

(11)

Para: [Redacted]  
De: [Redacted]

Recepción	
Folio:	SGM07-2296-01
Fecha:	23/11/2007
Hora:	14:24

Procedencia	
Número:	SDGO/2089/07
Fecha del oficio:	23/11/2007
Área:	Subdirección General de Operación

Asunto	
Remiten copia del Dictamen Técnico que presentó a la Dirección General la Comisión Interna encargada de Evaluar la Tecnología del Material Rodante más adecuada, para operar la línea 12 del Metro de la Ciudad de México.	

Instrucciones	
Instrucción:	Conocimiento
Instrucciones adicionales:	
Fecha compromiso:	.- No requiere respuesta

**Atentamente**

[Redacted Signature]

Conclusión	
006921	





Clave: 60000

Ref.: SDGO/

2089

/07

México D.F., a

23 NOV. 2007

[REDACTED]  
PRESENTE

Sírvase encontrar anexo al presente una copia del documento denominado "Díctamen Técnico que presentó a la Dirección General la Comisión Interna encargada de Evaluar la Tecnología del Material Rodante más Adecuada para Operar la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México", el cual contiene en su totalidad las firmas de los representantes de dicha comisión.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

[REDACTED]

[REDACTED]



C.c.p.

[REDACTED]

SG007-1239  
RGP/mcoc



SISTEMA  
DE TRANSPORTE  
COLECTIVO

DICTAMEN TÉCNICO  
QUE PRESENTA A LA  
DIRECCIÓN GENERAL

LA

COMISIÓN INTERNA ENCARGADA DE EVALUAR  
LA TECNOLOGIA DEL MATERIAL RODANTE MÁS  
ADECUADA PARA OPERAR LA LÍNEA 12 DEL  
METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

SEPTIEMBRE DE 2007.



## CONTENIDO

- I. INTRODUCCIÓN.
- II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LÍNEA 12.
- III. PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS MATERIALES RODANTES NEUMÁTICO Y FÉRREO EN OTROS METROS DEL MUNDO.
- IV. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS ASIGNADAS A LAS TECNOLOGÍAS NEUMÁTICA Y FÉRREA UTILIZADAS EN METROS.
- V. CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE MATERIAL RODANTE NEUMÁTICO Y FÉRREO.
- VI. TABLA DE EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MATERIAL RODANTE NEUMÁTICO Y FÉRREO.
- VII. CONCLUSIÓN.

I. INTRODUCCIÓN.

El Gobierno del Distrito Federal y el Sistema de Transporte Colectivo contemplan llevar a cabo la construcción de la nueva Línea 12 del Metro de la Ciudad de México.

La Línea 12 fue prevista en el Plan Maestro de Metro y Trenes Ligeros de la Ciudad de México de 1996 con un recorrido original Mixcoac - Iztapalapa, recientemente modificado a Mixcoac - Tláhuac en función de las últimas observaciones sobre densidad demográfica y demanda de transporte en la zona sur-oriente de la metrópoli.

Siendo indispensable la definición de la tecnología más adecuada del material rodante para operar la Línea 12, a fin de desarrollar la ingeniería básica, las especificaciones técnicas y los proyectos ejecutivos para las obras civil y electromecánica, la Dirección General del STC instruyó a las Subdirecciones Generales de Operación y de Mantenimiento para llevar a cabo las discusiones y los análisis necesarios.

A efecto de definir los aspectos más relevantes (ventajas y desventajas) en las aplicaciones de las tecnologías férrea y neumática del material rodante para la explotación de la Línea 12: fueron consideradas las experiencias de las áreas de transportación y de mantenimiento al material rodante, a las instalaciones fijas y a la obra civil, tanto en la operación de la Línea "A" con trenes de rodada férrea como en la operación de las otras 10 líneas con trenes de rodada neumática; se realizaron los razonamientos necesarios en el campo de la física hechos por parte del área de ingeniería; se tomaron en cuenta las opiniones del cuerpo de asesores del Organismo; y se consideró la información disponible sobre otros Metros en el mundo.

Durante las discusiones y los análisis se evitó desvirtuar los inconvenientes o bondades de las dos tecnologías consideradas y, más bien, estos se enfocaron a determinar las consecuencias de sus naturalezas técnicas y de sus respectivos desarrollos más recientes respecto a operabilidad, eficiencia, seguridad, mantenibilidad y fiabilidad para alcanzar, en cada caso, los más altos niveles de calidad en el servicio.



## II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LÍNEA 12.

Para la nueva Línea 12 se ha previsto que el trazo inicie en la Estación Terminal Mixcoac, siga por Eje 7 Sur, División del Norte, Eje 8 Sur, Eje 3 Oriente, Cafetaleros y Avenida Tláhuac, y termine en la Estación Terminal Tláhuac, transcurriendo sobre suelos de tipo lacustre y de transición. La siguiente tabla presenta las principales características de la Línea 12.

