

EL HORARIO CADENCIADO INTEGRADO. TEORÍA, CASOS DE APLICACIÓN, VENTAJAS, INCONVENIENTES, Y REFLEXIONES SOBRE SU POSIBLE APLICACIÓN EN ESPAÑA

Riccardo Lombardi

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

INECO-TIFSA. Dirección de Proyectos Ferroviarios.

e-mail: ric.lombardi@gmail.com - riccardo.lombardi@ineco.es

Resumen: El Horario Cadenciado Integrado (HCI) es una forma de planificar los horarios ferroviarios de servicios de viajeros que se ha consolidado en países como Holanda, Alemania y Suiza. Es cadenciado porque los servicios se repiten con cadencia (semihoraria, horaria, bihoraria), e integrado porque los horarios son estructurados de manera que se agilicen enlaces entre distintos servicios, minimizando el tiempo de espera para el usuario. Este artículo pretende cubrir una laguna en la bibliografía técnica nacional, donde hasta ahora las referencias son muy escasas, desarrollando distintas temáticas: los fundamentos teóricos del proceso de diseño del HCI, dos casos reales de aplicación en Europa, un resumen de ventajas e inconvenientes de su adopción, y un análisis de varios aspectos del sistema ferroviario español en relación a una posible introducción del HCI en nuestro país.

Palabras clave: HCI, horario cadenciado, horario cadenciado integrado, horario simétrico, planificación de horarios, transporte público, Suiza, ferrocarriles, enlaces, nodos.

Abstract: The integrated periodic timetable (IPT) is a specific type of railway timetable for passenger services that has been progressively implemented in the last few decades in countries such as Holland, Germany, and Switzerland. It is *periodic* because services are guaranteed at constant intervals (every half hour, hour, two hours, etc.), and *integrated* because the timetables are structured as to efficiently utilize connections between services and minimize passenger waiting time. The article's purpose is to fill the gap in Spanish technical literature, which provides very few references on this subject, through the analysis of different themes: the theoretical basics of the design of the integrated periodic timetable, a summary of its advantages and disadvantages, two cases of application in Europe, and the analysis of various aspects of the Spanish rail system with a view to possibly introducing the IPT in our country.

Keywords: IPT, periodic timetable, integrated periodic timetable, symmetric timetable, timetable scheduling, public transport, Switzerland, railways, junctions, nodes.

1. Introducción y objeto

Por razones obvias los horarios cubren un papel fundamental en la definición de un servicio de transporte ferroviario, y tienen una influencia directa sobre su potencial de captación de viajeros.

Siguiendo un planteamiento simplista, el horario de un servicio dado puede estudiarse con el único objetivo de cubrir la mayor cantidad posible de demanda, sin ninguna relación entre el horario de un tren y el siguiente. Sin embargo, la tendencia en las últimas 3-4 décadas en Europa es adoptar horarios de tipo *cadenciado*. Un servicio ferroviario se ofrece con un horario cadenciado, cuando los horarios de paso de los trenes se repiten con cierta *cadencia*, que puede ser habitualmente de una o más horas, o bien de un cociente de divisor entero de una hora (es decir, 10, 12, 15, 20, 30 minutos). Esto conlleva que los horarios sean característicos y de fácil memorización para el usuario, ya que los minutos de salida se repiten a lo largo del día. Por ejemplo, un horario de la forma 7:17, 8:17, 9:17, etc. es cadenciado a los 60 minutos, y un horario como 8:20, 8:50, 9:20, 9:50 es un horario cadenciado a los 30 minutos. Obviamente pueden alternarse distintas frecuencias a lo largo del día, para adaptarse a las franjas horarias de mayor y menor demanda.

El éxito de la utilización de horarios cadenciados es un hecho comprobado en Europa, principalmente por dos factores:

- La facilidad de memorización del horario, que en muchos casos hace innecesaria la consulta del mismo en el momento que se decida emprender un viaje.
- La seguridad de disponer de una malla mínima de servicios también en horas valle, que contribuye a que la opción de utilizar el tren se convierta en algo habitual.

Sin embargo los argumentos mencionados hasta ahora se limitan a un ámbito casi psicológico y por sí solos conllevan una mejora limitada en el nivel de servicio percibido por el viajero.

El objeto del presente documento es analizar el siguiente paso de optimización de un servicio ferroviario, que consiste en integrar los horarios cadenciados a otro punto fuerte del ferrocarril, es decir, la *facilidad de realizar transbordos* respecto a otros medios de transporte (el avión por la inviabilidad de efectuar paradas intermedias y el transporte por carretera por su peor puntualidad).

Los beneficios de combinar servicios cadenciados y conexiones con transbordos se pueden deducir de un ejemplo sencillo: si en una estación dada entre la llegada de un tren y la salida de otro existe un intervalo de tiempo mínimo y a la vez suficiente para realizar una conexión con transbordo (por ejemplo del orden de 5-10'), y si ambos servicios son cadenciados, esta misma posibilidad de conexión se repite igualmente a lo largo del día.

*Así, nos referimos a un **horario cadenciado integrado** (de ahora en adelante, HCI) como a un conjunto de horarios de distintos servicios ferroviarios, concebidos para favorecer enlaces con transbordo entre distintos trenes en varias estaciones.*

En el presente documento, además de facilitar referencias históricas, se tratarán los fundamentos teóricos del HCI, citando unos casos prácticos, se hará un resumen de sus ventajas e inconvenientes, y finalmente se expondrán consideraciones varias sobre su aplicabilidad a la red ferroviaria española.

2. Historia

Las primeras aplicaciones del HCI se realizaron en Holanda, Suiza y Alemania. Hasta entonces existían diversas relaciones comerciales explotadas con horarios cadenciados, sin embargo en ningún caso se llegaba a un horario integrado, es decir, los distintos servicios no eran concebidos para favorecer las conexiones entre ellos.

- 1908: Primer horario cadenciado en la línea Rotterdam - Scheveningen.
- 1921: Introducción del horario cadenciado en la *London & South Railway*.
- 1938: Extensión del horario cadenciado a toda la red holandesa.
- 1968: Primer horario cadenciado en dos líneas en Suiza.
- 1970: **Primer sistema de HCI en Holanda**, *Spoorslag '70*. Su eficacia fue tan elevada que la estructura del horario en los ferrocarriles holandeses no volvió a modificarse de forma sustancial hasta el cambio de horario del 10 de Diciembre de 2006.
- 1977: Introducción de un horario cadenciado en el Reino Unido, *Full Inter-City 125 services*.
- 1979: Los ferrocarriles alemanes introducen **el primer HCI** en su red de Intercity (largo recorrido), con el eslogan "*Jede Stunde, Jede Klasse*" (*todas las horas, todas las clases*, ya que anteriormente los Intercity se explotaban como trenes solo de primera clase)
- 1982: Introducción del **HCI en toda la red suiza**.
- 1993: Introducción progresiva del HCI a nivel regional en Alemania.
- 2004: Primera etapa del proyecto *Bahn 2000* en Suiza, con entrada en vigor de un nuevo HCI.

3. Los requisitos: cadenciamiento, ejes de simetría y nodos

Analizando una malla homogénea y cadenciada de una única tipología de servicio, ésta goza de una interesante propiedad de simetría: siendo t el intervalo entre trenes cadenciados, se pueden identificar en cada intervalo dos ejes de simetría entre los surcos de trenes en dirección opuesta. La distancia entre los ejes de simetría será igual a $t/2$. Este principio es válido para cualquier malla de servicios cadenciados y homogéneos (mismas paradas y tiempos de recorrido), es decir, sin analizar el mallado completo de una línea, sino considerando un tipo de servicio concreto. Se puede comprender mejor la existencia de dos

ejes de simetría dentro de un mismo cadenciamiento con los ejemplos siguientes.

Ejemplo 1: *Imagínese que en una línea de doble vía, está saliendo en una determinada dirección un tren cada hora. Estos trenes tienen idénticas paradas, velocidades, etc. En sentido opuesto también viajan los mismos trenes, con mismas paradas, velocidades y con la misma frecuencia de un tren cada hora. Si un observador se sube en la cabina de un tren, asistirá a un cruce cada media hora. Estos puntos de cruce identifican los ejes de simetría en el mallado.*

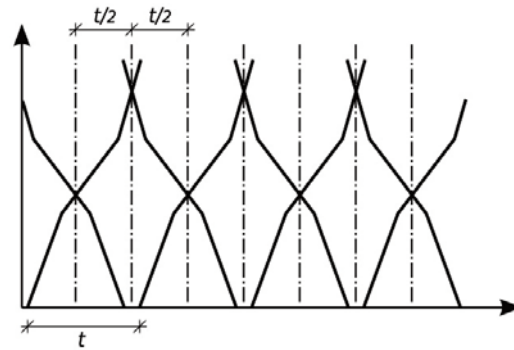


Figura 1: Ejes de simetría en un horario cadenciado

Ejemplo 2: *En la línea Madrid – Sevilla (horario 2010), los servicios AVE con parada únicamente en Córdoba, tienen salida de Madrid en el minuto :00 y llegada a Sevilla en el minuto :30 (sin tener en cuenta refuerzos en hora punta). En el trayecto inverso tienen salida de Córdoba en el minuto :45 y llegada a Madrid en el minuto :15. Los ejes de simetría se encuentran entonces en el minuto 7,5' y 37,5'. Por lo tanto, dos veces por hora, en los minutos 7,5 y 37,5, se producirán unos cruces en línea (salvo obviamente retrasos)*

Esta característica es una simple propiedad geométrica (como se muestra en la Figura 1) y de por sí no supone ninguna ventaja ni para el usuario ni para el planificador. Al contrario, para realizar un HCI, una condición prácticamente imprescindible en una red ferroviaria compleja es **la adopción del mismo eje de simetría para todos los servicios**.

Si todos los servicios comparten el mismo eje de simetría, **en estaciones elegidas oportunamente se puede estructurar el horario para que los horarios de llegada se concentren en pocos minutos antes del eje de simetría elegido. Por la propiedad de simetría, los horarios de salida se situarán poco después del eje de simetría. El resultado es que un viajero que llegue a esta estación, con pocos minutos de espera tendrá a su disposición una variedad de trenes con salidas a varios destinos.**

Por ejemplo, en el caso de referirse al eje de simetría en el minuto :00, en una estación X, si hay tres relaciones procedentes de A, B y C y con llegada en los minutos :52, :55 y :57, las salidas hacia los mismos destinos A, B y C deberán efectuarse, por la propiedad de simetría, en los minutos :08, :05 y :03. De esta forma, cualquier viajero procedente de A que quiera viajar a B o C puede llegar a su destino con un transbordo en X y con un tiempo de espera muy limitado. Esta misma consecuencia vale para cualquier otra combinación con origen / destino A, B o C.

Una estación con un horario configurado de tal manera, se convierte en un punto de intercambio, y en la teoría del HCI se define como **nodo**. Extendiendo este principio a otras estaciones se puede llegar a obtener una red compuesta por líneas y nodos, donde un usuario puede llegar a cualquier punto de la red directamente o a través de uno o más transbordos en los nodos.

