



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**T E S I S**

**“SISTEMAS DE TRACCIÓN ELÉCTRICA  
APLICADOS AL TRANSPORTE URBANO”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO**

**PRESENTA:**

**DANIEL VÁZQUEZ ALFARO**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M.I. CÉSAR ENRIQUE BENÍTEZ JOYNER**



**CD. UNIVERSITARIA ABRIL DE 2008.**

**A Dios:**

Por la fortaleza que me da para cada proyecto de mi vida  
y por levantarme cada vez que me siento derrotado,  
gracias por dejarme cumplir este sueño maravilloso  
y una de mis metas en la vida

**A mis padres:**

Por su apoyo incondicional y su comprensión ilimitada.

**Por sufrir conmigo desde niño, por sus desvelos,  
por su dedicación para formar en mí principios  
y valores que quedan en mí para siempre.**

Gracias mamá y papá por ser su hijo y  
**formarme tal cual soy.**

**A mi hermano:**

Gracias Robe por tu apoyo, por tu ejemplo, por ayudarme  
cuando lo necesitaba, gracias por las palabras fuertes  
que me ayudaron a hacer esto.

**A Fer:**

Gracias por creer en mí, gracias por apoyarme en todo  
y por ser parte en esta etapa de mi vida  
gracias con todo mi amor.

**Al Maestro Cesar Enrique Benítez Joyner:**

Gracias por su apoyo incondicional y por su tiempo invertido en  
el trabajo que presento, gracias por sus consejos y por ayudarme a  
hacer realidad uno de mis enormes sueños, gracias y le deseo  
lo mejor a usted también en su vida.

**A la Lic. Irma Hinojosa:**

Gracias por ayuda en la revisión de este trabajo.  
Gracias por brindarme la confianza y por su  
apoyo desde el principio de éste.

Gracias a cada profesor de la Facultad de Ingeniería, gracias a cada una de las personas que  
hicieron de manera directa o indirecta poder llegar hasta este punto gracias y simplemente  
gracias.

## ÍNDICE

**INTRODUCCIÓN**.....I

### **Primera parte ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO**

#### **Capítulo I Evolución histórica del transporte**

1.1 Transporte a través del tiempo en el mundo..... 1  
1.2 La aparición de la tracción eléctrica.....2  
1.3 El desarrollo en el mundo y en México de la tracción eléctrica.....5  
1.4 Actualidad en el Sistema de Transporte Colectivo Metro. (STC México).....12

#### **Capítulo II Los sistemas de tracción eléctrica**

2.1 Clasificación general de los sistemas de tracción eléctrica.....15  
2.2 Comparación técnica de los diferentes tipos de sistemas.....17  
2.3 Ámbito, capacidad y tipo de alimentación utilizado en los sistemas  
de transporte eléctricos.....19  
2.4 Algunos elementos adicionales de un sistema de transporte eléctrico.....21

### **Segunda parte ASPECTOS BÁSICOS DEL TRANSPORTE ELÉCTRICO**

#### **Capítulo III Componentes generales de un tren eléctrico**

3.1 Elementos eléctricos de un tren .....31  
3.2 Elementos adicionales mecánicos .....32  
3.3 Elementos alternos que intervienen en la tracción eléctrica .....35  
    3.3.1 Tipos de alimentación.....35  
    3.3.2 Tipos de frenado.....36

**Capítulo IV**  
**Importancia de los sistemas ferroviarios**

|     |                                                                   |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | El potencial y alcance de un sistema de transporte eléctrico..... | 39 |
| 4.2 | Beneficios económicos de los trenes eléctricos.....               | 44 |
| 4.3 | Competitividad de este tipo de transportes en la actualidad.....  | 47 |

**Tercera parte**  
**DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS SISTEMAS DE**  
**TRANSPORTE ELÉCTRICOS**

**Capítulo V**  
**Consumo de energía y eficiencia**

|       |                                                                |    |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 5.1   | Influencia de consumo en regímenes de operación.....           | 53 |
| 5.1.1 | Fuerzas de resistencia al avance.....                          | 53 |
| 5.1.2 | Resistencia debida a pendientes.....                           | 54 |
| 5.1.3 | Resistencia por curvatura.....                                 | 55 |
| 5.1.4 | Resistencia al arranque.....                                   | 55 |
| 5.2   | Conceptos de velocidad utilizados en transporte terrestre..... | 57 |
| 5.3   | Automatismos aplicados a los trenes eléctricos.....            | 57 |
| 5.3.1 | El antipatinaje de las máquinas de tracción.....               | 58 |
| 5.3.2 | La conducción optimizada.....                                  | 60 |
| 5.3.3 | El pilotaje automático.....                                    | 61 |
| 5.4   | Análisis de consumo de energía en el arranque de un motor..... | 62 |

**Cuarta parte**  
**ESCENARIO Y PERSPECTIVA DEL DESARROLLO DE LOS**  
**SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICOS**

**Capítulo VI**  
**Nuevas tecnologías aplicadas al sistema de transporte eléctrico**

|     |                                                       |    |
|-----|-------------------------------------------------------|----|
| 6.1 | Uso de semiconductores en locomotoras eléctricas..... | 65 |
|-----|-------------------------------------------------------|----|

|       |                                                                                                             |           |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2   | Introducción al control por medio de microprocesadores.....                                                 | 66        |
| 6.3   | Beneficios y bondades que brinda la aplicación de la tracción eléctrica.....                                | 73        |
| 6.4   | Aplicación de la tracción eléctrica en la actualidad y a futuro<br>en la ciudad de México.....              | 74        |
| 6.4.1 | Elección del medio de transporte apropiado y trazado<br>adecuado de las líneas de transporte colectivo..... | 75        |
| 6.4.2 | Modernización oportuna de vehículos e instalaciones<br>dependiendo de cada caso.....                        | 75        |
| 6.4.3 | Mejora constante del servicio.....                                                                          | 76        |
| 6.4.4 | Tarifas acordes al nivel de servicio.....                                                                   | 76        |
| 6.4.5 | Propaganda y publicidad.....                                                                                | 77        |
| 6.4.6 | Selección apropiada del personal.....                                                                       | 77        |
| 6.5   | Los sistemas de tracción eléctrica a la vanguardia.....                                                     | 77        |
|       | <b>CONCLUSIONES.....</b>                                                                                    | <b>81</b> |
|       | <b>ÍNDICE ADICIONAL DE FIGURAS Y TABLAS.....</b>                                                            | <b>90</b> |
|       | <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                                                                    | <b>94</b> |

---

**ÍNDICE ADICIONAL DE FIGURAS Y TABLAS**

| <b>Figura</b> | <b>Nombre</b>                                                                          | <b>Página</b> |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Figura 1.1    | Transporte a través de tracción animal (México 1890)                                   | 1             |
| Figura 1.2    | Estación de tranvías de la Plaza Mayor de la ciudad de México (1890)                   | 4             |
| Figura 1.3    | Tren TGV francés                                                                       | 4             |
| Figura 1.4    | PCC Ruta Estadio Azteca (México 1955)                                                  | 5             |
| Figura 1.5    | Red de tren ligero de la Ciudad de México                                              | 6             |
| Figura 1.6    | Selección de parte del usuario en el modo de transporte más adecuado a sus necesidades | 7             |
| Figura 1.7    | Metro férreo 1998                                                                      | 10            |
| Figura 1.8    | Construcción de la línea 8 del STC Metro                                               | 12            |
| Figura 1.9    | <i>Tren ligero actual de la ciudad de México</i>                                       | 13            |
| Figura 2.1    | El metro, sistema cómodo, seguro, económico y novedoso                                 | 16            |
| Figura 2.2    | Sistema de transporte novedoso y revolucionario                                        | 20            |
| Figura 2.3    | Sistema de tracción eléctrica actual de la ciudad de México                            | 18            |
| Figura 2.4    | Esquema ilustrativo sobre un sistema de transporte eléctrico                           | 22            |
| Figura 2.5    | Línea de transmisión de energía eléctrica                                              | 23            |
| Figura 2.6    | Planta hidroeléctrica Chicuasén Chiapas                                                | 24            |
| Figura 2.7    | Planta geotermoelectrica Los Azufres Michoacán                                         | 24            |
| Figura 2.8    | Diferentes tipos de contacto en el tercer carril                                       | 25            |
| Figura 2.9    | Descargadores de antenas                                                               | 26            |
| Figura 2.10   | Descargador de aislador                                                                | 26            |
| Figura 2.11   | Diferentes tipos y formas de aisladores                                                | 27            |
| Figura 3.1    | Esquema ilustrativo del orden de los carros en un tren eléctrico                       | 28            |
| Figura 3.2    | Vías actuales del sistema de tren ligero de la ciudad de México                        | 29            |
| Figura 3.3    | Esquema de ilustración de la suspensión primaria y secundaria                          | 32            |
| Figura 3.4    | Evolución de la estructura de los carros de trenes eléctricos                          | 33            |

---

|            |                                                                                               |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1 | Etapas de perforación de un pozo petrolero                                                    | 39 |
| Figura 4.2 | Beneficio que aporta el metro a una gran mayoría de personas de toda clase social             | 40 |
| Figura 4.3 | Nuevo diseño de trenes que busca confort y seguridad para los pasajeros                       | 41 |
| Figura 4.4 | Comparación técnica del espacio requerido para diferentes tipos de transporte                 | 42 |
| Figura 4.5 | Mejora de servicios públicos de transporte                                                    | 43 |
| Figura 4.6 | La promoción del transporte colectivo contribuye en beneficio económico de todos los usuarios | 45 |
| Figura 4.7 | Nuevas opciones de transporte eléctrico en las ciudades                                       | 46 |
| Figura 4.8 | Diferentes correspondencias en la trayectoria del STC Metro                                   | 48 |
| Figura 4.9 | Otras formas de transporte alternativas de nula contaminación                                 | 49 |
| Figura 5.1 | Representación gráfica de la fórmula de Daves                                                 | 53 |
| Figura 5.2 | Situación de un tren al encontrarse con una pendiente                                         | 54 |
| Figura 5.3 | Curvaturas que se presentan en la trayectoria del tren y que tiene que vencer su resistencia  | 55 |
| Figura 5.4 | Esquema que representa las fuerzas aplicadas sobre una rueda de tren                          | 59 |
| Figura 5.5 | Fuerzas aplicadas a una rueda                                                                 | 59 |
| Figura 5.6 | Esquema básico de la estructura de un automatismo                                             | 61 |
| Figura 6.1 | Talleres de mantenimiento para los trenes del STC Metro                                       | 66 |
| Figura 6.2 | Edificio donde se localiza el Tablero de Control Óptico                                       | 67 |
| Figura 6.3 | Rampa de ascenso y descenso del STC para personas discapacitadas                              | 68 |
| Figura 6.4 | Subestación Eléctrica de Alta Tensión                                                         | 69 |
| Figura 6.5 | Gráfico ilustrativo de una sección de fibra óptica utilizada en transmisión de datos          | 70 |
| Figura 6.6 | Trenes disponibles después del servicio de mantenimiento mayor o menor                        | 73 |
| Figura 6.7 | Congestionamiento vial en la ciudad de México                                                 | 74 |
| Figura 6.8 | Aspecto agradable de los vehículos de tracción eléctrica                                      | 76 |
| Figura C.1 | Prospecto de una línea de transporte masivo                                                   | 87 |

---

|              |                                                                                                         |               |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Figura C.2   | eléctrico subterránea<br>Transporte masivo eléctrico elevado                                            | 87            |
| Figura C.3   | Proyección de un sistema de tracción eléctrica superficial                                              | 88            |
| <b>Tabla</b> | <b>Nombre</b>                                                                                           | <b>Página</b> |
| Tabla 1.1    | <b>Periodos evolutivos de la tracción eléctrica</b>                                                     | 2             |
| Tabla 1.2    | Panorama histórico del transporte eléctrico                                                             | 3             |
| Tabla 1.3    | Etapas históricas de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro                             | 8             |
| Tabla 1.4    | Actualidad en la Red del Sistema de Transporte Colectivo Metro                                          | 9             |
| Tabla 1.5    | Ciudades del mundo que cuentan con sistema de transporte tipo Metro (A,B,C)                             | 11            |
| Tabla 2.1    | Clasificación general de los sistemas de transporte eléctricos                                          | 15            |
| Tabla 2.2    | Limitaciones y ventajas del sistema de corriente directa                                                | 17            |
| Tabla 2.3    | Ventajas y desventajas de un sistema de corriente monofásica de baja frecuencia                         | 18            |
| Tabla 2.4    | Ventajas y desventajas de los sistemas de corriente monofásica con frecuencia industrial y alta tensión | 19            |
| Tabla 2.5    | Tipos de plantas generadoras                                                                            | 23            |
| Tabla 3.1    | <i>Elementos adicionales al interior de la locomotora eléctrica</i>                                     | 31            |
| Tabla 3.2    | Factores que determinan las unidades básicas óptimas para ofrecer un buen servicio al usuario           | 34            |
| Tabla 3.3    | Ventajas que ofrece el motor de c.d. con excitación independiente                                       | 35            |
| Tabla 3.4    | Tipos de frenado que se conocen actualmente aplicables a la tracción eléctrica                          | 37            |
| Tabla 3.5    | Ventajas y desventajas que ofrece la utilización del freno eléctrico                                    | 38            |
| Tabla 4.1    | <b>Pasajeros transportados en el STC Metro (Fuente: Informe anual del Metro 1997)</b>                   | 44            |



|           |                                                                 |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 4.2 | <b>Características del STC Metro de la ciudad de México</b>     | 51 |
| Tabla 4.3 | Características del STE en la ciudad de México                  | 52 |
| Tabla 5.1 | Condiciones para un rodamiento satisfactorio o no satisfactorio | 60 |
| Tabla 6.1 | Protección contra sobretensiones y sobrecorrientes              | 65 |
| Tabla C.1 | Características del vehículo privado                            | 81 |
| Tabla C.2 | Características del transporte privado                          | 82 |
| Tabla C.3 | Grados de independencia de los sistemas de transporte           | 82 |

## INTRODUCCIÓN

El transporte ha sido un factor primordial desde el inicio de los tiempos, siempre se ha tenido la necesidad de trasladar personas y mercancías de un lugar a otro, ya sea a un sitio cercano o muy alejado, esto debido a que la estructura de las ciudades no es planeada con anterioridad y a que la demanda de servicios como el transporte surge en cuanto los lugares de interés de diversa índole (laboral, recreativo, religioso, etc) se localizan distantes de los domicilios o lugares de residencia de la comunidad.

En las últimas décadas el incremento en la necesidad de transporte dio origen a una expansión masiva del vehículo automotor de combustión interna, creando una problemática de interés general para los habitantes que ha superado los esquemas de control afectando de manera directa la integridad física y mental de los individuos.

Los problemas que ha originado el incremento excesivo de vehículos particulares de combustión son: La contaminación ambiental; aspecto que afecta gravemente la salud del ser humano, el aumento de tiempo de traslado de un lugar a otro, la necesidad de mayor infraestructura vial (ejes viales, viaductos, estacionamientos etc), y muchos incrementos en la demanda de energéticos utilizados para satisfacer el consumo de los vehículos automotores.

Por tal motivo surge el interés de proponer y sobresaltar la importancia que tiene la utilización de los sistemas de tracción eléctrica, pieza fundamental de este trabajo, que intenta motivar a la sociedad y a los funcionarios encargados de implementar medidas para tratar de atenuar los efectos negativos descritos anteriormente.

En la primera parte se plasma un panorama sobre el descubrimiento, el desarrollo y el impulso que han ofrecido los sistemas de tracción eléctrica a la sociedad desde su origen, en esta parte se tiene como base el estudio del Sistema de Transporte Colectivo Metro, en el que se bosquejan sus características principales hasta la actualidad, detallando su infraestructura que ha ofrecido una importante alternativa de transporte en la ciudad de México y su zona conurbana.

La segunda parte intenta detallar los componentes principales de una sistema de tracción eléctrica: Componentes mecánicos, eléctricos, y de infraestructura para su implementación en determinadas condiciones de operación. En el capítulo tercero se trata un tema importante como es la alimentación eléctrica de los sistemas de tracción y además se manejan los diferentes tipos de frenado, dentro de los cuales aparece el freno recuperativo que más adelante se profundizará su importancia y relación directa con el consumo y la eficiencia de la energía eléctrica, tema de interés actual que involucra ahorro en inversiones económicas y que claramente se demuestra en la operación del STC Metro de la ciudad de México.

Dentro del cuarto capítulo se refleja la importancia que tendría la consideración para tomar en cuenta los sistemas tales como el Metro, Metro Ligero y Trolebuses como una opción viable para construir una estructura sólida en la red de transporte de nuestro país y en donde la

demanda sea la suficiente para hacer que un proyecto de esta magnitud tenga consecuencias positivas para la sociedad y para el medio en el que vivimos.

Para la tercera parte de esta investigación se hace el énfasis en analizar la operación de un tren eléctrico, ver su rendimiento para después exhibir que existen maneras de hacer más aceptables los consumos de energía, para dar pauta a los usuarios de elegir el medio de transporte que contenga características superiores que en otros sistemas de transporte se vean limitadas, tales como: Frecuencia, seguridad, comodidad y continuidad en su servicio.

Dentro de la cuarta parte se involucraron los perfeccionamientos y la evolución que ha tenido en los trenes eléctricos en su estructura interna, desde los procesos meramente electromecánicos hasta llegar a ser controlados mediante el uso de microcontroladores, gracias a las innovaciones actuales de la electrónica de estado sólido. Aquí también se llega al objetivo primordial que inspira la realización de esta documentación en donde se motiva a concienciar que la mejor forma de cambiar la estrategia del transporte en general es adoptando esta idea de implementar como estructura filiar al transporte masivo eléctrico para que a partir de él se deslinden las demás ramas del transporte, para tener como finalidad esencial la demanda de transporte cubierta en su totalidad, con las mejores características posibles para el usuario y además como extra no se violente más al medio ambiente como se ha hecho hasta ahora.

**Primera parte**  
**ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO**

**Capítulo I**  
**Evolución histórica del transporte**

**Transporte a través del tiempo en el mundo**

El transporte ha sido desde el inicio de los tiempos un factor importante en el progreso y desarrollo de los pueblos y civilizaciones, tanto que de manera sistematizada ha ido evolucionando de forma drástica y sorprendente, desde la tracción mediante animales (Figura 1.1), hasta el día de hoy que contamos con sorprendentes sistemas como el tren de levitación magnética.



**Figura 1.1 Transporte mediante tracción animal (México 1890)**

.El **transporte** y el **consumo de energía** van íntimamente ligados, con la contaminación atmosférica, que diariamente es percibida de manera directa por cada uno de nosotros al respirar e inhalar diferentes gases, producidos por diversas fuentes contaminantes, tales como: Industrias, transportes, y algunos otros, incrementando las enfermedades alérgicas, degradando nuestro nivel de vida en todos los sentidos.

Una solución alternativa la brinda el transporte eléctrico masivo, que debemos considerar como forma de transporte, aprovechando la tecnología ecológica.

En relación con este tipo de transporte, el **motor eléctrico** comparado con el motor de combustión interna tiene enormes ventajas para su utilización y mayor aplicación; por ejemplo en trenes, tranvías y trolebuses.

El motor eléctrico, mecánicamente es más simple y eficiente que los de combustión interna, ya que tiene menos piezas y únicamente genera movimiento rotativo, en lugar de mecanismos más complicados y con movimientos alternos y deslizantes, que producen mucha **pérdida de energía** y desgaste. Por otra parte, el rendimiento de la energía eléctrica en el transporte es más eficiente que el de los combustibles fósiles (petróleo, gasolina o gas).

En la evolución del transporte que emplea electricidad como fuente de energía, podemos remontarnos a la inauguración de la primera **línea férrea comercial eléctrica** en Berlín en 1881; estos sistemas no contaban con una tecnología completa, puesto que se trataba de coches de tracción animal a los que se les adaptaba un motor eléctrico dentro del coche y se les conectaba a los ejes mediante cintas o conexiones flexibles; además la conexión del vehículo con la red eléctrica no era la adecuada.

En 1887, **Frank Sprague** desarrolló un sistema que permitía conectar de manera directa el motor eléctrico a los ejes, dicha innovación se empleó en Boston, en la red más extensa de tranvía de la época.

### La aparición de la tracción eléctrica

Se puede decir que a partir del surgimiento de la tracción eléctrica, se presentan tres periodos en su avance tecnológico (Tabla 1.1).

| LA TRACCIÓN ELÉCTRICA EN LA HISTORIA                             |                                                      |                                                                                |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Época de acontecimiento                                          | Hecho histórico                                      | Desarrollo realizado                                                           |
| <b>Primer periodo (hasta 1905)</b>                               | Aparición del motor eléctrico de corriente continua. | La locomotora eléctrica se vuelve autónoma.                                    |
| <b>Segundo periodo</b>                                           | Se desarrolla el transformador de corriente alterna. | La energía se puede producir en lugares lejanos a la máquina.                  |
| <b>Tercer periodo (hasta antes de la Segunda Guerra Mundial)</b> | Aparición de los convertidores.                      | Es posible convertir la corriente alterna en continua dentro de la locomotora. |

**Tabla 1.1 Periodos evolutivos de la tracción eléctrica**

Como puede verse hubo muchos tipos de transporte además de los mencionados, pero ninguno ofrecía ventajas como las que da el transporte eléctrico, es por ello la importancia de su desarrollo a través del tiempo, sus diversas modificaciones y su amplia tendencia.

Así, surge el interés de estudiar y analizar las bondades que la tracción eléctrica ofrecía, respecto a las ofertas existentes en la época.

Justamente así se avanzó en una **extensa perspectiva** de los sucesos que han marcado la pauta en cuanto a tracción eléctrica se refiere (Tabla 1.2).

| VISIÓN HISTÓRICA DEL TRANSPORTE ELÉCTRICO |                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fecha del acontecimiento                  | Suceso ocurrido respecto a la tracción eléctrica                                                                                                                |
| Finales del S. XIX                        | Descubrimiento de las primeras máquinas rotativas. Comienzo de la utilización de la electricidad en la tracción ferroviaria.                                    |
| Berlín 1879                               | Siemens y Halske construyen una pequeña locomotora eléctrica para una exposición industrial.                                                                    |
| EEUU 1888                                 | Puesta en servicio de 33 líneas ferroviarias con <b>210 [km]</b> y 265 vehículos.                                                                               |
| Londres 1890                              | Se aplica la tracción eléctrica en un servicio metropolitano inaugurándose la primera línea de metro.                                                           |
| Alemania 1898                             | Se pone por primera vez en funcionamiento un monorraíl en una línea ferroviaria.                                                                                |
| E.E.U.U. 1903                             | Dos automotores eléctricos, uno construido por Siemens, y otro que alcanzaba la velocidad de <b>210 [km/h]</b> , siendo los más rápidos de la época.            |
| Siglo XX                                  | Desarrollo a gran escala de electrificaciones en líneas ferroviarias en Estados Unidos y Europa, electrificación en corriente continua, monofásica y trifásica. |
| España 1946                               | Se aprueba Plan de Electrificación a <b>3000 [V]</b> , esto con la finalidad de conseguir economía en las instalaciones.                                        |
| Japón 1964                                | Se inaugura la línea que alcanza hasta <b>240 [km/h]</b> por donde circulaban los llamados "trenes bala".                                                       |

**Tabla 1.2 Panorama histórico del transporte eléctrico**

El primer **transporte masivo en México** lo representaron los tranvías que circulaban por el centro de la ciudad (Figura 1.2), haciendo a los habitantes accesibles los sitios más importantes de aquella época como: Plazas, mercados, sitios de recreo y algunos de interés personal y tradicionales.



