

C1149



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

T E S I S

**"APLICACIÓN DE UNA TÉCNICA DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN LA OPERACIÓN Y CONDUCCIÓN DE LOS
TRENES NEUMÁTICOS DE LAS LÍNEAS 1,2 Y 3 DEL
SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO, PARA AHORRO DE
ENERGÍA Y COSTOS."**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
(TRANSPORTE)**

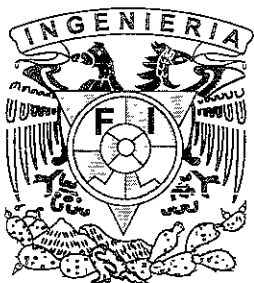
P R E S E N T A :

FRANCISCO ECHÁVARRI HERNÁNDEZ

**DIRECTOR DE TESIS
DR. SERGIO FUENTES MAYA**

MÉXICO, D.F.

2001





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

“ ... no estudio para aprender más, sino para ignorar menos”

Sor Juana Inés de la Cruz

A Dios y a mis padres que me dieron la oportunidad de vivir.

A mi esposa Paty, que con su amor, comprensión y entusiasmo hicieron que llegara a la meta.

A mis hijos Emilio y Paty, como un tributo a mi cariño, respeto y admiración.

A mis hermanos Sergio, Cristina, Julián y Carolina, con todo respeto y admiración.

A la familia en general, con cariño y aprecio.

Al Sistema de Transporte Colectivo, por brindarme su apoyo de especializarme y ampliar mis conocimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por acogerme en su seno y otorgarme la oportunidad de estudiar.

A mi Director de Tesis, por su interés y dedicación profesional.

A los Doctores, Maestros e Ingenieros de la UNAM, por transmitirme su visión, experiencia y conocimientos.

A mis compañeros de aula, que compartimos experiencias inolvidables.

A mis amigos del S.T.C., Luis Martín Amaya R., José A. Barajas C., Gloria Camarillo M., Gilberto Espinosa S., René Moreno M. y Bernardo Revueltas M. que me brindaron su ayuda incondicional.

Y en especial, quisiera agradecer al Ingeniero Baltasar Chavez Espino, como una deuda profesional, por ser el autor intelectual de la aplicación de esta técnica y sin su autorización, conocimientos y experiencia, no hubiera sido posible realizar ni presentar este trabajo.

Muchas gracias a todos ustedes y que Dios lo bendiga.

CONTENIDO

	Pág.
Introducción	1
CAPITULO I. Aspectos generales de la energía	3
1.1. Aspectos generales del consumo de energía en México	3
1.2. Los transportes consumidores de energía y Contaminantes en el mundo	11
1.3. El consumo de energía en los metros del mundo	17
CAPITULO II. Conceptos de la Tecnología Metro	24
2.1. Características generales	24
2.2. Consumo de energía eléctrica de los trenes	34
CAPITULO III. Optimización del uso de la Energía Eléctrica	37
3.1. Eficiencia Energética	37
3.2. Principio básico de la marcha optimizada automática	50
CAPITULO IV. Ahorro obtenido con la aplicación de la marcha Optimizada	53
4.1. Resultados de la marcha optimizada	53
CAPITULO V. Consumo de energía y sus costos	70
5.1. Evolución de los costos de la energía	70
Conclusiones	78
Anexos	80
Anexo A – Arranque y frenado reostático	81
Anexo B – El chopper	87
Anexo C – Dinámica de trenes	93
Bibliografía	99

Introducción

Como sabemos, la energía eléctrica es un insumo fundamental en todos los procesos productivos, así como un satisfactor indispensable para la sociedad. Ahora más que nunca, dadas las condiciones que prevalecen en todo el mundo, es necesario que cada país conserve sus recursos energéticos elevando la eficiencia de sus procesos y racionalizando el consumo de la energía con objeto de competir en el ámbito Internacional.

Por otra parte, los transportes desempeñan un papel esencial en la vida moderna y su eficiencia constituye un índice del desarrollo económico del país. La función de los medios de transporte urbano de carga y de pasajeros es la de establecer un puente de comunicación entre las zonas habitacionales y las áreas de trabajo, estudio, diversión y zonas comerciales. Un sistema de transporte ésta formado por cinco componentes principales que son: **vehículos, fuerza motriz, sistemas de control, vías de comunicación y estaciones.**

Bajo este concepto, el Metro de la Ciudad de México, es un modo de transporte vital para los ciudadanos de esta gran urbe al transportar un promedio de 4.5 millones de usuarios por día y consumir 2.5 millones de kilovatios por hora, energía similar a la que consume el estado de Baja California en las ciudades de Tijuana, Ensenada, Mexicali y La Paz, lo que significa que para su operación utiliza 900'000,000 de kWh en promedio por año; de estos, el 90% se ocupa en la tracción de los trenes y el resto en alumbrado y fuerza, lo que implica para el STC erogar \$300 mdp por año por concepto de consumo de energía eléctrica.

Una de las razones que me motivó a trabajar sobre este tema, sin duda lo fue, el investigar y encontrar nuevos sistemas y/o equipos que hicieran más eficientes los procesos de operación de los trenes y con ello reducir el consumo de la energía eléctrica y los costos por el pago de este insumo.

Para ello, se aplicó una técnica de eficiencia energética en la operación y conducción de los trenes eléctricos conocida como marcha optimizada, logrando probarla en diversos tipos de marcha de los trenes(de las líneas 1,2 y 3 del STC) mediante la operación a velocidades inferiores a las actuales, y a la aplicación de aceleraciones mayores a las vigentes, aprovechando así la marcha del tren en neutro el mayor tiempo posible sin alterar las velocidades comerciales previstas en el servicio; otra alternativa fue sustituir los equipos y/o sistemas de propulsión tales como: el frenado eléctrico reostático (JH) por el frenado eléctrico regenerativo y el equipo de tracción - frenado reostático por el equipo tipo chopper.

Es importante advertir que esta técnica, sólo se aplicó a los trenes de rodadura neumática de las líneas 1,2 y 3 por ser donde circulan la mayor cantidad de trenes y las que transportan el 75% de la demanda, además de que cuentan con los sistemas de propulsión tipo CHOPPER¹, donde el automatismo denominado "pilotaje automático embarcado de 135 KHz²" permitió modificar algunos elementos técnicos a bordo del tren.

Es importante mencionar también, que en el año de 1994, la Gerencia de Ingeniería y Desarrollo del Sistema de Transporte Colectivo inició con éste proyecto, posteriormente después de los primeros resultados, se llevó al campo para ponerlo en práctica en el año de 1996, situación que a la fecha ha brindado resultados interesantes.