CONCEPTO	VALOR
Demanda diaria aproximada en hora pico, al 2010	400,000 pas
Tipo de construcción	Subterránea
Longitud de operación	24.5 Km
Número total de estaciones	23
Estaciones de correspondencia (MIX, ZAP, ERM y DLP)	4
Estaciones terminales (MIX y TLC)	2
Arreglo de vías en estaciones terminales	3 vías – 2 andenes
Distancia media entre estaciones	1060 m
Distancia mínima entre estaciones	617 m
Distancia máxima entre estaciones	1,741
Longitud de andenes (formación de 9 coches)	150 m
Pendiente máxima	4 %
Radio mínimo de curvatura	150 m
Taller para mantenimiento menor	Tláhuac
Taller para mantenimiento mayor	Actuales*
Depósito de trenes en terminales	Mixcoac y Tláhuac

- \* En caso de una tecnología de trenes con rodada férrea no compatible con las características de la red actual, sería indispensable considerar la ejecución de los trabajos de mantenimiento mayor en los propios talleres de mantenimiento previstos en Tláhuac.



**III. PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS MATERIALES RODANTES  
NEUMÁTICO Y FÉRREO EN OTROS METROS DEL MUNDO.**

Como referencia general de las aplicaciones de las tecnologías neumática y férrea en el mundo, en la siguiente tabla se pueden apreciar los principales sistemas de Metro en los que se encuentran operando, así como las fechas de puesta en operación, incluyéndose la situación del Metro de la Ciudad de México.

MATERIAL NEUMÁTICO				MATERIAL FÉRREO					
OTROS METROS DEL MUNDO			METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO		OTROS METROS DEL MUNDO			METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	
Francia	París: 6 Líneas: 1, 6, 11, 14 y Orly)	(De 1954 a 1999)	Línea 1	(1969)	Francia	París: 9 Líneas: 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 12 y 13)	(De 1900 a 1993)	Línea A	(1991)
	Lyón	(1978)	Línea 2	(1970)	Inglaterra	Londres	(1863)		
	Marsella	(1978)	Línea 3	(1970)	Alemania	Berlín	(1902)		
	Lille	(1983)	Línea 4	(1981)	España	Madrid	(1919)		
	Rennes	(N/D)	Línea 5	(1981)	Japón	Tokio	(1960)		
	Toulouse	(N/D)	Línea 6	(1983)	Venezuela	Caracas	(1983)		
	Laon	(N/D)	Línea 7	(1984)	EE.UU.	Nueva York	(1904)		
Japón	Sapporo	(1971)	Línea 8	(1994)		Chicago	(1992)		
	Tokio	(N/D)	Línea 9	(1987)		Washington	(1976)		
	Kobe	(N/D)	Línea B	(1999)		Allanta	(1979)		
	Hiroshima	(N/D)				S. Francisco	(1972)		
China	Taipei	(N/D)			China	Hong Kong	(1979)		
	Taiwán	(N/D)				Shangai	(1993)		
EE.UU.	ChicagoAP	(N/D)			Brasil	Sao Paulo	(1974)		
Canadá	Montreal	(1966)				R. de Janeiro	(1979)		
Chile	Santiago	(1975)				Porto Alegre	(1991)		
Italia	Turín	(N/D)			Argentina	Buenos Aires	(1913)		
Singapur		(N/D)			Rusia	Moscú	(1935)		
					Italia	Roma	(1955)		
						Milán	(N/D)		
					México	Monterrey	(1984)		
				Y MUCHAS OTRAS CIUDADES IMPORTANTES					



#### IV. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS ASIGNADAS A LAS TECNOLOGÍAS NEUMÁTICA Y FÉRREA UTILIZADAS EN MÉTROS.

Las siguientes características técnicas asignadas a cada tipo de tecnología son aplicables a los sistemas de Metro y se corresponden con las especificaciones de los respectivos parques vehiculares existentes en el STC que, a su vez, derivan en lo básico de las versiones más modernas existentes en el mercado mundial.

CONCEPTO	UNIDAD	MATERIAL NEUMÁTICO	MATERIAL FÉRREO
Velocidad máxima de operación en STC	Km/h	80.00	90.00
Aceleración máxima a 4/4 CCM - vía seca	m/s <sup>2</sup>	1.40	1.00
Desaceleración en frenado de urgencia a 4/4 CCM	m/s <sup>2</sup>	2.00	1.27
Desaceleración en frenado de servicio	m/s <sup>2</sup>	1.33	1.00
Pendiente máxima con 66 % de adherencia y 4/4 CCM	%	8.00	4.00
Pendiente máxima en socorro por descompostura	%	4.00	2.00
Ancho de tren	m	2.50	2.50
Gálibo de túnel doble en vía recta	m	7.00	9.00
Longitud de tren de 9 carros	m	150.00	150.00
Capacidad de tren de 9 carros a 4/4 CCM	Pas	1,530.00	1,530.00
Alimentación - Tracción *	V	Barra guía 750 V	3er riel 750 V *
Equipo de Tracción - Frenado		VVVF - C. A.	VVVF - C. A.**
Captación de Energía *		Escobillas	Escobillas *
Motores de tracción		C. A. - Asíncronos	C. A. - Asíncronos
Transmisión de fuerza tractiva		Diferencial	Reductor
Rodadura		Rueda neumática	Rueda de acero
Composición de la vía *		Barra guía - pista - riel	3er riel - riel