**Figura 1.2 Estación de tranvías de la Plaza Mayor de la Ciudad de México (1890)**

A partir de este momento, la tracción eléctrica ha evolucionado de manera que, existen trenes capaces de alcanzar velocidades superiores a las convencionales con elevado nivel de seguridad, llegando a tener el **Tren de Gran Velocidad (TGV francés** de la Figura 1.3).



**Figura 1.3 Tren TGV francés**

Otro ejemplo son los **trenes Eurostar** que unen París y Bruselas con Londres; o también las últimas generaciones de trenes balas que alcanzan velocidades hasta de 300 [km/h], y respecto al **TGV francés actual**, además de que llega a alcanzar **515.3 [km/h]** con su nuevo sistema de suspensión neumática proporciona a los trenes mayor estabilidad.

Este tipo de transporte preveía su importancia desde sus inicios, ya que el aumento en la **contaminación** de la ciudad de México se acercaba de manera rápida a la que actualmente se padece en el año 2007.

Debido a esto se han desarrollado numerosos esfuerzos para contribuir a resolver los problemas críticos del transporte y la contaminación en el **Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM)**.

### Desarrollo en el mundo y en México de la tracción eléctrica

En México se multiplicó durante el porfiriato el número de kilómetros de vías férreas, lo que llevó a un auge del comercio y de la minería que no se había visto hasta esa época.

En cierto aspecto, el **tranvía PCC** (Figura 1.4) ofreció su servicio en la ciudad hasta la década de los ochenta y fue el antecedente inmediato del moderno tren ligero.



Figura 1.4 PCC Ruta Estadio Azteca (México 1955)

Los **tranvías** después de la primera mitad del siglo XIX sufrieron una importante transformación al cambiar la tracción de sangre por la eléctrica. La idea de aplicar el motor eléctrico como órgano de tracción de los tranvías data de 1879.



La Compañía de Ferrocarriles del Distrito Federal inauguró el 15 de enero de 1900, el servicio de la primera línea electrificada de tranvías, que iba del Zócalo a Tacubaya, y posteriormente hasta Tlalpan; con ello, iniciaba el reemplazo de los tradicionales **tranvías de mulitas o de sangre**.

El 19 de abril de 1947 se decretó la creación de la empresa denominada *Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal*, donde actualmente se coordina lo relacionado con el tren ligero y los trolebuses en la Ciudad de México.

El **tren ligero** de la ciudad de México (Figura 1.5) da servicio a tres importantes Delegaciones políticas (Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco), a través de sus 16 estaciones y dos terminales respectivamente; cuenta con 16 trenes dobles acoplados con doble cabina de mando, éstos tienen una capacidad para transportar 374 pasajeros por cada unidad, de manera segura y confiable.



Figura 1.5 Red de tren ligero de la ciudad de México  
(Fuente: Sistema de Transporte Eléctrico STE)

Una vez creado este organismo, comenzaron los planes para reestructurar y renovar el servicio. Un primer esfuerzo para poner a tono el nivel de los transportes de tracción eléctrica, fue la adquisición de un nuevo tipo de **tranvía denominado PCC**.

En ese mismo año salió a dar servicio de las instalaciones de Indianilla el **tranvía 2000**, único carro de este tipo, hasta que en agosto de 1953 el Jefe del Departamento del DF., Lic. Ernesto P. Uruchurtu ordenó la compra de 91 unidades más.

La flota vehicular asignada originalmente a esta nueva línea estuvo integrada por 17 trenes que fueron construidos mediante adecuaciones y ensambles de los antiguos tranvías PCC apoyados por asesoría extranjera; sin embargo, debido a la antigüedad de varios componentes, las unidades presentaban frecuentes averías que interrumpían la **continuidad** del servicio, por lo que se retiraron de operación, y en el año de 1990 se adquirieron nuevos trenes.

La década de los años sesenta fue testigo de nuevos cambios en materia de transporte público. El 29 de abril de 1967 apareció en el **Diario Oficial** el decreto de creación del **Sistema de Transporte Colectivo (STC)** para construir, operar y explotar un tren rápido con recorrido subterráneo y superficial en el Distrito Federal. Algunos meses después, el **19 de junio de 1967**, se inició oficialmente la construcción del **Metro de la ciudad de México**.

Nuestra ciudad, con una enorme extensión territorial, y con una población numerosa, necesitaba contar con un sistema de transporte rápido; dicho transporte debía tener novedosas características que orillarían al usuarios preferir desplazarse en él, es decir, la elección de transportarse en el Metro (Figura 1.6) surgiría con base en las limitaciones de otros medios.



**Figura 1.6 Selección de parte del usuario en el modo de transporte más adecuado a sus necesidades**

La actual red del Sistema de Transporte Colectivo Metro se divide históricamente en seis etapas basadas en sus periodos de construcción (Tabla 1.3). Cada una constituye un eslabón en el logro de obtención de **transporte confiable y seguro** para una considerable cantidad de usuarios.

| <b>Etapas de construcción y fecha</b>                                             | <b>Línea(s) construidas durante la etapa</b>                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Total de kilómetros construidos</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>1<sup>a</sup></b><br>(del 19 de junio de 1967 hasta el 10 de junio de 1972)    | Se construye la línea 1 en el oriente que va de Zaragoza a Chapultepec, la línea 2 de Tacuba a Taxqueña y la línea 3 de Tlatelolco a Hospital General.                                                                                                                       | <b>42.4</b>                            |
| <b>2<sup>a</sup></b><br>(del 7 de septiembre de 1977 hasta meses finales de 1982) | Prolongación de la línea 3 hacia el norte de la ciudad (Tlatelolco a la Raza) y hacia el sur (Hospital General a Zapata), además del inicio de construcción de la línea 4 (Martín Carrera a Santa Anita) y línea 5 (Pantitlán a Politécnico) siendo ésta última en 3 etapas. | <b>37.1</b>                            |
| <b>3<sup>a</sup></b><br>(principios de 1983 hasta finales de 1985)                | Prolongación de línea 3 de Zapata a Universidad, la línea 1 de Zaragoza a Pantitlán y la línea 2 de Tacubaya a Cuatro Caminos. Además se inició la construcción de la línea 6 (tramo del Rosario a Instituto del Petróleo) y la línea 7 (de Tacuba a Barranca del Muerto).   | <b>35.2</b>                            |
| <b>4<sup>a</sup></b><br>(Inicia en 1985 y concluye en 1987)                       | Ampliación de la línea 6 (de Instituto del Petróleo a Martín Carrera), y de la línea 7 (Tacuba a el Rosario) y el inicio de la línea 9 (Pantitlán a Tacubaya).                                                                                                               | <b>25.7</b>                            |
| <b>5<sup>a</sup></b><br>(Inicia en 1988 y termina en 1994)                        | Se inició la construcción de la línea A (metro férreo), se rediseño y construyó el trazo original de la línea 8 (Constitución de 1917 a Garibaldi).                                                                                                                          | <b>37.1</b>                            |
| <b>6<sup>a</sup></b><br>(Inicia en 1994 y finaliza en el 2000)                    | Se dio inicio a la construcción del metropolitano línea B (Buenavista a Garibaldi).                                                                                                                                                                                          | <b>23.7</b>                            |

**Tabla 1.3 Etapas históricas de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro**

De forma concisa podemos apreciar en la Tabla 1.4, la distribución del Sistema de Transporte Colectivo Metro en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, la fecha de su inauguración, su longitud y el total de líneas hasta el año 2005.

| No. de Línea. | Total de longitud de la línea [km] | Recorrido y total de estaciones.                                 | Fecha de final de construcción. |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>1</b>      | 1 8 . 8 2 8                        | <b>Pantitlán-Observatorio</b><br>2 0 e s t a c i o n e s         | 22 de agosto de 1984            |
| <b>2</b>      | 2 3 . 4 3 1                        | <b>Taxqueña-Cuatro Caminos</b><br>2 4 e s t a c i o n e s        | 22 de agosto de 1984            |
| <b>3</b>      | 2 3 . 6 0 9                        | <b>Indios Verdes-Universidad</b><br>2 1 e s t a c i o n e s      | 30 de agosto de 1983            |
| <b>4</b>      | 1 0 . 7 4 7                        | <b>Martín Carrera-Santa Anita</b><br>1 0 e s t a c i o n e s     | 26 de mayo de 1982              |
| <b>5</b>      | 1 5 . 6 7 5                        | <b>Pantitlán-Politécnico</b><br>1 3 e s t a c i o n e s          | 30 de agosto de 1982            |
| <b>6</b>      | 1 3 . 9 4 7                        | <b>Martín Carrera-El Rosario</b><br>1 1 e s t a c i o n e s      | 8 de julio de 1986              |
| <b>7</b>      | 1 8 . 7 8 4                        | <b>El Rosario-Barranca del Muerto</b><br>1 4 e s t a c i o n e s | 29 de noviembre de 1988         |
| <b>8</b>      | 2 0 . 0 7 8                        | <b>Garibaldi-Constitución de 1917</b><br>1 9 e s t a c i o n e s | 20 de julio de 1994             |
| <b>9</b>      | 1 5 . 3 7 5                        | <b>Pantitlán-Tacubaya</b><br>1 2 e s t a c i o n e s             | 29 de agosto de 1988            |
| <b>A</b>      | 1 7 . 1 9 2                        | <b>La Paz - Pantitlán</b><br>1 0 e s t a c i o n e s             | 12 de agosto de 1991            |
| <b>B</b>      | 2 3 . 7 2 2                        | <b>Buenavista-Ciudad Azteca</b><br>2 1 e s t a c i o n e s       | 30 de noviembre de 2000         |

**Tabla 1.4 Actualidad en la Red de Sistema de Transporte Colectivo Metro**

Los trabajos de construcción del Sistema de Transporte Colectivo en sus tres primeras líneas se hicieron solamente en 40 meses.

En un primer momento, los carros en servicio se construían en Francia. Después de un gran número de investigaciones, la empresa mexicana Constructora Nacional de Carros de Ferrocarril (CNCF), fundada en 1952 y ubicada en Ciudad Sahagún, Hidalgo, inició la producción en su planta de los primeros carros mexicanos en el año de 1975, utilizando tecnología francesa.

El 12 de agosto de 1991 se inauguró una nueva modalidad de transporte de tracción eléctrica: el **Metro férreo** (Figura 1.7), que corre de Pantitlán, Distrito Federal, a La Paz, población situada en el Estado de México.



**Figura 1.7 Metro férreo (1998)**

En todo el mundo, el Metro (Tabla 1.5) ha sido la solución óptima para la demanda de los problemas que surgen al no contar con un transporte eficiente; esto se refleja notoriamente en las grandes ciudades, ya que es el tipo de transporte urbano más cómodo, seguro, eficiente y económico que se pueda implementar, a la vez que hace posible una mayor velocidad en el desplazamiento que otros tipos de transporte urbano conocidos.

La desventaja que se refleja a simple vista es la enorme inversión que se debe aportar desde un principio para su construcción; aunque este es un gasto realmente benéfico para una gran población de recursos limitados y que a futuro brindará más ventajas como las ya mencionadas.

Existen medios de transporte alternos como el tren ligero o el trolebús, pero estos no son de la misma capacidad del Metro, son de una capacidad limitada que serían en un momento dado, incapaces de satisfacer la demanda que se solicita o que a largo plazo se necesitaría satisfacer.

| (A)                          |                              |                                  | (B)                          |                     |                 | (C)                          |                           |             |
|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------|-------------|
| Año de inicio de operaciones | Nombre de la ciudad          | País                             | Año de inicio de operaciones | Nombre de la ciudad | País            | Año de inicio de operaciones | Nombre de la ciudad       | País        |
| 1863                         | Londres                      | Gran Bretaña e Irlanda del Norte | 1966                         | Tbilisi             | Georgia         | 1981                         | Fukuoka                   | Japón       |
| 1868                         | Nueva York                   | USA                              | 1966                         | Oslo                | Noruega         | 1981                         | Yerevan                   | Armenia     |
| 1869                         | Atenas                       | Grecia                           | 1967                         | Bakú                | Azerbaijan      | 1981                         | Kyoto                     | Japón       |
| 1874                         | Estambul                     | Turquía                          | 1968                         | Rotterdam           | Holanda         | 1982                         | Helsinki                  | Finlandia   |
| 1892                         | Chicago                      | USA                              | 1969                         | Ciudad de México    | México          | 1983                         | Caracas                   | Venezuela   |
| 1896                         | Budapest                     | Hungría                          | 1971                         | Peking (Beijing)    | China           | 1983                         | Lille                     | Francia     |
| 1896                         | Glasgow                      | Gran Bretaña e Irlanda del Norte | 1971                         | Sapporo             | Japón           | 1983                         | Baltimore                 | USA         |
| 1897                         | Boston                       | USA                              | 1971                         | Munich              | Alemania        | 1984                         | Manila                    | Philippines |
| 1898                         | Viena                        | Austria                          | 1972                         | San Francisco       | USA             | 1984                         | Calcutta                  | India       |
| 1900                         | París                        | Francia                          | 1972                         | Nuremberg           | Alemania        | 1984                         | Miami                     | USA         |
| 1902                         | Berlín                       | Alemania                         | 1972                         | Yokohama            | Japón           | 1984                         | Minsk                     | Bielorusia  |
| 1906                         | Hamburgo                     | Alemania                         | 1973                         | Pyongyang           | Corea del Norte | 1985                         | Porto Alegre              | Brasil      |
| 1907                         | Filadelfia                   | USA                              | 1974                         | Seúl                | Corea de Sur    | 1986                         | Essen                     | Alemania    |
| 1913                         | Buenos aires                 | Argentina                        | 1974                         | São Paulo           | Brasil          | 1986                         | Vancouver                 | Canada      |
| 1919                         | Madrid                       | España                           | 1974                         | Praga               | Republica Checa | 1987                         | Al-Qahirah [Cairo, Kairo] | Egipto      |
| 1924                         | Barcelona                    | España                           | 1975                         | Santiago de Chile   | Chile           | 1987                         | Detroit                   | USA         |
| 1925                         | Sydney                       | Australia                        | 1975                         | Jarkov              | Ucrania         | 1987                         | Bello Horizonte           | Brasil      |
| 1927                         | Tokio                        | Japón                            | 1976                         | Washington          | USA             | 1988                         | Valencia                  | España      |
| 1933                         | Osaka                        | Japón                            | 1976                         | Bruselas            | Bélgica         | 1989                         | Guadalajara               | México      |
| 1935                         | Moscú                        | Rusia                            | 1977                         | Tashkent            | Uzbekistan      | 1990                         | Los Ángeles               | USA         |
| 1950                         | Estocolmo                    | Suecia                           | 1977                         | Amsterdam           | Holanda         | 1991                         | Monterrey                 | México      |
| 1954                         | Toronto                      | Canadá                           | 1977                         | Marsella            | Francia         | 1993                         | Napoli [Neapel]           | Italia      |
| 1955                         | Sankt-Peterburg (Leningrado) | Rusia                            | 1977                         | Kobe                | Japón           | 1995                         | Shanghai                  | China       |
| 1955                         | Roma                         | Italia                           | 1978                         | Lyón                | Francia         | 1995                         | Medellín                  | Colombia    |
| 1955                         | Cleveland                    | USA                              | 1979                         | Río de Janeiro      | Brasil          | 1995                         | Bilbao                    | España      |
| 1957                         | Nagoya                       | Japón                            | 1979                         | Hong Kong           | China           | 1996                         | Taipei [Taipeh]           | Taiwan      |
| 1959                         | Lisboa                       | Portugal                         | 1979                         | Atlanta             | USA             | 1999                         | Krung Thep [Bangkok]      | Thailandia  |
| 1960                         | Kiev                         | Ucrania                          | 1979                         | Bucarest            | Rumania         | 2000                         | Tehran [Teheran]          | Irán        |
| 1964                         | Milán                        | Italia                           | 1980                         | Tianjin             | China           | 2001                         | Brasilia                  | Brasil      |
| 1964                         | Montreal                     | Canada                           | 1981                         | Melbourne           | Australia       |                              |                           |             |

Tabla 1.5 Ciudades del mundo que cuentan con sistema de transporte tipo Metro (A/B/C)

#### 1.4 Actualidad en el Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC México)

Debido al crecimiento masivo y a la concentración de la población de la ciudad de México en las últimas décadas, la demanda de un transporte que cumpla con las características óptimas ideales (**rápido, seguro, eficiente y no contaminante**) dio pie a dar cambios en materia de transporte público (Figura 1.8).



**Figura 1.8 Construcción de la línea 8 del STC Metro**

La construcción del Metro de la ciudad de México no fue una tarea fácil; debido al tipo de suelo y a los movimientos telúricos que ocurren con mucha incidencia, debido a esto fue necesario realizar estudios profundos a fin de garantizar la seguridad y la integridad física de los usuarios de este transporte.

Actualmente el Metro tiene normas de seguridad que permiten brindar un servicio con un alto nivel; parte de esto se ve reflejado en los modernos **Puestos Centrales de Control (PCC)**, donde se toman decisiones importantes en la circulación de los trenes.

Viendo la historia del transporte eléctrico en México, se afirma que los antiguos **tranvías eléctricos** heredaron sus características básicas a los actuales trolebuses; y siendo realistas observamos que constituyen la base de nuestro actual Metro.

En el Metro se cuenta con una serie de mantenimiento preventivo y correctivo en los trenes que circulan, instalaciones, vías y equipos, para garantizar su eficiencia al máximo.

Todo lo anterior no basta; es necesario ir renovando día con día el concepto de transporte público, y tratar de ampliar el horizonte e ir más allá para hacer más integral este servicio en beneficio de la sociedad mexicana.

El **Programa Integral de Transportes** y el **Plan Maestro de Transportes Eléctricos** establece diferentes proyecciones para los años 2003, 2009 y 2020 para la red general de transportes eléctricos que comprende la configuración definitiva de 27 líneas del Metro, incluyendo las existentes:

- 10 líneas en operación con 201 [km] en el Distrito Federal
- 13 líneas de Metro de rodamiento neumático
- 2 líneas de tracción tipo férreo (la de Rosario-Cuautitlán y la de Santa Clara-Coacalco)
- 9 líneas de tren ligero incluida la existente entre Taxqueña y Xochimilco (Figura 1.9)

En suma se tendría una red de transporte masivo eléctrico de 483 [km]. Asimismo, día a día se debe sensibilizar en lo posible a las personas a utilizar un sistema colectivo de transporte, e ir reduciendo el transporte individual, esta medida daría como resultado una reducción en problemas de congestión, contaminación y accidentes.



**Figura 1.9** Tren ligero actual de la ciudad de México



El proyecto a futuro más cercano es el llamado **tren suburbano**, que planea una ruta de Buenavista a Cuautitlán, con una longitud aproximada de 25 [km], y que podría operar a mediados del año 2008.

Este proyecto pretende beneficiar a miles de futuros usuarios que gastan valioso tiempo de viaje actualmente, útil en alguna otra actividad productiva, y no sólo tiempo perdido en el traslado de un lugar a otro.

La licitación a otorgarse será por 30 años para prestar el Servicio Público de Transporte Ferroviario Suburbano en la ruta Buenavista-Cuautitlán, así como para el uso y aprovechamiento de los bienes inmuebles.

Los inmuebles que comprende la licitación son:

- Un taller para mantenimiento de locomotoras y otro para carros
- La terminal Buenavista
- Los terrenos para construir la terminal Cuautitlán
- Las cinco estaciones intermedias que son Tultitán, Lechería, San Rafael, Tlalnepantla y Fortuna

Por tanto, el Servicio Público de Transporte Ferroviario Suburbano tendrá una longitud aproximada de 27 [Km], contará con dos terminales y cinco estaciones intermedias, previéndose conexión en la estación Fortuna con la Línea 6 del Metro (estación Ferrería) y con la Línea B del Metro, en la terminal Buenavista.

## Capítulo II

### Los sistemas de tracción eléctrica

#### 2.1 Clasificación general de los sistemas de tracción eléctrica

El sistema eléctrico de transporte urbano ha solucionado en las grandes ciudades las demandas y necesidades de trasladar **mercancías y personas**; actualmente está considerado como un sistema sobresaliente desde la mitad del siglo XIX y principios del XX.

Los transportes de fuerza motriz eléctrica tienden a ser los **transportes del futuro**. Los sistemas de transportes eléctricos comprenden:

- Tranvías
- Metros
- Trolebuses
- Tren ligero

Los **transportes eléctricos** se pueden clasificar conforme a varios criterios. (Tabla 2.1)

| CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS TRANSPORTES ELÉCTRICOS |                                                             |                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Criterio                                            | Tipo                                                        | Ejemplos                                                                                                                                       |
| Por su uso                                          | 1. Urbanos<br>2. Interurbanos                               | 1. Tranvías, trolebuses, metro<br>2. Trenes, metro                                                                                             |
| Considerando la vía                                 | 1. Férrea<br>2. Asfáltica                                   | 1. Trenes, tranvías, metro<br>2. Trolebuses                                                                                                    |
| Por el sistema de tomacorriente                     | 1. Superior<br>2. Inferior                                  | 1. Trenes, tranvías, trolebuses<br>2. Metro                                                                                                    |
| Considerando la corriente de alimentación           | 1. Directa<br>2. Alterna                                    | 1. Corriente directa<br>2. a) 16 2/3 [Hz] (25 [Hz])<br>b) 50 [Hz] (60 [Hz]) 3 $\phi$<br>c) 50 [Hz] (60[Hz]) 1 $\phi$                           |
| Por su carga                                        | 1. Trenes mixtos<br>2. Trenes rápidos<br>3. Trenes expresos | 1. Con paradas seguidas y velocidad media<br>2. Con paradas controladas y velocidad alta<br>3. Regímenes de recorridos y velocidades distintas |

**Tabla 2.1 Clasificación general de los sistemas de transporte eléctricos**

La evolución del metro ha sido consecuencia del conjunto de la **evolución tecnológica**. Las variaciones que se han producido en las últimas décadas hacen pensar en una marcha hacia condiciones de seguridad, comodidad y economía (Figura 2.1) difícil de imaginar hace algunos años.



**Figura 2.1** El Metro, sistema cómodo, seguro, económico y novedoso

Existen muchas ventajas que hacen del Metro un sistema de transporte **novedoso y revolucionario** (Figura 2.2), como la sustitución de la rueda metálica de los trenes por las neumáticas de caucho; un beneficio es que elimina ruidos y vibraciones, da más vida a los diferentes órganos del vehículo, ya que no existe golpeteo o algún síntoma que llegue a causar desperfecto; el precio de estos beneficios radica fundamentalmente en los costos de las refacciones aunque el mantenimiento periódico a la vía es inevitable.



**Figura 2.2** Sistema de transporte novedoso y revolucionario

## 2.2 Comparación técnica de los diferentes tipos de sistemas

### a) Sistema de corriente trifásico

Este tipo de sistema trabaja con motores **trifásicos asíncronos**, de número de polos variables.

Éstos presentan las siguientes deficiencias:

- Factor de potencia bajo
- Dificultad para el control de velocidad

El sistema de corriente trifásico fue adoptado en el norte de Italia y en Suiza, pero debido a sus desventajas fue retirado de servicio.