Mi aportación a la investigación, fue lograr combinar la teoría con la práctica y sobre todo reafirmar mis conocimientos en materia de eficiencia energética al transporte en general.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue: 1) aplicar la técnica de eficiencia energética conocida como "marcha optimizada" a los trenes de éstas líneas, 2) lograr ahorrar energía eléctrica en las líneas 1,2 y 3 donde se transportan las $\frac{3}{4}$ partes de usuarios / día; y 3) reducir los costos por el pago del insumo.

Este trabajo se desarrolla como sigue: en el capítulo Uno, se plantean aspectos generales de la energía en México, su consumo e influencia en los transportes y otros sectores en el mundo; en el capítulo Dos, se explican los conceptos de la tecnología metro, principio de la marcha de los trenes y consumo de energía eléctrica de los trenes; en el Tres se describen los conceptos y principios teóricos de la eficiencia energética y la marcha optimizada; en el Cuarto se presentan los resultados de ahorro de energía y en el capítulo Cinco se describen los beneficios económicos como resultado de aplicar estas medidas; en los anexos se presentan los conceptos teóricos del arranque y frenado reostático, chopper y dinámica de trenes.

¹ Sistema de Propulsión de Arranque y Frenado de los trenes, Anexo B

² Automatismo denominado "Pilotaje Automático", para controlar la marcha de los trenes.

CAPITULO I ASPECTOS GENERALES DE LA ENERGÍA

En este capítulo se establece un panorama general de la clasificación y disponibilidad de la energía en nuestro país y se destaca la necesidad de hacer más eficientes los procesos donde intervenga.

Por otra parte, se presenta la estructura del Balance de Energía y del Sector Transporte a nivel Nacional. Asimismo, se demuestra que los transportes en general son grandes consumidores de energía y por ende los que contribuyen en mayor medida a la contaminación de las grandes ciudades.

Por último, se describe y compara en términos generales el consumo de energía del Sistema de Transporte Colectivo contra el transporte eléctrico a nivel mundial y con ello se confirma que el metro de esta ciudad consume 2.5 millones de KWh y de éstos el 90% corresponde a la tracción de los trenes y el 10% para alumbrado y fuerza, es decir, edificios, oficinas, talleres etc.

1.1 Aspectos generales del consumo de energía en México³

La disponibilidad de energía es indispensable para el desarrollo de las actividades productivas y para asegurar la competitividad de la economía. *El Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000* tiene como meta a mediano plazo crecer de manera sostenida para elevar el ingreso *per cápita* de los mexicanos. Para ello, se requiere contar con una política de energía que, basada en un diagnóstico riguroso, consolide fortalezas y subsane debilidades del sector en la satisfacción de la demanda nacional para los próximos años.

De acuerdo con estos objetivos, la Secretaría de Energía fija políticas y orienta a los organismos del sector a cumplir con el mandato que tiene el Estado de asegurar la explotación y el uso racional de los recursos energéticos en beneficio de los mexicanos.

El *Balance nacional de energía* contribuye año con año a este diagnóstico aportando información sistematizada sobre las fuentes y usos de la energía del país, proporcionando elementos para valorar el cumplimiento de las políticas y estrategias a corto, mediano y largo plazo, y coadyuvando a orientar las acciones que se deberán emprender para emplear de manera

³ Balance Nacional de Energía 1997, Secretaría de Energía págs.11 a 34

óptima los recursos de energía, lograr un crecimiento económico sostenido en el largo plazo y preservar el medio ambiente.

En 1997 las acciones implantadas en el sector arrojaron importantes resultados, entre los que destacan:

Mayor eficiencia energética.

Tendencia estable en la producción de energía.

Tendencia constante en los destinos de la oferta interna bruta.

Incremento en el consumo nacional de energía.

Crecimiento en el consumo final de energía.

Requerimientos mayores de energía para consumo final.

Estructura del balance

El balance nacional de energía⁴ presenta las fuentes de energía primarias y secundarias, que se definen como: (figura 1).

Fuentes de energía.- Son todo aquello que produce energía útil directamente o por medio de una transformación; se clasifican en primarias y secundarias.

Energía primaria.- Son las distintas fuentes de energía tal y como se obtienen de la naturaleza, ya sea en forma directa o después de un proceso de extracción. Se consideran once fuentes primarias de energía:

Carbón mineral

Combustible sólido, de color negro o marrón, que contiene esencialmente carbono y pequeñas cantidades de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y otros elementos. Proviene de la degradación de organismos vegetales durante un largo periodo.