- \* Para el caso de una tecnología de trenes con rodada férrea existen otras opciones de alimentación de energía eléctrica de tracción, como el sistema Pantógrafo - Catenaria Rígida de Altura Reducida.
- \*\* Siglas en ingles de los equipos de Control de Tracción - Frenado de tipo "Voltaje Variable, Frecuencia Variable para Motores de Corriente Alterna Asíncronos".



# SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO

## V. CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGIAS DE MATERIAL RODANTE NEUMÁTICO Y FÉRREC.

A partir de las características generales previstas para la nueva Línea 12 y de las características asignadas a los dos tipos de tecnología, y en base a la experiencia y la información disponible de las áreas del STC encargadas de la transportación, el mantenimiento y la ingeniería, ha sido posible desarrollar las discusiones y controversias conceptuales y analíticas necesarias para llegar a establecer con claridad las ventajas y desventajas de cada caso, respecto a los aspectos más significativos en la operación y el mantenimiento en el STC. Los siguientes razonamientos resumen los resultados de tales discusiones.

- **Capacidad de transporte.**- Considerando un mismo número de trenes en línea y mismas dimensiones y condiciones de operación, al presentar la rueda neumática mayor fricción con la pista que la rueda de acero con el riel, se posibilita que el tren neumático alcance aceleraciones más fuertes ( $1.4$  vs.  $1.0$   $m/s^2$ ) y desaceleraciones mayores ( $2.0$  vs.  $1.27$   $m/s^2$ ), permitiéndole obtener velocidades medias más altas, que significan mayores frecuencias ( $40$  vs.  $36$  trenes/hora). Es decir, para ofertar una misma frecuencia y misma capacidad de transporte se requieren más trenes férreos que con la tecnología neumática.

Se aclara que la mayor fricción del neumático con la pista también genera mayor resistencia al rodamiento, lo que, para el cálculo de potencia, influye junto con otros conceptos en la resistencia total al avance del tren\*, estimada por técnicos del STC en  $11.6$   $kg/ton$ ; sin embargo, durante el arranque y hasta la velocidad máxima, la resistencia al rodamiento no es la más importante, ya que la resistencia a la aceleración y la resistencia al viento llegan a tomar proporciones superiores.

- **Velocidad comercial.**- Justamente, las mayores aceleraciones y desaceleraciones del material neumático siempre conllevarán velocidades comerciales más altas para éste. Cuando se trata de marchas tipo con interestaciones menores a  $1$   $km$  la diferencia entre las velocidades comerciales del material neumático al férreo tienden a ser más señaladas, por ejemplo para interestaciones de  $800$   $m$  el equipo neumático alcanzaría  $36$   $km/h$  y el equipo férreo  $33$   $Km/h$ .

- **Rendimiento energético.**- No obstante que las mayores aceleraciones y desaceleraciones para marchas tipo con interestaciones menores a  $1$   $Km$  demandan mayor consumo neto de energía eléctrica para el neumático ( $10\%$  más), al relacionar éste con la mayor capacidad de transporte para el neumático ( $11\%$  más), se tiene un rendimiento energético  $1\%$  más alto para la tecnología neumática.

- **Número de trenes para línea 12.**- Tomando en cuenta la longitud de operación prevista para la Línea 12 ( $24.5$   $km$ ) y el arreglo en terminales de  $3$  vías -  $2$  andenes, las características de aceleración - frenado de los trenes neumáticos y férreos determinan que los trenes necesarios para operar con un intervalo de  $2$  minutos y  $25$  segundos serían  $36$  neumáticos o  $38$  férreos. Además, habría que considerar, en cada caso,  $2$  trenes de reserva de operación y aproximadamente  $10\%$  de trenes para mantenimiento, lo que arroja los totales de  $42$  trenes neumáticos o  $45$  trenes férreos.

\* El Manual de Ingeniería en Locomotoras de la empresa alemana Henschel menciona que, según pruebas realizadas en Francia, la resistencia total al avance de un tren con coches vacíos de  $14$  toneladas y neumáticos inflados a  $9$   $kg/cm^2$ , a  $100$   $km/h$ , fue de  $14.7$   $kg/ton$  ( $6.7$   $kg/ton$  de resistencia al rodamiento y  $8.0$   $kg/ton$  de resistencia al aire). Con datos del mismo manual puede determinarse que la resistencia total de un tren férreo, en condiciones similares de peso y velocidad, sería de  $10.2$   $kg/ton$  ( $2.2$   $kg/ton$  de resistencia al rodamiento y  $8.0$   $kg/ton$  de resistencia al aire).