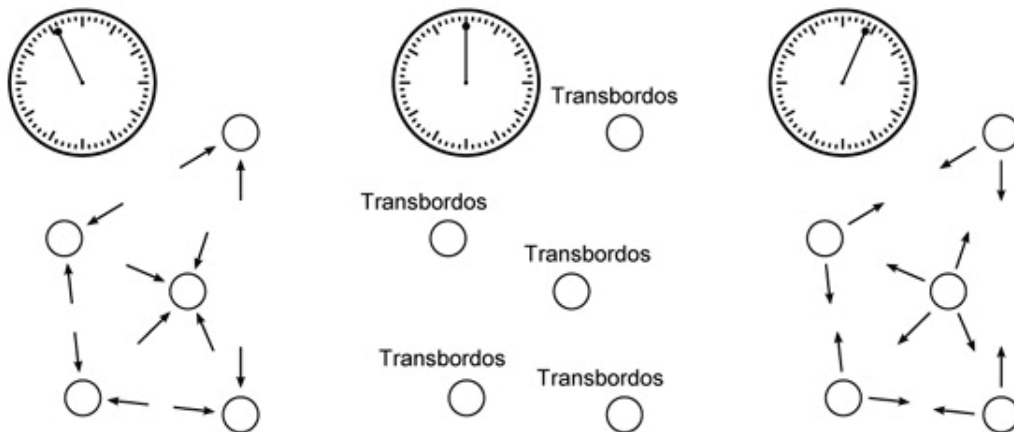


Figura 2: Funcionamiento de una red con horario cadenciado integrado y nodos de conexión.

3. Fundamentos teóricos

En los apartados siguientes se exponen los fundamentos teóricos y el proceso ideal de definición del esquema básico de una red cadenciada integrada, que consiste en la identificación de potenciales nodos de conexión. En general el proceso se expone siempre refiriéndose al cadenciamiento habitual de 60 minutos, siendo éste conceptualmente idéntico para cualquier cadenciamiento. Para casos particulares se han añadido ejemplos con el fin de aclarar ciertos conceptos cuando éstos se traspasan a cadenciamientos diferentes.

4.1. Definición de los nodos

4.1.1. Tipos de nodo

Se ha comentado que por la propiedad de simetría, en el intervalo t de un cadenciamiento se encuentran dos ejes de simetría. En el cadenciamiento horario existirán por lo tanto dos ejes de simetría en el intervalo de una hora. Los ejes de simetría habitualmente elegidos se corresponden a los minutos :00 y :30. Refiriéndose a un cadenciamiento en general, se puede afirmar que siempre existen dos tipos de nodo en un cadenciamiento t : la “clasificación” del nodo depende únicamente de en torno a qué eje de simetría se están concentrando las llegadas y salidas. Existirán por lo tanto nodos t (:00 en el caso del cadenciamiento horario) y nodos $t/2$ (:30 para el cadenciamiento horario).

Dado que en la realidad en una red compleja coexistirán servicios con intensidades de tráfico diferentes, también deberán coexistir cadenciamientos diferentes: para que entonces puedan existir también conexiones entre servicios horarios con bihorarios, o semihorarios con horarios, lo lógico será hacer que estos servicios compartan algunos ejes de simetría. Es decir, un eje de un cadenciamiento horario también debería ser uno de los ejes de simetría de un cadenciamiento semihorario.

Así, si los ejes del cadenciamiento horario son los minutos :00 (tipo t) y :30 (tipo $t/2$), para un cadenciamiento semihorario será oportuno utilizar los minutos :00/:30 (tipo t) y los minutos :15/:45 (tipo $t/2$). Para un cadenciamiento bihorario, existirán nodos :00 de horas pares (tipo t) y nodos :00 de horas impares (tipo $t/2$), o bien, para que se puedan distinguir de manera más inmediata, nodos :00 y nodos :60.

El hecho que un nodo sea de un tipo u otro tiene una importancia fundamental en la definición de la red, como se verá en el apartado siguiente.

Cadenciamiento	Nodos del primer tipo (t)	Nodos del segundo tipo ($t/2$)
120 minutos	:00	:00 o bien :60 *
60 minutos	:00	:30
30 minutos	:00/:30	:15/:45

* la denominación ":60" es ficticia y sirve únicamente para distinguir los dos tipos de nodos (" t " y " $t/2$ "), que en ambos casos tendrán simetría alrededor del minuto :00

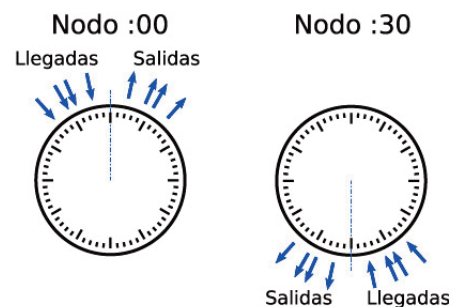


Figura 3: Resumen de tipos de nodo por tipo de cadenciamiento y ejemplos de nodos :00 y :30

4.1.2. Proceso de definición de los nodos

Para simplificar imagínese que los tiempos de trasbordo en los nodos sean nulos y que todos los trenes puedan llegar y salir a la vez en los minutos :00 y :30 asegurándose todas las conexiones.

Un tren que salga de un nodo deberá llegar a otro nodo en un tiempo múltiplo de $t/2$, es decir en este caso de 30 minutos. Si la relación es entre dos nodos diferentes (:00 con :30) el tiempo deberá ser de 30, 90, 150 minutos, es decir igual a $at + t/2$ siendo a cualquier número entero. Si la relación es entre dos nodos iguales (:00 con :00 o :30 con :30) el tiempo de viaje deberá ser de 60, 120, 180 minutos, es decir at . Como criterio general habrá que buscar entonces tramos con tiempo de viaje cercanos a múltiplos de $t/2$, y a partir de ellos se definirán los nodos y sus "categorías" (:00 o :30). En realidad hay que asegurar un mínimo colchón de tiempo en los nodos para los trasbordos, por lo que los tiempos de recorrido reales deberán ser estrictamente inferiores a dicho múltiplo.

Ejemplo: un tramo con un tiempo de recorrido de 35 minutos es conveniente contemplarlo como un tramo de 60 minutos entre dos nodos :00 (o entre dos nodos :30). El tren podría por ejemplo salir de un nodo en el minuto :12 y llegar al otro en el minuto :47, en ambos casos conexiones con tiempos de espera más que aceptables.

El proceso de búsqueda y definición de estaciones como nodos es iterativo y no existe una metodología exacta para ello. Además, en la gran mayoría de los casos la elección de ciertas

estaciones como nodos depende de factores que trascienden el ámbito matemático (entre otros, factores ambientales, económicos, de capacidad de la infraestructura, de importancia de ciertas relaciones frente a otras, y de planificación a largo plazo). En efecto, este proceso culmina con toda probabilidad con la definición de una red “óptima” entre varias alternativas imperfectas, privilegiando ciertos nodos/estaciones sobre otros. El ejemplo siguiente aclara como se puede llegar a situaciones absurdas en el proceso de definición de nodos.

***Ejemplo:** En este caso se han definido dos nodos A y B, siendo el tiempo de recorrido entre estos inferior a 30 minutos, y por tanto uno de los dos debe ser necesariamente un nodo :00 y el otro :30. La estación C, que se pretende definir también como nodo, se caracteriza por un tiempo de recorrido inferior a 30 minutos entre B y C y también entre C y A. Refiriéndose a B, la estación C debería entonces definirse como nodo :30, y respecto a A debería definirse como nodo :00. Se ha llegado a un absurdo y su consecuencia es la imposibilidad de asegurar un enlace adecuado con ambos nodos A y B, o mejor dicho, una de las dos conexiones sería más desfavorable con tiempos de espera mayores (superiores a media hora). Las soluciones posibles son renunciar a definir C como nodo, o bien privilegiar la conexión que se valora como más prioritaria. En este caso, si se quiere privilegiar la conexión B-A-C en A, se definirá C como nodo :00; si se prefiere privilegiar en B la conexión A-B-C se definirá C como nodo :30.*

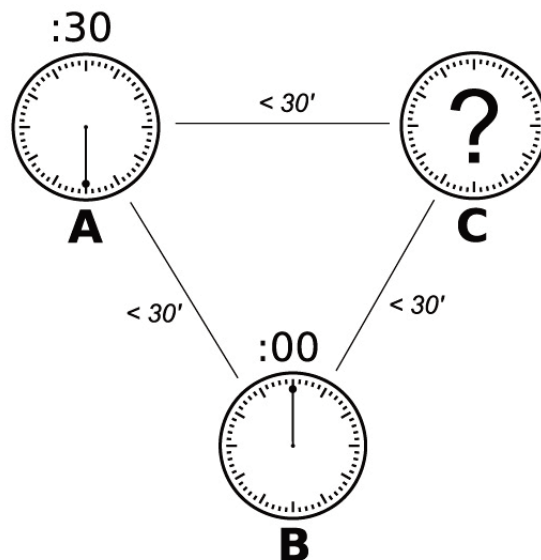


Figura 4: Ejemplo de situación absurda en la búsqueda y definición de nodos de conexión.

El resultado final del proceso de definición de la red y de los nodos es un esquema parecido al de la figura siguiente.

4.1.3. Funcionamiento: nodos totales y parciales

No siempre resulta posible poder asegurar todas las conexiones en una estación que se pretende definir como nodo, por diferentes razones: la más obvia e importante de ellas es que en muy pocos casos los tiempos de recorrido entre un nodo y otro se acercan a los valores característicos de 30', 60', 90', etc. Se define **nodo total** un nodo donde todas las conexiones (o razonablemente casi todas) entre los varios servicios es asegurada, al contrario un **nodo** es **parcial** si se asegura solo una fracción de las conexiones.

Es de destacar que el hecho que un nodo sea parcial no significa que no pueda ser eficaz. Imagínese que, si en un futuro se implantara el HCI en Madrid Puerta de Atocha, no fuera

posible enlazar servicios entre las relaciones AVE Madrid-Barcelona con las de Madrid-Valencia. Se trataría sin embargo de una conexión de bajo interés comercial, ya que los viajeros procedentes de Zaragoza y Barcelona viajarían a Valencia respectivamente por Teruel y el Corredor Mediterráneo. Por lo tanto, no se perjudicaría el funcionamiento del nodo a pesar de configurarse como un nodo parcial.

4.2. Representación gráfica

La representación clásica del horario en un plano $s-t$ en este caso no es la mejor solución, ya que se está trabajando con una red interconectada y el plano $s-t$ se limita a representar un único eje ferroviario. Resulta por tanto conveniente representar el horario en un sencillo mapa esquemático con algunas reglas, como se detalla en la siguiente imagen.