### b) Sistema de corriente directa

Está implementado dentro de las propias subestaciones en los puntos de alimentación de la catenaria, donde se encuentran algunos transformadores reductores y el equipo rectificador necesario.

Las tensiones reglamentadas para su uso van desde **0.75 [KV]**, **1.5 [KV]** y **3.0 [KV]**. La tensión de 0.75 [KV] se utiliza en tranvías y metros, mientras que las tensiones de 1.5 y 3.0 [KV] respectivamente en trenes.

Este tipo de sistema también presenta limitaciones y ventajas. (Tabla 2.2)

| SISTEMA DE CD                                                                                                                      |                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Limitaciones                                                                                                                       | Ventajas                                                                                                      |
| Las subestaciones para la conversión de energía son complejas y costosas.                                                          | Las subestaciones con rectificadores operan con una eficiencia alta, para todo tipo de cargas.                |
| El nivel de tensión que se debe utilizar implica tener muchas subestaciones y también secciones grandes para la catenaria.         | Las subestaciones se pueden automatizar debido a su esquema de instalación.                                   |
| Las corrientes de dispersión en la tierra producen corrosión en instalaciones adyacentes como: tuberías de agua, gas, cables, etc. | Los motores de corriente directa ofrecen características ideales para el transporte.                          |
| Se utiliza reóstato de arranque y regulación, algo que implica pérdida de energía.                                                 | Todas las máquinas alimentadas en corriente directa se adaptan fácilmente al freno reostático o recuperativo. |

**Tabla 2.2 Limitaciones y ventajas del sistema de corriente directa**

En los **equipos rectificadores** han surgido evoluciones desde que se utilizaba el grupo motor generador; después aparecieron los rectificadores a partir de vapor de mercurio hasta llegar a la actualidad, que se utilizan rectificadores tipo estado sólido.

Todas estas innovaciones tecnológicas, tanto en el área mecánica como eléctrica, han permitido que los equipos desempeñen su funcionamiento con **mayor eficiencia y rendimiento**.

*c) Sistema de corriente monofásica de baja frecuencia (16 2/3 [Hz]) y tensión de 15 [KV]*

Este tipo de sistema se adoptó en el transporte, debido a que los motores de corriente directa, tipo serie en régimen de motor universal, presentan problemas de conmutación a la frecuencia industrial; y utilizando baja frecuencia, se obtienen resultados aceptables.

Existen tres maneras fundamentalmente de satisfacer este tipo de alimentación:

- Que la producción y el **transporte de la energía** se realicen de forma directa a la frecuencia respectiva (16 2/3 [Hz]), y como equipo principal de la subestación, sólo será un transformador.
- Tener un puesto central para **convertir a la frecuencia** deseada; esto con la ayuda de máquinas de tipo motor-generador a los parámetros requeridos para el sistema de transporte. El equipo necesario implica un transformador reductor, un convertidor de frecuencia motor-generador; y un transformador elevador.
- Implementar subestaciones para tracción con convertidores individuales; entonces, cada **subestación** contaría al menos con un convertidor reductor trifásico; un convertidor de frecuencia motor-generador; y un transformador elevador.

Como todo sistema, el de corriente monofásica de frecuencia presenta ventajas y desventajas (Tabla 2.3).

| <b>SISTEMA DE CORRIENTE MONOFÁSICA</b>                                                                                                        |                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Desventajas</b>                                                                                                                            | <b>Ventajas</b>                                                                                                                                                  |
| El equipo de conversión de la energía es muy costoso y especializado.                                                                         | Como la catenaria se alimenta en alta tensión, las subestaciones están retiradas y es ligera.                                                                    |
| Se tiene baja eficiencia en los equipos de conversión, o también si se tiene el sistema propio de generación y transmisión a esta frecuencia. | La locomotora en su diseño consta de un transformador reductor, se pueden sacar varias derivaciones de tensión, logrando varias características del motor serie. |
| El motor de la locomotora (tipo serie) se enfrenta a problemas difíciles de conmutación.                                                      | Se tiene la ventaja de tener corriente alterna de baja tensión para los servicios para la locomotora.                                                            |

**Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de un sistema de corriente monofásico de baja frecuencia**

**d) Sistema de corriente monofásica, de frecuencia industrial y alta tensión (50/60 [Hz], 25 [KV])**

En este sistema se admite que las subestaciones propias del sistema de transporte se alimenten de manera directa del sistema eléctrico nacional, entre dos fases a través de un transformador monofásico que alimenta a la catenaria de una lado y del otro lado a la vía; este sistema también presenta ventajas y desventajas (Tabla 2.4).

En una locomotora eléctrica se instala un **transformador reductor**, que tiene un secundario, que alimenta el sistema rectificador y los servicios propios.

Los motores principales son de corriente directa; y actualmente el **sistema de rectificación** es del tipo estado sólido.

| <b>SISTEMA DE CORRIENTE MONOFÁSICA A FRECUENCIA INDUSTRIAL</b>                                           |                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Desventajas</b>                                                                                       | <b>Ventajas</b>                                                                                                        |
| Se provocan desequilibrios en el sistema de energía eléctrica.                                           | La alimentación de las subestaciones se hace de manera directa del sistema eléctrico nacional.                         |
| Se considera como un consumidor asimétrico.                                                              | Las subestaciones se encuentran retiradas y son sencillas, solamente con un transformador reductor y equipo anexo.     |
| La rectificación de la corriente sobre la locomotora se consideraba un problema, y se superó hasta 1955. | La catenaria es muy ligera, además tenemos que dentro de la locomotora disponemos de corriente alterna a baja tensión. |

**Tabla 2.4 Ventajas y desventajas de los sistemas corriente monofásica con frecuencia industrial y alta tensión**

**2.3 Ámbito, capacidad y tipo de alimentación utilizado en los sistemas de transporte eléctricos**

El transporte es un bien altamente **cuantitativo y específico**, ya que se tienen diferentes tipos de viajes para distintos propósitos, a diferentes horas del día, por diversos medios, y variados tipos de carga o personas. Existen factores difíciles de analizar y cuantificar; cuando se trata de estudiar al transporte (Figura 2.3), por mencionar algunos problemas, como la seguridad, comodidad o también la economía en algunos casos.

En todo momento, el **transporte es vital** para la vida cotidiana, siempre requiere un medio adecuado para optar por él; es por ello que se requiere establecer innovaciones que vayan de acuerdo con las necesidades que los usuarios de cada lugar y zona requieran.

Actualmente, la sociedad ha tomado conciencia en los problemas que genera la falta de un servicio de transporte de **calidad y eficiencia**; es por esto que en los **países industrializados** y aun en los países en desarrollo, han procurado resolver estos conflictos de manera creadora e inteligente, dando por resultado sistemas de transporte con visión y tendencias de ampliar el campo a futuro; una de estas respuestas la ha proporcionado de manera, satisfactoria, el transporte por medio de tracción eléctrica, adoptado en muchas ciudades importantes del mundo.



**Figura 2.3 Sistema de tracción eléctrica actual de la ciudad de México**

En este tipo de países, el transporte urbano se considera como un servicio social de índole análoga a la de otros servicios que brinda el Estado, tales como policía, bomberos, y ambulancias, entre otros.

En Europa, por ejemplo los transportes de superficie han sido objeto de modificaciones y perfeccionamiento; esto gracias al ingenio de los especialistas. Las metas a seguir consisten en reducir la afluencia de vehículos particulares, por una parte; y mejorar los servicios públicos en cuestión de rapidez, comodidad y costo, respectivamente.

De aquí que se presente la problemática del transporte como lo plantea Juan de Dios Ortúzar S., catedrático de la Universidad Católica de Chile “*¿Cómo satisfacer la demanda de viajes de personas con muchos propósitos distintos, a varias horas del día, y en diferentes medios, dada una red de transporte y un sistema de gestión, con una cierta capacidad de operación?*”<sup>1</sup>; Así enfocando un objetivo en específico, se facilita el análisis para tratar el servicio de transporte.

<sup>1</sup> Ortúzar, Juan de Dios, *Modelos de demanda de transporte*, 1ª ed., 3ª reimp., Alfaomega Grupo Editor, México, 2000, p.14

El servicio de transporte para un estudio se puede manejar en dos límites según su capacidad, y tomando en cuenta la distancia entre las paradas consecutivas ( $d_{PC}$ ), la aceleración máxima ( $a_{m\acute{a}x}$ ), la velocidad máxima ( $v_{m\acute{a}x}$ ) y el intervalo de duración entre paro y paro ( $I$ ).

### a) Servicio urbano

$$d_{PC} \leq 1000 \text{ [m]}$$

$$a_{m\acute{a}x} \pm 1 \text{ a } 1.3-1.4 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$v_{m\acute{a}x} \leq 100 \left[ \frac{km}{h} \right]$$

$$I \text{ de } 2 \text{ a } 3 \text{ [min.]}$$

### b) Servicio suburbano

$$d_{PC} \leq 2 \text{ a } 3 \text{ [Km]}$$

$$a_{m\acute{a}x} \pm 0.5 \text{ a } 1.0 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$v_{m\acute{a}x} \leq 100 \left[ \frac{km}{h} \right]$$

$$I \text{ de } 5 \text{ a } 10 \text{ [min.]}$$

### c) Grandes líneas

$$d_{PC} \text{ Varios [Km.]}$$

$$a_{m\acute{a}x} \pm 0.1 \text{ a } 0.5 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$v_{m\acute{a}x} \geq 200 \left[ \frac{km}{h} \right]$$

$$I \text{ de } 30 \text{ [min.] a } 1 \text{ [hr]}$$

*Nota: Valores estimados a base de la experiencia de las redes de transporte.*



## 2.4 Algunos elementos adicionales de un sistema de transporte eléctrico

Todo sistema se compone de partes que cumplen cierta tarea en específico, además de algunos elementos adicionales externos (Figura 2.4) estrictamente necesarios para cumplir con el propósito de obtener un servicio óptimo. De tal forma que para un sistema de transporte eléctrico que cumpla con los requerimientos esperados, es necesario contar con algunas partes que ayuden a alcanzar este fin.

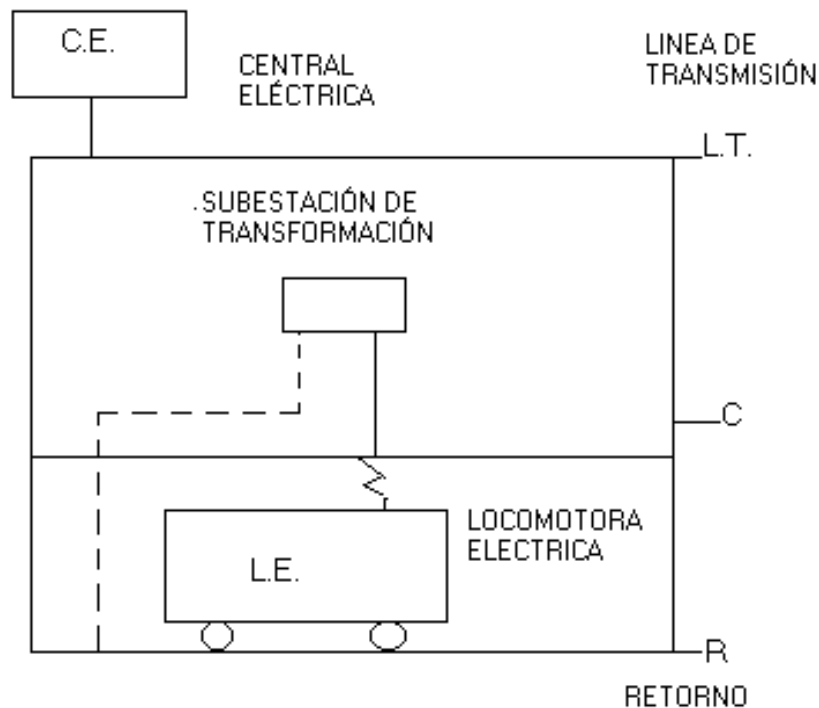


Figura 2.4 Esquema ilustrativo sobre un sistema de transporte eléctrico

Algunas **instalaciones adicionales** de un tren eléctrico son:

- Las instalaciones productoras de energía (plantas generadoras de energía eléctrica)
- Líneas de transporte de energía eléctrica (líneas de transmisión Figura 2.5)
- Acometidas de las líneas de transmisión a las subestaciones propias de los trenes eléctricos
- Catenaria (línea de contacto)
- Rieles



**Figura 2.5** Línea de transmisión de energía eléctrica (Fuente CFE)

Las **plantas generadoras** (Tabla 2.5) de energía son el conjunto de elementos (organismo, sistema) destinado a convertir o transformar en energía eléctrica (potencial o prima), que existe en cualquiera de las **fuentes de energía** conocidas.

| Planta generadora                     | Tipos                                                                                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hidroeléctricas<br>(Véase Figura 2.6) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convencionales</li> <li>• Mareomotrices</li> </ul>                |
| Termoeléctricas                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas</li> <li>• Vapor</li> </ul>                                   |
| Núcleoeléctricas                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Por fisión</li> <li>• Por fusión</li> </ul>                       |
| Ciclo combinado                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas natural</li> <li>• Agua</li> </ul>                            |
| Geotérmicas                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volcanes</li> <li>• Géiseres</li> <li>• Aguas termales</li> </ul> |

**Tabla 2.5** Tipos de plantas generadoras de energía



**Figura 2.6** Planta hidroeléctrica Chicuasén Chiapas

Dentro de las **fuentes de energía** las podemos clasificar en:

- a) **Energía renovable**, es decir, que se renueva periódicamente o de manera cíclica; ejemplos de ellas son:
  - Hidráulica
  - Eólica
  - Solar
  - Marítima
- b) **Energía no renovable**, es la forma de energía que se terminará en cierto tiempo; es decir, de los combustibles fósiles y sus derivados
- c) Casos **especiales**, son aquellos que perduren a la par de la vida de nuestro planeta, como la energía geotérmica (Figura 2.7) o la nuclear.



**Figura 2.7** Planta geotermoelectrica Los Azufres Michoacán

La línea de contacto (Figura 2.8) puede adoptar dos sistemas: Por **tercer carril** y por **catenaria**.

El primero de estos sistemas consiste en utilizar un conductor en forma de perfil de acero laminado paralelo a la vía colocado sobre apoyos aislados, los cuales reposan en las traviesas o durmientes de las vías. El vehículo eléctrico tiene un brazo que al contactar con el tercer carril, cierra el circuito eléctrico al estar con tensión.

Se obtienen las siguientes **ventajas** al utilizar tercer carril:

- Su gran rigidez hace que no experimente deformaciones sensibles al paso del tiempo
- Es un sistema más económico que el de la catenaria

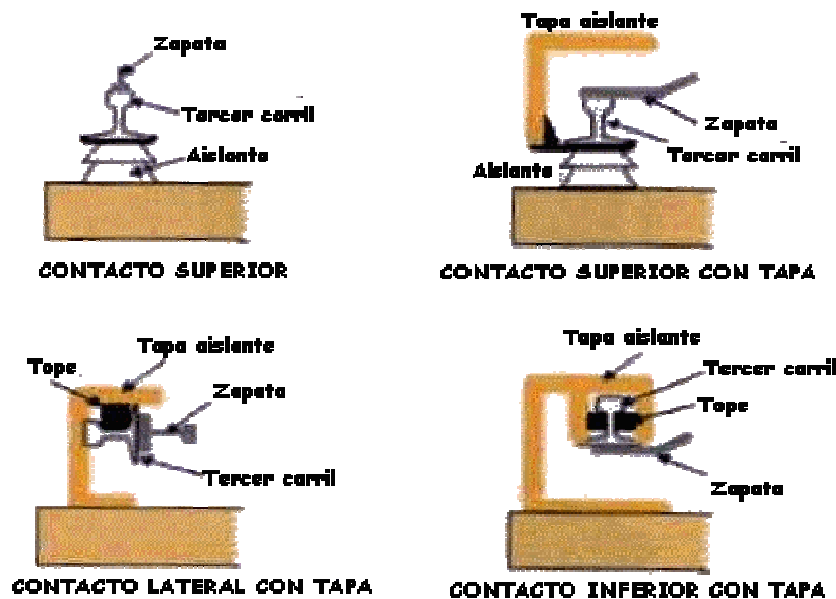


Figura 2.8 Diferentes tipos de contacto en el tercer carril

Pero también presenta algunas **desventajas**:

- Riesgo de electrocutar para personas y animales
- Estorbo en las estaciones
- Necesidad de interrumpir el tercer carril en los pasos a nivel y aparatos de vía

Como protección de la línea contra sobrecargas se instalan **descargadores de antenas** (Figura 2.9), o **descargadores en los aisladores** (Figura 2.10); y para protección contra descargas atmosféricas pararrayos coincidiendo con la protección de puesta a tierra de los postes.



Figura 2.9 Descargadores de antenas

En cuanto a la **catenaria**, al ser una instalación de alta tensión debe cumplir con reglamentos y normas de acuerdo con el **Reglamento de Alta Tensión** existente sobre protección de personas e instalaciones, el cual establece que los postes e instalaciones de alta tensión deben ponerse a tierra. Si existe circuito de retorno, los postes deben conectarse a los carriles, y si no, se conectan entre sí con ayuda de un cable auxiliar, que va conectado a tierra a intervalos regulares de distancia.

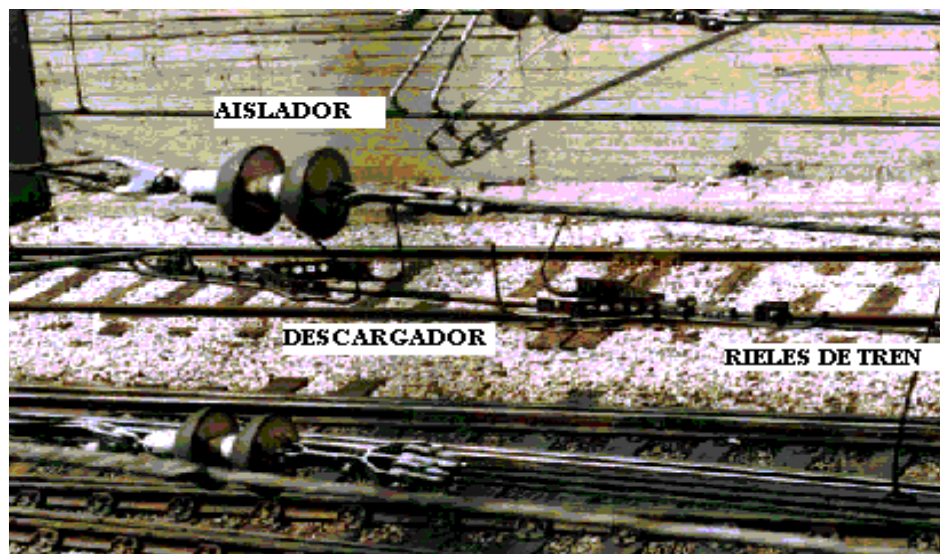


Figura 2.10 Descargador de aislador

Los **aisladores** (Figura 2.11) son los encargados de aislar la catenaria del poste. Los materiales de que están compuestos elementos son la porcelana, pero como este material es muy pesado, actualmente se utilizan materiales tales como el vidrio-resina, que son mucho más ligeros, y con gran resistencia a la tracción y flexión.

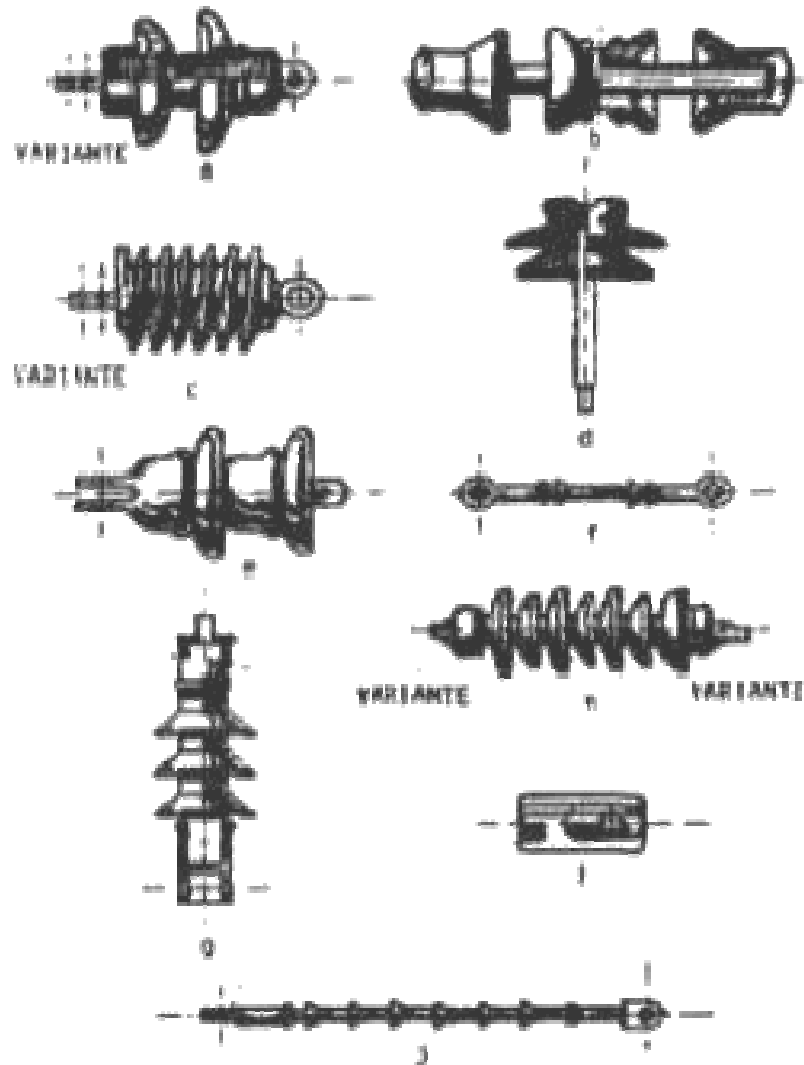


Figura 2.11 Diferentes tipos y formas de aisladores



## Segunda parte ASPECTOS BÁSICOS DEL TRANSPORTE ELÉCTRICO

### Capítulo III Componentes generales de un tren eléctrico

Un **tren eléctrico consta de dos partes fundamentales**: La parte **eléctrica** y la parte **mecánica**. Es por ello que debemos diferenciar cada una de ellas:

#### A) Parte mecánica

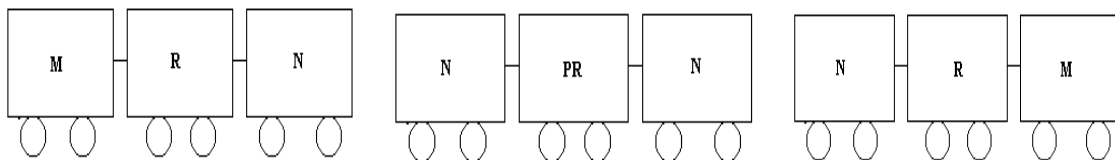
- La caja
- El bastidor
- El tren de rodadura

#### B) Parte eléctrica

- Función de potencia
- Función de control
- Función auxiliar

En un sistema de tracción eléctrica como es el Metro, medio óptimo de transporte de **gran capacidad**, que tiene su propio derecho de vía y no presenta obstaculizaciones externas por otro medio de transporte, permiten desarrollar velocidades ligeramente altas dependiendo del tramo de distancia entre estaciones, además de los equipos de seguridad instalados.