⁴ Op. Cit. Balance de Energía 1997, pág 32

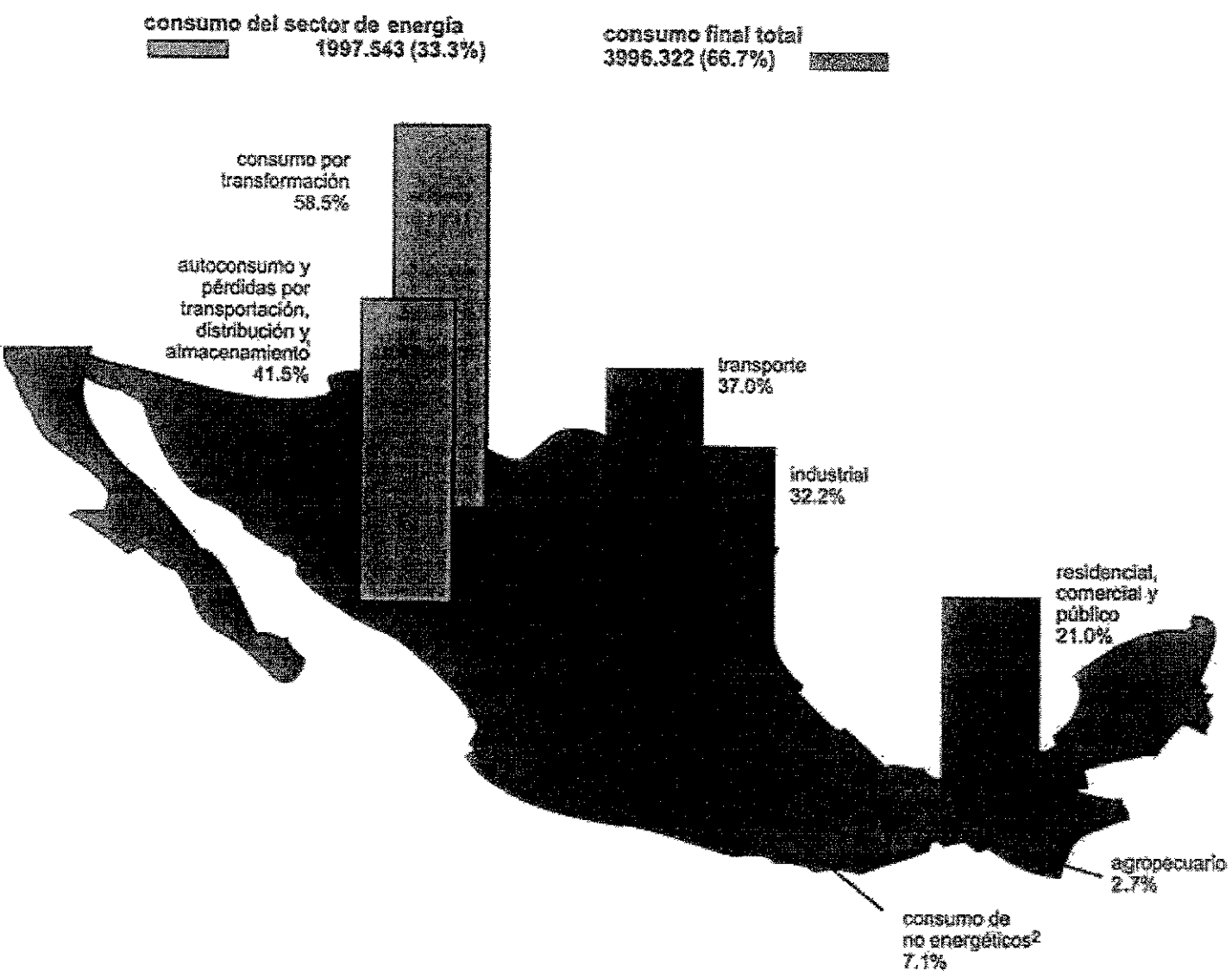


Figura 1. Consumo Nacional de Energía

Petróleo crudo.

Es un líquido aceitoso de color café oscuro que se presenta como un fluido viscoso y se le encuentra almacenado en el interior de la corteza terrestre.

Condensados.

Compuestos líquidos que se recuperan en instalaciones de separación de los campos productores de gas asociado. Se incluyen líquidos recuperados en gasoductos, los cuales se condensan durante el transporte del gas natural asociado. Se componen básicamente de pentanos y líquidos más pesados.

Gas natural no asociado

Mezcla gaseosa de hidrocarburos formada principalmente por metano.

Gas natural asociado

Mezcla gaseosa de hidrocarburos que se extrae con el petróleo crudo. Para consumir este energético, es necesario separar los líquidos y el azufre que contiene en una planta de gas.

Nucleoenergía

Energía contenida en el mineral de uranio después de pasar por un proceso de purificación y enriquecimiento. Se considera energía primaria el contenido de material fisionable del uranio, el cual se usa como combustible en los reactores nucleares.

Hidroenergía

Energía potencial de un caudal hidráulico. La producción de hidroenergía se calcula como la generación bruta de electricidad entre la eficiencia del Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

Geoenergía

Energía almacenada bajo la superficie de la tierra en forma de calor y que emerge a la superficie en forma de vapor. Se considera sólo la porción de dicha energía utilizada para la generación de electricidad.

Energía eólica

Energía que se obtiene mediante un conjunto turbina – generador accionado por la fuerza del viento.

Bagazo de caña

Fibra que se obtiene después de extraer el jugo de la caña en los ingenios azucareros.

Leña

Se considera la energía que se obtiene de los recursos forestales y se utiliza en forma directa, en el sector residencial para cocción de alimentos y calefacción. Incluye troncos y ramas de árboles, pero excluye los desechos de las actividades madereras.

Energía Secundaria.- Son energéticos derivados de las fuentes primarias, y se obtienen en los centros de transformación con características específicas para su consumo final. Estos productos son coque, gas licuado, gasolinas y naftas, kerosinas, diesel, combustóleo, productos no energéticos, gas natural y electricidad.

Coque

Combustible sólido, con alto contenido de carbono, obtenido en la destilación del carbón siderúrgico y del petróleo. En el balance se contabilizan dos tipos, coque de carbón y coque de petróleo.

Gas licuado de petróleo (LP)

Combustible que se obtiene de la destilación del petróleo y del tratamiento del gas natural. Se compone de propano, butano, o de una mezcla de

ambos. Este combustible se utiliza fundamentalmente en el sector residencial y comercial.

Gasolinas y naftas

Combustible líquido liviano, con un rango de ebullición entre 30 y 200°C, que se obtiene de la destilación del petróleo y del tratamiento del gas natural. Dentro de este rango se consideran las gasolinas de aviación, automotrices, naturales y las naftas.

Kerosinas

Combustible líquido compuesto por la fracción del petróleo que se destila entre 150 y 300°C.

Diesel

Combustible líquido que se obtiene de la destilación del petróleo entre 200 y 380°C. Es un producto para uso automotor e industrial; se emplea principalmente en motores de combustión interna tipo diesel. En este grupo se incluyen Pemex diesel, diesel desulfurado, diesel marino y gasóleo industrial.

Combustóleo

Combustible residual de la refinación del petróleo. Abarca todos los productos pesados; se utiliza principalmente en calderas, plantas de generación eléctrica y motores para navegación, y se divide en combustóleo pesado, ligero e intermedio.

Productos no energéticos o materia prima

Productos que se utilizan como materia prima, aun cuando poseen un considerable contenido de energía como asfaltos, lubricantes, grasas, parafinas, etano, propano – propileno, butano – butileno, azufre y materia prima para negro de humo.

Gas natural

Hidrocarburo gaseoso obtenido como subproducto del gas asociado en plantas de gas y refinerías después de extraer los licuables; se forma por metano y pequeñas cantidades de etano.

Electricidad

Energía transmitida por electrones en movimiento. Este rubro incluye la energía eléctrica generada por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

Sector transporte⁵

En 1997, el consumo de combustibles y electricidad de los diversos medios de transporte que se utilizan en el país ascendió a 1478.1 PJ⁶, cifra 4.2% superior a la registrada en 1996.(figura 2)

Autotransporte

El autotransporte de carga y pasajeros consumió 1321.2 PJ en 1997, lo cual equivale a un aumento de 3.7% respecto a 1996. Este subsector representó 89.4% del consumo del sector transporte en su conjunto. Los principales energéticos consumidos fueron las gasolinas, con 72.5% igual a 958.0 PJ, 3.1% más que el año precedente. El diesel participó con 26.1% 344.1 PJ, y aumentó 5.6% respecto al año anterior, el gas licuado con 19.1 PJ, que es igual a 1.4% del total y 0.6% menos que en 1996.