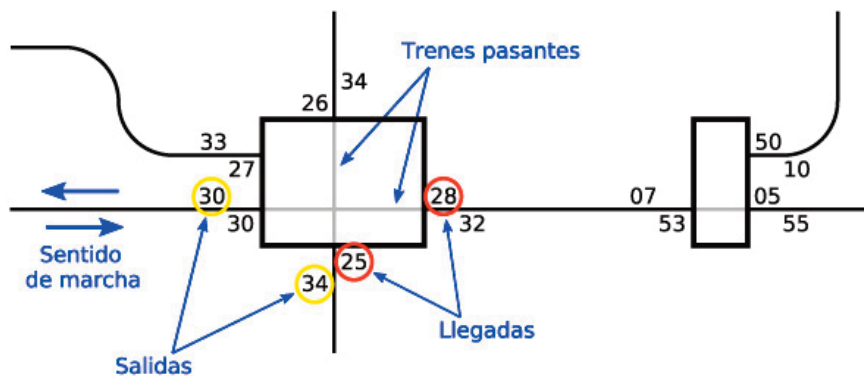


Figura 6: Representación gráfica del horario cadenciado integrado

Cada rectángulo representa un nodo de tipo :00 o :30. No existe correspondencia entre líneas dibujadas e infraestructuras reales de ferrocarriles: cada línea representa una relación comercial con cadenciamiento t . Según lo que se representa en el esquema, las dos líneas que se dirigen hacia el Oeste representan relaciones comerciales cuyos trenes pueden recorrer en un tramo el mismo eje de vía única o doble, o también líneas totalmente diferentes, algo que de esta representación no se puede deducir (se supone que sí lo sabe quien está proyectando el horario)

Donde cada línea interseca el rectángulo aparecen dos números, que representan el minuto de salida y llegada de dicho tren a la estación. El número más lejos del rectángulo representa el horario de salida, y el más cercano el de llegada. Los dos números se ubican habitualmente respetando el sentido de marcha de los trenes (en España por la derecha). Dentro del rectángulo también pueden tener continuidad las líneas que llegan al mismo, para evidenciar que un tren en concreto tiene paso por la estación y que sigue hasta su destino final. (ejemplo: tren desde “Norte” llega al minuto :26, se detiene 8 minutos y sale en el minuto :34 hacia “Sur”). Por otro lado el tren hacia / desde “Oeste” que llega en el minuto :27 y sale en el minuto :33 tiene origen y destino en esta misma estación.

4.3. Metodología general

Como ya se ha comentado anteriormente, no existe una metodología exacta para la elaboración de un HCI. Se exponen a continuación unos principios que tienen una validez general en la redacción del mismo.

4.3.1. *Nodos en grandes estaciones*

En estaciones término de gran importancia resulta frecuentemente imposible concentrar salidas y llegadas en un intervalo muy pequeño, principalmente por las limitaciones en los movimientos de entrada o salida en la cabecera y por la cantidad de tráficos que confluyen en la estación.

Otras razones hacen también imposible establecer conexiones muy cortas en grandes estaciones:

Una estación de gran importancia, que puede ser además parcialmente o totalmente en fondo de saco, es en muchos casos origen / destino de la mayoría de los trenes que prestan servicio en la misma, con lo cual puede hacerse necesario un mayor tiempo de estacionamiento para otras operaciones, como las de limpieza, si se pretende reutilizar el mismo material.

Los trayectos peatonales tradicionalmente más largos, y la obvia mayor dificultad del viajero en el proceso de búsqueda del propio tren y del propio andén, hacen conveniente aumentar el tiempo mínimo de transbordo que se adoptaría en el estudio del horario.

La conclusión que se deduce de estos condicionantes, es que en caso de estudiar la ubicación de un tren en un mallado, si éste atraviesa un nodo periférico y uno central, resulta en general conveniente privilegiar la construcción de un nodo total, eficaz y con un tiempo de espera mínimo en el nodo periférico.

4.3.2. *Nodos periféricos*

Excluyendo las grandes terminales, se analiza ahora una estación de tamaño medio y pequeño que es punto de cruce de dos o más líneas, y en la que se aborda el estudio de la viabilidad de su funcionamiento como nodo de conexión.

La estación dispondrá en general de una variedad limitada de relaciones comerciales, y resulta por lo tanto conveniente minimizar los tiempos de conexión entre ellas al no existir las mismas limitaciones de las grandes estaciones. Para poder asegurar una conexión es necesario un tiempo mínimo entre llegada de un tren y salida de otro, que varía en función de diversos factores, entre ellos:

Recorrido necesario para el transbordo: la posibilidad de operar un transbordo en el mismo andén reduce el tiempo mínimo necesario para un transbordo, pudiéndose reducir hasta 2-3 minutos si se cuenta con cierta puntualidad de los servicios. En casos donde es preciso un cambio de andén, es conveniente adoptar

un tiempo de transbordo mínimo de 4-6 minutos dependiendo de la configuración funcional de la estación.

Puntualidad: la puntualidad media de los trenes puede influir en los tiempos de conexión, ya que en principio una conexión para ser eficaz debe garantizarse también en caso de retraso.

En los ejemplos a continuación se ha adoptado como tiempo mínimo de conexión 4 minutos. Pueden plantearse diferentes escenarios, según se quiera priorizar una relación respecto a otra, o bien no privilegiar ninguna.

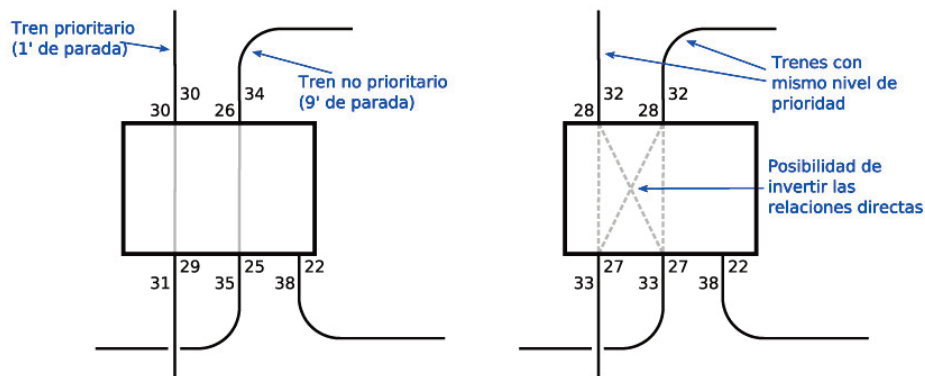


Figura 7: Distintas opciones de asignación de prioridad en un nodo total periférico.

En la imagen de la izquierda está representado un caso donde se ha considerado prioritaria una relación comercial asignándole un tiempo de parada de sólo un minuto. Para poder asegurar los tiempos mínimos de conexión el otro tren deberá llegar unos minutos antes y salir unos minutos después, con un tiempo total de parada de 9 minutos. A parte de ellos hay otra relación con origen / destino en la misma estación, que llega en el minuto :22 y sale en el minuto :38 asegurando así todas las conexiones. Este escenario en la realidad podría ser aplicado a una conexión entre largo recorrido (tren prioritario) y tren regional (penalizado), o para una relación regional que por distintas razones necesite prioridad (relación con alto nivel de ocupación, necesidad de limitar el tiempo de recorrido dentro de 30-60-90-120 minutos, etc.)

En el caso a la derecha se ha optado por no privilegiar a ninguna relación. Las dos relaciones comerciales tienen llegada en el minuto :27 en sentido norte y :28 en sentido sur, y salida en los minutos :32 y :33, con parada comercial de 5 minutos. Cabe recordar que se debe disponer de una infraestructura con vías e itinerarios suficientes para estas entradas y salidas simultáneas. Este escenario ofrece además una opción de explotación interesante: ya que ambos trenes tienen hora de llegada y salida idéntica o parecida, los trenes pueden intercambiarse de destinos en horas alternas, sin producir variaciones en el horario, tal y como aparece en la imagen con una traza discontinua. También es deseable que los transbordos puedan tener lugar en el mismo andén, lo que permitiría reducir sustancialmente los tiempos de transbordo.

4.3.3. Nodos parciales

En casos frecuentes no siempre resulta posible concentrar todas las llegadas y salidas alrededor de un eje de simetría. Pueden configurarse nodos donde una llegada se produce después del punto de simetría (:00 o :30), que conlleva por la propiedad de simetría también una salida antes del punto de simetría en sentido contrario. En estos casos el nodo puede llegar a funcionar como nodo parcial, asegurando solo una parte de las conexiones, o haciendo posibles otras pero con tiempos de espera mayores. El gráfico a continuación representa un ejemplo de los efectos que se producen en este caso, donde la relación “anómala” es la A-B.

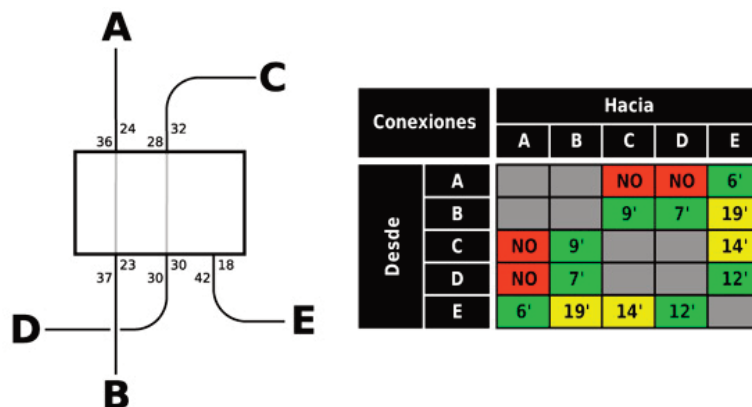


Figura 8: Ejemplo de funcionamiento de un nodo parcial.

Las conexiones A-C y A-D se van a perder en ambos sentidos; la conexión B-E y en menor medida la C-E no son óptimas y pierden parte de su potencial de captación, ya que aumenta su tiempo de espera. Sin embargo todas las demás conexiones (B-C, B-D, A-E, D-E) están garantizadas, por lo que se puede afirmar que el nodo mantiene su efectividad. Cabe destacar que no siempre un nodo con estas características implica que se pierdan algunas conexiones. Con un ajuste de horarios, siempre respetando las reglas de simetría, es posible que se puedan garantizar todas las conexiones, generando en algunos casos un aumento de tiempos de espera.

4.3.4. Uso de otros ejes de simetría

Puede ocurrir frecuentemente que en un nodo/estación concreto coexistan varios ejes de simetría, con diferencias del orden de los 1-5 minutos. El mantenimiento riguroso del mismo eje de simetría es un caso teórico, en el que los tiempos de recorrido de todas las relaciones y en ambos sentidos de marcha son idénticos, no solo en total, sino en todos los subtramos entre paradas sucesivas. Esta condición en la explotación real ocurre muy raramente, por distintos factores:

- Los “colchones” de horario, es decir, los márgenes adicionales de tiempo que se añaden al horario respecto a la marcha teórica, no se suelen añadir de forma homogénea.
- En tramos con fuertes pendientes en un solo sentido, los tiempos de recorrido pueden ser diferentes entre un sentido y otro.
- Interacciones con la explotación de otros trenes fuera del sistema cadenciado, que conllevan por ejemplo adelantamientos o cruces en un solo sentido de circulación.

Los efectos de las desviaciones entre ejes de simetría son parecidos a los de un nodo parcial, es decir, algunas conexiones pueden perderse o ver aumentar su tiempo de espera, como en el siguiente ejemplo.