La operación del Metro siempre es por medio de varios carros por tren, llegando a los diez; en el caso específico del Metro de la Ciudad de México (Figura 3.1), el tren consta de nueve carros en el siguiente orden:



**Donde:**

- M:** es un carro motriz con cabina, en el cual integran motores, el JH control electromecánico para los motores de tracción), el chopper (control electrónico para los motores)
- N:** es un carro motriz sin cabina (tiene los mismos elementos de un carro tipo M)
- R:** es un carro remolque que tiene como elementos: el MCP (grupo motocompresor), también se encuentran las baterías de 52 celdas, el MA (grupo moto alternador)
- PR:** también es un carro remolque en el cual se instala el PA (Pilotaje Automático)

Figura 3.1 Esquema ilustrativo del orden de los carros en un tren eléctrico

Adicionalmente a esto se tiene como dato que las velocidades de operación se sitúan en el intervalo de 25 a 80  $\left[ \frac{Km}{h} \right]$ , las capacidades por carro se calculan de 120 a 250 espacios entre pasajeros sentados y de pie; las dimensiones del carro pueden ser de 16 a 23 [m], con un ancho que oscila entre 2.5 y 3.2 [m].

Se cuenta con **sistema de prepago** antes de abordar el tren, haciendo de ésta una ventaja para la rapidez del ascenso y descenso de los pasajeros; característica que no la ofrece otro sistema de transporte masivo.

Dentro de los componentes importantes, en cuanto a la infraestructura que requiere un tren eléctrico, podemos enumerar los siguientes elementos básicos:

#### a) La vía

Su geometría depende básicamente de dos condiciones (Figura 3.2):

- La forma de **trazado de la línea**; de modo que se adapte a las condiciones de la superficie del terreno.
- **Condicionantes geométricos** debidos a la circulación de vehículos, tales como los peraltes, inclinación en rasantes, entrevía, nivelación, etc.



Figura 3.2 Vías actuales del sistema de tren ligero de la ciudad de México

#### b) La señalización



Que básicamente debe cumplir con estos requisitos:

- Garantizar la **seguridad** de la circulación sin colisiones ni movimientos intempestivos de aparatos.
- Regular la **circulación** por medio de consignas preestablecidas, o según las necesidades de cada momento.

### c) La alimentación

Esta será según el tipo de tracción; en el caso de ser eléctrica, la energía se adecuará a las características que requieran, según las especificaciones de los motores de tracción y los servicios adicionales (iluminación, control, etc.).

### d) Las subestaciones

O sea puntos de paso de la energía para alimentar la línea de contacto. Las partes elementales de una subestación son:

- La parte de alta tensión que va unida a la parte de alta tensión de la red del sistema eléctrico nacional a la que esté conectado.
- Una serie de componentes que se encargan de la transformación de la energía y convierten a la tensión deseada.
- La parte que da salida a la energía que finalmente alimenta directamente la catenaria.

### e) Las estaciones

Es la parte final en la que los usuarios emplean el servicio para transporte personal y/o de mercancías, siendo ubicadas en puntos estratégicos dentro de una población urbana y de gran afluencia.

Todas estas características determinan las condiciones de operación del sistema de transporte, y hace que dependiendo de las formas intrínsecas de la infraestructura total, sea el nivel de servicio que se ofrezca y permita explotar al máximo de las propiedades de éste.

Se tiene que tomar en cuenta que desplazarse de un lugar a otro dentro de una ciudad, a medida que pasan los años, resulta cada vez más difícil y costoso, tanto en dinero y en tiempo, característica actualmente muy preciada.

### 3.1 Elementos eléctricos de un tren

Además de la fuerza motriz que se necesita para impulsar el tren, se requiere que de forma simultánea se tengan algunos servicios adicionales como son:

- Aire comprimido
- Ventilación de los motores principales
- Acondicionamiento del aire
- Alimentación de los circuitos de control y servicios propios

Existen además de los elementos mencionados, otros equipos que se encuentran dentro de la locomotora eléctrica (Tabla 3.1) y que son indispensables para un trabajo eficiente en ella.

| <b>ELEMENTOS ADICIONALES AL INTERIOR DE UN TREN ELÉCTRICO</b> |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nombre del aparato o dispositivo</b>                       | <b>Elementos que integran al sistema</b>                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Circuito principal</b>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• El tomacorriente (pantógrafo)</li> <li>• El interruptor principal</li> <li>• Los contactores</li> <li>• Los separadores</li> </ul>                                                                                |
| <b>Aparatos de mando</b>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulador de levas</li> <li>• Botones de pulso</li> <li>• Llaves posicionales</li> </ul>                                                                                                                          |
| <b>Aparatos de protección</b>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descargador autovalvular (apartarrayos)</li> <li>• Separadores de seguridad</li> <li>• Relevadores de protección</li> <li>• Fusibles</li> </ul>                                                                   |
| <b>Aparatos de señalización, medición y control</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Luces de varias clases y tipos</li> <li>• Aparato sónico (alarmas)</li> <li>• Controladores</li> </ul>                                                                                                            |
| <b>Circuitería en general</b>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cableado del circuito principal y alta tensión (arriba de los 1000 [V] respecto a tierra)</li> <li>• Cableado de circuitos auxiliares, es decir, los de control, medición y protección de baja tensión</li> </ul> |
| <b>Equipos de ejecución</b>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Servomotores eléctricos o electropneumáticos</li> <li>• Electroimanes</li> </ul>                                                                                                                                  |

**Tabla 3.1 Elementos adicionales al interior de la locomotora eléctrica**

### 3.2 Elementos adicionales mecánicos

En los **bogies**, dispositivos sobre los que se produce el movimiento, se acoplan en cada carro dos bogies que pueden ser motores (es decir, que producen tracción), o bien remolques simplemente.

El **bogie** (Figura 3.3) contiene los siguientes elementos:

- a) Un reductor
- b) Las ruedas
- c) Las cajas de grasa
- d) La suspensión primaria
- e) El sistema de frenado
- f) Las antenas
- g) Los enganches
- h) Los motores

En la Figura 3.3 se muestra el contacto con las cajas de grasa, mediante dos brazos sobre los que se apoyan los resortes de la suspensión.

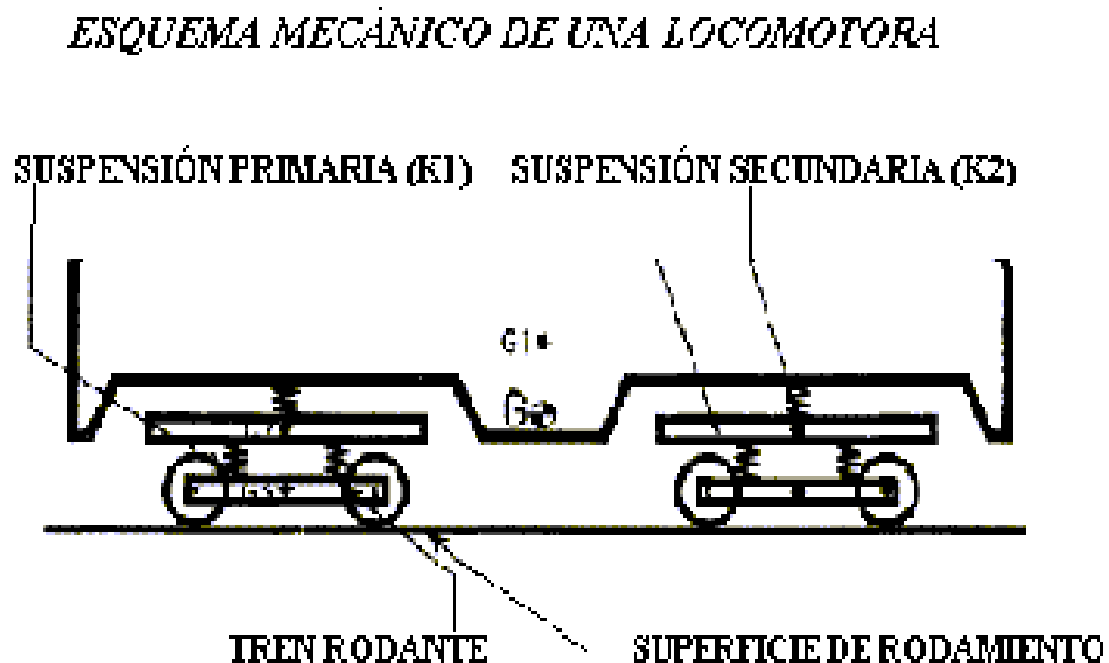


Figura 3.3 Esquema de ilustración de la suspensión primaria y secundaria

Cada uno de estos equipos dentro de la infraestructura mecánica, cumple una función en particular o específica:

Un **reductor** en cada uno de los motores de los bogies, con sus correspondientes engranajes para convertir el movimiento longitudinal en transversal.

Las **ruedas**, que son elásticas, y están diseñadas para evitar el descarrilamiento o el vuelco; así se logra mantener un contacto puntual con el carril, lo que proporciona una disminución de la resistencia al avance.

Las **cajas de grasa**, que albergan en su interior los rodamientos mediante los cuales se realiza la unión del bogie al vagón; evitando así el giro completo del vagón en las curvas, a la vez que proporcionan mayor comodidad a los pasajeros.

Los bogies han tenido una evolución a través de la historia; en la parte mecánica se han desarrollado y probado físicamente por varios años cada uno de los tipos de bogie siendo importante observar un bosquejo de ellos. (Figura 3.4)

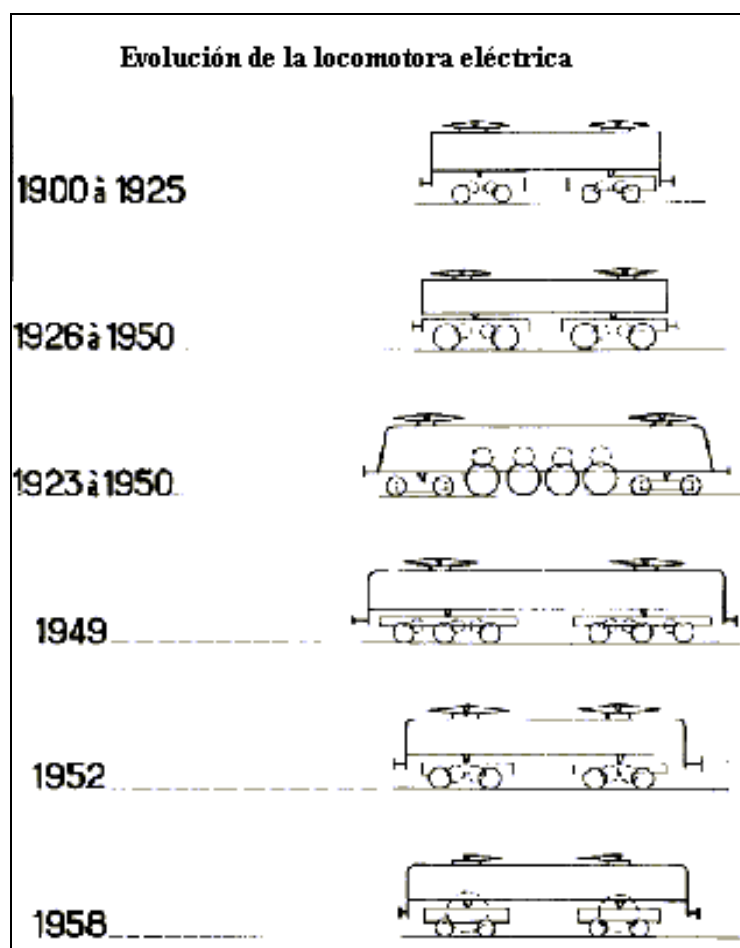


Figura 3.4 Evolución de la estructura de los carros de trenes eléctricos

La **suspensión primaria** es neumática; y su cometido es amortiguar los posibles movimientos debidos a los desniveles de la vía.

La **suspensión secundaria** sirve para contrarrestar la carga, que suponen los pasajeros que lleva cada vagón en cada momento.

El **sistema de freno** de los bogies, compuesto a su vez por dos subsistemas de frenado:

- a) Subsistema de **frenado por discos** montado sobre el eje
- b) El freno de estacionamiento

Las **antenas**, que son dos y salen del bastidor del bogie. Sirven para recoger la información del carril. Dicha información opera con el sistema de emergencia **ATO** (Operación Automática de Trenes), y el de protección **ATP** (Sistema de Protección Automática de Trenes).

Los **enganches**, con distintos sistemas de acoplamiento según para lo que se utilicen.

Algunos aspectos de importancia en los trenes es el tamaño del vehículo (Tabla 3.2), ya que una de las principales características que limita sus dimensiones es el libramiento en las curvas de la posible trayectoria; es decir, curvas con radios mínimos.

| FACTORES PARA ESTABLECER CONDICIONES ÓPTIMAS DE SERVICIO |                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Factor que interviene                                    | Características                                                                                                                                                                                          |
| Diferente tamaño de trenes                               | Deseable que se pueda ajustar en número de carros por tren, esto según la demanda de servicio, para minimizar costos de operación.                                                                       |
| Longitud mínima del tren                                 | En horarios de mínima demanda operar con trenes más cortos.                                                                                                                                              |
| Equipo mecánico y eléctrico del tren                     | Que se logre compartir los componentes en los diferentes carros para lograr un ahorro en mantenimiento, además de tener el menor número de vehículos fuera de operación debido a falta de mantenimiento. |
| Número de controles por carro                            | Por ser un equipo caro, minimizar el número de ellos y comparar costos entre una operación bidireccional (costo del vehículo) o una unidireccional (costo de la terminal).                               |
| Longitud del carro por carretilla                        | Buscar que la longitud de los carros sea la mínima indispensable, ya que el peso de estos al ser demasiado, dificulta el poder moverlos.                                                                 |
| Facilidad de mantenimiento                               | En cuanto a las dimensiones, al ser pequeños los carros facilita su transporte al taller de mantenimiento, y así es posible ofrecer un servicio más continuo.                                            |
| Utilización del material rodante                         | Debe ser utilizado de manera estructurada para no tener parados muchos vehículos.                                                                                                                        |

**Tabla 3.2 Factores que determinan las unidades básicas óptimas para ofrecer un buen servicio al usuario**

Los **motores**: Teniendo en cuenta que se consideran como unidad dos vagones de Metro, de los cuales el primero es motor y el segundo remolque. El vagón motor lleva dos bogies bimotors de corriente alterna, y los tipos de motor más utilizados son los asíncronos trifásicos y monofásicos.

Lo anterior hace ver la complejidad de un **sistema de tracción eléctrica**; es por ello que se debe tener un conocimiento amplio de la ingeniería en varias ramas, así como también, de algunas carreras afines que se involucren con el estudio de los sistemas de tracción.

### 3.3 Elementos alternos que intervienen en la tracción eléctrica

Aspectos importantes que intervienen en el funcionamiento correcto y seguro de un sistema de transporte eléctrico masivo tal como el Metro es de relevancia exponer, ya que son recursos que garantizan la eficiencia y control pleno del sistema de transporte que se trata.

#### 3.3.1 Tipos de alimentación

La propensión actual de emplear motores de corriente directa para la tracción eléctrica, se ve reflejada en las ventajas que ofrecen sus diferentes tipos de implementaciones.

Ahora bien, a pesar de las ventajas que ofrecen los motores serie, la tendencia que surge es el uso de motores de corriente directa (**CD**) de excitación independiente (Tabla 3.3).

| VENTAJAS DEL MOTOR DE CD CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ventaja                                                                          | Debido a que:                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Cada motor se controla de forma individual                                       | El conductor sólo manda una sola señal y la parte electrónica se encarga de mantener una carga equilibrada entre los motores y el control de deslizamiento sobre cada eje motriz.                                                                                                                                  |
| Alto esfuerzo motriz aún para velocidades altas                                  | El motor serie ofrecía una buena característica par velocidad, también en cuanto a su flexibilidad de adaptarse a condiciones de carga, pero si se requería mantener el esfuerzo a altas velocidades, simplemente no se lograba. En cambio el motor de CD con excitación independiente lo podía lograr fácilmente. |
| El motor con excitación independiente se adapta fácilmente al freno recuperativo | Es decir, su implementación al combinarlo con el freno recuperativo, era de notable facilidad, esto ayuda también a un ahorro de energía de forma indirecta.                                                                                                                                                       |

Tabla 3.3 Ventajas que ofrece el motor de CD con excitación independiente

Lo anterior es debido al avance en la electrónica de control moderna; es decir, que gracias al conocimiento amplio de **sensores y circuitos integrados**, la física dedicada al control puede desvanecer los fenómenos transitorios y de estabilidad; esto gracias a la velocidad de respuesta de tales componentes electrónicos.

### 3.3.2 Tipos de frenado

El sistema de frenado es una parte delicada de gran importancia en los aspectos de seguridad relacionados con el tren eléctrico; es por ello, que resulta necesario tener conocimiento de los diferentes tipos de freno que pueden implementarse en la estructura de un sistema de transporte eléctrico.

Para todo esto es necesario tomar en cuenta una serie de conceptos que ayuden a entender la teoría del frenado, tales como:

- a) **Frenado clásico:** Se basa en conseguir un trabajo resistente adicional por rozamiento de las zapatas con la periferia de las llantas de forma indirecta, que finalmente se disipa térmicamente.
- b) **Frenado en carga:** El frenado dependerá directamente de las condiciones de carga en que se encuentre el tren; es decir, vaya más o menos cargado.

Una vez que se deslizan las llantas, si se mantiene el esfuerzo ejercido por las zapatas a la rueda, se produce inevitablemente el bloqueo de la rueda. Para evitar **desgastes innecesarios** tanto en la vía como en la rueda, ni desgaste excesivo en las zapatas, resulta conveniente aplicar siempre y en todo momento un esfuerzo ejercido por las dos zapatas sobre una rueda en rotación menor o necesariamente igual al peso ejercido por la rueda sobre el carril.

Los vehículos que emplean energía eléctrica como fuerza motriz pueden equiparse con freno eléctrico, cuya realización es posible debido a la reversibilidad del **motor eléctrico**; el cual pasa a trabajar en régimen de **generador eléctrico**.

En régimen de motor (modo de funcionamiento normal), la energía que suministra la catenaria o el tercer carril, según sea el caso, se transforma en energía mecánica para hacer posible la tracción.

Cuando el tren se encuentra en situación de frenado, la energía **cinética** o **potencial** acumulada por el vehículo en marcha, obliga a la **máquina eléctrica** a trabajar como generador, transformando la energía **mecánica** en energía **eléctrica**, la cual puede disiparse por medio de resistencias por las que fluye energía térmica y posteriormente es mandada a la atmósfera por medio de calor, o puede ser reaprovechada dirigiéndola a la línea por medio de lo que se conoce como **freno eléctrico regenerativo**.

**Cuatro tipos de frenado** son los aplicados actualmente en el transporte ferroviario como se muestran en la Tabla 3.4, en la que se logran apreciar sus ventajas y desventajas.

| <b>TIPOS DE FRENADO APLICABLES A LA TRACCIÓN ELÉCTRICA</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Clasificación</b>                                       | <b>Tipo de frenado</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Frenado con zapatas</b>                                 | <p>Tiene ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficaces si hay malas condiciones atmosféricas</li> <li>• Favorece la adherencia por sí sola</li> <li>• No daña las llantas a <math>v &lt; 120</math> [km/h]</li> </ul> <p>Tiene desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensucia el carril con materiales al frenar</li> <li>• Frenado ruidoso</li> <li>• Vida corta</li> <li>• Se desprenden chispas durante el frenado</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Frenado con discos</b>                                  | <p>Es uno de los más utilizados no sólo en ferrocarriles sino también en vehículos de carretera.</p> <p>Se puede realizar mediante:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Discos</li> <li>• Pastillas</li> </ul> <p>Presenta ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Frenado poco ruidoso</li> <li>• Menores gastos de conservación</li> <li>• La mayor parte del calor efectuado mediante el frenado, se queda en los discos</li> <li>• Se comporta bien hasta velocidades menores de 230 [km/h]</li> </ul> <p>Presenta algunos inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor aprovechamiento de la adherencia</li> <li>• Mayor distancia de parado</li> </ul> |
| <b>Frenos neumáticos</b>                                   | <p>Su funcionamiento se basa en el esfuerzo de frenado aplicado a las zapatas o a los discos, proveniente indirectamente de mover el pistón de un cilindro.</p> <p>Existen tres tipos de frenos neumáticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De aire comprimido</li> <li>• De vacío</li> <li>• De una combinación de ambos</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Freno electrodinámico</b>                               | <p>Su fundamento es que el motor trabaje también como generador eléctrico. Sólo es aplicable a ejes motores.</p> <p>Pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reostáticos</li> <li>• De recuperación o regenerativo</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

**Tabla 3.4 Tipos de frenado que se conocen actualmente aplicables a la tracción eléctrica**



A continuación se enumeran las **ventajas** del **freno eléctrico**, y también implica ciertas **desventajas** (Tabla 3.5):

| <b>VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL FRENO ELÉCTRICO</b>                                                                                              |                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ventajas</b>                                                                                                                                | <b>Desventajas</b>                                                                                                                                       |
| Utilizar el freno eléctrico evita el desgaste excesivo en zapatas y el revestimiento de las ruedas.                                            | Difícil aplicarlo a bajas velocidades, por ello que se utiliza como freno para mantener y regular la velocidad sobre pendientes y no como freno de paro. |
| Evita la producción de polvos metálicos, despedidos por el rozamiento de las zapatas, polvo que deteriora algunos equipos eléctricos.          | Necesita más equipo, lo cual encarece notablemente la unidad locomotora.                                                                                 |
| El freno eléctrico no depende de las condiciones atmosféricas.                                                                                 | El motor sigue calentándose aún en régimen de freno, debido a su trabajo como generador.                                                                 |
| En caso de contar con freno regenerativo, la recuperación de energía se ve reflejada en los gastos de operación que tienden a ser menores.     |                                                                                                                                                          |
| Aumenta la seguridad de la circulación de trenes, teniendo a la disposición un freno suplementario (de motor), además de los frenos mecánicos. |                                                                                                                                                          |

**Tabla 3.5 Ventajas y desventajas que ofrece la utilización de freno eléctrico**

El **freno recuperativo** es el proceso mediante el cual la energía cinética adquirida por el vehículo, la transforma en energía eléctrica que es recibida por la catenaria. La máquina serie no se puede utilizar como generador en el freno recuperativo, debido a su falta de estabilidad en este régimen.

## Capítulo IV Importancia de los sistemas ferroviarios

### 4.1 El potencial y alcance de un sistema de transporte eléctrico

La globalización de las economías ha hecho del transporte una herramienta imprescindible, haciendo que el número de demanda en éste aumente considerablemente. Localmente, la expansión de las ciudades han aumentado las distancias no sólo en kilómetros, sino también en clave de tiempo o accesibilidad.

Dos de las grandes preocupaciones en las ciudades es el **tráfico** y la mejora de la **movilidad urbana e interurbana**.

La creciente concentración de población en áreas urbanas, especialmente en países en vías de desarrollo, convierte al transporte en uno de los problemas más importantes que se tienen que resolver a corto plazo.