Aéreo

El consumo de energía en este medio de transporte sumó 99.1 PJ, con un aumento de 7.5% respecto al año anterior. Esta cifra fue 6.7% del consumo del sector transporte. Los energéticos utilizados fueron; las kerosinas, con 98.9%, las gasolinas 1.1%.

Ferroviario

El sistema de transporte ferroviario consumió 20.4 PJ de diesel, 15.7% menos que en 1996, y 1.4% del total del sector transporte.

⁵Op Cit. Balance de Energía 1997, pág 39

⁶ PJ = PetaJoule, Peta = 10¹⁵(prefijo métrico) y Joule = Unidad de energía equivalente a mover un kilogramo masa un metro de distancia, aplicando una aceleración de un metro por segundo cada segundo

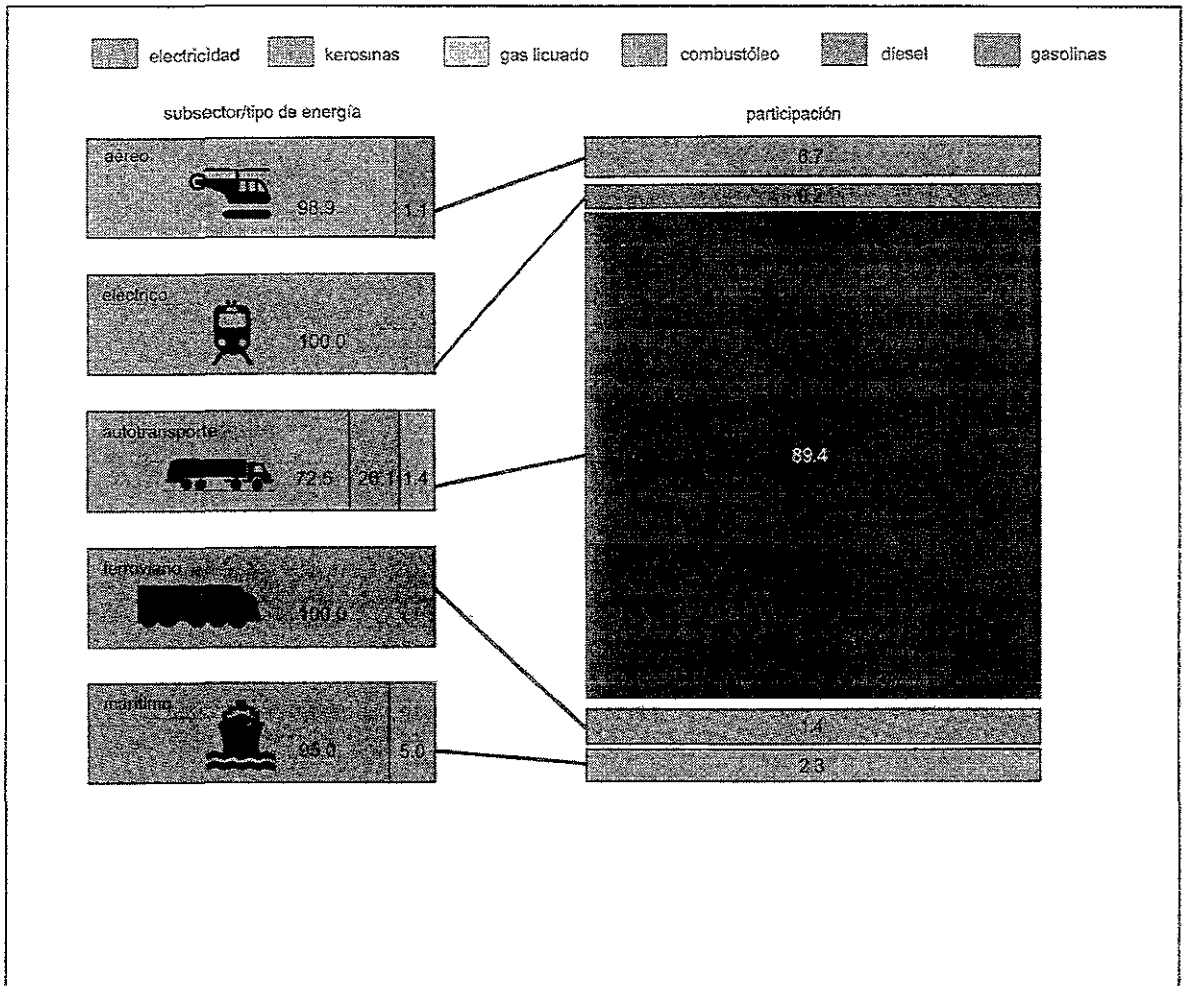


Figura 2. Consumo de Energía del sector Transporte

Marítimo

El transporte marítimo utilizó 33.9 PJ en 1997, 37.3% más que en 1996, y 2.3% del consumo total del sector transporte. Los energéticos consumidos fueron el diesel, 95%, y el combustóleo 5%.

Eléctrico

El transporte eléctrico consumió 3.5 PJ durante 1997, 0.4% más que en 1996 y 0.2% del total del sector transporte.

Este último sistema está integrado por el metro de las ciudades de México y Monterrey los cuales consumieron 91.2% del total, y por los trolebuses, el tren ligero y el transporte eléctrico de la ciudad de Guadalajara, que utilizaron 8.8%.

1.2 Los transportes consumidores de energía y contaminantes en el mundo.

La UITP⁷ en 1997, en su 52° Congreso Internacional celebrado en Stuttgart Alemania, menciona que las últimas décadas han estado marcadas por un aumento en el consumo de energía en el mundo. Esto condujo a pensar que en muy poco tiempo, los recursos energéticos fósiles (no renovables) no estarán disponibles en cantidad suficiente, ni podrán competir con las energías clásicas. Por lo tanto este consumo creciente será cubierto en su mayor parte por la energía clásica y por ende la contaminación aumentará fuertemente, aún cuando alguna de las tecnologías permita mejorar los rendimientos de la producción y del consumo.

Ante este pronóstico tan pesimista y realista, la única alternativa consiste en ahorrar energía en todos los sectores de la producción, incluyendo el transporte, que corresponde al consumo de energía primaria y que aumenta en forma paralela al crecimiento económico en el mundo.

Si se comparan los sistemas de transporte desde el punto de vista del consumo de energía y de las emisiones contaminantes, hay que tomar en cuenta a toda la cadena de utilización energética del transporte en su conjunto y no sólo al sector de tracción eléctrica. En efecto, el consumo de energía primaria se distingue del consumo de energía final, que sirve a fin

⁷ UITP Unión Internacional de Transportes Público con sede en Bruselas, Bélgica

de cuentas para ofrecer el servicio de transporte. Para el caso de la ciudad de México⁸ esta se representa en la figura 3.