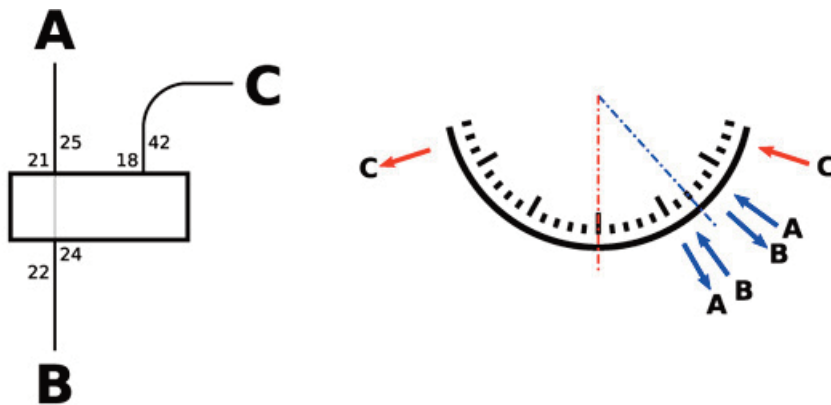


Figura 9: Ejemplo de funcionamiento de un nodo con diferentes ejes de simetría

En este caso en el mismo nodo total (ya que se cumplen todas las conexiones), coexisten un eje de simetría en el minuto :30 (relación con C) y otro eje en el minuto :23 (relación A-B). En este caso se afecta a los tiempos de transbordo A-C y B-C, que valen respectivamente 21 y 18 minutos.

5. Casos reales

5.1. Schleswig – Holstein (Alemania)

La región (Land) de Schleswig – Holstein se encuentra en el extremo norte de Alemania, en la frontera con Dinamarca. Por el lado sur, se extiende hasta las afueras de la ciudad de Hamburg, si bien ésta no es parte de la región y constituye una región autónoma. Los núcleos principales de la red ferroviaria en Schleswig-Holstein son Lübeck Hbf, Neumunster y Kiel Hbf. Sin embargo la ciudad de Hamburg es el principal centro de generación y atracción de tráfico para la región de Schleswig-Holstein, al ser una de las áreas metropolitanas más pobladas de Alemania.

En el esquema de la Figura 10 se han representado sólo los trenes regionales que son parte del sistema de horario cadenciado, existiendo obviamente otras relaciones que por distintas razones no pueden formar parte del sistema horario cadenciado, como:

- Relaciones puntuales, es decir, que se realizan entre dos puntos con una frecuencia de 1-2-3 trenes diarios, casi siempre de largo recorrido.
- Refuerzos aislados en hora punta.
- Otras relaciones con origen/destino Hamburg, que sirven para intensificar las frecuencias en las áreas de mayor demanda cercanas a Hamburg

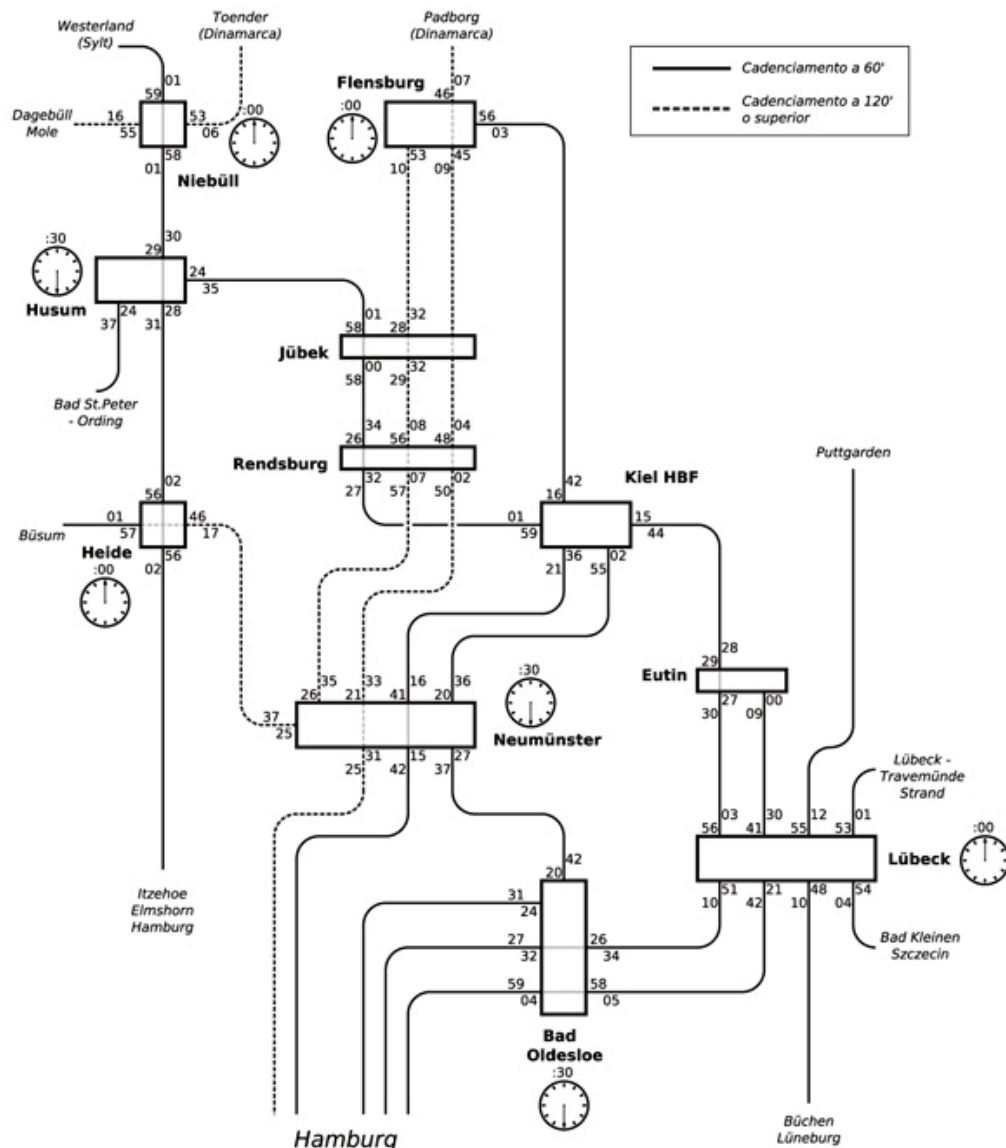


Figura 10: Esquema de horario cadenciado integrado en la red ferroviaria de la región de Schleswig – Holstein, Alemania.

La red en examen es un buen ejemplo de HCI, y se puede apreciar la existencia de varios **nodos totales**. La contrapartida de un sistema de este tipo es que **se producen en algunos casos estacionamientos en nodos totales del orden de los 5-10 minutos, necesarios para asegurar todas las conexiones, pero penalizando el tiempo de recorrido de relaciones pasantes**. Por lo tanto, este sistema se considera más adecuado para escenarios con varias relaciones regionales con igualdad de prioridad.

Éste precisamente es el caso de la región de Schleswig – Holstein, donde la mayoría de las relaciones son de tipo regional, existiendo relaciones puntuales de largo recorrido (a Kiel, Westerland (Sylt) y Puttgarden (donde los trenes son embarcados hacia Dinamarca). Como ejemplo, se muestra como un viajero puede ir de Lübeck a Heide utilizando tres trenes diferentes, con enlaces en las estaciones de Bad Oldesloe y Neumünster:

Salida de Lübeck en el minuto :10 y llegada a Bad Oldesloe en el minuto :26.

Existe otra relación que sale en el minuto :42 pero no es óptima para un transbordo en Lübeck. La función de este segundo tren es simplemente ofrecer una frecuencia de un tren cada 30 minutos en el corredor Lübeck – Hamburg.

16 minutos disponibles para transbordo en Bad Oldesloe

Salida de Bad Oldesloe en el minuto :42 y llegada a Neumünster en el minuto :27.

10 minutos disponibles para transbordo en Neumünster. La estación de Neumünster es un nodo importante de la red de Schleswig – Holstein, y ofrece varias otras conexiones, a Hamburg, Flensburg, Kiel, y Heide.

Salida en el minuto :37 de Neumünster y llegada a Heide en el minuto :46. Es de destacar que la frecuencia de los servicios entre Neumünster y Heide es sólo bihoraria, al contrario de las relaciones anteriores que son horarias. Obviamente el viajero debería haber consultado los horarios anteriormente para evitar llevarse una sorpresa en Neumünster y descubrir que su tren sale sólo en la hora siguiente.

5.1.1. Carencias

En el sistema cadenciado integrado de la región de Schleswig – Holstein pueden encontrarse principalmente dos defectos:

- Kiel Hbf no funciona como nodo
- Falta de conexiones en Jübeck y Rendsburg

La razón de la imposibilidad de planificar un nodo en Kiel Hbf ha de buscarse en el sistema Neumünster - Bad Oldesloe - Lübeck. Hay que destacar que Neumünster y Lübeck son respectivamente la cuarta y segunda ciudad más pobladas de Schleswig-Holstein, con aproximadamente 78000 y 211000 habitantes. Actualmente no existe una relación ferroviaria directa entre estas dos ciudades y el trayecto se realiza siempre con un transbordo en la estación de Bad Oldesloe. Los tiempos de recorrido en los dos trayectos parciales son:

- Lübeck Hbf - Bad Oldesloe: 17' (< 30)
- Bad Oldesloe - Neumünster: 45' (< 60)

Para que este sistema de conexiones funcione, Lübeck Hbf y Neumünster deberán necesariamente ser dos nodos diferentes, es decir, un nodo :00 y el otro :30.

Con este condicionante se va ahora a analizar el posible nodo de Kiel Hbf. El tiempo de recorrido entre Kiel y Neumünster es de 25 minutos, y entre Kiel y Lübeck es de 1h12'. Se llega entonces a un absurdo similar a lo expuesto en el apartado 5.2, porque según se mire la relación con Neumünster o con Lübeck, Kiel Hbf debería definirse respectivamente como nodo :00 o nodo :30.

Así en la planificación se renuncia a establecer un nodo total en Kiel Hbf, prefiriendo privilegiar las conexiones más al sur entre Neumünster, Bad Oldesloe y Lübeck. Todo ello no impide configurar un horario para permitir algunas conexiones puntuales en la estación de Kiel Hbf. En el caso de Kiel se ha hecho posible por ejemplo un enlace Flensburg – Kiel – Neumünster – (Hamburg) con un tiempo de conexión de 5 minutos, y otro enlace Neumünster – Kiel – Eutin con un tiempo de conexión de 6-8 minutos.

5.2. Olten (Suiza)

La estación de Olten es uno de los puntos neurálgicos de la red ferroviaria suiza. Su importancia como nodo de tránsito e intercambio ha incrementado sustancialmente con la apertura de la nueva línea de alta velocidad entre Berna y Olten y del nuevo túnel de base del Loetschberg. Tal y como se planificó en el plan *Bahn 2000* (algo equivalente al PEIT de nuestro país), la inauguración de estas líneas permitió limitar los tiempos de recorrido Bern-Basel y Bern-Zürich dentro de los 60 minutos, crear un sistema cadenciado integrado a 30 minutos, y dentro de este convertir Olten en un nodo de conexión de tipo :00/:30. En el mapa siguiente se muestra el sistema cadenciado integrado en vigor desde el año 2007.