El **consumo de energía** por parte de los sistemas de transportes mundiales procede un 99% de los combustibles derivados del petróleo; esta estrategia tiene el inconveniente de que el petróleo es una fuente de energía no renovable (Figura 4.1), y además se está explotando a una tasa mayor a su capacidad de recuperación, según los yacimientos conocidos y la estructura actual de costos de extracción.



**Figura 4.1** Etapa de perforación de un pozo petrolero

Un factor adicional es el hecho de que el consumo de combustibles fósiles como fuente de energía en el transporte supone la emisión de diversas sustancias a la atmósfera, aumentando los niveles de contaminación y acelerando el cambio climático.

La respuesta tecnológica a los retos ambientales ha surgido de diversos campos de la ingeniería: tecnología de combustibles (combustibles alternos y biocombustibles); tecnología del motor (catalizadores, motor eléctrico, y nuevos materiales); tecnología del vehículo (ordenadores a bordo, telemática y nuevos materiales); todo esto sumado a tecnologías de gestión de tráfico y de la conducción de vehículos.

A partir de los logros alcanzados y de las investigaciones en curso, es previsible que el transporte del mañana sea eficiente, limpio, seguro e inteligente (Figura 4.2).



**Figura 4.2 Beneficio que aporta el metro a una gran mayoría de personas de toda clase social**

En las ciudades congestionadas a nivel mundial se opta por ampliar la red de transporte masivo Metro, para satisfacer la demanda de transporte; esto debido a que ofrece en la actualidad una amplia gama de características superiores tecnológicamente; por ejemplo, se dispone de los equipamientos de control y seguridad modernos, con **ATP (Protección Automática de Trenes)** y **ATO (Operación Automática de Trenes)**, y video-vigilancia del recinto de viajeros.

El nuevo diseño en trenes está orientado al viajero en comodidad, seguridad y capacidad de transporte (Figura 4.3), llegando a ser actualmente en algunos trenes superior a las 1200 personas/tren.



**Figura 4.3** Nuevo diseño de trenes que busca confort y seguridad para los pasajeros

En las grandes urbes, el Metro o el ferrocarril de cercanías no tiene rival para transportar a gran velocidad flujos muy importantes, media de 20 000 viajeros por hora y sentido, pudiendo alcanzar los 80 000 viajeros como en Tokio o en Hong Kong.

Como podemos ver un tren transporta el mismo número de pasajeros que 800 o 1000 autos; es decir, más coches que ocuparían un espacio que podría ser benéfico para otro tipo de servicio.



O sea, en una comparación técnica para transportar 50 000 personas por hora y sentido, se necesita (Figura 4.4):

- 150 [m] de anchura de carretera para coches
- 75 [m] de anchura de carretera para autobuses
- Una franja de 25 [m] de anchura para una línea de Metro

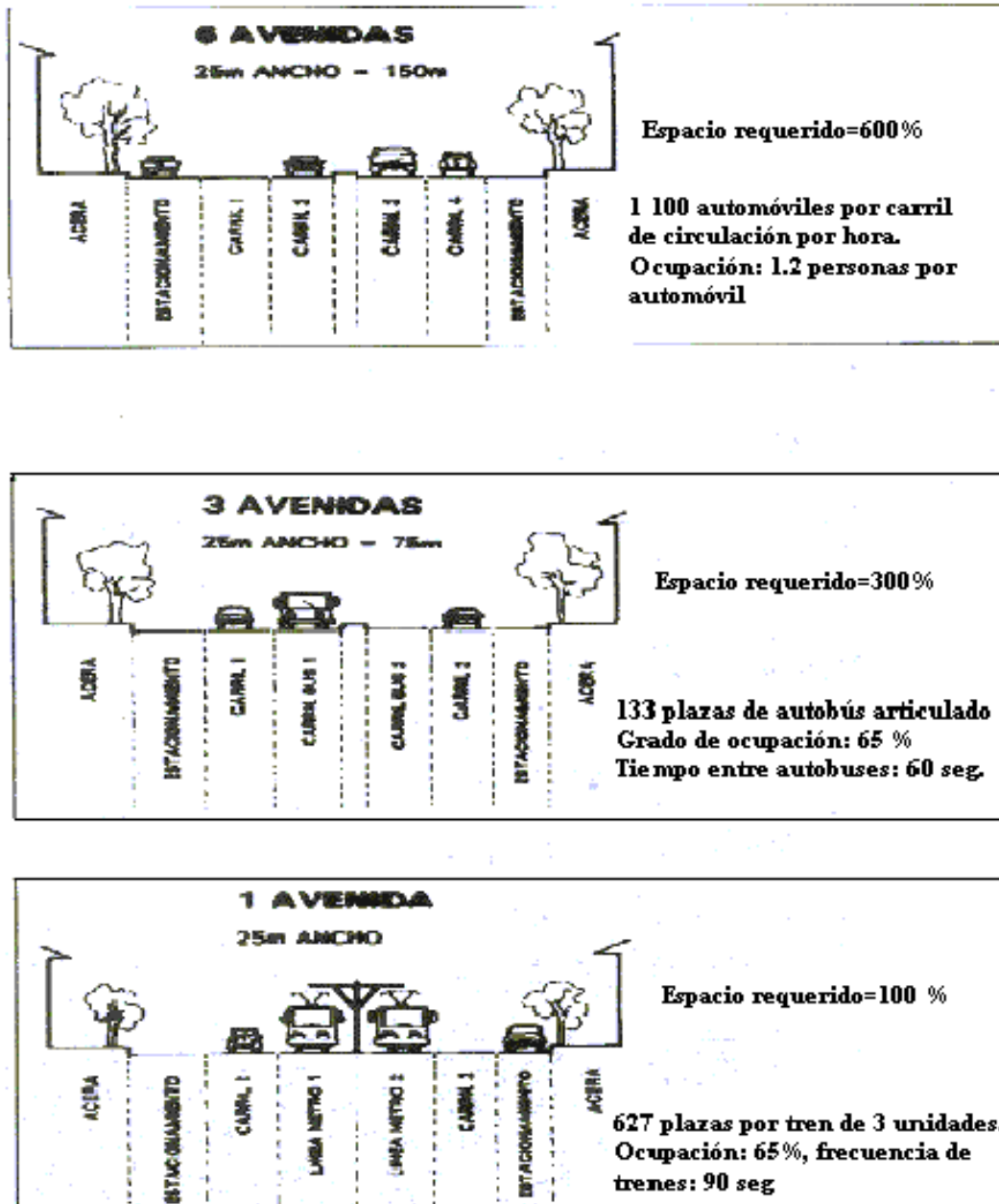


Figura 4.4 Comparación técnica del espacio requerido para diferentes tipos de transporte

Conviene señalar, que el espacio ocupado por el **transporte particular** es enorme en comparación con el ocupado por una línea de Metro que beneficiaría a los usuarios no sólo en mayor velocidad de desplazamiento, sino también en un menor gasto económico, redituable para algunas otras necesidades prioritarias.

A falta de organización de grupos civiles y políticos para resolver las necesidades de traslado (personas y mercancías), y la inversión de los insuficientes recursos disponibles en obras que sólo sirven **intereses minoritarios**, por ejemplo: los poseedores de autos (minoría), frente al de los que no los poseen (abrumadora mayoría).

A la solución de este problema no sólo son aplicables las de índole técnica, sino también las de significación política, entendiendo el término en su más profundo sentido: **el de servir al pueblo y el de prever el futuro.**

Algunos factores que pueden ayudar a mejorar el ambiente y contribuir a superar el funcionamiento de la infraestructura del transporte, son:

- Reducir la afluencia de vehículos particulares
- Mejorar y promover el uso de servicios públicos de transporte en cuanto a la comodidad, rapidez y costos (Figura 4.5)

Debido a que un Metro requiere años para su planeación, construcción y operación, es necesario que estas determinaciones de implantar el servicio en determinadas zonas de gran afluencia de personas sean lo más rápida posible, y que se trate poner la menor oposición debida a intereses políticos o algunos otros particulares.



**Figura 4.5 Mejora de servicios públicos de transporte**

México es uno de los países en que los **transportes urbanos** de superficie siguen en manos de **empresarios privados**; en tanto que otras ciudades del mundo se han municipalizado y se manejan de forma centralizada los distintos tipos de transportes; de esta manera pueden planearse y organizarse líneas, recorridos y horarios, tomando como base del sistema general de los transportes, el sistema masivo rápido, que el Metro ofrece.

Nuestra capital reclama un plan de **ampliaciones del Metro** a largo plazo, que sin interrupciones y desfallecimientos prevea y resuelva las necesidades de transporte urbano, complementando el método básico, el Metro, con un buen trazado de líneas urbanas y suburbanas de trolebuses, tranvías y ferrocarriles.

Muchas son las ventajas mencionadas que surgirían de tomar como alternativa, un proyecto de Metro en las ciudades; dentro de las más rescatables, están:

- Gran capacidad de transporte
- Economía en energéticos
- Seguridad
- Rapidez
- Ausencia de contaminación ambiental

Mientras que en México fue inaugurada la primera línea de Metro en 1969, otros sistemas ya habían cumplido 80, 100 o más años de trabajo, como fue visto en la Tabla 1.5 del Capítulo I.

#### 4.2 Beneficios económicos de los trenes eléctricos

La capacidad de nuestro Metro (Tabla 4.1) puede llegar a ser de 55 mil personas por hora en una dirección, a base de un tren de tan sólo 9 carros y con capacidad normal de 1530 pasajeros, cada 100 segundos. Para lograr el desplazamiento del mismo número de personas en autobús, se requieren más de mil unidades.

| <b>PASAJEROS TRANSPORTADOS EN CADA LÍNEA DEL STC METRO PERIODO 1987-1997</b><br><i>(miles, promedio en día laborable)</i> |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| <b>Línea de metro</b>                                                                                                     | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> | <b>8</b> | <b>9</b> | <b>A</b> | <b>TOTAL</b> |
| <b>1987</b>                                                                                                               | 1245     | 1347     | 979      | 139      | 269      | 149      | 156      |          | 140      |          | 4425         |
| <b>1990</b>                                                                                                               | 1128     | 1286     | 963      | 116      | 242      | 159      | 231      |          | 342      |          | 4466         |
| <b>1993</b>                                                                                                               | 1003     | 1137     | 923      | 106      | 258      | 146      | 247      |          | 370      | 216      | 4406         |
| <b>1997</b>                                                                                                               | 842.5    | 929      | 820      | 99       | 237      | 138      | 264      | 314      | 355.7    | 222.8    | 4221         |

**Tabla 4.1 Pasajeros transportados en el STC Metro**  
**(Fuente: Informe anual del Metro 1997)**

Por otra parte, teniendo en cuenta que en promedio los vehículos particulares transportan de 1.3 a 1.6 personas por unidad, serían necesarios entre 34 y 42 mil autos para mover el mismo número de personas.

La superioridad en la **economía de energía es aplastante a favor del Metro**; el consumo por kilómetro recorrido como promedio por pasajero es de siete centésimas de kilovatio por hora.

Según algunos criterios urbanísticos se justifica la **fuerte inversión** requerida por una red adecuada de Metro (Figura 4.6), en donde la extensión de la ciudad es considerable; aún cuando la densidad en habitantes por kilómetro cuadrado no sea elevada.



**Figura 4.6 La promoción del transporte colectivo contribuye en beneficio económico de todos los usuarios**

Una serie de **ventajas** las ofrece este servicio: ausencias de accidentes; contaminación nula; velocidad y economía en el tiempo de desplazamiento, brindadas a los usuarios a un **costo sumamente bajo**.

La lucha entonces, trasciende a la atención sobre propuestas de implementación rápida y oportuna de este medio de transporte en las zonas donde realmente se requiera un nivel de servicio de **alta afluencia** de personas, buscando un medio óptimo para trasladarse de un lugar a otro.



El sistema eléctrico de transporte que atienda la demanda actual y futura en la **Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)**, debe:

- a) Dar soluciones integrales a los problemas de transportación
- b) Ampliar la cobertura de sistemas masivos de transportación con redes transversales y periféricas (no sólo radiales) al núcleo urbano de la Ciudad de México
- c) Fomentar el uso de los modos de transportación menos contaminantes, conformando una red de transportes eléctricos, que reestructure el servicio público de transporte de personas
- d) Reducir las distancias y tiempos de desplazamiento en las áreas de transferencia
- e) Inducir adecuadamente el control y la seguridad dentro y fuera de las estaciones del sistema de transporte masivo
- f) Facilitar el reordenamiento del transporte concesionado
- g) Ayudar en los programas de protección al ambiente y de opciones energéticas
- h) Otorgar el mayor beneficio social con las inversiones que se realicen



**Figura 4.7** Nuevas opciones de transporte eléctrico en las ciudades

Un elemento que mantiene el rezago en la expansión del transporte eléctrico (Figura 4.7) es que las empresas de transporte eléctrico que operan en la Ciudad de México, al ser propiedad estatal y por motivos de índole política, no logran el consenso suficiente para obtener la capacidad económica y de organización para promover e impulsar el desarrollo de este modo de transporte.

### 4.3 Competitividad de este tipo de transportes en la actualidad

Una de las características que ofrece el transporte de tracción eléctrica como el Metro, es la alta seguridad del servicio en comparación con otro tipo de transporte; en particular, comparando con accidentes de tráfico debido al alto congestionamiento vial, resulta una opción atractiva para el desplazamiento en beneficio de la integridad física.

La rapidez de transportación es actualmente un reto con el que se vive de forma constante y que cada vez resulta una verdadera hazaña conseguirlo; la **velocidad media de tránsito en la superficie es de 14.56 [Km/h]**, en tanto que la del **Metro** esta calculada en **promedio en 34 [km/h]**. Los viajeros que utilizan el Metro ahorran una gran cantidad de horas al año, que en sí también se traduce en un ahorro económico que beneficia la solvencia familiar.

La velocidad que alcanzan los trenes de la Ciudad de México es de 80 [km/h] como máximo, y casi 35 [km/h] como velocidad comercial; es decir, incluyendo el tiempo de parada en las estaciones.

Tomando en cuenta su capacidad, que es de 170 personas por carro y sus dimensiones geométricas, así como su marcha silenciosa, figuran entre los más cómodos de los que se encuentran en uso.

La **contaminación ambiental urbana en el caso del Metro es nula**, pues la electricidad, que se consume es generada en plantas situadas a gran distancia; algunas de ellas, hidroeléctricas, a su vez no contaminantes.

La experiencia colectiva de muchas ciudades en todos los continentes con sistemas políticos de toda índole, con diferentes grados de desarrollo, pero con los mismos agobiantes problemas de tránsito, contaminación y escasez de energéticos, se orienta cada día más a considerar el Metro como el método más adecuado para mover la cantidad creciente de personas que necesitan desplazarse para sus fines.

Dentro de la planeación, el requisito que se debe cumplir es un pago único que permita al pasajero llegar desde su punto de origen hasta su destino, con un sólo boleto, con pocos transbordos y en el tiempo más reducido.

Las características que hacen aceptable para la mayoría de los usuarios un sistema de transporte público, son varias:

- Frecuencia constante de servicio
- Velocidad
- Confiabilidad
- Precio del boleto
- Comodidad

Otra de las características importantes que debe poseer un sistema de transporte es el **número de opciones que brinda**, entendiendo esto como los **puntos a los que se puede desplazar** el usuario utilizando el mismo transporte y al mismo precio (Figura 4.8).

Nuestro Metro ofrece en la actualidad esta característica, lo que lo hace realmente atractivo, y como una de las principales opciones para elegir como medio óptimo de transporte.



**Figura 4.8** Diferentes correspondencias en la trayectoria del STC Metro

Son varios los **principales objetivos de los planes gubernamentales sobre el transporte** en la Ciudad de México:

- a) Lograr una operación integral y coordinada del sistema de transporte en general
- b) Otorgar prioridad al de tipo colectivo, con el fin de desalentar el uso del particular
- c) Convertir al Metro en el eje estructurador del sistema colectivo

- d) Promover el uso intensivo del transporte no contaminante
- e) Elevar la calidad del servicio, y ampliar la cobertura hacia zonas de menores ingresos

El transporte público de pasajeros en la Ciudad de México es inherente a la vida cotidiana, pero también un elemento que requiere gran cantidad de recursos y esfuerzos. La construcción del Metro es la más costosa, y si bien es cierto que no contamina, existen también otras alternativas como el tren ligero, los trolebuses y los tranvías, que requieren menores inversiones.

Para mediados de 1994, el **costo aproximado de un kilómetro de Metro**, incluyendo unidades e infraestructura, era de **100 millones de pesos**, en comparación, el tren ligero era de 10, y el del trolebús tan sólo de 2 millones. No cabe duda que en términos de capacidad de transporte y velocidad de servicio, el Metro tiene las mayores ventajas.

La política gubernamental de promover el transporte no contaminante se cumple parcialmente cuando la prioridad presupuestaria se le asigna al Metro, sin considerar otras alternativas más económicas pero menos eficientes (Figura 4.9).



**Figura 4.9 Otras formas de transporte alternativas de nula contaminación**

La supresión o disminución del transporte eléctrico en México en los últimos años ha sido un grave error; se debe en gran parte al predominio del transporte automotor que, entre otras cosas, ha generado una fuente de alto nivel de contaminación en la ciudad.



La operación del Metro ha requerido a través de los años la participación de diferentes instancias oficiales y privadas que influyen en su funcionamiento, y no siempre se coordinan entre sí. Por ejemplo, en algún tiempo las funciones de planificación y coordinación general con otros modos de transporte las realizaba la **Coordinación General del Transporte (CGT)** que decidía entre otros asuntos, la modificación o apertura de otras rutas.

La construcción de la infraestructura civil (líneas y estaciones) estaba a cargo de la **Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR)** y de la empresa privada **Ingeniería de Sistemas de Transporte Metropolitano (ISTME)**, además una de las principales filiales de **Ingenieros Civiles Asociados (ICA)**. La ejecución directa de las obras corría a cargo de la **Constructora (COMETRO)**, y la supervisión por parte de **Empresas Consultoras (ECON)**, ambas también privadas. La construcción de la mayoría de los carros era labor de la paraestatal **Constructora Nacional de Carros de Ferrocarril (CNCF)**.

Dos de los motivos que frenaron el cambio en los proyectos a corto, mediano y largo plazos para la construcción de líneas de Metro en las zonas que así lo requerían se debió principalmente a dos razones: el inicio de la **crisis financiera** que redujo sensiblemente los recursos públicos y la **prioridad presupuestal** asignada a partir de 1979 para concluir ejes viales.

La política de dar preferencia a estos fue muy criticada por diversos ámbitos académicos y políticos, pues como efectivamente ha sucedido *se estimuló el uso del transporte individual y le restó impulso al colectivo*.

En cuanto a la meta de obtener 400 [Km] de líneas de Metro para el 2000, fue modificada respecto al que se tienen en el año 2006 que son 483 [Km] de líneas de Metro, solo que el Plan Maestro quedó circunscrito a los límites territoriales del DF, y como fruto de la experiencia, sus objetivos fueron más explícitos:

- a) Cubrir las zonas de mayor densidad demográfica, las más congestionadas y los centros de las principales actividades de la ciudad
- b) Permitir la reestructuración progresiva y completa de los transportes de superficie y su coordinación con el Metro, e inducir la utilización del transporte masivo
- c) Reordenar los usos del suelo y tomar en cuenta la importancia del daño de las propiedades, edificaciones públicas y privadas, así como el patrimonio cultural
- d) Impulsar el desarrollo de la tecnología y la industria nacional
- e) Reducir al mínimo los costos de inversión

Los logros alcanzados hasta la fecha son importantes, pero no son suficientes para satisfacer de manera adecuada la **demandas de transporte masivo**; aún es insuficiente por lo que se debe sensibilizar a las instancias gubernamentales y a los grupos civiles a que se interesen en ver las amplias opciones que brinda el **invertir en el transporte eléctrico masivo**, así como

también incitar al sector privado a colaborar en la **transformación del transporte en México**, ya que es un elemento esencial para la mayoría.

El **STC Metro** ha crecido hasta alcanzar las dimensiones mostradas en la Tabla 4.2, en donde la mayor parte de las líneas predomina en el norte de la Ciudad de México.

| CARACTERÍSTICAS DEL STC METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO |      |      |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Característica                                       | 1979 | 1983 | 1988  | 1993  | 1994  | 1995  | 1996  | 1997  |
| Líneas                                               | 3    | 6    | 8     | 9     | 10    | 10    | 10    | 10    |
| Longitud                                             | 46.9 | 93.5 | 141.0 | 158   | 178   | 178   | 178   | 178   |
| Estaciones                                           | 45   | 91   | 138   | 147   | 166   | 166   | 166   | 166   |
| Carros en Operación                                  | 882  | 1728 | 2304  | 2424  | 2487  | 2559  | 2559  | 2559  |
| Trenes                                               | 98   | 120  | 256   | 270   | 276   | 284   | 284   | 284   |
| Pasajeros Al día (millones de viajes)                | 2.8  | 3.4  | 4.044 | 3.895 | 3.898 | 4.038 | 3.895 | 3.704 |

**Tabla 4.2 Características del STC Metro de la ciudad de México**

En lo que se refiere al Servicio de Transportes Eléctricos, éste muestra un incremento significativo en la oferta de perspectivas de transporte, aunque en magnitud es bastante menor al de los restantes servicios públicos de transporte (Tabla 4.3).

Este transporte ha recibido una relativa atención en virtud de la lucha contra la contaminación en la Ciudad de México. Sin embargo, sus características tecnológicas, en particular la necesidad de **infraestructura especial ha obstaculizado su crecimiento**, por lo que no es de esperar que crezca a una tasa alta.

Los **trolebuses** no han incrementado la cantidad de líneas y vehículos como se ha planteado en diversos programas oficiales. Como ya se sabe, el **tranvía** ha dejado de operar desde hace varios años; en su lugar, el **tren ligero** fue anunciado con grandes expectativas de llegar a ser una opción no contaminante, pero de bajo costo en comparación con el Metro.

Desafortunadamente, los primeros años de prueba no resultaron tan satisfactorios como se esperaba, y los planes para la **red de tren ligero** que actualmente **consta de una sola línea** consideran una expansión a mediano plazo. Sin embargo no debe menospreciarse el potencial

del tren ligero, que cuenta en su infraestructura en la actualidad con 25 [Km] de extensión total, y mueve casi 16 000 000 de pasajeros al año.

| CARACTERÍSTICAS DEL STE DE LA CIUDAD DE MÉXICO       |               |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|
| Medio/Año                                            | 1979          | 1983 | 1988 | 1991 | 1994 | 1997 |
| <i>Trolebuses</i>                                    |               |      |      |      |      |      |
| Líneas                                               | 14            | 14   | 30   | 19   | 19   | 17   |
| Longitud (Km)                                        | 320           | 317  | 510  | 440  | 360  | 410  |
| Vehículos en operación                               | 400           | 310  | 367  | 269  | 284  | 438  |
| <i>Tranvías</i>                                      |               |      |      |      |      |      |
| Longitud (Km)                                        | No disponible | 31   |      |      |      |      |
| Vehículos en operación                               | 35            | 30   |      |      |      |      |
| <i>Tren ligero</i>                                   |               |      |      |      |      |      |
| Longitud (Km)                                        |               |      | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 |
| Vehículos (Trenes)                                   |               |      | 6    | 6    | 6    | 16   |
| <b>Total de pasajeros al día (miles en promedio)</b> | 588           | 650  | 765  | 397  | 341  | 522  |

Tabla 4.3 Características del STE en la ciudad de México

Cabe señalar que a pesar de que los transportes eléctricos desarrollan una política de atención a zonas de bajo nivel económico, las críticas a este servicio no han sido tan destructivas como en algunos otros servicios de transporte.