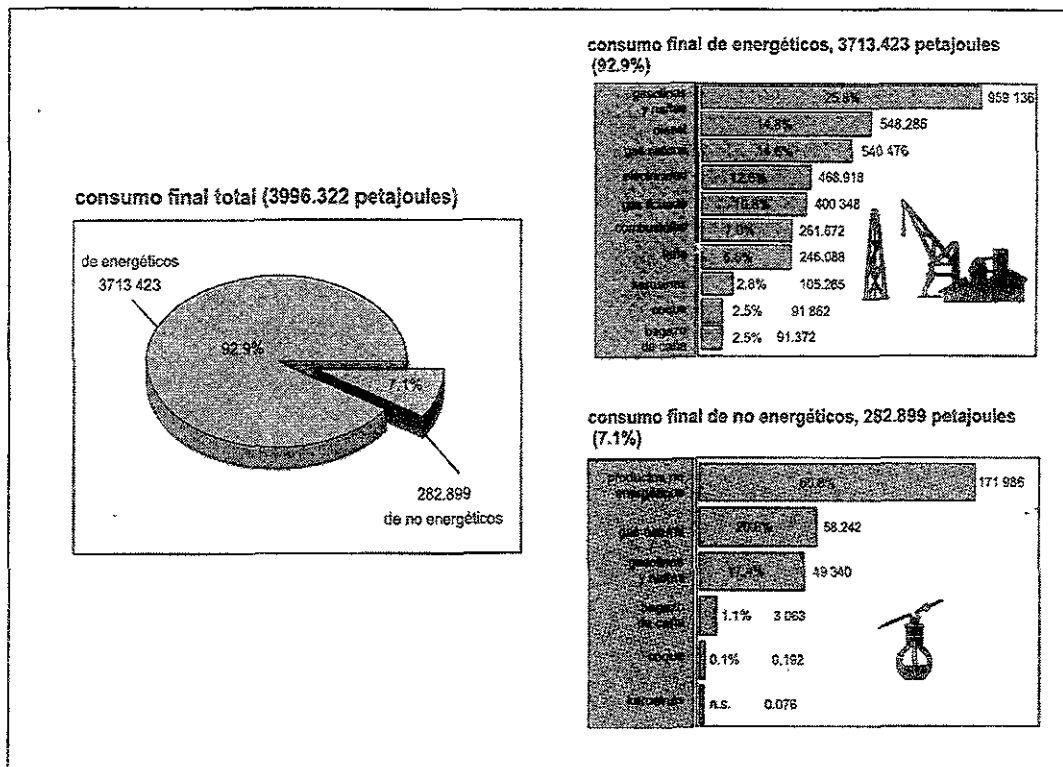


Figura 3. Consumo final de energéticos por sector y tipo

⁸ Op Cit. Balance de Energía 1997, pág 35

Por otra parte, los sistemas de Metro, en razón de sus altos rendimientos, contribuyen a economizar energía en el transporte y a reducir las aglomeraciones de alta densidad poblacional. La viabilidad futura de éstas depende justamente de la presencia de transportes públicos cada vez más eficientes.

Se dice que, globalmente, los metros transportan cada año cerca de 21.4 mil millones de pasajeros. Su consumo de energía eléctrica puede ser estimado en 20,000 GWh; esto equivaldría a generar un total de producción de electricidad de un país como Portugal; además, los costos del consumo de energía eléctrica representan un gasto considerable de las empresas de Metro. Luego entonces, un objetivo común de los países que cuentan con un sistema de transporte tipo Metro como Francia, Inglaterra, Alemania; Japón, Estados Unidos y México entre otros, es reducir al máximo posible el consumo de energía eléctrica de estos sistemas de transporte.

Algunos expertos argumentan que en el caso de los ferrocarriles, la pérdida entre la energía primaria y la energía final utilizada se eleva cerca de 65-66% como resultado de la transformación y la distribución, ya que en este caso, las necesidades indirectas en los consumos de energía inherentes a la operación del sistema cuentan mucho; por ejemplo, las maniobras o el calentamiento previo de las locomotoras y la puesta en marcha de nuevas locomotoras. Por esta razón, estudios realizados por la UITP llegaron a la conclusión de que cerca del 50% del consumo mundial de energía primaria podría ser atribuida a los transportes pero, a pesar de ello, estos porcentajes pueden variar considerablemente según las características de los sistemas⁹(figura 4)

Esto significa que la parte importante que recae en los transportes en el consumo energético es del 84% de la producción mundial de

⁹ Revista de la UITP del 52° Congreso de Ahorro de Energía, realizada en Stuttgart Alemania, pág. 17