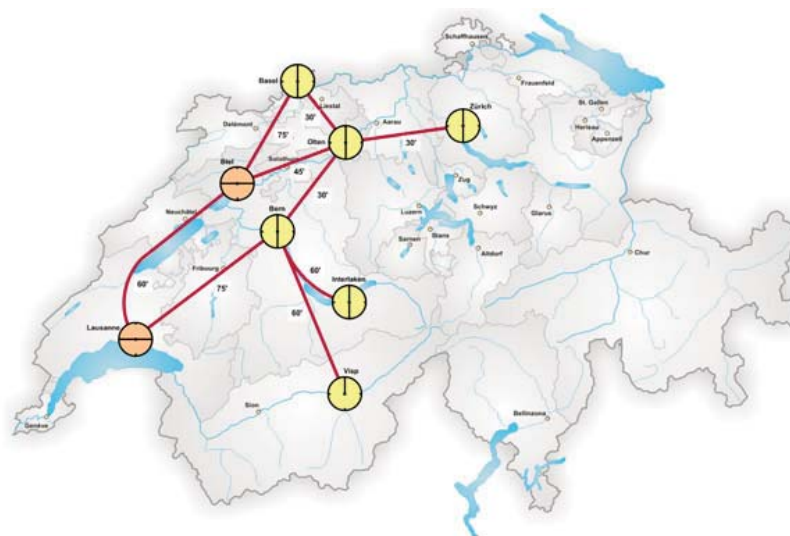


Figura 11: Sistema cadenciado integrado en vigor en Suiza desde el año 2007
(autor: Bernese_media)

Los horarios de la estación de Olten se muestran en la figura a continuación. Por comodidad, se han representado los minutos suponiendo que el sentido de circulación sea por la vía derecha, para mantener homogeneidad de representación con los demás ejemplos (en Suiza el sentido de circulación habitual es por la vía izquierda).

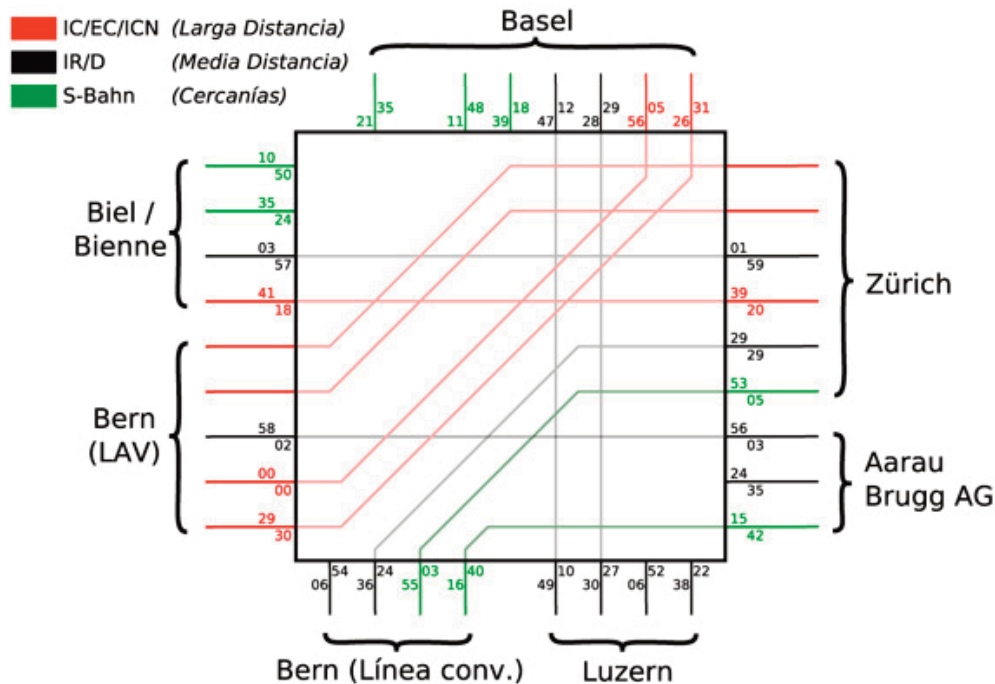


Figura 12: Esquema de horario cadenciado integrado en la estación de Olten, Suiza.

Aún sin disponer del mapa de la Figura 11, se puede deducir que Olten funciona como un nodo del tipo :00/:30. Analizando las relaciones de largo recorrido, se puede notar una relación pasante Bern-Zürich sin parada intermedia, que se ha representado en el nodo con dos líneas sin horarios de llegada y salida. Existe además una relación semihoraria directa entre Bern y Olten, y una relación Biel - Zürich, efectuada con trenes basculantes ICN, cuyas llegadas y salidas se desvían en unos 10 minutos del eje de simetría. A éstas hay que añadir dos relaciones interregionales entre Olten y Zürich, que sin embargo no tienen parada intermedia entre las dos ciudades y realizan por lo tanto un servicio más parecido al largo recorrido.

Exceptuando entonces la relación ICN, se puede apreciar como los minutos de llegada y salida de las relaciones de largo recorrido se concentran sorprendentemente en los minutos :00 y :30. La consecuencia más evidente es la imposibilidad de realizar transbordos entre dos trenes de largo recorrido en la casi totalidad de los casos, al no disponer de un colchón mínimo de 4-5 minutos para efectuar el transbordo. Sin embargo, en este caso la estructura de los horarios de largo recorrido no resta funcionalidad al sistema: en efecto, un transbordo entre dos trenes de largo recorrido en Olten es en la mayoría de los casos inútil, dado que

existen otros enlaces directos entre las ciudades de Basel, Zürich, Luzern, Bern y Biel/Bienne. Estos enlaces no son representados en el esquema anterior, ya que no tienen paso por Olten, exceptuando la relación pasante entre Bern y Zürich.

Al contrario, la potencialidad del nodo de Olten se aprecia estudiando los horarios de las relaciones regionales y de Cercanías: la gran mayoría de ellas tiene unos horarios de llegada entre los 5 y 10 minutos antes del eje de simetría, y salida entre los 5 y 10 minutos después del eje de simetría. Con unos horarios estructurados de tal manera, el nodo funciona de forma eficaz para agilizar la conexión de relaciones de largo recorrido con regionales y Cercanías. En otras palabras la estación de Olten no funciona como un nodo total, sino que privilegia el transbordo entre distintos niveles de transporte, agilizando el acceso a las relaciones rápidas desde aquellos núcleos periféricos que gozan de un servicio únicamente de regionales y de cercanías.

A todo esto, hay que añadir otro aspecto interesante, que es la posibilidad de realizar conexiones (no representadas en el esquema) con el transporte público local: dado que el esquema de simetría :00/:30 es algo consolidado a lo largo de los años, también los demás horarios de autobuses urbanos e interurbanos con tránsito o cabecera en la estación se han adaptado “a remolque” a los horarios ferroviarios, minimizando los tiempos de conexión.

En resumen, este esquema de explotación reproduce a mayor escala el ejemplo representado en la Figura 7, donde se privilegia una relación prioritaria (largo recorrido) a costa de otra (regional), y es uno de los más habituales en Suiza, dado que su mismo concepto se ve aplicado en otros nodos como Bern, Zürich y Basel. A la vez esta manera de concebir un nodo es una de las más eficaces, ya que permite conexiones entre distintos servicios regionales, o bien entre éstos y largo recorrido, sin afectar a los tiempos de viaje de estos últimos. El mayor condicionante es que debe existir demanda suficiente para establecer numerosas conexiones directas de largo recorrido, y por tanto renunciar, salvo casos puntuales, a conexiones entre trenes de largo recorrido.

6. Justificación del horario cadenciado integrado

6.1. Ventajas

6.1.1. Explotación

Cualquier servicio de transporte público supone un coste de explotación para la operadora de transporte, que depende entre otros factores de la producción en términos de *trenes*km*. Por otro lado la calidad de servicio percibida por el usuario depende de distintos parámetros, entre ellos frecuencia, tiempo de viaje total, confort, puntualidad, precio.

Por ello, tiene sentido el estudio de la viabilidad de cualquier medida que pueda mejorar la calidad del servicio en relación al coste de explotación. Entre estas medidas se puede incluir el HCI, que aprovecha un punto de fuerza del ferrocarril que es la sencillez en planificar conexiones entre distintos servicios, gracias a su discreta puntualidad y a la posibilidad de efectuar numerosas paradas intermedias. La implantación de un HCI puede conllevar:

- La disminución del tiempo de viaje total en una relación con transbordo, ya que su objetivo es minimizar el tiempo de espera intermedio.
- El aumento de las frecuencias ofrecidas al viajero, y en particular en caso de trayectos con origen o destino en núcleos secundarios, gracias a la conexiones que multiplican los trayectos disponibles.

En resumen, el **horario cadenciado integrado influye directamente en la calidad del servicio percibida por el viajero, actuando**, de los parámetros de calidad antes citados, **sobre frecuencia y tiempo de viaje total**.

Además de estas ventajas cuantificables en valores concretos, existen otras consecuencias menos tangibles, pero no por ello de menor importancia. En primer lugar, **el HCI va exactamente en la dirección de paliar la mayor deficiencia del transporte público frente al vehículo particular, que es la flexibilidad**, en el sentido de mayor frecuencia y mejor cobertura del territorio. De hecho, las mejoras en el nivel de servicio son más notables en aquellas áreas con peores frecuencias de paso de los trenes: si en una estación de cruce entre dos líneas hay una frecuencia para cada servicio de apenas dos horas, es fundamental que el viajero que quiera cambiar de tren tenga un tiempo de conexión más cercano a los 10 minutos que a los 110 minutos. Al contrario, un viajero del núcleo de Cercanías de Madrid probablemente no podría siquiera apreciar la introducción de un HCI, al disponer de un servicio con frecuencias muy elevadas. Así, unir dos, tres, o más relaciones en un HCI puede convertir las mismas en rentables cuando éstas, operadas singularmente, no lo serían (o justificar su subvención al limitar el déficit de explotación dentro de valores razonables).

6.1.2. Coordinación con el sistema de transporte público local

Otro aspecto a considerar, como ya se ha comentado en el ejemplo de Olten, es que si existe un compromiso en consolidar el HCI a lo largo de los años (ejemplo que se puede apreciar en Suiza, Alemania y Holanda), el transporte público local puede coordinarse con los nodos: los horarios de Cercanías, tranvías, autobuses urbanos e interurbanos con tránsito o cabecera en la estación se adaptan con un “efecto dominó” a los horarios ferroviarios. Este aspecto, junto con una adecuada información al ciudadano/usuario, es fundamental, ya que la introducción del HCI se acompaña en muchos casos con un aumento de la producción en *trenes*km* y del coste de explotación global, y por lo tanto se busca también un aumento del volumen de viajeros transportados. El mensaje que se transmite al ciudadano a través un HCI, es que al coger un autobús o un tren de Cercanías cerca del propio domicilio, no se sube en un simple medio de transporte, sino que se está utilizando un sistema completo e interconectado, y que al llegar a una estación de mayor importancia, se tendrá a disposición una multitud de opciones de viaje a diferentes destinos y sin esperas excesivas.