Con todo lo anterior se observa el panorama del sistema de transporte, y se nota que no ha tenido ningún tipo de planeación y que sólo se ha ido desarrollando de forma inherente y por propia inercia, aspecto que denigra la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México y que hace reflexionar en tomar medidas para **reparar el estancamiento implantado en el transporte.**

En gran medida se debe dar prioridad a proyectos que involucren al Metro como fuente estructural del sistema de transporte, ya que el beneficio que se produzca será para todos los habitantes de la **ZMCM**, y además se tendría un control sobre los demás sistemas de transportación que hubiese alrededor de este sistema.

## Tercera parte DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE ELÉCTRICOS

### Capítulo V Consumo de energía y eficiencia

#### 5.1 Influencia de consumo en regímenes de operación

Dentro de la dinámica de trenes existen factores que limitan la operación y fluidez de los trenes, tales como las que se mencionan a continuación:

##### 5.1.1 Fuerzas de resistencia al avance

Existe una fuerza denominada fuerza de resistencia al rodamiento; esta fuerza es independiente de la velocidad del tren.

Otra de las fuerzas que influyen al rodamiento es la resistencia debida al aire; esta fuerza es proporcional al cuadrado de la velocidad.

Es importante considerar estas fuerzas que se oponen al movimiento libre del tren para poder determinar la fuerza motriz capaz de vencerlas y permitir el avance del tren.

Estas fuerzas se representan en la fórmula de Davis:

$$r_a = a + bv^2 + cv$$

Esta fórmula representa la resistencia al avance  $r_a$  en función de la velocidad  $v$ .

Representada geoméricamente con una parábola que indica cómo varía la resistencia debido a los cambios de velocidad (Figura 5.1).

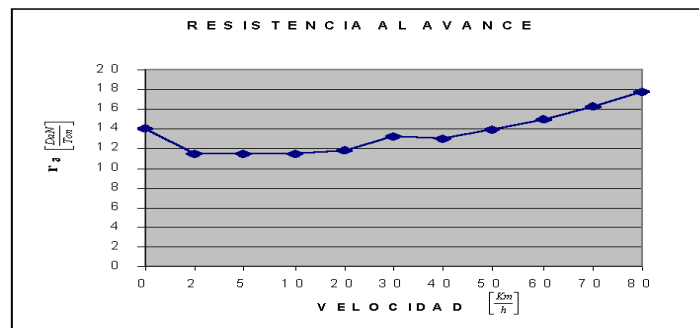


Figura 5.1 Representación gráfica de la fórmula de Daves



Es decir, el rodamiento no es libre si no que se ve obstaculizado por diversas fuerzas de tipo natural, que ofrecen resistencia al avance; en la fórmula de Daves, el factor  $b$  representa el coeficiente aerodinámico.

La **resistencia al rodamiento independiente** de la velocidad ( $a$ ), normalmente es manejada por algunos autores para el caso de trenes, como una constante universal de valor

$$a = 11.4 \left[ \frac{DaN}{Ton} \right]$$

Existen otras resistencias que se oponen al movimiento del vehículo, y que son de importancia considerarlas, como son:

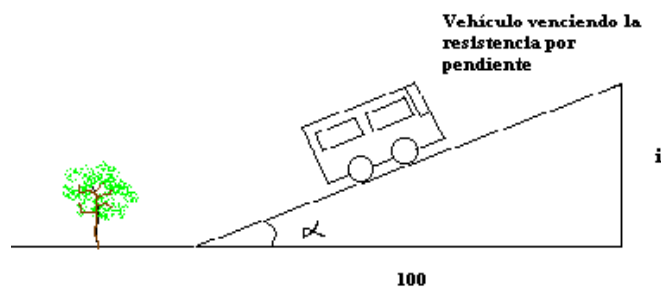
- Resistencias debidas a la **fricción en los cojinetes**
- Resistencias debidas a los **dispositivos de tracción y de suspensión**, los cuales se deben a movimientos parásitos del vehículo
- Resistencias debidas a las **deformaciones producidas por el golpeteo**, tanto en la parte rodante como en los rieles
- Resistencias debidas a la **fricción con el aire**, con o sin viento, en el aire libre o en túneles

Todas estas resistencias dependen en gran medida de factores, tales como: la velocidad del vehículo, su peso, la infraestructura de construcción, condiciones atmosféricas, mantenimiento a la vía y al vehículo, etc.

### 5.1.2 Resistencia debida a pendientes

Este tipo de resistencia depende en todo momento a la topografía del terreno (Figura 5.2), ya que de ella dependen las pendientes por las que circule el tren en cuestión.

Dicha resistencia se toma de manera a favor cuando el tren va de bajada. Lo más usual para ferrocarriles es el uso máximo de pendientes del 5%. Normalmente, los declives se dan en tanto por mil (0/00).



**Figura 5.2** Situación de un tren al encontrarse con una pendiente ( $\alpha$  es el ángulo de la pendiente)

### 5.1.3 Resistencia por curvatura

El vehículo ferroviario tiene que vencer resistencias en las curvas (Figura 5.3), además de las resistencias al rodamiento analizadas, por ejemplo:

- Las ruedas tienen la tendencia de ir sobre la tangente, originando fricciones suplementarias sobre el riel exterior.
- En la entrada y salida de curvas se produce una fricción de las cajas de los vehículos sobre los bogies.
- El radio de curvatura para la vía exterior es mayor para la vía interior; por tanto, la rueda exterior recorre más camino, produciéndose así una fricción adicional entre las ruedas y la vía.



Figura 5.3 Curvaturas que se presentan en la trayectoria del tren y que tiene que vencer su resistencia

### 5.1.4 Resistencia al arranque

En la situación en la que un **tren se encuentra parado entre 20 y 30 minutos**, tiende a desaparecer la película que se había formado de aceite, normalmente existente en las chumaceras, por lo que los ejes se “pegan”. También se descubre que las **ruedas se “pegan”** en la vía, si el carro tractivo tiene que despegar a todo el tren, esta resistencia se vuelve considerable.

El **coeficiente de adherencia** entre la rueda y la vía (denominado por algunos autores con el símbolo  $\phi$ ), depende de factores tales como: el estado físico de las ruedas, de la vía y también de las condiciones en las que se encuentra la locomotora en general.

El estado de la vía depende de las condiciones del tiempo, y en particular si la vía se encuentra seca o mojada.

El coeficiente de adhesión sufre una disminución aproximadamente del 10% en pendientes, curvas y túneles.

Algunos trenes eléctricos disponen de dispositivos para soplar arena e impurezas en el punto de contacto rueda-vía. Otros poseen dispositivos electrónicos para detectar el patinaje y corregir la fuerza de tracción, actuando directamente sobre el motor eléctrico de tracción.

A simple vista se nota que encontrarse con estas resistencias, la fuerza de tracción necesaria para que el tren eléctrico entre en movimiento sea mayor, razón por la cual el consumo de energía tiende a aumentar, lo cual a largo plazo se considera como un gasto de operación extra si no se trata de mantener en óptimas condiciones el tren y las instalaciones, aunque también esto representa costos de mantenimiento.

La **electrificación de los transportes en corriente directa**, se utiliza en gran escala en los sistemas urbanos (tranvía, tren ligero y Metro).

En lo que respecta a la parte eléctrica, el motor de una locomotora eléctrica está obligado a trabajar en condiciones muy pesadas; las causas son las siguientes:

- La **carga** que debe soportar es **muy variable**; es decir, debe tener gran capacidad de sobrecarga
- La **tensión** que se le suministra llega a ser **muy variable**, el pantógrafo (si es el caso) se puede desprender de la línea de contacto
- Está expuesto casi de manera directa a los golpes (**shoks**) provocados por las condiciones y geometría de la vía
- Está **expuesto a la intemperie** (polvo, lluvia, nieve y partículas corrosivas)
- Normalmente, el **espacio para su montaje es reducido**
- Debe **tener las características compatibles** con las de la locomotora, desde el punto de vista par-velocidad y eficiencia
- En caso de estar equipado con freno recuperativo, debe de **soportar las cargas como generador**

Los motores para locomotoras se construyen con materiales de características elevadas; y los valores típicos de inducción y densidad de corriente, son elevados hasta sus límites superiores. Esto lleva a tener regímenes térmicos muy fuertes, imponiendo enfriamiento forzado del motor.

Física y constructivamente, un motor se caracteriza por los siguientes parámetros:

- Eficiencia
- Factor de sobrecarga
- Consumo específico de materiales activos
- Coeficiente constructivo

El **factor de sobrecarga** representa la capacidad del motor de resistir sobrecargas por lapsos relativamente pequeños (por ejemplo, en los periodos de arranque). Este factor determina la robustez del motor.

En dos máquinas con igual potencia y de las mismas características la más pesada es más cara por ser más robusta.

## 5.2 Conceptos de velocidad utilizados en transporte terrestre

En los sistemas de transportes se conocen diferentes tipos de velocidades (entendiendo el concepto de velocidad en su forma más sencilla, como el espacio recorrido por unidad de tiempo):

- **Velocidad instantánea:** es la velocidad de un vehículo a un determinado tiempo.
- **Velocidad promedio:** entre dos estaciones del trayecto, se determina como el cociente resultante de dividir el espacio recorrido entre ambas estaciones, por el tiempo transcurrido.
- **Velocidad comercial:** es para toda la línea o trayecto, la cual incluye el tiempo gastado en paradas de cada estación del recorrido total.
- **Velocidad máxima:** es la velocidad máxima que alcanza el vehículo en algún momento de su recorrido.

## 5.3 Automatismos aplicados a los trenes eléctricos

Desde los inicios de la tecnología, se ha buscado siempre **controlar sistemas** que parecen de importancia, y que de manera inherente se busca lo que actualmente se denomina como el automatismo de sistemas.

El **automatismo es una materia de un grado de dificultad alta**, ya que en la realización de la mayoría de los procesos es importante determinar en cierto instante una decisión que puede llegar a ser trascendente. Cada nivel de decisión requiere elementos de cálculo previamente analizados, para evitar que se pueda cometer algún posible error.

La constitución básica de un automatismo implica la captación de algunos parámetros que deben ser analizados en función de sistemas de **tratamiento de señales**, para obtener la respuesta de los mecanismos a ser automatizados; esto implica:

- **Acondicionar** las señales de entrada al sistema.
- Dentro del sistema de tratamiento de señales, **revisar la lógica** que seguirán las señales según los parámetros disponibles.
- **Analizar** las señales que se liberan del sistema a la salida.

Las unidades de tratamiento de señales, se constituyen básicamente de circuitos lógicos electrónicos, formados de componentes analógicos y discretos (transistores, circuitos integrados); todos estos, ensamblados en la práctica mediante ciertos criterios:

- La electrónica de gran difusión, se caracteriza por que sus componentes dan resultados confiables cuando se encuentran en un entorno confortable.
- La electrónica que alcanza altos resultados, se caracteriza por la noble fiabilidad, aún trabajando en ambientes severos por un lapso corto de tiempo.
- La innovación de circuitos integrados ha dado mejores resultados, debido a que ya los errores de conexión son menores en algunos sistemas.

Dentro de los automatismos más utilizados en el ambiente ferroviario actual, se encuentran los siguientes:

- 5.3.1 El antipatinaje de las máquinas de tracción
- 5.3.2 La conducción optimizada
- 5.3.3 El pilotaje automático

### 5.3.1 El antipatinaje de las máquinas de tracción

La adherencia influye en la forma de la característica “fuerza-velocidad” que presentan las locomotoras eléctricas; esto da origen a que se presente el patinaje en el tren.

El par en una rueda está determinado por la expresión (Figura 5.4):

$$Par = Fd = F(2r) = J\alpha$$

Pero la fuerza de la segunda ley de Newton, sabemos que esta dada por:

$$F = ma$$

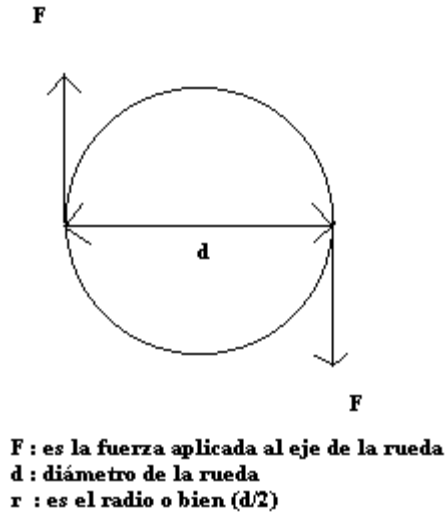


Figura 5.4 Esquema que representa las fuerzas aplicadas sobre una rueda del tren

Un factor como la imperfección en la vía influye como limitante de la adherencia, pero no es determinante.

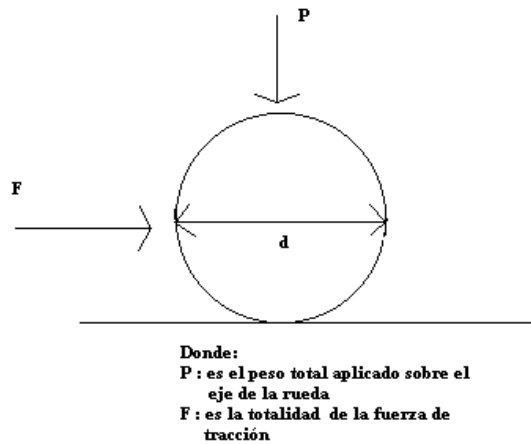


Figura 5.5 Fuerzas aplicadas a una rueda

Así entonces, tenemos que para conocer si existe una buena adherencia y por tanto el rodamiento es satisfactorio, se debe analizar sí: (Véase Figura 5.5)

$$F \leq \mu P \quad ; \text{ rodamiento satisfactorio}$$

$$F \geq \mu P \quad ; \text{ rodamiento no satisfactorio}$$

$$\mu \quad ; \text{ es el coeficiente de fricción.}$$

A partir de estas condiciones, se presentan cuatro posibles casos (Tabla 5.1):

| CONDICIONES DE BUENA ADHERENCIA DE UN TREN |                |
|--------------------------------------------|----------------|
| $\mu P \leq F$                             | $\mu P \geq F$ |
| Tracción (el motor gana velocidad)         | Deslizamiento  |
| Patinaje                                   | Frenado        |

**Tabla 5.1** Condiciones para un rodamiento satisfactorio o no satisfactorio

El método básico que se sigue cuando no existe un rodamiento satisfactorio consiste en:

- Detectar que ocurre el fenómeno (es decir, cuando se inicia)
- Analizar la información, y procesarla
- Corregir el problema (reducir la fuerza de tracción, o bien aumentar fricción)

Estos pasos anteriores son el principio de operación de los actuales frenos **ABS** (Antiblocking Brake System)

### 5.3.2 La conducción optimizada

Se aplica principalmente en trenes suburbanos con el objetivo puro de racionalizar la marcha del tren respecto a una mejora previa, en reducción a un mínimo de consumo de energía.

Técnicamente, la aplicación de este automatismo presupone tres estados en el movimiento de los trenes, que son:

- Tracción
- Coasting, o marcha libre
- Frenado

En la tracción, la locomotora eléctrica gana velocidad y se genera el desplazamiento de la misma, normalmente con una aceleración estándar de  $1.4 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ ; en esta parte también se controla que la locomotora no sufra el efecto de patinaje.

En la sección de coasting o marcha libre, la máquina eléctrica deja de consumir energía y sólo es empujada por la propia inercia producida con anterioridad en los instantes de tracción. En general esta etapa tiende a tener un lapso mayor de tiempo de acción.

El frenado, ya sea **freno reostático** o bien **regenerativo** (en el mejor de los casos), tiene una duración de aplicación menor, debido que el tren se encuentra ya bajo los efectos de desaceleración producidos en la marcha libre por los factores mencionados al principio del capítulo (sección 5.1); en este caso se tiene que la desaceleración del tren es constante; también aquí se manipula que no se presente el fenómeno de deslizamiento.

Las **partes elementales de este automatismo de conducción optimizada** son:

- Una memoria
- Un reloj
- Un calculador y un comparador
- Un cómputo del espacio recorrido

### 5.3.3 El pilotaje automático

Un tren guiado por rieles que está prácticamente en un circuito en el que todas las acciones de conducción se basan en órdenes de tracción o frenado, su itinerario se encuentra inscrito sobre la superficie.

Las reglas para este tipo de conducción respetan estos **tres principios**:

1. Respetar en todo punto de la trayectoria las velocidades máximas autorizadas para el trayecto (o bien, la velocidad máxima del tren sí la del siguiente es inferior)
2. Evitar todo acercamiento con un tren precedente
3. Respetar los horarios

Estructura básica de un sistema de pilotaje automático (Figura 5.6):

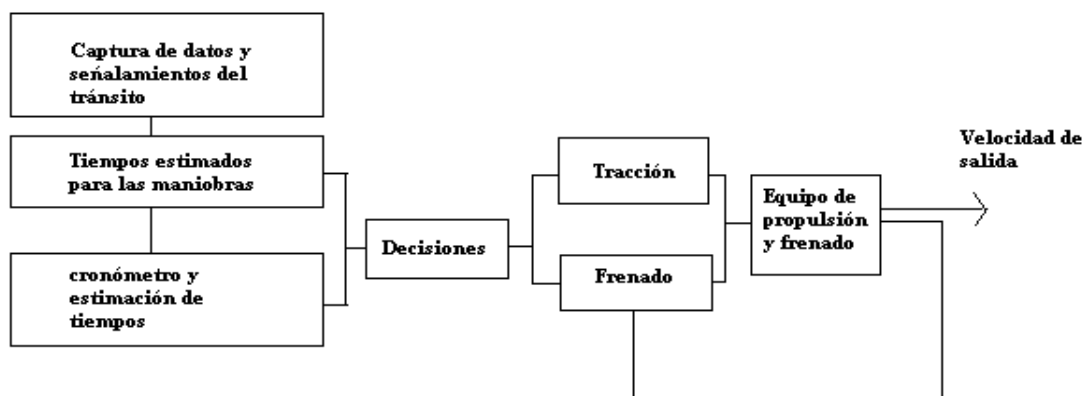


Figura 5.6 Esquema básico de la estructura de un automatismo



El pilotaje automático se relaciona con toda la infraestructura de las instalaciones y del tren; todos los aspectos manipulados por medio de mecánica y electrónica; la observación adecuada de las señales en la vía; respetar las velocidades máximas para cada sección del recorrido; es decir, respetar todas las reglas que se seguirían en caso de que una persona comandara el tren.

#### 5.4 Análisis de consumo de energía en el arranque de un motor

Un motor eléctrico para la tracción se define con estos parámetros:

- **Clase de corriente** (CD, CA monofásica de baja frecuencia, CA de frecuencia nominal, etc.)
- **Tensión nominal** (V) que representa la tensión para la que está diseñado el motor.
- **Corriente nominal** (A), que es la corriente a la cual el motor puede funcionar, en condiciones normales (tensión, temperatura ambiental, frecuencia, enfriamiento, humedad), en tiempo ilimitado sin que la temperatura de alguna de sus partes rebase los límites establecidos por su clase de aislamiento.
- **Velocidad nominal** (RPM), es la que corresponde a la tensión y corriente nominales de los datos de placa de la máquina (esto sólo en casos eventuales).
- **Potencia nominal** (KW o HP), es la potencia entregada a la flecha, para la tensión y corriente nominales.
- **Eficiencia nominal**, el cociente de la potencia nominal entre la potencia absorbida, más las pérdidas en el motor

Recordamos que el motor eléctrico se conecta a través de engranes directamente al eje motriz, de tal manera que la velocidad del motor en RPM se transforma en la velocidad del vehículo en  $\left[ \frac{km}{h} \right]$  y el par del motor en [kgf ] o [N] se transforma en fuerza tangencial aplicada a la vía, es decir, fuerza de tracción del vehículo.

Las ruedas de una locomotora se desgastan, disminuyendo su diámetro; y esto no se produce uniformemente en todas las ruedas. Una pequeña diferencia entre los diámetros de los dos ejes motrices de una locomotora afecta la **característica de tracción** a uno de los motores, recordando que cada eje tiene un motor de tracción respectivamente.

En el caso de la electrificación en CD, el voltaje de la catenaria se aplica directamente a los motores de tracción.

La variación de la tensión se puede lograr sólo mediante la interconexión de los motores de varias maneras, de donde resulta que la locomotora debe disponer de un número par de motores (2, 4, 6, 8 motores)

Es decir, un ejemplo de esto sería si tenemos una locomotora de 6 motores y 3 [kW] en la catenaria, pueden resultar las siguientes posibilidades de conexión:

- a) Serie resultando 500 [V] por cada motor
- b) Serie-paralelo, con 1000 [V] por cada motor
- c) Paralelo, con 1500 [V] por cada motor que sería el régimen nominal de operación

Para el paso de conexión, debe efectuarse sin interrumpir el paso de corriente en el circuito principal, ya que de otra forma se provocarían efectos negativos tales como: variación en la fuerza de tracción, o brincos altos de tensión directos sobre el motor.

Se practican dos métodos de paso de una conexión a otra:

1. **Paso por cortocircuito** (por “by pass”)
2. **Paso por puente**

El **método de paso por cortocircuito** consiste en cortocircuitar parte de los motores, hasta que se realiza la siguiente conexión.

El **método de puente** consiste en pasar de igual manera de una conexión serie a una paralela; primero añadiendo reóstatos en serie a cada sección de motores, e interconectando una red entre ambos motores; esto da por resultado tener dos mallas; posteriormente se quitará esta parte de la red dejando una sola malla y a los motores en paralelo, con un reóstato que limitará la corriente en el paso; después, simplemente se eliminará la inserción de los reóstatos.

Con el fin de realizar locomotoras más versátiles se puede variar, mecánicamente, la relación en los engranes que transmiten el par del motor, hacia la vía.

El **cambio de la conexión entre los motores** (serie, serie-paralelo, paralelo), resulta como una necesidad de regulación de velocidad. Se tiene que el implementar este sistema de interconexiones, conduce a una reducción en el consumo de energía.

Se puede decir que el método de arranque con cambio de conexiones, pasando por serie, serie paralelo, y paralelo, para las locomotoras de corriente directa, ofrece la posibilidad de reducir las tensiones aplicadas a las terminales de los motores; pero está impuesta también a obtener desde el punto de vista de la disipación (pérdida), la mínima energía en el reóstato de arranque.

Es importante analizar el **arranque de un motor para que tenga el mínimo consumo de energía** posible, ya que en la actualidad el ahorro de energía se ha convertido en un concepto

de suma importancia que exige eficiencia y eficacia al máximo posible; aunque para lograrlo requiera una aportación adicional en gastos de investigación y estudios previos; a largo plazo, estos gastos se amortizarán debido al bajo consumo de energía.

**Cuarta parte**  
**ESCENARIO Y PERSPECTIVA DEL DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE**  
**TRANSPORTE ELÉCTRICOS**

**Capítulo VI**  
**Nuevas tecnologías aplicadas al sistema de transporte eléctrico**

**6.1 Uso de semiconductores en locomotoras eléctricas**

En este tipo de locomotoras se considera solamente la rectificación estática (a base de **diodos semiconductores**)

Con el desarrollo tecnológico alcanzado en el dominio de la fabricación de semiconductores, en la actualidad se utilizan como solución generalizada, diodos de silicio en los rectificadores de alta capacidad, sobre las locomotoras monofásicas.

