el deterioro de los frenos y permitiendo una circulación más fluida (*Figura 8.a*). Para el futuro se está ensayando con un dispositivo de comunicación por radio que no requerirá de equipos en la vía.

Si por algo se caracteriza el clima japonés es por ser azotado frecuentemente por las fuerzas de la naturaleza. Por un lado tenemos los terremotos, a los que el Shinkansen afronta con una batería de sismógrafos situados a lo largo de su recorrido. Éstos detectan las ondas P y S y calculan la intensidad y epicentro del terremoto para poder detener los trenes (*Figura 8.b*). El sistema original ha sido mejorado recientemente, para una detección más rápida y fiable. En cuanto a la nieve, a medida que el Shinkansen se ha ido adentrando en el norte del país se han ido buscando soluciones para no tener que interrumpir el servicio. Se han instalado aspersores de agua caliente a pie de vía para fundir la nieve y calefactores en los bogies de los trenes con el mismo propósito. No hay que olvidarse de los tifones. Éstos traen consigo problemas como desprendimientos o fuertes vientos laterales que hay que afrontar.



Para asegurar los altos grados de seguridad también hay que seguir una política de mantenimiento estricta. Para ello los trenes de auscultación geométrica tienen que adaptarse a las velocidades comerciales existentes para no interrumpir la explotación regular y para poder simular la respuesta dinámica que tiene la vía al paso de los trenes. Es por ello que los actuales T4 y East i circulan a 270 km/h.

7. EXPECTATIVAS Y POSIBILIDADES DE FUTURO

A la hora de hablar de futuro veamos, de las líneas planeadas por el Seibi Shinkansen, cuáles están en construcción actualmente (*Figura 9.a*). De todas ellas destacar la extensión del Tohoku Shinkansen hasta Aomori para conectar con el futuro Hokkaido Shinkansen que unirá Honshu con Hokkaido a través del túnel de Seikan. A parte de estos casos también existen varias líneas en discusión, como la prolongación del Hokkaido Shinkansen hasta Sapporo, que parece justificada al ser ésta la 5ª ciudad más poblada de Japón, el Nagasaki Shinkansen que uniría Nagasaki con Fukuoka y la extensión del Hokuriku Shinkansen hasta Osaka. Este último proyecto parece detenido debido a la posibilidad que también se una Tokio y Osaka mediante el Chuo Shinkansen, en el que circularía un tren de levitación magnética (*Figura 9.c*). El MAGLEV conectaría ambas ciudades en apenas una hora. Pero su ejecución parece poco previsible para un futuro próximo debido a las dudas del gobierno por su elevado coste.

A parte de las líneas mencionadas previamente parece improbable la apertura de otras vías. No existe otro corredor que justifique una obra de tal envergadura. Es por ello que, por ejemplo JR East, se plantea extender los Mini-Shinkansen por la costa del Mar de Japón u otras compañías (JR Shikoku y JR Kyushu) experimenten con trenes de rodadura desplazable. El objetivo es

mejorar la conexión a la red Shinkansen, sin tiempos de espera o trasbordos, a un precio razonablemente bajo y poder así competir con el transporte por carretera.

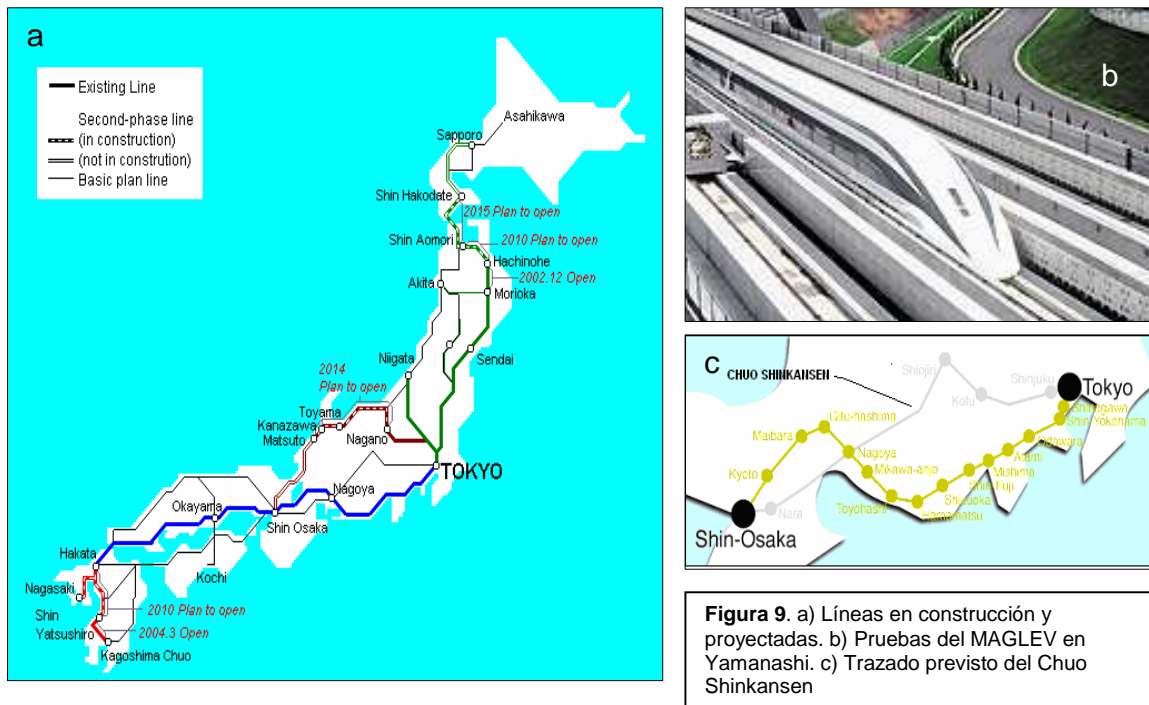


Figura 9. a) Líneas en construcción y proyectadas. b) Pruebas del MAGLEV en Yamanashi. c) Trazado previsto del Chuo Shinkansen

8. CONCLUSIONES

Como conclusiones cabe resaltar los siguientes puntos:

- 1 Por un lado destacar que la inauguración del Tokaido Shinkansen supuso un antes y un después en el transporte ferroviario, revitalizando un modo que parecía claudicar frente a otros como el avión o el coche.
- 2 Además es fundamental diferenciar entre las etapas de crecimiento que ha habido hasta el momento. Solamente la privatización de JNR provocó que se innovara e investigara en aspectos como la velocidad, la seguridad o el mantenimiento.
- 3 También hay que distinguir entre cada una de las líneas. Se pueden separar en tres grupos, cada uno con diferentes políticas de explotación, dependiendo qué zona ha de servir y con qué competencia han de lidiar.
- 4 Asimismo es importante decir que las líneas posteriores a la Tokaido (en Japón y en el mundo) han aprendido de sus errores al ser ésta la primera línea de alta velocidad a nivel mundial.
- 5 Si dentro de Japón las líneas son distintas, qué decir si comparamos con las líneas europeas, donde la frecuencia, demanda o el abanico de servicios son completamente distintos.
- 6 Es interesante señalar las posibilidades de futuro que afronta el Shinkansen, subrayando que la única gran ciudad japonesa que queda por conectar es Sapporo. Las compañías se plantean ahora otras metodologías para mejorar los servicios prestados en zonas más rurales.
- 7 Por último sentenciar que no parece que el MAGLEV vaya a ver la luz en un futuro próximo. Habrá que esperar a que se agudicen los problemas de capacidad en el corredor Tokio-Osaka para que el gobierno tome una decisión.



www.comsaemte.com