6.1.3. Desarrollo de la infraestructura y planificación de inversiones

En administraciones como Suiza y Alemania, donde el uso del HCI está consolidado desde hace años, **la misma planificación de mejora de la infraestructura se mezcla con el diseño de los horarios futuros**. La razón consiste en que donde hay un sistema cadenciado

integrado, la estructura del horario es mucho más “estática”: en ciertos casos resulta más fácil prever en qué instalaciones se pueden producir cruces, adelantamientos, y por consecuencia abordar su mejora funcional, o qué tramos necesitan prioritariamente un acortamiento de tiempos de recorrido para optimizar el funcionamiento de algunos nodos. También resulta más difícil modificar horarios de ciertos servicios que atraviesan varios nodos, puesto que los horarios de paso en éstos serán previsiblemente vinculados a enlaces con otros servicios, que podrían perderse en caso de cambios en los horarios. Al estar los horarios de distintos servicios mucho más interconectados entre sí, los cambios de horario sustanciales acaban siendo unas verdaderas “revoluciones”, que frecuentemente se deben a inauguraciones de nuevas infraestructuras, y que conllevan la necesidad de redefinir el esquema existente de nodos.

Si el sistema cadenciado integrado se consolida a nivel nacional, esto permite a los organismos que deciden sobre las inversiones en infraestructuras y la movilidad del ciudadano tener una **visión más global del sistema de transporte público**. Resulta más sencillo **identificar objetivos y estrategias, asociarlos con costes y definir prioridades**. La misma ganancia de 10 minutos en una relación puede obtenerse con costosas renovaciones de vía o de infraestructura, o con una remodelación de algunos horarios. Al contrario, pueden justificarse costosas inversiones aunque sean para una ganancia de tiempo de recorrido limitada, si por ejemplo esta mejora permite adecuar de 67 a 57 minutos el tiempo de viaje entre dos puntos, permitiendo así el funcionamiento de ambos como nodos. Asimismo, el HCI puede ser un factor determinante en operar decisiones sobre velocidades máximas de circulación en Alta Velocidad, donde pequeñas variaciones suponen grandes diferencias en términos de gasto energético.

A título de ejemplo, la nueva línea de Alta Velocidad suiza Mattstetten-Rothrist (parte del corredor Bern-Olten) se construyó con la principal intención de reducir el tiempo de viaje entre las dos ciudades a menos de 30 minutos, y el tiempo de viaje Berna - Zürich y Berna - Basilea a menos de una hora. De esta forma Berna, Zurich, Basilea y Olten se pudieron convertir en un sistema de nodos, ofreciendo cada media hora en las cuatro estaciones un gran número de relaciones con transbordos, algo que no sería posible si el tiempo de viaje hubiese sido superior.

6.2. Condicionantes e inconvenientes

6.2.1. Modulación de la oferta de transporte

Para que el HCI pueda funcionar es necesario un cadenciamiento mínimo a lo largo de todo el horario de servicio de un día tipo (tanto horas punta como medias y valle), de manera que se garantice el funcionamiento de los nodos. En casos particulares pueden preverse uno o dos “huecos” en los surcos (típicamente a última hora de la mañana y a primera hora de la tarde), pero como regla general debe existir un cadenciamiento mínimo, que es la base de la definición de los nodos. Definir este cadenciamiento en base a la hora punta sería sobredimensionar excesivamente la oferta respecto a la demanda, causando así un elevado coste de explotación. El cadenciamiento base debería al contrario poder cubrir las horas

medias y valle (ocasionando en general un exceso de oferta en horas valle), atendiendo el aumento de demanda en hora punta con refuerzos que en algunos casos quedarían fuera del sistema cadenciado integrado. Para compensar los distintos niveles de demanda sin modificar las frecuencias, también se puede actuar modulando la capacidad de transporte, es decir, alternando la utilización de unidades en composición simple y doble, o variando las composiciones de trenes en caso de usar material convencional. En la misma dirección van las estrategias de *yield management*, es decir, ofrecer tarifas promocionales para inducir el viajero a utilizar trenes en horas de menor tráfico. No obstante, aunque se utilicen todas las contramedidas posibles, la experiencia demuestra que globalmente la introducción de un HCI conlleva un ligero aumento de la producción en *trenes*km*.

6.2.2. Relaciones directas

El HCI puede suponer desventajas para un determinado tipo de usuario: él que viaja entre dos puntos con una elevada demanda de transporte. Para él, la introducción de un HCI sería en el mejor de los casos totalmente irrelevante. En el caso más desfavorable, puede sufrir un empeoramiento del servicio, si se ha afectado a los tiempos de viaje de los servicios para garantizar los enlaces en algunos nodos. Sin embargo, si la demanda en el corredor es suficiente para segmentar la oferta, pueden preverse servicios *exprés* fuera del sistema cadenciado. En todo caso, es necesario abordar este problema en una visión global de ventajas e inconvenientes: se debe y se puede asumir una pequeña afección al nivel de servicio de ciertas relaciones, si es compensada por una mejora notable del nivel de servicio de otras.

6.2.3. Explotación

Un sistema como el HCI en muchos casos puede hacer perder a muchos usuarios conexiones directas con algunos destinos. En contrapartida, se ofrece al usuario una frecuencia aceptable y uniforme a lo largo del día de trayectos con transbordos. Un factor crucial en la aceptación del HCI por parte de un potencial usuario, es que los enlaces sean garantizados también en caso de retrasos. Esto no suele ocurrir en caso de grandes retrasos por eventos excepcionales, donde se considera aceptable que el viajero tenga que esperar por el tren siguiente en caso de perder una o más conexiones, pero puede convertirse en un serio problema en caso de pequeños pero frecuentes retrasos (del orden de los 5-10 minutos). El compromiso a garantizar ciertas conexiones conlleva:

- Un **empeoramiento del nivel de puntualidad global** de la red de servicios incluidos en el HCI. Este empeoramiento es obviamente en comparación con la puntualidad que tendrían los mismos con un horario clásico. El efecto crece exponencialmente con el nivel de “no puntualidad” original: una red con una puntualidad excelente, no verá muy afectada su puntualidad con la adopción de un horario cadenciado integrado. Al contrario, en una red con retrasos frecuentes, estos se propagarán con un efecto dominó pudiendo llegar a perjudicar el funcionamiento global del sistema.
- Un **mayor esfuerzo de seguimiento de la explotación** tanto por el personal de tren como el de tierra. Para cada retraso de un tren con enlace, sería preciso

considerar distintos factores y tras su evaluación, tomar la decisión de hacer esperar o no al tren de enlace. Se deberá tener en cuenta el número de viajeros que necesitan el enlace (si son por ejemplo 10, será preferible pagarles una indemnización en lugar de hacer esperar otro tren con 300 viajeros a bordo), los minutos de retraso, cuanto tiempo deberían esperar para el tren siguiente (una espera de 2 horas tendría mayor peso que una espera de media), si éste tiene plazas suficientes o deberían viajar sin plaza asignada, si el tren que debe esperar tiene otras conexiones, con el riesgo de causar retrasos en cadena, etc...

Un ejemplo anecdótico es el modo de gestión en los ferrocarriles suizos de los retrasos de trenes internacionales entrantes en la red. Dado que dichos trenes en muchos casos cubren surcos troncales para el HCI suizo, en caso de disponer de recursos suficientes, son capaces de disponer en un tiempo muy breve (del orden de los 30-60 minutos) un tren “sombra” que empiece su recorrido en la estación de frontera, circulando en el surco destinado originariamente para el tren internacional, y que viajará puntual asegurando así todos los enlaces en su recorrido. Esta operación puede llevarse a cabo únicamente si se conoce con suficiente antelación que el tren internacional llegará con cierto retraso. En caso de incidencias típicas en estaciones de frontera (cambio de personal, incidencias técnicas por cambio de tensión y sistemas de seguridad, controles de policía y aduana), esta solución no sería viable, porque el tren “sombra” saldría necesariamente con retraso por no disponer de tiempo suficiente para su preparación.

6.2.4. Capacidad y modelo de explotación de los nodos principales

El problema quizás más relevante del HCI es que no aprovecha las infraestructuras existentes al 100% de su capacidad. En un HCI ideal, una infraestructura nodal empieza a acumular trenes entre 15-10 minutos antes del eje de simetría, y vuelve a vaciarse 10-15 minutos después del eje de simetría. Durante el resto del periodo de cadenciamento, queda vacía.

El problema ha sido adelantado en el apartado “4.3.1.- Nodos en grandes estaciones”, y conlleva que en grandes terminales sea difícil o imposible minimizar los tiempos de conexión, por las siguientes razones:

- Limitaciones de capacidad en el haz de vías, que debería disponer de al menos una vía para cada relación comercial que se quiera integrar en el HCI, además de un margen adicional para hacer frente a incidencias y puntas de demanda.
- Limitaciones de capacidad en los canales de acceso, que impiden la concentración de llegadas y salidas alrededor del eje de simetría. obligan a llegadas de relaciones regionales pasantes, que tendrán entonces tiempos de parada alrededor de los 10-20 minutos.
- Los amplios espacios que conllevan grandes distancias a recorrer por los viajeros dentro de la estación en la búsqueda del andén de salida del propio tren.
- La costumbre y necesidad de prever mayores colchones de horario en entornos saturados.

Si bien el problema de la capacidad de los canales de acceso es de difícil solución o incluso imposible, para remediar a la saturación de vías de estacionamiento puede preverse la construcción de uno o más haces de vías de apoyo en las inmediaciones de la estación.

Un posible esquema de explotación para un nodo de gran importancia es el siguiente:

-20’/-10’: Llegadas de relaciones regionales con término en la misma estación. En su caso, puede enviarse el material utilizado a un haz de vías de apoyo para descongestionar la estación.

-10’/-5’: Llegadas de relaciones regionales pasantes, que tendrán entonces tiempos de parada alrededor de los 10-20 minutos.

-5’/+5’: Llegadas y salidas de relaciones de largo recorrido, tanto pasantes como con inicio / término en la estación. Las relaciones pasantes tendrán un tiempo de parada lo más corto posible y ajustado al tiempo necesario para subida y bajada de pasajeros. En las relaciones con inicio / término en la estación, para el tren que inicia servicio se reutilizará el material que ha llegado la hora anterior, disponiendo así de unos 60 minutos para limpieza y puesta en servicio de la unidad.

+5’/+10’: Salidas de las relaciones regionales pasantes

+10’/+20’: Salidas de las relaciones regionales con inicio en la misma estación, pudiéndose reutilizar las unidades llegadas durante el mismo ciclo, y en su caso que fueron enviadas a la instalación de apoyo, con un tiempo de reutilización global de 20-40 minutos, compatible con este tipo de servicios.

7. Aspectos a considerar en la posible adopción del horario cadenciado integrado en nuestro país

7.1. Compatibilidad de infraestructuras existentes y en proyecto

Obviamente, también en nuestro país la planificación de nuevas infraestructuras se acompaña con estudios de explotación de más o menos detalle. Sin embargo, nuestras infraestructuras hasta ahora han sido planificadas en la inmensa mayoría de los casos basándose en un modelo de explotación diferente al del HCI, y que contempla únicamente relaciones origen/destino aisladas entre ellas.

Se detallan a continuación algunos ejemplos de infraestructuras no óptimas para un sistema cadenciado integrado.