El uso de semiconductores se debe en gran parte al impulso que se ha dado en cuanto a su avance; que tiene que ver con la eficiencia que presenta en cuanto a pérdidas de energía se refiere, ya que con anterioridad los dispositivos presentaban más pérdidas de energía, y con ello el **consumo de energía** aumentaba considerablemente.

Se debe tener en cuenta una serie de protecciones contra sobretensiones y sobrecorrientes cuando se utilizan **rectificadores estáticos** (Tabla 6.1).

| <b>PROTECCIONES CONTRA SOBRETENSIONES Y SOBRECORRIENTES</b>                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>SOBRETENSIONES</b>                                                                                                                                                                                                                            | <b>SOBRECORRIENTES</b>                                                                                                                                                                                                                              |
| Si son debidas a operaciones por switcheo o sobretensiones de origen atmosférico, una forma de evitar sus efectos nocivos se pueden instalar apartarrayos.                                                                                       | Pueden ser de varios orígenes: sobrecarga de la locomotora o algún corto circuito, que a su vez se deba a alguna falla.                                                                                                                             |
| Si son debidas a la conmutación del rectificador, para evitar las oscilaciones se instala en paralelo con el diodo rectificador, un circuito formado por una resistencia y un capacitor, que a la vez limitan también la tensión de conmutación. | Protección con fusibles, donde estos fusibles son de construcción especial (es decir de tiempos muy cortos, tensión de arqueo reducida y bajas pérdidas)                                                                                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | Protección por cortocircuitador:<br>Se utilizan transformadores de impulso, los cuales deben emitir una señal, y se dispara un contacto especial, que pone en cortocircuito el devanado secundario del transformador, un tiempo cercano a 0.002 [s] |

**Tabla 6.1 Protección contra sobretensiones y sobrecorrientes**

Los **diodos** más utilizados son a base de **silicio**; nociones de la física del átomo plantean que el silicio es un elemento tetravalente, con el número 14; y en estado de pureza absoluta es un aislante. La unión entre dos superficies de materiales de las cuales uno es silicio puro, y otro es silicio con un cierto grado de impureza controlada, constituye una **pastilla semiconductor**.

La fabricación práctica de las pastillas semiconductoras es un proceso muy elaborado y de alta precisión, requiriendo de técnicas y equipos muy especializados.

## 6.2 Introducción al control por medio de microprocesadores

Al estudiar a los sistemas de tracción eléctrica nos encontramos la tendencia a obtener el mejor servicio posible; esto se puede lograr gracias a los desarrollos tecnológicos actuales, por mencionar algunos en lo que se refiere a talleres de mantenimiento, encontramos lo siguiente:

- **Plataforma de pruebas**

Destinada a la prueba y reparación de los equipos de alta tensión y de tracción (Figura 6.1), tales como: transformadores, rectificadores, disyuntores, seccionadores, etc.

Además en esta zona se encuentra la subestación de rectificación, que suministra la energía eléctrica para la tracción de los trenes (750 voltios de corriente continua), además, se cuenta con una grúa viajera con capacidad de 20 toneladas utilizada para el movimiento interno de los equipos.



**Figura 6.1** Talleres de mantenimiento para los trenes del STC Metro

- **Nave de depósito**

Esta superficie sirve como área de estacionamiento de los trenes en las horas de menor afluencia de pasajeros; es decir, las horas valle o al final del servicio diario.

- **Nave de mantenimiento menor**

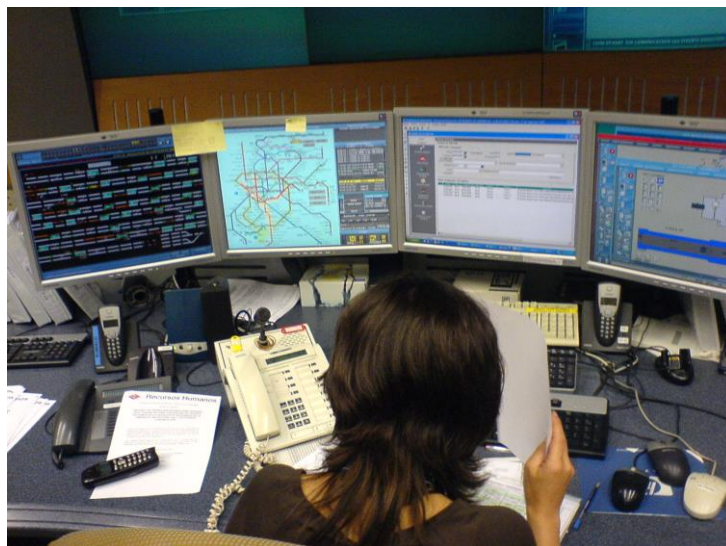
Es la zona en la que se realizan trabajos de mantenimiento preventivo y correctivo de los trenes. Aquí se encuentran instalados equipos, tales como: sistema recolector de polvos, y el sistema de aire respirable.

- **Vía de pruebas**

En esta sección de vía, se hacen circular los trenes simulando las condiciones de operación normal de la línea (aceleración, frenado, velocidad); se cuenta con una fosa de visita y una caseta de pilotaje automático, equipada con los mismos sistemas electromecánicos y electrónicos con los que cuentan las vías principales de la línea.

- **Puesto de maniobras (PMT)**

En este edificio (Figura 6.2) se encuentra instalado un **Tablero de Control Óptico (TCO)**, mediante el cual se visualiza y controla el movimiento de los trenes que entran o salen de los talleres, teniéndose también el control de la energía eléctrica utilizada para la tracción en las diferentes zonas de los mismos.



**Figura 6.2** Edificio donde se localiza el Tablero de Control Óptico

La **obra electromecánica** es de importancia sustancial, ya que aquí es donde se agrupan los sistemas de vías, electricidad, electrónica, mecánica, energía y automatismos.

#### a) Sistema mecánico

Se encuentra instalado en las zonas de ascenso y descenso de pasajeros (Figura 6.3), locales técnicos, en corredores, en cárcamos de bombeo y túneles. Hay elementos mecánicos en el tendido de las vías, escaleras mecánicas, máquinas lavadoras de trenes, máquinas diversas, herramientas y grúas.



Figura 6.3 Rampa de ascenso y descenso del STC para personas discapacitadas

#### b) Sistema eléctrico

Consta de una kilométrica red de cables de diferentes diámetros y colores según su capacidad; es el “tejido nervioso” del Metro. Se encuentran distribuidos en los túneles, en los tramos superficiales y elevados; en las escaleras e instalaciones complementarias se localizan los cables de baja tensión, así como los de tracción; en su conjunto constituyen dos sistemas principales: las redes de alumbrado y fuerza, y las redes de tracción.

### c) Subestación eléctrica de alta tensión

Todas las redes eléctricas se originan a partir de la **Subestación Eléctrica de Alta Tensión (SEAT)** (Figura 6.4). Para asegurar una alta confiabilidad, disponibilidad y seguridad en la **alimentación eléctrica de alumbrado y fuerza** de las estaciones de pasajeros y equipos en las líneas, así como la **energía eléctrica de tracción** para la circulación de trenes, es necesario tener una red específica; las actuales están diseñadas de tal forma que al presentar cualquier falla en un solo elemento, no se altere en ninguna forma la operación de los trenes en servicio, ni tampoco la alimentación del alumbrado y fuerza.



**Figura 6.4** Subestación Eléctrica de Alta Tensión (SEAT)

La subestación cuenta con varias salas:

- **Sala de mando y control:** constituida por dos tableros: uno de mando y otro de control óptico (TCO), uno para los equipos de 230 [kV] y otro para los equipos de 23 [kV], con los cuales se pueden mandar aperturas y cierres de los interruptores en hexafluoruro, transformadores de potencia e interruptores de 23 [kV]
- **Sala de protección:** constituida por varios tableros, con relevadores para detectar y proteger los alimentadores, y equipos de 230 y 23 [kV] ante cualquier falla que se produzca en el sistema. En esta sala se tienen también los tableros de baja tensión, denominados principales, los cuales, alimentan en baja tensión los diversos equipos de la subestación.



- **Sala de baterías:** compuesta por dos bahías de baterías que sirven de respaldo a los diferentes equipos de mando y control en casos de contingencias en los alimentadores de 230 [kV].
- **Sala de cómputo:** integrada por computadoras con el programa que controla y analiza el registro de cualquier problema que ocurra en la línea.

#### d) Avances técnicos

El **mejoramiento** de los equipos en el sistema eléctrico representa **ahorros** importantes, tanto en los costos como en el mantenimiento, como fue la sustitución de interruptores por disyuntores en todos los equipos susceptibles de abrir bajo condición de corto circuito, a nivel de 750 [V] de corriente directa; así como la optimización de los niveles de iluminación en las diferentes áreas de una estación, con un **ahorro de energía de aproximadamente 25%** en comparación con las primeras líneas de Metro construidas.

Dentro de las innovaciones, la **fibra óptica** (Figura 6.5), **garantiza la seguridad** para el sistema de mando centralizado; la incorporación del cable de fibra óptica representa una ventaja extraordinaria para la optimización del sistema de mando centralizado, a través del cual se ejercen los controles sobre el tráfico de trenes, el sistema de señalización en las vías y la energización o desactivación del flujo de energía en las mismas, según las necesidades del servicio.

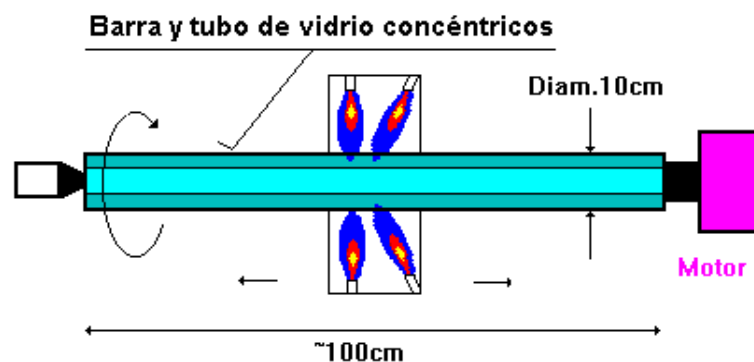


Figura 6.5 Gráfico ilustrativo de una sección de fibra óptica utilizado en transmisión de datos

Actualmente se cuenta con tecnología de punta para el Metro; desde el **Puesto Central de Control (PCC)**, un moderno equipo computarizado controla la circulación de trenes de la línea. Consiste en un **Tablero de Control Óptico (TCO)**, con una serie de diodos o puntos

luminosos que registran la ubicación y deslizamiento de los trenes a lo largo de la línea a través del pupitre de mando, dotado con **pantallas táctiles** en sustitución de los viejos controles a base de platinas, teniendo de manera casi **instantánea la transmisión** de los mandos, indicaciones u órdenes, a cualesquiera de las tres especialidades que hacen posible el funcionamiento del Metro: **Pilotaje automático, señalización y tracción**.

A través de finísimos filamentos de fibra óptica, los mandos e indicaciones viajan de manera simultánea, sin riesgo de saturar las líneas, estableciéndose una comunicación rápida y oportuna que mejora la capacidad de respuesta ante determinadas situaciones, y la consecuente aplicación de medidas emergentes, como el avance y frenado, la velocidad de circulación de los trenes o la desactivación del flujo de energía, que redundan en la eficiencia del servicio y la seguridad del usuario.

Como se mencionó en el Capítulo 5 que existen automatismos en el STC, esto involucra también la entrada de los **microprocesadores** y la tecnología para lograr los objetivos que antes ejercían **dispositivos electromecánicos** para el trabajo de tracción-frenado y para los sistemas de control de las funciones auxiliares.

El **cambio de esta tecnología** de dispositivos electromecánicos se debió entre otras **causas** a: la baja fiabilidad de los mecanismos, el envejecimiento de las piezas móviles, el constante mantenimiento que debía tenerse, y problemas con el abastecimiento de refacciones.

Las funciones auxiliares de control y mando de los trenes de transporte eléctrico por medio de microprocesadores se llevó a cabo sustituyendo a sus antecesores que se trataban de mecanismos electromecánicos, por unidades denominadas **Autómatas Programables**, o **Controladores Lógicos Programables (PLC)**, construidos a base de componentes de estado sólido, que pueden ser diseñados bajo las normas de operación y seguridad que se requieren para el transporte eléctrico ferroviario.

El autómata programable es un **sistema de control de estado sólido** que también puede emplearse en el campo industrial para realizar entre otras cosas, funciones manipuladas anteriormente por sistemas de control mediante relevadores y/o interruptores; ahora las funciones son programadas por computadora detrás del monitoreo continuo de las condiciones en que se encuentran las diferentes entradas y salidas conectadas a él, con base en las instrucciones almacenadas en su memoria.

El autómata o **Control Lógico Programable** consta de forma simple, de **cuatro secciones**:

### **1. Procesador**

Es el corazón del sistema; toma decisiones a medida de que procesa la información que le llega, además de transferirla. En esta parte se encuentra la **Unidad Central de Proceso (CPU)**.

## 2. Entradas

Es la interfase entre los dispositivos a monitorear y el procesador.

## 3. Salidas

Es la interfase entre los diferentes equipos a controlar y el procesador.

## 4. Fuente de energía

Convierte la energía contenida en la fuente del usuario a niveles de alimentación necesarios para la operación de los circuitos de estado sólido del procesador, y de los contenidos en las secciones de entrada / salida.

Para la programación de autómatas es necesario un equipo auxiliar, que puede incluir una terminal de programación para editar y monitorear los programas.

Las **funciones auxiliares de mando y control** de los carros de Metro que pueden realizarse son:

- Apertura y cierre de puertas
- Control del moto/compresor
- Control del moto/alternador
- Mando del equipo de tracción y frenado eléctrico
- Señalizaciones diversas
- Mando de frenado neumático
- Control de velocidad
- Control de ventilación de pasajeros
- Control de conducción.

La versatilidad de los PLC es enorme, ya que algunos son capaces de ejecutar **1000 instrucciones en tan sólo 3 [ms]** y además poseen una memoria de programa de 96 Kb o mayor; entre algunas de sus funciones cuentan con: reloj calendario para programar horarios de funcionamiento; contador de horas de funcionamiento; cronómetro; y medidor de tiempo de ciclo para optimizar programas y lograr ejecuciones más rápidas.

Para una mayor fiabilidad es posible el acoplamiento mediante el uso de fibra óptica, lo que permite una alta velocidad de transmisión de los datos a los bastidores de ampliación sin interferencias, ya que los cables de este tipo son inmunes a ella y ofrecen separación galvánica; no transmiten ningún tipo de ruido, y son ideales para ambientes con riesgo de explosión, dado que los puntos de empalme óptico no pueden formar chispas.

Mediante las **tarjetas electrónicas**, que constituyen al autómeta, se pueden **realizar tareas especiales**, ya que en su mayor parte incorporan un microprocesador. Así pueden regular con gran precisión temperaturas captadas con termopares o termoresistencias, o regular magnitudes de proceso tales como caudal; presión; nivel; posicionamiento (variando la corriente continua o alterna, la velocidad, etc.); y regular servo/válvulas o válvulas proporcionales.

Un ingrediente extra que proporcionan los PLC es que pueden **detectar la presencia de perturbaciones** durante un proceso de control o de mantenimiento, ya que las fallas se localizan y eliminan con mayor rapidez lo que **permite reducir considerablemente el tiempo de diagnosis**, y con ello los tiempos de suspensión de algunos procesos, que finalmente se traduce en reducción de costos de mantenimiento y mejoras en la disponibilidad de los trenes (Figura 6.6).



**Figura 6.6** Trenes disponibles después del servicio de mantenimiento menor o mayor

### **6.3 Beneficios y bondades que brinda la aplicación de la tracción eléctrica**

La experiencia colectiva de muchas ciudades se orientan a considerar a los sistemas de tracción eléctrica como el método más apropiado para mover la cantidad creciente de personas que tienen la necesidad de desplazarse para realizar alguna actividad.

*Esto no quiere decir que el Metro sea el único método de transporte urbano, pero sí el más indicado.*

Si las ciudades con problemas viales, contaminación atmosférica, excesivo parque vehicular automotor y gran demanda de desplazamiento optaran por sustituir la vértebra principal de transporte colectivo por un sistema de transporte colectivo de tracción eléctrica como el

Metro convencional o bien Metro ligero, y a partir de él se desarrollaran las demás modalidades de transporte como ramas de una estructura sólida y benéfica.

Dentro de los aspectos que se han reiterado en varias ocasiones sobre las **bondades que nos ofrece la tracción eléctrica**, se enumeran los siguientes:

1. Frecuencia
2. Velocidad comercial
3. Confiabilidad
4. Precio del boleto
5. Comodidad

#### 6.4 Aplicación de la tracción eléctrica en la actualidad y a futuro en la ciudad de México

Todo comienza desde el planteamiento del desarrollo económico, que plantea **dos situaciones**:

1. La transformación de la estructura urbana, y en consecuencia la demanda de transporte.
2. La transformación de la estructura de los transportes.

La modificación de la estructura de los transportes se caracteriza por:

- El **aumento** de la **congestión** de la superficie vial (Figura 6.7).
- Necesidad de utilizar una parte importante de la superficie vial para el **estacionamiento**.



Figura 6.7 Congestionamiento vial en la Ciudad de México

Los **problemas** que plantea el uso del **transporte particular** son graves, pero aún, son mayores cuando se intenta resolver el problema que plantea el estacionarse; es decir, cómo se ve diario, gran parte de la superficie de nuestras calles está ocupada por automóviles estacionados; esto hace que se dificulte más la circulación.

En el desarrollo de una ciudad, los transportes deben formar parte de un todo; su desarrollo debe ser equilibrado; y esto es posible, sólo si existe un plan y ambas partes establecen una solución común.

La actuación del transporte público debe centrarse en torno a los siguientes aspectos:

#### **6.4.1 Elección del medio de transporte apropiado, y trazado adecuado de las líneas de transporte colectivo.**

Es decir, el trazado de las líneas de transporte debe estar de acuerdo con la demanda de transporte. Las líneas deben ser en lo posible diametrales, con el objeto de evitar los cambios de vehículos que imponen las líneas radiales.

Estas líneas diametrales deberán pasar por el centro de la ciudad, a pesar de las dificultades de tráfico que esto supone en el caso de los transportes de superficie.

Estas líneas diametrales serán complementadas con otras obras de circunvalación, con objeto de enlazar entre sí las zonas periféricas y evitar desplazamientos inútiles.

#### **6.4.2 Modernización oportuna de vehículos e instalaciones dependiendo de cada caso.**

Se deben mejorar los aspectos de: velocidad comercial, comodidad, rentabilidad, y nivel de confiabilidad y seguridad.

Analizando la **velocidad comercial**, ésta se ve desde dos puntos de vista: la **rentabilidad y la bondad del servicio**.

En forma concreta, presupone que con el aumento del tráfico debido al transporte automotor, los sistemas de transporte colectivo deben tener su ruta confinada; así se incrementaría notablemente esta característica. Dos aspectos que favorecen el incremento de la velocidad comercial son: la **disminución del tiempo entre paradas**; es decir, aumentando la distancia entre paradas, o bien **facilitando** aún más la **entrada y salida** de viajeros.

El **aumento de la comodidad** se exige cada vez más de los transportes públicos, y esto lleva consigo a la adopción de medidas diversas como: suspensiones del vehículo adecuadas; disminución del ruido; ventilación suficiente; aspecto estético agradable; cuidadoso estudio técnico del nivel de iluminación y del color; disposición de asientos confortables y en número suficiente (Figura 6.8).



**Figura 6.8** Aspecto agradable de los vehículos de tracción eléctrica

Los niveles de **seguridad** se basan actualmente en la incorporación de sistemas más potentes de frenado, estudios estructurales a fin de adoptar en los vehículos un reparto proporcional de peso, adopción de niveles automatizados de señalización; en proyecto, de instalaciones, y accesos y salidas más fáciles.

#### **6.4.3 Mejora constante del servicio.**

Esto se refiere a mejoras en las líneas, por ejemplo, hablar del aumento en la **velocidad comercial**, procurar mantener la **frecuencia del servicio**; esto es, tener un mayor control de la **regularidad y la puntualidad** mediante la implementación de control automatizado con el fin de conseguir la homogeneidad en los intervalos, buscar las mejores opciones para correspondencia entre líneas; es decir, en aquellas estaciones que supongan un cambio de dirección habrá que tener un estudio importante y conciso de la coordinación entre éstas, además de acceso inmediato a servicios de transportes públicos alternos rápidos.

#### **6.4.4 Tarifas acordes con el nivel de servicio.**

La tarifa debe ser **revisada en forma cuidadosa, y periódicamente**, no se deben tener aumentos excesivos que causen un malestar en los usuarios, y no debe representar una situación crítica extrema en la población mayoritaria.

#### 6.4.5 Propaganda y publicidad.

Es preciso establecer una opinión favorable entre la población, relativa al medio de transporte óptimo que deben utilizar, con el fin que sea el más adecuado; por ello, conviene **dar a conocer las innovaciones y mejoras del servicio**, de las instalaciones, de las ampliaciones y las modificaciones del mismo. En este sentido podrían aplicarse encuestas periódicas, de manera que el **usuario expusiera sus necesidades y sugerencias** para la prosperidad del servicio.

#### 6.4.6 Selección apropiada del personal.

El personal juega un papel importante en la **interrelación entre el usuario y el servicio** que se ofrece, ya que determinará en buena medida la aceptación del servicio de transporte y la garantizará la satisfacción del usuario.

### 6.5 Los sistemas de tracción eléctrica a la vanguardia

La forma eficaz de conseguir un rendimiento óptimo del transporte es separar el transporte particular del transporte público; esto da la tendencia a un transporte público subterráneo o elevado, siendo el sistema de **transporte masivo eléctrico Metro una de las opciones más viables** y con la característica que se desplaza por una vía independiente en todos los puntos de su recorrido.

Otra opción a seguir es la del tranvía subterráneo, que viene siendo un paso previo al Metro, pero aplicado en ciudades cuya demanda no justifica los gastos que implica la implantación del Sistema Colectivo Metro.

El Sistema de Transporte Colectivo Metro, desde hace algunos años ha aplicado soluciones técnicas con el fin de reducir el consumo de energía, principalmente en los trenes.

Dos de estas soluciones importantes aplicadas, son:

1. El **frenado eléctrico regenerativo**
2. El uso de **equipo de tracción-frenado Chopper** en sustitución del equipo reostático

Como es sabido, la función esencial de la electrónica de potencia es cambiar la presentación de la energía eléctrica con alta eficiencia, utilizando elementos semiconductores que trabajen en condiciones de conmutación todo o nada (diodos, transistores, tiristores, etc), auxiliados con elementos inductivos, capacitivos y resistivos.



A estos equipos que cambian la presentación de la energía, se les llama en general convertidores. El **chopper** cambia corriente continua a corriente continua; el **rectificador** cambia corriente alterna en corriente continua; el **inversor** cambia corriente continua en corriente alterna; y el llamado **ciclo convertidor**, que cambia corriente alterna en corriente alterna de distinta frecuencia.