- **Potencial de innovación y desarrollo tecnológico en el país.**- Dado que las estructuras metálicas, el mobiliario y los accesorios de las carrocerías de los trenes, incluyendo las puertas y sus equipos y mecanismos, así como los equipos de tracción - frenado, de conversión de energía eléctrica, de aire comprimido y de control son básicamente los mismos para los dos tipos de tecnologías, y debido a que ambas han sido desarrolladas bajo las normas internacionales de fabricación de equipo ferroviario, puede asegurarse que las posibilidades de innovación y desarrollo tecnológico para estos componentes, a nivel operativo, de fabricación y de proveedores, son similares en ambas tecnologías.

El mismo razonamiento se aplica a los bogies en lo correspondiente a bastidor, suspensión y motores eléctricos. Sin embargo, dentro de los mismos bogies, existen elementos de tecnología diferente que se refieren a la transmisión de fuerza tractiva (diferenciales o reductores), a los sistemas de freno neumático (zapatas-rueda de seguridad o balatas-disco) y a las ruedas (neumáticos o ruedas de acero). Por ello, puede establecerse que las posibilidades de innovación y desarrollo tecnológico en los bogies sólo difieren en cuanto a los elementos mencionados, que representan menos del 10% del valor de un tren. Por lo que, al ser los elementos de los bogies de los trenes férreos mas comunes en el mercado internacional, éstos tendrían un mayor potencial de innovación y desarrollo tecnológico en el país, del orden de 10% del costo total de los trenes.

- **Facilidades de abastecimiento de refacciones para trenes.**- Igual que en el punto anterior, a nivel de las estructuras metálicas, mobiliario y accesorios de carrocerías, de las puertas con sus equipos y mecanismos, así como de equipos de tracción - frenado, de conversión de energía eléctrica, de aire comprimido y de control, las facilidades de abastecimiento de refacciones son las mismas para ambas tecnologías, e igualmente a nivel de bastidor y suspensión de bogies, incluyendo motores eléctricos de tracción.

La diferencia está en los mismos bogies, a nivel de la transmisión, del sistema de freno neumático y de las ruedas. Esta diferencia impacta positivamente al equipo férreo debido a que sus elementos son de fabricación común para un sinnúmero de sistemas de Metro y ferroviarios. Por lo que los trenes férreos tendrían un mayor potencial de abastecimiento de refacciones en alrededor de 10% del costo total de los trenes.

- **Facilidades de mantenimiento para trenes.**- En este caso, también las facilidades de mantenimiento son similares en ambas tecnologías a nivel de las estructuras metálicas, mobiliario y accesorios de carrocerías, de las puertas con sus equipos y mecanismos, y de los equipos de tracción - frenado, de conversión de energía eléctrica, de aire comprimido y de control, así como de bastidor y suspensión, incluyendo motores eléctricos de tracción.

Aquí también la diferencia está en los bogies, a nivel de la transmisión y de los sistemas de freno neumático, que favorece al equipo férreo, dado que en general estos elementos son de mantenimiento más fácil en trenes de rodada férrea.

Sin embargo, en cuanto a ruedas, la diferencia se revierte contra la tecnología férrea, ya que es más sencillo cambiar neumáticos (operación de 4 días hábiles por tren y cada 255,000 km), que reperfilado de ruedas de acero, pues para esto es necesario contar con un torno especializado con operadores calificados. El reperfilado de las ruedas de acero de un tren toma 12 días hábiles por tren y se realiza cada 65,000 km (o cada 6 meses), lo que significa 10.2 veces más trabajo de mantenimiento en trenes con rodada férrea que en trenes con neumáticos.



# SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO

- **Facilidades de abastecimiento de refacciones para vías.-** Las refacciones de vía para ambas tecnologías, como rieles, tercer riel para alimentación eléctrica, barras guía, pistas de rodamiento y durmientes, así como sus accesorios de fijación, son de relativa fácil adquisición en los mercados ferroviarios internacionales, incluso en algunos casos en los mercados nacionales; no así las que corresponden a los aparatos de vía para trenes neumáticos, que son más complejos y por tanto más difíciles de conseguir (a nivel mundial se conocen sólo dos fabricantes de aparatos de vía para trenes neumáticos, aunque el impedimento para su fabricación no es la tecnología sino los reducidos volúmenes que no la hacen atractiva). Por esta razón, las facilidades de abastecimiento de refacciones para vías de trenes con rodada de acero presentan ciertas ventajas respecto al abasto de refacciones para vías de trenes con rodada neumática.
- **Facilidades de mantenimiento de vías.-** El mantenimiento de vías para trenes con rodada neumática presenta ventajas respecto a lo que corresponde a vías para trenes con rodada férrea, por las siguientes razones:
  - ✓ **Conservación de vía.** Este rubro incluye básicamente la realineación y la renivelación de la vía. En el caso de la vía neumática, ésta admite deformaciones que no ponen en riesgo al material rodante ya que se tienen tolerancias amplias de alineación, nivelación y alabeo, permitiendo que los neumáticos se adapten con facilidad a especificaciones más bajas que las establecidas para vías férreas; en cambio para mantener la seguridad en una vía férrea sólo se aceptan alabeos máximos de 0.5 mm/m, ya que los conjuntos de ruedas son más rígidos y, al excederse esta tolerancia, puede ocasionarse que alguna de las ruedas pierda contacto con el riel.
  - ✓ **Aparatos de vía.** A pesar de que los aparatos de vía para trenes con rodada neumática son mucho más complicados, al existir una mínima fricción entre los neumáticos y éstos se reduce considerablemente el desgaste de agujas y rieles. En el caso de la rodada de acero el desgaste es mayor, por lo que se requiere una lubricación constante y adecuada tanto en rieles como en cejas de ruedas. Sin embargo, si por descuidos en el mantenimiento ésta lubricación es excesiva, se corre el riesgo de extender el lubricante a la superficie de rodamiento de la rueda y al riel, provocando deslizamientos del tren que comprometen la seguridad al no frenar en las distancias debidas. También, si la lubricación es deficiente se produce un mayor desgaste de la vía en curvas, en aparatos de vía y en cejas de ruedas de acero, que implica reperfilados más frecuentes.
  - ✓ **Riel y pista.-** En el caso de los trenes neumáticos el desgaste de la pista de rodamiento es casi nulo dado que el neumático es menos abrasivo a la misma, pues en 38 años de servicio éstas sólo han tenido que cambiarse en la parte superficial de Línea 2 para evitar patinajes y deslizamientos en tiempos de lluvia, y en algunos tramos de Línea 1 por corrosión debida a excesiva humedad y no por fin de vida útil. Para la rueda de acero, aunque la fricción entre ésta y el riel es menor, la mayor abrasión provoca desgastes importantes que conllevan el cambio de tramos de riel completos en tiempos más cortos que para la rodada neumática. También, la diferencia de peso entre del riel normal del sistema de vía férrea (115 lb/yd) y el del riel seguridad de la vía neumática (80 lb/yd), incrementa directamente el costo del primero (40 %), mientras su vida útil, por la mayor frecuencia de uso, se reduce respecto a la del segundo.



- ✓ **Alimentación eléctrica para tracción\*.-** En este aspecto, el mantenimiento del tercer riel para alimentar los trenes con rueda de acero es más sencillo que lo que corresponde a trenes con rodada neumática, dado que para los trenes férreos se requiere sólo una barra conductora de corriente que prácticamente no está sujeta a esfuerzos, mientras que en los trenes neumáticos se requieren 2 barras que, además, sirven para guiar los trenes y están sometidas a esfuerzos importantes.
- **Facilidades de mantenimiento para instalaciones fijas.-**
  - ✓ **Equipos mecánicos.-** Los equipos mecánicos de las instalaciones fijas, que son necesarios en la operación y el control de los trenes, son similares para ambas tecnologías, por lo que en los dos casos se tiene la misma facilidad de mantenimiento, excepto en lo que concierne, en trenes con rueda de acero, al mantenimiento y conservación de los lubricadores automáticos de pestañas y de vías que, como antes se dijo, no se tienen en trenes y vías de rodada neumática.
  - ✓ **Equipos eléctricos.-** Siendo similares los equipos eléctricos de las instalaciones fijas para la operación y control de los dos tipos de trenes, tanto neumáticos como férreos, en este caso no existen ventajas de unos respecto a los otros y las facilidades de mantenimiento son iguales para ambas tecnologías.
  - ✓ **Equipos electrónicos -** También en este caso, los equipos electrónicos de las instalaciones fijas para operación y control son similares, tanto en trenes neumáticos como en trenes férreos, por lo que no existen ventajas de uno sobre el otro y las facilidades de mantenimiento son las mismas en ambas tecnologías.
- **Seguridad en la operación.-** La seguridad en la operación de los trenes depende principalmente de los siguientes aspectos:
  - ✓ **Guiado de tren.-** El sistema de guiado de trenes con rodada neumática en vías principales elimina la posibilidad de descarrilamientos, dado que los conjuntos de ruedas guía de los bogies se apoyan a ambos lados sobre barras guía altas y robustas; por el contrario, el guiado en la vía para rodada férrea depende del contacto de las cejas de las ruedas de acero, más reducidas, que obliga a estrictas y continuas operaciones de alineación y nivelación de rieles, y de la correcta localización de contrarrieles de seguridad en zonas de curvas. Sin embargo, en el caso de la vía férrea, el correcto mantenimiento de las vías, la construcción de un murete entre las vías de ambos sentidos y la disposición de contrarrieles en curvas ofrecerían una seguridad prácticamente comparable entre las dos tecnologías.
  - ✓ **Tolerancia a sismos.-** Ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, no obstante que ambos tipos de vía estarían expuestas a deformaciones, las correspondientes al tren de rodada férrea son más vulnerables debido a su constitución más elástica y a las tolerancias más estrictas requeridas para proporcionar la seguridad en la operación. Después de un evento de este tipo, las vías para tren de rodada férrea requieren de una inspección más minuciosa y constante antes de reiniciar el servicio.