7.1.1. Una infraestructura no óptima para el HCI: Antequera – Santa Ana

Antequera – Santa Ana es una estación de Alta Velocidad, situada a 17 km al oeste del centro urbano de Antequera. Esta estación forma parte de la línea de Alta Velocidad Córdoba – Málaga, y en ella prestan servicio trenes con destino Madrid y Málaga, además de trenes de Madrid a Algeciras y Granada, con cambio de ancho en Antequera – Santa Ana. En futuro

estará conectada al nuevo Eje Ferroviario Transversal Andaluz (EFT) y al ramal de Alta Velocidad a Granada. Además está conectada a las infraestructuras existentes en ancho ibérico a Ronda/Algeciras, Málaga, Granada, Córdoba y Sevilla.

La estación dispone de un total de 5 vías en ancho UIC (3 con andén y 2 de paso), y 2 vías de ancho ibérico con un andén central que da servicio a ambas. Por su particular ubicación y al ser el punto de convergencia de varios ejes de Alta Velocidad y convencionales, la estación sería un lugar ideal para establecer un nodo de conexión en ella entre varios servicios en ancho ibérico e UIC, mejorando el acceso a la Alta Velocidad desde las poblaciones menores. Desgraciadamente, **la posibilidad de realizar este servicio tanto ahora como en el futuro, es limitada por la capacidad de estacionamiento de 3 vías en ancho UIC y 2 en ancho ibérico.**

Para el ancho UIC, la configuración ideal sería disponer de al menos 4 vías de estacionamiento (2 por sentido), renunciando a las vías de paso si fuera necesario, para permitir un intercambio ágil y en el mismo andén entre servicios por el Eje Ferroviario Transversal y servicios de Larga Distancia hacia/desde Madrid. El modelo de explotación con el EFT en servicio podría alternarse en horas sucesivas: en una hora dada, se produciría un transbordo entre un servicio AVE Madrid – Málaga y un Avant Sevilla – Granada, y en la siguiente hora se invertirían los destinos, enlazando un servicio AVE Madrid – Granada con un Avant Sevilla – Málaga.

En relación al ancho ibérico, se optó por dos vías de estacionamiento que serían ampliamente suficientes para los pocos tráficos diarios de las líneas convencionales de Granada/Almería, Ronda/Algeciras, Sevilla y Málaga (la línea Córdoba – Bobadilla está prácticamente en desuso, con un solo servicio por día y sentido), bajo la hipótesis de una explotación “clásica” con las llegadas y salidas distribuidas a lo largo del día. Con la introducción de un HCI, las dos vías de estacionamiento pueden ser insuficientes, al deber

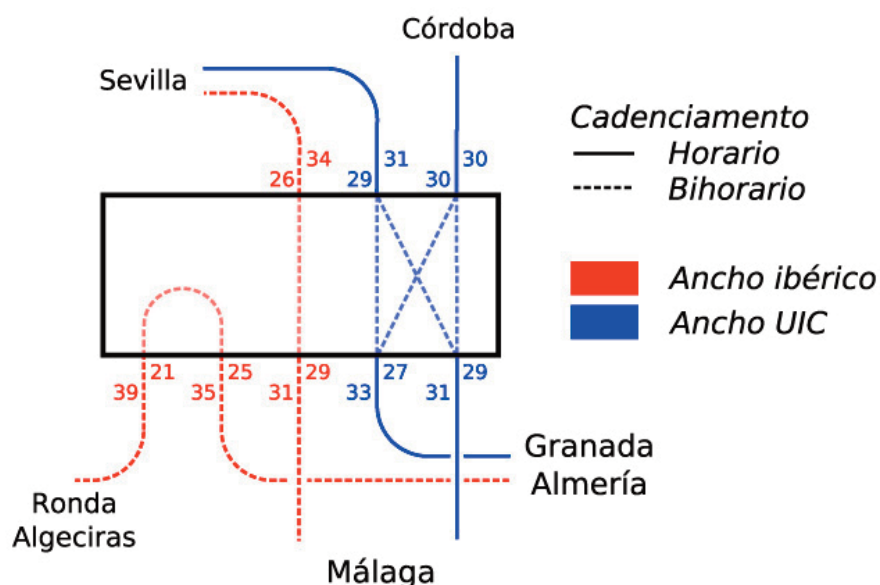


Figura 13: Escenario de explotación teórico de Antequera Santa Ana como nodo total.

concentrar llegadas y salidas en los mismos minutos para permitir el enlace con los servicios de Alta Velocidad. Es de destacar que aunque estos servicios en un HCI queden con frecuencias del orden de las 2-3-4 horas, el escenario ideal consiste en que lleguen los servicios en ancho ibérico de todos los corredores a la misma hora. Para ello, serían necesarias 4 vías, o bien 2 con longitud útil mayor de la actual y suficientes para estacionar dos composiciones de Media Distancia por cada vía, con todos los condicionantes de explotación que conlleva. Manteniendo las dos vías actuales, otra alternativa es prestar servicio en horas pares con dos relaciones y en horas impares con otras dos. En este caso se salvaguarda el transbordo entre cualquier servicio de ancho ibérico con uno UIC, suponiendo que los tráficos UIC tengan frecuencia horaria, pero se perderían aquellas conexiones entre dos servicios de ancho ibérico que tienen parada en Antequera – Santa Ana en horas diferentes.

7.1.2. Infraestructuras excedentes

Podemos encontrarnos con partes de infraestructuras concebidas según el modelo de explotación actual, que tendrían utilización inferior o nula en el caso de un cambio progresivo al modelo de explotación del HCI. Se pueden identificar dos casos evidentes en nuestro país:

- **Cambiadores de ancho:** Una relación directa explotada con trenes de ancho variable, podría realizarse efectuando un transbordo en aquella estación donde se realiza el cambio de ancho, siempre y cuando la estación disponga de vías de estacionamiento en ambos anchos de vía. Esta forma de explotación puede conllevar ventajas adicionales, como un ahorro en el coste de explotación, al poder utilizar trenes de ancho fijo, menos caros, e incluso una mejora en los tiempos de recorrido globales, ya que los trenes de ancho fijo UIC pueden aprovechar las máximas velocidades permitidas en los tramos de Alta Velocidad.

- **Enlaces by-pass:** En correspondencia de bifurcaciones de líneas de Alta Velocidad, se han construido, o están en proyecto, vías de enlace que conectan los dos ramales de la bifurcación y configuran el nudo en forma de Y. En algunos casos no cabe la menor duda sobre la utilidad de dichos enlaces (Nudo de la Y Vasca, by-pass de Perales del Río, Nudo de La Encina). Existen sin embargo otros casos en los que la utilidad de la inversión puede parecer dudosa si se aplicara un modelo de explotación orientado al HCI. A título de ejemplo, los by-pass proyectados en Olmedo y Camp de Tarragona quedarían inutilizados en caso de prever únicamente enlaces con transbordo en dichas estaciones para los viajeros de las relaciones Galicia – País Vasco / Cataluña y Zaragoza / Lleida – Tarragona / Valencia respectivamente.

7.1.3. Estaciones en las afueras de las poblaciones

Una solución aplicada con frecuencia en nuestro país es optar por la construcción de nuevas estaciones de Alta Velocidad en el exterior de los cascos urbanos, con el fin de no afectar a velocidades de proyecto, evitar complicaciones constructivas, o por petición expresa de las administraciones locales. Dichas soluciones en muchos casos son inevitables y se han

abordado también en el resto de Europa. Sin embargo, la diferencia sustancial con las correspondientes estaciones españolas, es que en la gran mayoría de los casos, dichas estaciones se ubican en puntos de cruce con líneas existentes, o bien se construyen posteriormente los correspondientes enlaces ferroviarios a la estación. Así, estas terminales se configuran como intercambiadores entre distintos niveles de servicio, paliando sus deficiencias de accesibilidad a la estación en transporte público. Obviamente **el uso del horario cadenciado integrado puede agilizar la creación de dichos enlaces y aprovechar la potencialidad de este tipo de estaciones.**

Entre estaciones europeas así concebidas cabe citar **Marne La Vallée – Chessy** (en las afueras de París, con intercambio TGV-RER), **Siegburg – Bonn** y **Montabaur** (en la línea de alta velocidad Colonia – Frankfurt, con intercambio con transporte regional y de Cercanías), **Kassel – Wilhelmshöhe** (al oeste de la ciudad de Kassel, en la línea de alta velocidad Hannover – Würzburg, con intercambio con transporte regional, de Cercanías, e incluso de largo recorrido convencional)

El único ejemplo nacional de una estación de Alta Velocidad periférica y con posibilidad de intercambio con tráficos regionales es **Antequera – Santa Ana**, si bien como se ha comentado antes, su potencialidad es limitada por el número de vías de estacionamiento. El resto de las estaciones no dispone de conexiones parecidas, habiendo sido diseñadas en base a un modelo de explotación diferente, y privilegiándose en la definición de su ubicación otros factores como parámetros de trazado, cercanía al centro urbano, etc.

Existen casos particulares en la red española donde una línea convencional se encuentra a escasa distancia de estaciones de Alta Velocidad, a saber:

- La estación de **Camp de Tarragona**, al lado de línea en desuso Reus – Roda de Bará. En caso de que se lleve a cabo la rehabilitación de dicha línea (eventualidad no remota), sería de gran interés para la implantación de un HCI que ésta pueda enlazar con la estación existente de Camp de Tarragona, proporcionando así una potente conexión a la estación con tráficos de Media Distancia y Cercanías.
- La futura estación de Alta Velocidad de **Medina del Campo**, en el eje Olmedo – Zamora – Lubián – Ourense. Este eje de Alta Velocidad cruza la línea convencional Madrid – Hendaya aproximadamente 1 km al este de la ubicación de la futura estación. La cercanía de este eje vertebral de la red de ancho ibérico representa una oportunidad para el futuro, pudiéndose plantear una variante de la misma que cruce perpendicularmente la nueva estación en su cabecera este. Se permitiría así que la totalidad de las circulaciones en ancho ibérico entre Ávila/Salamanca y Valladolid puedan efectuar parada en la estación de “Medina del Campo AV”, que se configuraría como una estación-intercambiador en dos niveles.

7.2. Integración con la red de Alta Velocidad

Cabe comentar que el HCI es el complemento idóneo para una red ferroviaria de Alta Velocidad. Los horarios de los servicios regionales pueden estudiarse de manera que el tren regional funcione como colector o dispersor de viajeros para un corredor de Alta Velocidad

/ Larga Distancia, con transbordo en un nodo en concreto. Asimismo, en un trayecto entre dos nodos, un tren regional será un dispersor de viajeros procedentes del nodo anterior, y a la vez un colector de viajeros para el nodo siguiente.

Así, a través de horarios coordinados adecuadamente, se hace posible la extensión de la competitividad de los tiempos de viaje por Alta Velocidad a trayectos mixtos, evitando que tiempos demasiado excesivos de acceso a ella hagan perder su interés frente a otros medios de transporte. Aquellos núcleos de población periféricos, que no pueden beneficiarse de un acceso directo a la Alta Velocidad, gozarían de una mejora en los tiempos de viaje globales al resto del país.