Prácticamente, podemos obtener beneficios de la tecnología; uno actualmente manejado, es el **ahorro de energía**, como en algunos capítulos en los que se habló de este importante tema. Es bien sabido que la energía eléctrica es un insumo fundamental en los procesos productivos, así como también un satisfactor indispensable para la sociedad; por tal motivo es necesario que se cuente con la **cultura de conservación de los recursos energéticos**; algunas de estas medidas son: elevando la eficiencia de los procesos, y/o bien racionalizando correctamente los consumos.

Mediante la aparición de técnicas y equipos avanzados, así como de modernos sistemas operativos y organizacionales, es posible obtener los resultados antes mencionados.

Sin embargo, la batalla por hacer uso más eficiente de la energía no ha cesado, y se han encontrado métodos y técnicas para reducir el consumo de energía de los trenes; una de ellas es con la **optimización de los diversos tipos de marcha de movimiento del tren**, esto es, mediante la operación de los trenes a velocidades inferiores a las actuales, y la aplicación de aceleraciones mayores a las vigentes con el fin de compensar de alguna forma el tiempo de recorrido de las interestaciones, y **aprovechar la marcha en neutro** el mayor tiempo posible; esta técnica es conocida como **marcha optimizada**.

Los **resultados** de la aplicación de la **marcha optimizada** son básicamente:

1. Un **ahorro de 11.5 %** de energía empleando un tiempo de 49 segundos más que la de la marcha actual (probada en el STC Metro)
2. Un **ahorro de 6.9 %** de energía empleando 14 segundos más que la de la marcha actual

Estos resultados pueden **variar según la topología del terreno** en el que se encuentre la línea del tren a ser analizado en promedio en las líneas del Metro de la Ciudad de México que se implementó, ha representado un ahorro del 10% de energía lo que significa un ahorro de 20 millones de pesos al año.

Estos ahorros de energía son importantes cuando se estudia un caso comprobado como es el STC Metro, ya que en gran parte su subsistencia radica en los logros que se obtienen a pesar de las pocas inversiones que se le otorgan por parte de las instancias correspondientes.

Dentro de las innovaciones y desarrollos tecnológicos actuales aplicados se encuentran los descritos a continuación:

- **Subestaciones Eléctricas de Alta Tensión (SEAT)**

Los mandos de tracción se hacen desde la SEAT con ayuda de tableros especiales y equipo de cómputo instalado en un centro de control.

- **Señalización**

El sistema de señalización incorpora controladores de punta de aguja para los aparatos de vía, con el fin de disminuir las posibilidades de descarrilamiento de los trenes.

- **Mando centralizado**

Su objetivo primordial es la regulación automática del tráfico de trenes.

- **Sistema de automatización**

Modos que aseguran la conducción del tren en forma automática respetando las condiciones de la señalización ubicada a lo largo de la línea (ATO, ATP).

- **Pilotaje automático (PA)**

Este sistema mejora la comodidad, además se encarga de enviar frenados reversibles que permiten continuar la marcha con seguridad sin llegar al paro total del tren, hasta alcanzar la velocidad establecida de acuerdo con el tipo de marcha.

- **Conducción Manual Controlada (CMC)**

Si el módulo que permite la conducción automática (ATO) se avería, el tren puede continuar en servicio mediante el modulo de ATP, quedando a cargo del conductor efectuar los mandos de tracción y frenado.

- **Radiotelefonía**

Presenta una mejora en la comunicación entre el **Puesto Central de Control (PCC)** y los conductores de los trenes, utilizando un cable radiante instalado a lo largo de la línea como medio de transmisión en banda de 400 [MHz].

- **Sistemas de telefonía**

Los equipos utilizados trabajan por medio de fibras ópticas a fin de optimizar las comunicaciones.

- **Conmutador telefónico**

La incorporación de conmutadores digitales en la red de comunicaciones del **STC** garantiza mayor rapidez y calidad en el servicio, permitiendo la comunicación directa con el exterior; sobre todo en las horas en las que las operadoras no estén en servicio.

Como se aprecia, los avances tecnológicos garantizan que los sistemas de tracción eléctrica son los sistemas que presentan mayores ventajas para emplearse en ciudades en donde hay una demanda de transporte alta, y que no es cubierta en su totalidad con las mínimas características que se deben ofrecer a los usuarios de transporte.

## CONCLUSIONES

El planeta se encuentra por primera vez en su historia en una crisis ecológica, debido a la sobreexplotación de los recursos naturales y el vertido de residuos. Estos abusos son consecuencia del productivismo y consumismo impulsados por el actual modelo económico, y el modelo de vida que éste genera, evidenciado en la capacidad de nuestras ciudades de consumir recursos, y provocar al menos tres cuartas partes de la contaminación total. Las urbes son lugares de producción y consumo desmedido, convertidas en parásitos consumidores insaciables de recursos y generadores de contaminación. La producción del espacio urbanizado impulsado por la masificación del automóvil y el desarrollo del transporte en general, es una de las actividades que más contribuye a la insostenibilidad global.

### Primera.-

Con toda la investigación anterior se puede proyectar la correcta planeación de un sistema de transporte, en donde éste pretende ver que se cumplan con los siguientes **requerimientos**:

- Buen desempeño y atracción a los usuarios
- Excelente operación

### Segunda.-

Las metas del sistema de transporte de tracción eléctrica deben cumplir con las **mejores características posibles**:

- Transportar al máximo número de pasajeros en condiciones seguras
- Lograr la máxima y mejor eficiencia operativa
- Buscar los costos mínimos para lograr el mejor nivel de desempeño

### Tercera.-

Se debe concientizar sobre el modo de transportación, destacando las ventajas del transporte colectivo (Tabla C.2) contra las desventajas del particular (Tabla C.1), observando cual brinda la mayor satisfacción al usuario:

| VEHÍCULO PRIVADO                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CARACTERÍSTICAS POSITIVAS                                                                                                                                                                                   | CARACTERÍSTICAS NEGATIVAS                                                                                                                                                                                                                                                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Confort</li> <li>▪ Privacidad</li> <li>▪ Estatus</li> <li>▪ Independencia</li> <li>▪ Ruta directa</li> <li>▪ Accesibilidad alta</li> <li>▪ Flexibilidad</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Requerimiento de espacio</li> <li>▪ Contaminante</li> <li>▪ Ruidoso</li> <li>▪ Alto grado de accidentes</li> <li>▪ Problemas de congestión</li> <li>▪ Tensión del conductor</li> <li>▪ Alto coste unitario del viaje</li> </ul> |

Tabla C.1 Características del vehículo privado

| TRANSPORTE COLECTIVO                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CARACTERÍSTICAS POSITIVAS                                                                                                                                                                                                                                                                               | CARACTERÍSTICAS NEGATIVAS                                                                                                                                                                                                                               |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alta capacidad</li> <li>▪ Bajo costo de viaje</li> <li>▪ Bajas necesidades de espacio</li> <li>▪ No necesaria habilidad de conducir</li> <li>▪ Altos niveles de seguridad</li> <li>▪ Viaje relajado</li> <li>▪ Permite desarrollos de alta densidad</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mayores tiempos de viajes</li> <li>▪ Tiempo de espera</li> <li>▪ Tiempo de transferencia</li> <li>▪ Tiempo andado</li> <li>▪ Menos confort</li> <li>▪ Menos privacidad</li> <li>▪ Baja flexibilidad</li> </ul> |

**Tabla C.2 Características del transporte privado**

**Cuarta.-**

Se requieren **mejoras** en los sistemas de autobuses; es decir, un buen método que serviría de apoyo al Metro son los autobuses de pasajeros de confinamiento exclusivo para su tránsito. En algunas partes del mundo existen en función los llamados autobuses guiados, esto permite una mejora en la calidad del servicio.

**Quinta.-**

Se debe considerar el grado de independencia (Tabla C.3) de la infraestructura del tipo de sistema de transporte que sea más adecuado, dependiendo de la zona en que se implante:

| GRADOS DE INDEPENDENCIA DEL TRANSPORTE PÚBLICO |                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CATEGORÍA                                      | CARACTERÍSTICAS                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>A</b>                                       | Infraestructura completamente controlada, tiene la plataforma para el transporte colectivo completamente independiente, sin cruces a nivel de vehículos y/o personas.                                                                                |
| <b>B</b>                                       | Infraestructura parcialmente controlada, que comprende los casos en los cuales el transporte colectivo está separado físicamente del resto del tráfico (por rodillos, vallas, barreras especiales), pero con cruces a nivel de vehículos o personas. |
| <b>C</b>                                       | Infraestructura no controlada, que se refiere a las vías públicas en las cuales el transporte colectivo está mezclado con el resto del tráfico.                                                                                                      |

**Tabla C.3 Grados de independencia de los sistemas de transporte**

El Metro convencional y el tren suburbano son de categoría A; ofrecen un buen nivel de servicio, pero sus costos de inversión limitan su aplicación. Por ello surgen los sistemas automáticos guiados, que prácticamente son vehículos más pequeños y con total automatización, lo que exige categoría A de reserva de plataforma total en su trazado.

#### **Sexta.-**

Se debe impulsar un sistema de transporte urbano innovador de capacidad intermedia guiado y de tracción eléctrica. Integrarlo con la red de transporte existente en cada ciudad; es decir, coordinarlo en función de éste, y así tener la mejor opción para los intercambios modales con los servicios existentes.

Actualmente existe un sistema de transporte guiado automático, que es un modo de transporte constituido por una flota de vehículos sin conductor, pero bajo el control de un ordenador sobre plataforma, totalmente independiente del resto del tráfico a nivel, en túnel o en viaducto. Sus características de concepción, diseño y explotación con comparables en muchos aspectos a las del Metro convencional, pero tiene apreciables diferencias en cuanto a costes, capacidad, y flexibilidad de explotación.

#### **Séptima.-**

El Metro ligero es un modo de transporte ferroviario de tracción eléctrica, típicamente urbano y suburbano; consta de una flota de vehículos con conductor que operan en plataforma reservada, aunque también puede darse el caso de tenerlo en plataforma totalmente independiente. Su capacidad, costo y calidad del servicio se sitúan entre las del autobús y el metro convencional.

En cuanto a la construcción y mejora de la red, un Sistema de Metro Ligero (SML), se caracteriza por la posibilidad de un crecimiento modular a medida que la demanda u otros condicionantes lo justifiquen.

Así aparece el SML como el sistema de capacidad intermedia de mayor versatilidad para resolver problemas de movilidad en las aglomeraciones urbanas; existen alrededor de 300 sistemas de este tipo en el mundo. En tanto los sistemas automáticos guiados han encontrado su mayor aplicabilidad en la resolución de problemas de transporte específicos en centros de actividad (aeropuertos, parques de atracciones, etc.), en otras ocasiones se ha encontrado beneficio como transporte urbano de alta capacidad, en algunas ciudades del mundo.

Es aquí donde se logra diferenciar entre los diferentes sistemas de transporte:

- Metro ligero en comparación con el autobús con camino propio
- Transporte automático guiado comparado con el Metro ligero

### **Metro ligero en comparación con el autobús con camino propio**

#### **Ventajas:**

1. Mejor imagen e identidad de las líneas
2. Vehículos más amplios y cómodos
3. Mayor capacidad para recibir nuevos usuarios

4. Niveles de ruido bajos, y sin emisión de sustancias contaminantes
5. Mejores prestaciones de los vehículos, debido a la tracción eléctrica
6. Mayor capacidad de transporte, llegando a alcanzar una capacidad de 20 000 pasajeros/hora/sentido, mientras que en el autobús de plataforma reservada sólo se pueden llegar a los 8 000 pasajeros/hora/sentido
7. Menores costos de explotación y mantenimiento
8. Más aptos para operar en túneles (no hay necesidad de ventilación)
9. Posibilidad de conversión a Metro convencional, según la demanda lo justifique
10. Mayor capacidad estructurante para el desarrollo urbano (actividad comercial, promociones inmobiliarias, etc.)

**Desventajas:**

1. Frecuencias de servicio más bajas para una demanda dada debido a que los vehículos son de mayor capacidad (especialmente en horas valle)
2. Necesidad de introducir en la infraestructura tecnología diferente en el caso de instalaciones nuevas
3. Menor capacidad de ramificación de las líneas, requiriendo más transbordos
4. Periodo de instalación más largo

**Transporte automático guiado, comparado con el Metro ligero**

**Ventajas:**

1. Nivel de servicio más alto (velocidad comercial, frecuencia, regularidad)
2. Mayor seguridad (control automático, señales, parada en caso de falla)
3. Costos de explotación y mantenimiento relativamente más bajos

**Desventajas:**

1. Dificultades de integración en el tejido urbano, como consecuencia de la exigencia de plataforma independiente
2. Menor facilidad para la construcción por fases
3. Periodo de instalación más largo

**Octava.-**

Así se evalúa la sustentabilidad para afirmar que el sistema de tracción eléctrica ofrece la mejor y más variada gama de opciones, para ser aplicado dentro de una ciudad con determinada demanda de transporte.

Dentro de un sistema de Metro ligero encontramos que puede tener las siguientes funciones básicas:

- En ciudades de tamaño medio puede ser configurado como modo de transporte principal para realizar viajes interurbanos, y los viajes radiales de conexión del centro de la ciudad con los alrededores.
- En las grandes ciudades podría actuar como alimentador / distribuidor de otros sistemas de transporte de mayor capacidad como el Metro convencional, o el ferrocarril
- Puede servir también como interfaz para conectar una ciudad principal con otra situada a corta distancia.

Un sistema de Metro ya sea en cualquiera de sus dos modalidades brinda impactos potenciales y brinda objetivos específicos para la comunidad.

#### **Novena.-**

Uno de estos objetivos es mejorar la **accesibilidad** y **movilidad urbanas**; esto debido a que ofrece una mejora sustancial de la calidad del sistema de transporte colectivo, siendo capaz de captar usuarios del vehículo privado, y reduciendo los niveles de congestión en muchas áreas.

Se tiene en cuenta que se derivan importantes impactos sobre el tráfico en el momento de la construcción, y también en la operación del sistema de Metro. El primero, en la fase de construcción se tiene en cuenta que se afectarán las vialidades cercanas; debido a las obras, habrá cierre de calles; y en algunos otros puntos viales que tendrán que sufrir modificaciones; esto durante un periodo de tiempo determinado por la construcción.

Estos efectos se pueden reducir al mínimo si desde el principio de la obra se evalúa cuidadosamente el problema, y se implementan medidas de gestión de tráfico adecuadas con la finalidad de mitigarlas.

Ya en la operación del sistema, se tienen dos posibles efectos:

#### **1. Efectos positivos**

En la medida en que el Metro capte más usuarios del vehículo privado, se reducirá la congestión de automotores; también habrá tendencia a la liberación del espacio de calles por la reducción de autobuses.

#### **2. Efectos negativos**

Podría haber reducciones de espacio en las avenidas y calles, debido al área de reserva de plataforma para el Metro, aunque éstas también tienen soluciones como pueden ser: adquiriendo suelo adicional para la calzada; reducir el ancho de los carriles, establecer pavimento continuo compartido; eliminar zonas de estacionamiento en las zonas viales, etc.



El Sistema de Transporte Colectivo Metro ofrece mejora en la calidad ambiental urbana, ya que ofrece ventajas sobre el vehículo privado y los autobuses; es decir, también al reducir el empleo de vehículos privados, disminuye el uso vial particular y los asentamientos debido a exceso de estacionamiento en las arterias viales.

Por todas estas razones se considera que el Metro es el medio de transporte más seguro, que determina condiciones de operación óptimas y adaptables contra los demás medios que operan a su alrededor.

#### **Décima.-**

La explotación del sistema de Metro debe estar siempre orientada a conseguir un elevado nivel y calidad de servicio, capaz de atraer a los usuarios del vehículo privado en los centros urbanos, manteniendo los costos de explotación aceptables.

Debido a la capacidad y a la calidad de la oferta de servicio del sistema de transporte Metro, se puede explotar al máximo una variable como lo es la frecuencia del servicio, pudiéndose conseguir frecuencias altas, con intervalos entre trenes de 1.5 a 3 minutos en hora punta, con lo que los tiempos de espera son mínimos; mientras que en horas valle pueden tener intervalos entre 5 y 15 minutos, aunque normalmente no se pasa de los 10 minutos en la práctica si se desea mantener una calidad de servicio alta.

La velocidad comercial de este medio de transporte, también es un parámetro importante y en ocasiones llega a ser de las más altas si se dispone de una infraestructura independiente.

Se puede tener regularizado el servicio, es decir, cumplir con un horario establecido, esto puede llegar a ser clave para reducir los tiempos de espera, facilita las correspondencias entre los diferentes servicios de transporte, y en general para que los usuarios tengan **confianza** en el sistema.

Para mejorar tanto la velocidad comercial como la **regularidad** no es conveniente la venta de boletos a bordo por el conductor, debiéndose prever la venta anticipada y la utilización de bonos o tarjetas multiviaje, así como también la disposición de las puertas de los vehículos, el diseño de la plataforma y de los andenes de forma que permitan la subida y bajada con rapidez, ayudarán a mejorar las variables de explotación antes mencionadas.

#### **Décimo primera.-**

Una de las ventajas adicionales del transporte de tracción eléctrica es que permite el uso de frenado de recuperación, que tiene la característica que puede llegar a **economizar la energía** en un orden aproximado del 20%.

Hablando del consumo de energía, la tracción eléctrica tiene la ventaja que sólo se consume energía cuando el sistema o tren se pone en marcha; mientras que otros sistemas que requieren de diesel, gasolina o gas, consumen energía aun estando detenidos momentáneamente durante

su recorrido, además este tipo de sistemas como se ha reiterado, son fuente importante de contaminación y deterioro atmosférico.

**Décimo segunda.-**

Dos de los objetivos que tienen que alcanzarse son:

- La creación de alternativas de transporte de menor daño ambiental dentro del marco de movilidad existente
- Replantear la necesidad de transporte, y de esta forma mejora la accesibilidad sin necesidad del motor de combustión

Dentro de las limitantes que hacen que el sistema de Metro tienda a no considerarlo como opción viable, es que los costos de construcción llegan a ser relativamente altos como se ha mencionado, pero se tiene la posibilidad de que existen tipos diferentes de construcción de una línea de Metro.

Por ejemplo hay la posibilidad de construirlo en tipo **zanja** (poca profundidad) abierta o techada, o tipo **túnel blindado** (gran profundidad). La diferencia radica en el costo y su tecnología de construcción. Una de las bondades que ofrece al construirlo de este modo es que en superficie (Figura C.1) no afecta tanto la ecología como la estética que es muy deseable, ya que se pueden tener encima de él, algunos otros servicios adicionales que complementen su operación.

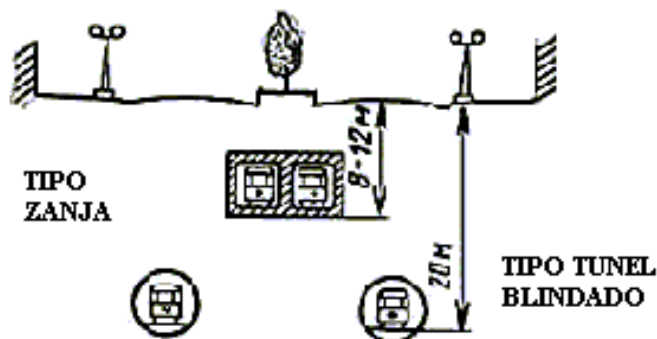


Figura C.1 Prospecto de una línea de transporte masivo eléctrico subterránea

Una segunda alternativa que presenta la construcción del Metro es haciéndolo elevado (Figura C.2), que al igual que el subterráneo implica mayores costos de construcción debido a la

infraestructura que se requiere, aunque este sistema se ha llegado a usar últimamente en las recientes líneas del STC Metro en tramos bastante extensos.



Figura C.2 Transporte masivo eléctrico elevado

Una tercera forma de proyectar una línea de transporte de Metro es la instalación superficial (Figura C.3), en donde una de sus ventajas radica en que el sistema no es demasiado costoso debido a la limitada infraestructura que requiere, pero como es lógico esto conlleva a un costo adicional que se tiene que pagar con una mayor longitud, viéndose afectadas en un momento dado restricciones de zonas verdes, restricciones de áreas peatonales longitudinales (banquetas estrechas); es decir, de cualquier modo se tendría un costo a pagar.



Figura C.3 Proyección de un sistema de tracción eléctrica superficial

### Décima tercera.-

Las ventajas de los motores eléctricos aplicados a la tracción es que los trenes que los utilizan, se dice que nunca se quedan sin combustible debido a que la fuente de energía se considera ilimitada, tienden a ser más silenciosos, no contaminan, tienen mejor prestación en cuanto a aceleración, velocidad y capacidad de carga.

**Décimo cuarta.-**

Con esto, nuevamente se afirma que se puede tener una alternativa integral de desarrollo para el transporte urbano en donde sus principales componentes serán:

1. Territorio para asentar el confinamiento exclusivo del transporte eléctrico
2. Estaciones y terminales de la red (es) a ser incorporadas
3. Puentes peatonales (infraestructura externa)
4. Talleres de mantenimiento
5. Centros de control
6. Sistemas adicionales que funjan como alimentadores de algunas zonas suburbanas

Lo anterior permitirá tener una red de transporte acorde con la demanda en la cual no se obstaculice el traslado de personas y mercancías de un lugar a otro; esto, siempre tomando en cuenta los intereses de los usuarios y dentro de una planificación que brinde seguridad y los mejores cambios positivos para el bienestar personal de los mismos.

Así se comprueba la factibilidad buscada al principio de esta investigación sobre los sistemas de transporte eléctrico, y que bien es cierto presupone un futuro potencial en las ciudades que adopten como base este sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

Oliveros Rives, Fernando y Rodríguez Méndez, Manuel, *Tratado de Ferrocarriles II*, Editorial Rueda, Ingeniería Civil e Instalaciones.

Fernández Lafuente, Francisco, *Metro ligero: nuevos tranvías en la ciudad*, España, Ministerio de obras públicas, transportes y medio ambiente, 1995, 102 pp.

Espinoza Ulloa, Jorge, *El metro: una solución al problema de transporte urbano*, México, Representaciones y servicios de ingeniería, 1975, 143 pp.

Valero Calvete, Javier, *Transportes Urbanos*, Madrid, Dossat, 1970, 330 pp.

Batru Serbán, Neagu, *Trenes eléctricos*, México, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 1991, 238 pp.

Hay, William W., *Ingeniería de Transporte*, México, Limusa, 1983, 109 pp.

Molinero Molinero, Ángel R. y Sánchez Arellano, Luis Ignacio, *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración*, México, Universidad Autónoma del Estado de México, 1997, 753 pp.

Islas Rivera, Víctor, *Llegando tarde al compromiso: La crisis del transporte en la ciudad de México*, El colegio de México, 2000, 603 pp.

## HEMEROGRAFÍA

Gorostiza, Francisco, “*Ferrocarril: prospectiva al año 2005*”, en Revista IC Ingeniería Civil, número 404, México, 2002, p 24 – 39

Guzmán Cruz, Marco A., Boletín técnico informativo del STC, Volumen I, Números 1 - 9, marzo 1996 – agosto 1998

## DIRECCIONES ELECTRÓNICAS

Página del Sistema de Transporte Colectivo Metro  
<http://www.metro.df.gob.mx>

Artículos publicados sobre trenes eléctricos del mundo  
<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Hall/6994/eficienc.htm>

Portal mundial de los tranvías  
<http://www.tramway.com>

Metro Planet. El sitio de todos los Metro en el Mundo.  
<http://www.metropla.net/>