\* Para el caso de la tecnología de trenes con rodada férrea, existen otras opciones de alimentación de energía eléctrica de tracción con ventajas de seguridad y de facilidad en mantenimiento, como el sistema Pantógrafo - Catenaria Rígida de Altura Reducida.

- ✓ **Tolerancia a hundimientos diferenciales.**- Aun cuando la construcción subterránea con Muros Milán a Cielo Abierto de la Línea 12 reducirá importantemente el efecto de estos fenómenos, dado que su trazo pasará en su mayor parte por terrenos inestables con asentamientos diferenciales de suelo, en el caso del sistema de vías para trenes férreos será obligado el continuo mantenimiento de vías bajo estrictos programas de alineación y nivelación, a diferencia de lo requerido para trenes con rodada neumática.

Por lo anterior, no obstante que por el procedimiento constructivo de la Línea 12 se prevé una baja probabilidad de eventos catastróficos provocados por sismos o movimientos del subsuelo, la sensibilidad de ambas tecnologías frente a éstos podrá ser similar siempre que se toman en cuenta las medidas estrictas de diseño y construcción y, en todo caso, se dé fiel cumplimiento y se tenga estricto control de los programas y procedimientos de mantenimiento como base de la seguridad en la operación y el control de los trenes.

Otras consideraciones sobre la seguridad en la operación y el mantenimiento de los trenes son:

- ✓ **Frenado de Urgencia / Arrollados.**- Los trenes con rodada neumática alcanzan desaceleraciones máximas en frenado de urgencia de  $2.0 \text{ m/s}^2$ , mientras en los trenes con rueda de acero es  $1.27 \text{ m/s}^2$  (ambos a 4/4 de carga), por ello, en caso de caer personas a las vías o presentarse incidentes intempestivos, el tren de rodada neumática tiene mayor posibilidad de detenerse antes de llegar al punto crítico, (70 m vs. 110 m del férreo, ambos a 60 km/h), por lo que en este sentido los trenes con rodada neumática tienen menores probabilidades de accidentes.
- ✓ **Riesgo eléctrico en vías\*.**- Con frecuencia personal de mantenimiento debe recorrer las vías a pie sin que se interrumpa la circulación de trenes, por lo que, cuando un tren se acerca, este debe moverse con rapidez al nicho de seguridad, obligándose a saltar las barras guía o el tercer riel (con corriente eléctrica de 750 V). Por ello, en las vías para rueda de acero con tercer riel, el personal sólo brinca la mitad de las barras o rieles energizados, siendo más riesgosas las vías para trenes con ruedas neumáticas.
- **Disponibilidad de trenes.**- Si para Línea 12 se consideraran trenes con rodada neumática, la operación del primer tramo podría contar con un parque de 20 trenes neumáticos NC-82, retirados de Línea 2 al entrar en servicio los nuevos trenes NM-02. Esta ventaja no existirá en el caso de trenes con rodada de acero, ya que los trenes existentes no podrían operar en Línea 12 (los de Línea "A" de rodada de acero cuentan con un sistema pantógrafo - catenaria que, en principio, no tendrá la Línea 12).
- **Facilidad de traslado de trenes para mantenimiento mayor.**- En tanto los talleres Ticomán y Zaragoza permiten dar mantenimiento mayor a trenes neumáticos; el de La Paz para los trenes férreos de Línea "A" no cuenta con instalaciones adecuadas, por lo que la realización ahí de tales operaciones sería con serios inconvenientes y, si fuese necesario llevar los trenes al Taller Zaragoza, también sería con grandes dificultades. En su caso, los trenes férreos de Línea 12 tendrían problemas para ser llevados a cualquiera de los talleres actuales por las líneas existentes, ya que tendría que modificarse su sistema de captación de corriente y, aun así, su traslado sólo podría realizarse de noche, a baja velocidad y sin pilotaje automático por no ser compatible. Por ello, sería indispensable considerar la construcción de instalaciones de mantenimiento mayor en el Taller Tláhuac.