7.3. Sistema de check-in

El sistema de acceso a los tráficos de largo recorrido en España prevé en las estaciones de tamaño grande y mediano un proceso de embarque o *check-in*, que consiste en un control de seguridad y una comprobación de estar en posesión de un título de viaje válido antes de acceder al andén. Según la normativa actual de Renfe Operadora, el acceso se cierra 2 minutos antes del horario de salida del tren. Este proceso aumenta por tanto el tiempo total de viaje para el usuario: sería además incorrecto cuantificarlo en los 2 minutos antes citados, teniendo en cuenta que es técnicamente inviable que todos los viajeros efectúen el *check-in* inmediatamente antes del cierre del mismo. Así, no cabe la menor duda que el proceso de *check-in* obliga al viajero a presenciarse con mayor antelación en la estación y aumenta el tiempo total de viaje en promedio entre todos los viajeros de un dado tren.

Comparando un trayecto directo con otro con enlace, la primera operación de *check-in* no tiene influencia en una comparación de tiempos globales, ya que se realizaría en ambos casos, o ninguno, dependiendo de la normativa. Al contrario, en caso de transbordo, es **fundamental que no haya de repetirse el proceso de check-in**, algo que impediría la realización de transbordos rápidos y afectaría demasiado al tiempo de viaje de un trayecto con enlace frente a uno directo.

Adoptar **esta medida puede hacer precisas actuaciones en aquellas grandes estaciones** que han sido diseñadas reorganizando los flujos de viajeros y separándolos entre llegadas y salidas. En algunos casos esta separación es integral, llegando a prever en el complejo un “Vestíbulo de Salidas” y otro “Vestíbulo de Llegadas”, como ocurre por ejemplo en la remodelación del Complejo Ferroviario de Atocha en Fase 1 y siguientes. En este caso, debería estudiarse la canalización de los flujos para transbordos, evaluar si la configuración actual de la estación es compatible con éstos, y en su caso estudiar las actuaciones correspondientes. En caso de estaciones en fondo de saco y con longitudes de andenes en muchos casos superiores a los 400 metros, es obviamente recomendable que los transbordos se puedan canalizar a través de pasarelas sobre andenes o pasos inferiores, evitando obligar a los viajeros a rodear las toperas de las vías con recorridos totales de 500 hasta 1000 metros y reduciendo así el tiempo de transbordo.

7.4. Puntualidad

Como se ha comentado, la introducción de un HCI conlleva un empeoramiento general del nivel de puntualidad, y en particular cuando la puntualidad originaria no es muy buena. En el ferrocarril español la situación cambia sustancialmente según el escenario que se mire: en la red UIC, el nivel de puntualidad es próximo a la excelencia, mientras en la red de ancho ibérico la situación es mucho más heterogénea.

Para la implantación de un HCI, se considera precisa por un lado **una acción continua de investigación sobre las causas de retrasos** en la red de ancho ibérico para intentar limitarlos, o bien una adaptación de los horarios correspondientes cuando esto no sea posible. Por otro lado, debería **reconsiderarse la viabilidad de mantener compromisos de puntualidad demasiado severos** para la operadora de transporte, en vista de un posible aumento de la frecuencia de pequeños retrasos debidos a enlaces.

7.5. Marco normativo, competencia y rol del administrador de infraestructuras

Por imposición de la normativa tanto nacional (ley 39/2003 del Sector Ferroviario) como europea, se ha llevado a cabo la división de la antigua Renfe en el administrador de infraestructuras (Adif), y la operadora de transporte (Renfe Operadora). El objetivo de este nuevo marco legal es, entre otros, garantizar un acceso no discriminatorio a la infraestructura a otras operadoras de transporte en un régimen de competencia. Su funcionamiento es parecido a lo que ocurre en el transporte aéreo, donde las operadoras corresponden al administrador de infraestructura un canon por la utilización de la misma.

Es evidente que la facilidad de poder construir un sistema cadenciado integrado dentro de este marco normativo, y en escenarios futuros con distintas operadoras de transporte, depende en gran medida de la reglamentación del sector. En este sentido es crucial el papel que cubre el administrador de infraestructuras, como se explica en los apartados siguientes.

7.5.1. *Proceso de asignación de capacidad*

Para favorecer la consolidación de un sistema cadenciado integrado, pueden plantearse medidas en las condiciones de acceso a la infraestructura que lo favorezcan, siempre y cuando respeten el marco normativo (acceso no discriminatorio, etc.). El objetivo de estas medidas es evitar que surcos aislados puedan afectar al funcionamiento del sistema impidiendo la ubicación de surcos cadenciados en horarios óptimos para el funcionamiento del sistema cadenciado integrado. A continuación, se representan dos ejemplos de condiciones de acceso a la infraestructura en administraciones con un sistema cadenciado consolidado.

Alemania (DB Netz)

En la ley “Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung – EIBV” (*reglamento de utilización de la infraestructura ferroviaria*), en su apartado 9, figura que el administrador de infraestructura alemán (DB Netz) tiene poder de decisión sobre los derechos de accesos de las operadoras según el siguiente orden de prioridad:

- Tráficos cadenciados o englobados en una red
- Tráficos internacionales
- Tráficos de mercancías

Si bien la misma ley define lo que se entiende como tráfico cadenciado (al menos 4 surcos diarios, sustancialmente iguales en su recorrido, y con una cadencia no superior a los 120 minutos), no aclara el término “englobados en una red”. Esta aclaración se encuentra en otro texto legal, que es el decreto “*Verordnung zum Erlass und zur Änderung eisenbahnrechtlicher Vorschriften*”, donde se publica la primera versión de la ley antes citada y su correspondiente interpretación. En este texto, se cita textualmente que “un tráfico englobado en la red se produce en caso de conexiones con otros tráficos (relaciones con transbordos)”. En otras palabras, **tanto los tráficos cadenciados o tráficos con conexiones, aunque no sean cadenciados, tienen prioridad en la asignación de surcos** sobre todos los demás tipos de tráfico.

Suiza (SBB Infrastruktur)

En el texto “Bestimmungen für die Bestellungen von Trassen” (*Prescripciones para la petición de surcos*), en el apartado 4.4.1.1 se cita que “en el acceso a la red, **el tráfico cadenciado de viajeros**, que circule en los horarios de servicio habituales en un cadenciamiento integrado de 30, 60 o 120 minutos, **y que es englobado en una cadena de transporte público, tiene prioridad**”.

7.5.2. Explotación con distintas operadoras de transporte

En escenarios con varias operadoras de transporte, la relación de cada una de las operadoras con el sistema cadenciado integrado varía sustancialmente según se trate de transporte regional (regulado y subvencionado por las comunidades autónomas) o transporte de largo recorrido (en régimen de competencia).

Transporte regional subvencionado

El caso de transporte regional subvencionado con distintas operadoras no presenta particulares dificultades de aplicación, y ya existe en distintas regiones de Alemania, incluyendo la región de Schleswig – Holstein descrita anteriormente. En el contrato de servicio estipulado entre las comunidades autónomas y las operadoras de transporte, se especifican todas las cláusulas necesarias para salvaguardar el correcto funcionamiento del HCI: integración tarifaria, validez de los títulos de transporte, gestión de la explotación, etc.

Transporte de largo recorrido en régimen de competencia

Este caso presenta mayores complejidades, sobre todo porque no existen hasta ahora ejemplos de aplicación en Europa. Las diferentes operadoras de largo recorrido que fueron constituidas en Europa (entre otras Elipsos, Thalys, Cisalpino, Artesia, Lyria, CityNightLine) son sociedades controladas por las respectivas operadoras nacionales (Renfe, Sncf, SBB,

Trenitalia, DB, etc.) y se crearon no tanto para instaurar un régimen de competencia, sino para atender con mejor eficiencia a particulares segmentos de mercado, como el tráfico nocturno e internacional.

Por otra parte, en un futuro es de suponer que existirán operadoras privadas en competencia con las nacionales. Si una de éstas desea operar con unos surcos externos al horario cadenciado, esto obviamente no supone mayores problemas para el funcionamiento del mismo. En el caso de que también la operadora privada ocupe surcos que son parte del HCI, lo más deseable es que las operadoras de transporte lleguen a mutuos acuerdos, que aseguren el correcto funcionamiento del horario cadenciado y simplifiquen el acceso al servicio por parte del usuario. Haciendo un paralelismo con el transporte aéreo, puede imaginarse un escenario parecido a los vuelos fletados en código compartido o *code-sharing*. Las cuestiones a resolver son numerosas, y se citan a continuación algunos ejemplos:

- Posibilidad de emisión de billetes únicos para trayectos con varias operadoras y/o a través de un único canal de venta.
- Si una relación se explota sin reserva obligatoria de plaza, acuerdos para que con el mismo billete se pueda utilizar trenes de ambas operadoras.
- ¿Si el tren en el surco siguiente es explotado por otra compañía, podrá el viajero utilizar este tren si ha perdido su conexión?
- ¿Hasta qué punto es conveniente que una operadora acepte viajeros de otra operadora por incidencias causadas por esta última, perjudicando así la calidad del servicio a sus clientes?
- ¿Un tren de una operadora deberá esperar la llegada de otro tren con retraso de otra operadora para asegurar la conexión? ¿Y hasta cuánto retraso? ¿Y qué compensaciones económicas se deberán reconocer?

Cuantas más cuestiones queden resueltas, más eficaz será el funcionamiento del HCI en régimen de competencia.

En todo caso, es difícil prever cual será el escenario real de explotación en cuanto entren nuevas operadoras en el mercado: con este ejemplo se pretende únicamente argumentar que el HCI puede coexistir con un régimen de competencia, si existe por un lado voluntad política para protegerlo a través de normativa adecuada, y por otro lado las operadoras son suficientemente concienciadas para llegar a acuerdos que benefician a todas las partes en causa.

El presente artículo también está publicado en

http://ferrocarriles.wikia.com/wiki/Horario_cadenciado_integrado

Todo el contenido se distribuye bajo la siguiente licencia Creative Commons:



Se permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, y utilizar el contenido para hacer obras derivadas, bajo las siguientes condiciones: se debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra); si se altera o transforma esta obra, o se genera una obra derivada, sólo se puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Bibliografía

PACHL, Jorn (2008). *Systemtechnik des Schienenverkehrs. 5. Auflage*, pp. 222-236. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

REY, Georges (2007). *Entwicklung des ITF von den Anfängen bis zur Gegenwart*. Eisenbahntechnisches Kolloquium 2007, Technische Universität Darmstadt.

Reinhard Clever (1997). *Integrated Timed Transfer. A European Perspective*. Transportation Research Record 1571, pp. 109-115.

Varios Autores. *Taktfahrplan*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Taktfahrplan>

DB Netz AG. *Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG (SNB)*.

Verordnung zum Erlass und zur Änderung eisenbahnrechtlicher Vorschriften. Bundesratsdrucksache 249/05 del 15/04/2005, pp. 43 y siguientes

Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung (EIBV). Bundesministerium der Justiz. http://bundesrecht.juris.de/eibv_2005/

Network Statement 2010. Infrastruktur Trassenmanagement, SBB CFF FFS.

Horarios ferroviarios en Europa en la web oficial de Deutsche Bahn. <http://reiseauskunft.bahn.de>

Figuras

Todas las figuras son elaboradas por el autor, excepto:

Figura 9: Autor *Bernese_media*, procedente de Wikimedia Commons