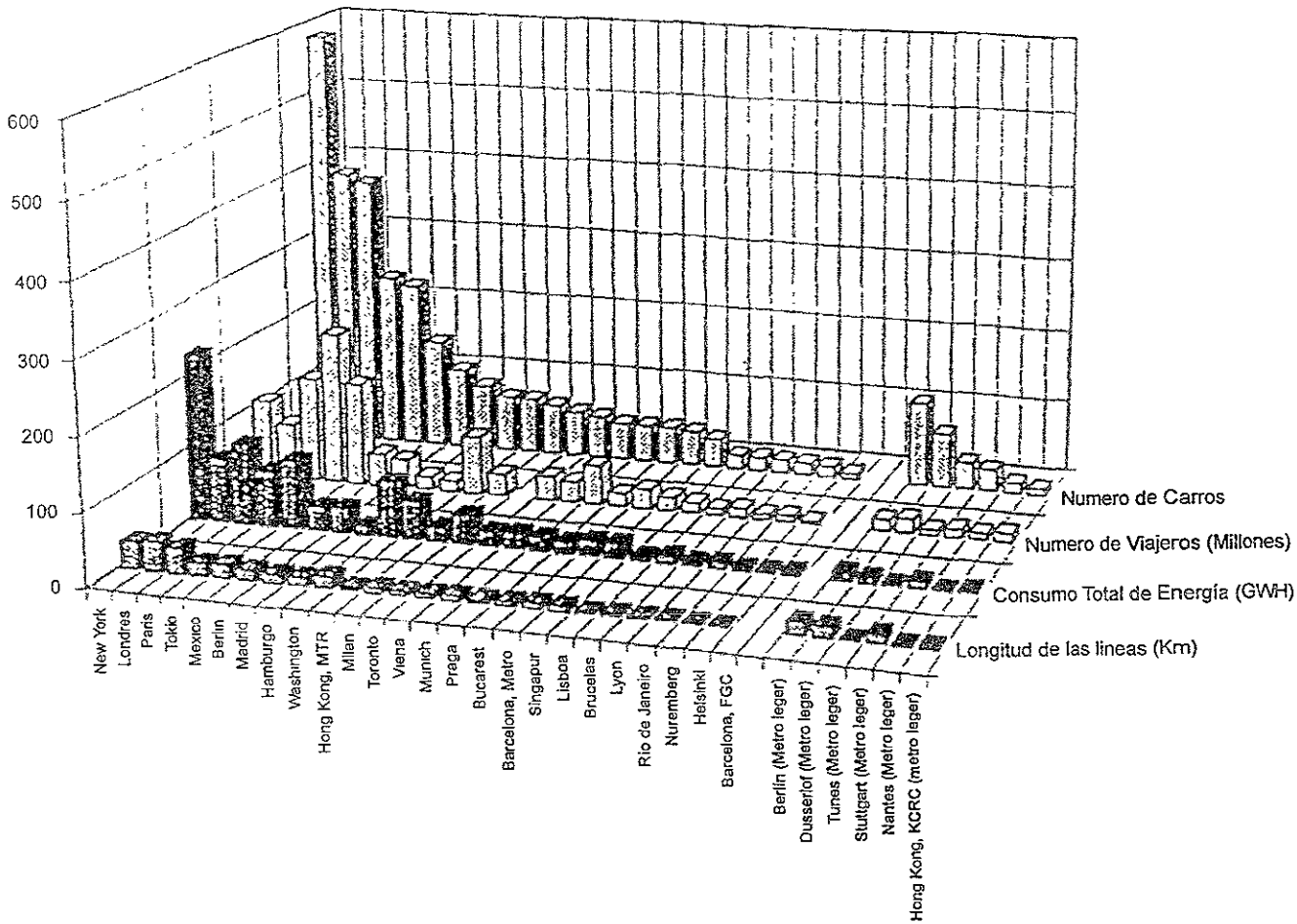


Figura 4. Características de los sistemas de transportes tipo metro y tren ligero y sus consumos de energía.

energía que representan los combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón), por lo que los transportes son hoy el factor de contaminación número uno y seguirán siéndolo por largo tiempo. Esto ha repercutido en el medio ambiente y la salud.

Estos efectos son múltiples especialmente en la contaminación atmosférica debida a sustancias gaseosas como bióxido de carbono (CO₂); monóxido de carbono (CO); óxidos de nitrógeno (Nox); hidrocarburos (Hc); bióxido de azufre (SO₂) y partículas de polvo.

A mediados de los años 80, se estimó que la circulación de automóviles fue la causa de las siguientes emisiones en el mundo: 310 millones de toneladas de CO, 40 millones de toneladas de HC y 32 millones de toneladas de Nox.

Los medios de transporte de tracción eléctrica tienen también un impacto negativo en el medio ambiente. Así por ejemplo, en Alemania las centrales térmicas figuran entre los contaminadores más importantes; en 1984 se le atribuyeron a la producción de corriente las siguientes emisiones: 30% de óxidos de nitrógeno Nox, 66% de hidrocarburos clorados, 50% de hidrocarburos fluorados, 20% del total de los polvos y 60% del dióxido de azufre (SO₂). Pero a pesar de ello, es posible purificar las emisiones de un modo más controlado en las centrales que en los automóviles individuales.

La UITP estima que para evaluar los efectos, hay que situarse a tres niveles: mundial, regional y local.

A escala mundial; resalta la cuestión de la compatibilidad con el medio ambiente respecto al efecto del calentamiento de la atmósfera. Las emisiones de gas carbónico y de óxidos de nitrógeno tienen una importancia vital.

En el ámbito regional; hay que considerar particularmente el gas de escape de los vehículos que, en razón de ciertas condiciones atmosféricas, se transforman para crear el ozono, aerosoles ácidos (sulfatos, nitratos) y partículas. Estos contaminantes pueden ser transportados por el viento a largas distancias. Los óxidos de azufre son llevados a la superficie de la tierra en la forma de lluvias ácidas.

En el plano local; los efectos relacionados con la circulación de automóviles son cada vez más problemáticos y la elección del medio de transporte será decisiva para la calidad de vida o, expresándolo de una forma dramática, para la viabilidad de las ciudades. Esto es particularmente cierto en el caso de las grandes metrópolis y de los centros de las ciudades, donde se conjugan casi todos los efectos nocivos para el medio ambiente y la salud anteriormente citados.

Para cada medio de transporte, conviene establecer un juicio diferenciado de acuerdo a las prioridades de los contaminantes, las cantidades emitidas, su distribución en la atmósfera y los daños que, a fin de cuentas, causan o se supone que causan.

Los automóviles llevan su propio carburante y emiten las substancias contaminantes por donde circulan.

El impacto de la relación de automóviles en el ámbito local será más sensible en tanto la urbanización vaya creciendo. De aquí al fin del siglo, más de la mitad de la población mundial vivirá en aglomeraciones urbanas.

La mayor parte de estas grandes conurbaciones se sitúan en América Latina y en Asia. En muchos de estos países, 20 a 60% de los vehículos registrados se concentran en la capital. En las zonas urbanas, la circulación carretera es una de las principales responsables de la contaminación atmosférica; 90 a 95% de las emisiones de monóxido de carbono y de plomo; 60 a 70% de las emisiones de óxidos de nitrógeno y 40 a 50% de las de hidrocarburos le son imputables.

En el caso de la ciudad de México, el mayor problema lo constituyen los viajes en auto particular, ya que el 16.7% del total de viajes se realiza en el 95% de vehículos de pasajeros que circulan en la ciudad. La contaminación que producen los 2.5 millones de autos particulares, asciende al 70% que genera el sector transporte

Estas cifras son parcialmente elevadas y la calidad del aire de las ciudades de países en vías de desarrollo daña a los ojos; por otra parte; la inhalación de humos y de residuos de plomo incide seriamente en la salud de los ancianos y niños. En nuestro país por ejemplo, se estima que 12,500 muertes y la pérdida de 11.22 millones de horas de trabajo son consecuencia de la fuerte concentración de partículas en la atmósfera. Cerca de 140,000 niños sufren intoxicación por plomo y tendrán la necesidad de un tratamiento apropiado.

El ruido del tráfico es otro efecto que desemboca cada vez más en problemas de salud. Entre más carros hay, más problemas se presentan en las ciudades, lo que va acompañado de diversos inconvenientes: un mayor consumo de combustibles, mayor necesidad de espacios y rentabilidad decreciente de los transportes públicos. Los servicios locales como la recolección de basura, la distribución de agua y electricidad, resultan cada vez insuficientes y más caros que en las ciudades con mayor densidad de población que se orientan hacia los transportes públicos.

Estos son tan sólo algunos aspectos relacionados con el consumo de energía y la contaminación que generan los transportes y la problemática que traen consigo; sin embargo, éstos son insustituibles en urbes como la ciudad de México y otras más.