Para el caso de la tecnología de trenes con rodada férrea, existen otras opciones de alimentación de energía eléctrica de tracción con ventajas de seguridad y de facilidad en mantenimiento, como el sistema Pantógrafo - Catenaria Rígida de Altura Reducida.



Dada la compatibilidad de la rodada neumática con gran parte de la red, en su caso, su traslado a los talleres de mantenimiento de Ticomán o Zaragoza se facilitaría.

Por su parte, el reperfilado de ruedas de acero de los trenes férreos de la Línea 12 sólo podría realizarse en los talleres La Paz, donde existe el torno rodero, lo que complicaría su traslado, ya que la Línea "A" cuenta con catenaria para la alimentación de corriente de tracción, por lo que los trenes de Línea 12 tendrían que dotarse de pantógrafos (se requeriría trasladar 2 trenes/semana con la consiguiente afectación de trabajos de mantenimiento en las Líneas 8, 1 y "A" por las que transitarían).

La mejor solución, en caso de que los trenes de Línea 12 fueran de ruedas de acero, sería dotar al taller Tláhuac con instalaciones adecuadas para efectuar trabajos de mantenimiento mayor, incluyendo el torno rodero para perfilado de ruedas de acero.

➤ **Regulación y control de la operación.**

- ✓ **Regulación (recuperación de retardos).**- La recuperación de retrasos en la operación de las líneas es un proceso obligado y frecuente, que se lleva a cabo al ordenarse operar con marchas aceleradas o sobre aceleradas. Al ser menores la aceleración y el frenado de los trenes férreos que en los trenes neumáticos, la recuperación de retrasos en la Línea 12 sería menos eficaz al utilizarse los primeros.
- ✓ **Señalización.**- Ya que la señalización para operar ambos tipos de trenes es la misma, las facilidades para control de circulación de trenes serían similares.
- ✓ **Pilotaje automático.**- También en este caso, los equipos de pilotaje automático en ambos tipos de trenes pueden ser los mismos, por lo que las facilidades para llevar a cabo el control de la marcha de los trenes serían similares.

➤ **Impacto ambiental.**

- ✓ **Desechos de ruedas.**- Mientras que el STC desecha al año alrededor de 10,000 ruedas neumáticas portadoras y 5,000 ruedas neumáticas de guiado, que son de difícil reciclaje, las ruedas de acero de sus trenes férreos son totalmente reciclables al final de su vida útil, por lo que se puede decir que la tecnología de trenes con ruedas neumáticas provoca un mucho mayor impacto ambiental.
- ✓ **Aceites y lubricantes.**- El volumen de aceites y lubricantes requerido por los elementos mecánicos de los trenes de rodada neumática es un poco mayor que el requerido por trenes con rodada de acero, lo que significa que los trenes con rodada neumática tienen un ligero mayor impacto ambiental que los últimos.
- ✓ **Ruido.**- La tecnología para disminuir el ruido en trenes con ruedas de acero actualmente ha avanzado, de manera tal que se considera que su baja intensidad es comparable a la generada por trenes con rodada neumática.
- ✓ **Vibraciones.**- Al respecto, la tecnología para reducir el ruido de baja frecuencia de las ruedas de acero no ha logrado eliminar la transmisión de vibraciones al suelo y las construcciones contiguas, por lo que el impacto ambiental provocado por este tipo de ruido es inferior en los trenes con ruedas neumáticas.

**VI. TABLA DE EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MATERIAL RODANTE NEUMÁTICO Y FÉRREO.**

A fin de evaluar los razonamientos conceptuales y analíticos anteriores hechos por los participantes de las áreas involucradas, se diseñó una tabla en la que se asignó a cada concepto un valor de 0 a 1 y, a cada grupo de conceptos un valor cuya suma es 100, definiéndose así el peso específico de los conceptos y sus grupos, para lo cual los participantes discutieron ampliamente las respectivas asignaciones. En seguida se presenta dicha tabla con los resultados de evaluación obtenidos.