Los expertos europeos de la UITP comentan que, para tomar conciencia del significado de los transportes públicos urbanos, basta con imaginarse la ciudad de Tokio, New York, París ó México sin ellos; esto provocaría todo un caos. Pese a ello, argumentan que la solución a los problemas de la contaminación urbana sólo puede darse, reforzando y asignando recursos económicos a éstos, al mismo tiempo que sugieren sistemas de transporte eléctricos eficientes sobre rieles, ya que estos contribuyen en gran medida al mejoramiento de la calidad de vida y del medio ambiente. Ellos aseguran que los costos sociales relacionados con la contaminación atmosférica, con las molestias auditivas, la necesidad de espacios y la frecuencia de los accidentes son mucho menores para este tipo de transporte que para el carretero, cualquiera que sea su modalidad.

1.3 El consumo de energía en los metros del mundo.

La UITP, en su revista del 52° Congreso, comenta que el consumo de energía de las empresas de metro difiere mucho de una red a otra y depende de numerosos factores; las figuras 4 y 5a presentan el consumo de energía de 25 de redes de metro y/o 7 metros ligeros, donde se consideran longitudes de línea, número de carros y viajeros respectivos¹⁰. Aunque existen ciertas correlaciones, es evidente que hay otros factores de influencia que no es posible comparar de momento y directamente entre las empresas de metro; como por, ejemplo

¹⁰ Revista de la UITP del 52° Congreso de Ahorro de Energía, pág 18

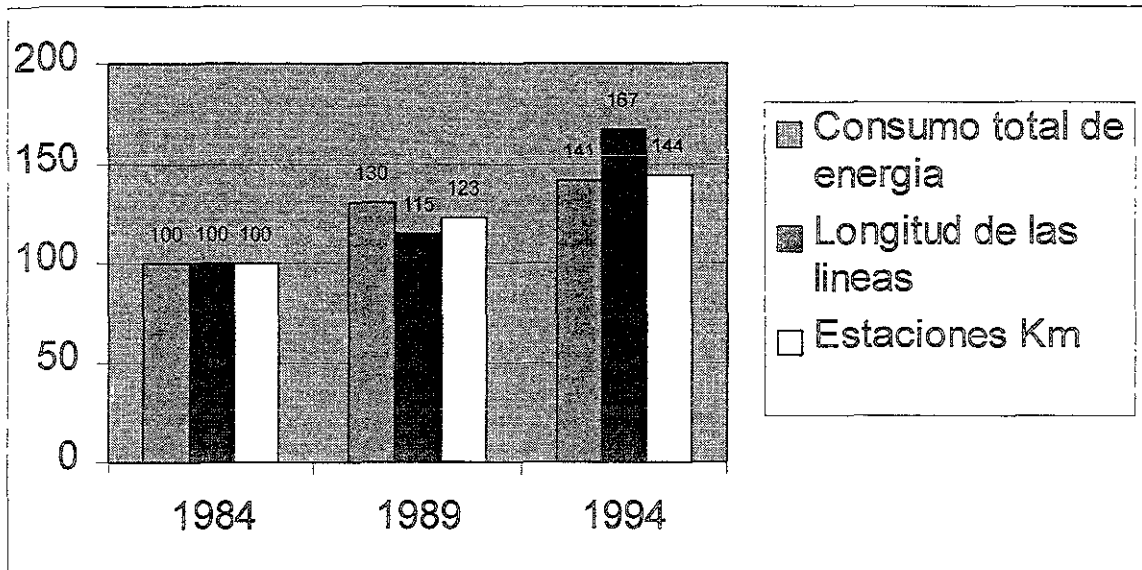


Figura 5a Consumo de Energía, longitud de línea y estaciones / Km

tipo de motor y peso de los vehículos, entre otros, por lo que sólo se propone arrojar luz sobre las grandes tendencias válidas para todas las redes.

La evolución en el transcurso de los últimos 10 años (1984 – 1995) y los resultados de una encuesta realizada por los miembros de la UITP, en julio de 1995 a 25 sistemas de transporte tipo metro y 7 metros ligeros, miembros de ésta Organización, junto con la información extraída del JANE'S (Libro Internacional de los Sistemas de transporte Urbano), permitió estimar que los sistemas de metro del mundo han consumido 20,000 GWh de energía eléctrica en total durante 1994.

De los sistemas de transporte que tomaron parte en la encuesta, el consumo de energía aumentó al 41% en el curso de los últimos 10 años, no obstante que algunas redes han sido objeto de ampliaciones sensibles o han sufrido otros cambios importantes en este período.

Parece que, aparte de la prolongación de las líneas, el crecimiento en el consumo de energía se debe al aumento en el número de pasajeros o al aumento de frecuencias, al mejoramiento de la comodidad, así como a otros factores.

La energía eléctrica consumida en 1994 por las empresas de metro se repartió en promedio¹¹ como lo muestran las figuras 5b y 6 entre los siguientes sectores:

Tracción	75%
Estaciones, túneles e instalaciones de vías	22%
Talleres e inmuebles diversos	3%

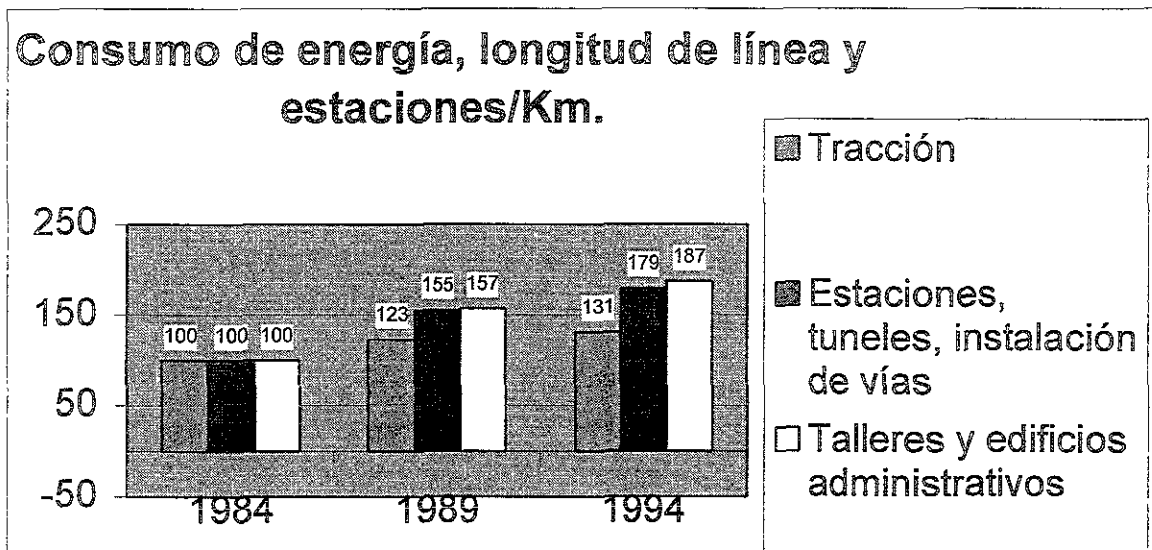


Figura 5b. Consumo de Energía, longitud de línea y estaciones/Km

Se observan, sin embargo, grandes diferencias entre los porcentajes respectivos de energía consumida. Para el caso del metro de México, se comprueba que su consumo de energía esta representado por el 90% en tracción y el 10% en alumbrado y fuerza.