SISTEMAS Y SUBSISTEMAS		Peso %	Val. Máx.	Calificación Neumático	Calificación Férreo	Res. Neum.	Res. Férreo	
Operación	Capacidad de Transporte	0.50	4.25	0.80	0.70	1.70	1.40	
	Velocidad Comercial	0.50		0.80	0.75	1.70	1.50	
Rendimiento energético	Resistencia al avance y número de Trenes	1.00	5.313	0.80	0.70	4.25	3.72	
Potencial de innovación y desarrollo tecnológico STC	Trenes sin considerar bogies	0.50	6.667	0.5	0.5	1.07	1.07	
	Bogies sin considerar ruedas	0.30		0.4	0.4	0.80	0.80	
	Ruedas	0.20		0.6	0.8	0.80	1.07	
Facilidades de abastecimiento de refacciones para Trenes	Cajas	0.20	6.667	0.8	0.8	1.07	1.07	
	Traction - Frenado	0.25		0.6	0.6	1.00	1.00	
	Convertidores y Compresores	0.20		0.6	0.6	0.80	0.80	
	Puertas	0.10		0.6	0.6	0.40	0.40	
	Bogies	0.25		0.5	0.5	0.5	0.80	0.80
	- Bastidor	0.20						
	- Suspensión	0.12						
	- Ruedas	0.08						
	- Transmisión	0.12						
	- Motores	0.10						
- Frenos Neumáticos	0.08	0.6	0.8	0.80	0.80			
Facilidad de Mantenimiento para trenes	Cajas	0.20	6.375	0.8	0.8	1.07	1.07	
	Traction - Frenado	0.25		0.6	0.6	1.00	1.00	
	Convertidores y Compresores	0.20		0.6	0.6	0.80	0.80	
	Puertas	0.10		0.6	0.6	0.40	0.40	
	Bogies	0.25		0.5	0.5	0.5	0.80	0.80
	- Bastidor	0.05						
	- Suspensión	0.03						
	- Ruedas	0.02						
	- Transmisión	0.03						
	- Motores	0.10						
- Frenos	0.02	0.6	0.4	1.00	0.67			
Facilidades de abastecimiento de refacciones para Vías	Conservación de vía	0.2	6.667	0.8	0.8	1.07	1.07	
	Alimentación - Traction	0.2		0.8	0.8	1.07	1.07	
	Aparato de Vía	0.4		0.4	0.8	1.07	2.13	
	Riel y Pista	0.2		0.8	0.8	1.07	1.07	
Facilidad de Mantenimiento para Vías	Conservación de vía	0.5	6.375	1.0	0.4	3.15	1.28	
	Alimentación - Traction	0.15		0.8	1.0	0.77	0.96	
	Aparato de Vía	0.2		0.8	0.4	1.02	0.51	
	Riel y Pista	0.15		0.8	0.6	0.77	0.57	
Facilidades de mantenimiento para Instalaciones Fijas	Equipos Mecánicos	0.4	6.375	0.7	0.6	1.79	1.53	
	Equipos Eléctricos	0.3		0.7	0.7	1.34	1.34	
	Equipos Electrónicos	0.3		0.7	0.7	1.34	1.34	
Seguridad en la Operación	Guano de tren	0.4	25	1.0	0.8	10.00	8.00	
	Tolerancia a sistemas diferenciales	0.1		1.0	0.7	2.50	1.75	
	Tolerancia a los hundimientos	0.3		1.0	0.8	7.50	6.00	
	Frenado de Urgencia	0.1		0.9	0.6	2.25	1.50	
	Arrollados	0.1		0.6	0.9	1.50	2.25	
	Riesgo eléctrico en vías	0.1		0.6	0.9	1.50	2.25	
Disponibilidad de trenes	Nuevos (3)	1.0	4.25	1.0	1.0	4.25	4.25	
Facilidad de traslado para Manto Mayor	La Paz o Tepic	1.0	2.125	0.80	0.80	1.70	1.28	
Regulación y Control de la operación	Regulación (Recepción de refacciones)	0.3333	7.438	0.90	0.80	2.70	2.40	
	Sensibilización	0.3333		1.00	1.00	2.43	2.43	
	Pilaje automático	0.3333		1.00	1.00	2.43	2.43	
Impacto ambiental	Descargas de ruido	0.70	12.5	0.10	0.80	0.70	7.00	
	Accesos y vibraciones	0.10		0.80	0.80	1.00	1.00	
	Ruido	0.10		0.80	0.80	1.00	1.00	
	Vibraciones	0.10		0.80	0.80	1.00	1.00	
			100			78.66	78.09	



**SISTEMA  
DE TRANSPORTE  
COLECTIVO**  
VII. CONCLUSIÓN.

Habiéndose tomado en cuenta las características generales de la futura Línea 12 y discutido ampliamente por los participantes cada concepto característico de las dos tecnologías, lo cual quedó registrado en el resultado de la tabla de evaluación técnica del punto anterior, que arroja prácticamente la misma calificación para ambos casos, puede asegurarse que tanto la tecnología de trenes con ruedas neumáticas como la de trenes con ruedas de acero son técnicamente solventes para ser consideradas en la explotación de la Línea 12, con altos niveles de seguridad, fiabilidad, mantenibilidad y operatividad. Sin embargo, considerando los análisis financieros efectuados al respecto, que indican:

- ✓ Una inversión en obra civil, obra electromecánica y material rodante, superior en 0.7% para el caso de la tecnología neumática;
- ✓ Y un costo anual de mantenimiento de trenes y vías, de operación y de consumo de energía eléctrica, superior en 7% para el caso de la tecnología neumática;

se concluye que la aplicación de la tecnología férrea resulta, desde el inicio, del orden de 7% al año más conveniente económicamente para operar la nueva Línea 12.

El presente dictamen se firma el día 6 de septiembre de 2007.

[Redacted signature area]