En el diagrama que se presenta a continuación, la base 100% corresponde al total de energía requerida (comprada) por la empresa, midiéndose esta energía en el punto de entrega. Esta comprende tanto la electricidad proporcionada por terceros, es decir, por las compañías distribuidoras publicas o privadas, como la proveniente de centrales pertenecientes a la red; por ejemplo, el frenado de los trenes, no se toma en cuenta en el 100%;

¹¹ Idem Revista de la UITP, pág. 19

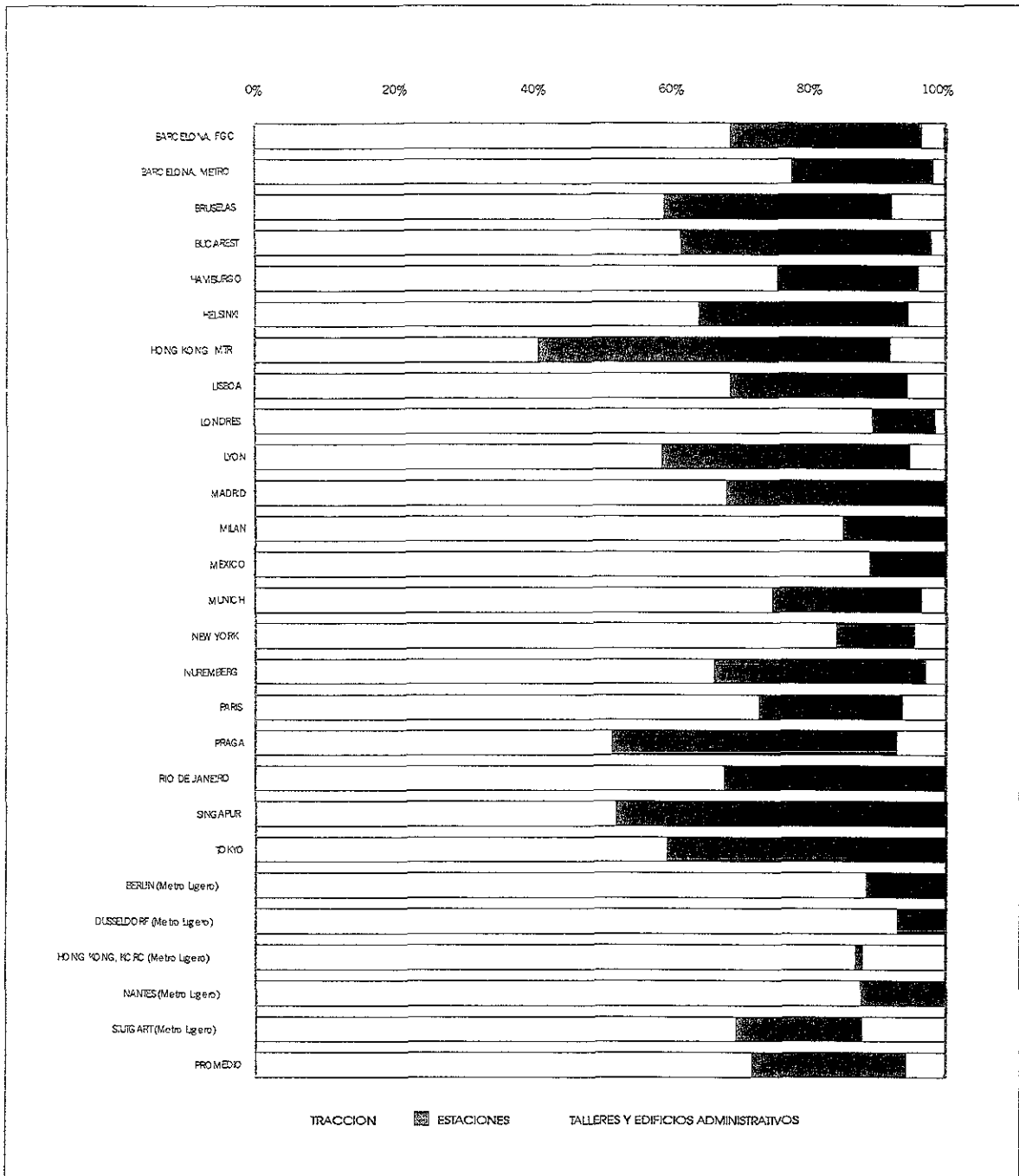


Figura 6: Repartición del consumo de energía en 1994

así mismo, se tiene que de las 25 empresas que respondieron a la encuesta, éstas utilizan una tracción en corriente continua. Estas operan:

- 21 sistemas con 600 v a 750 Vcc y tercer riel o barra guía (México)
- 1 sistema con 1,200 v a 1,500 Vcc y tercer riel o barra guía
- 5 sistemas con 600 v a 750 cc y catenaria
- 6 sistemas con 1,200 v a 1,500 cc y catenaria.

En el análisis del consumo de energía de tracción, esta representa el 75% de las necesidades energéticas. Cerca del 3% de esta energía es necesaria para cubrir las pérdidas que se presentan en las subestaciones y se producen esencialmente en transformadores y rectificadores y, en menor proporción, en cables y equipos. Los valores indicados, que probablemente se apoyan en estimaciones en su mayoría, varían mucho según la empresa.

En la medida de 3%, una parte reducida corresponde a los equipos auxiliares de las subestaciones (iluminación, calefacción, sistemas de comando).

Otras pérdidas de energía de tracción se producen durante la transmisión entre la subestación y el tren.

Se trata del calor disipado por las corrientes de tracción en la línea de llegada, es decir, en los cables de alimentación y la catenaria/tercer riel, así como en la línea de retorno, o sea en los rieles de rodamiento, o el cuarto riel y los cables de retorno. Estas pérdidas de energía, cuyo valor promedio es de 4%, varían igualmente de una red a otra.

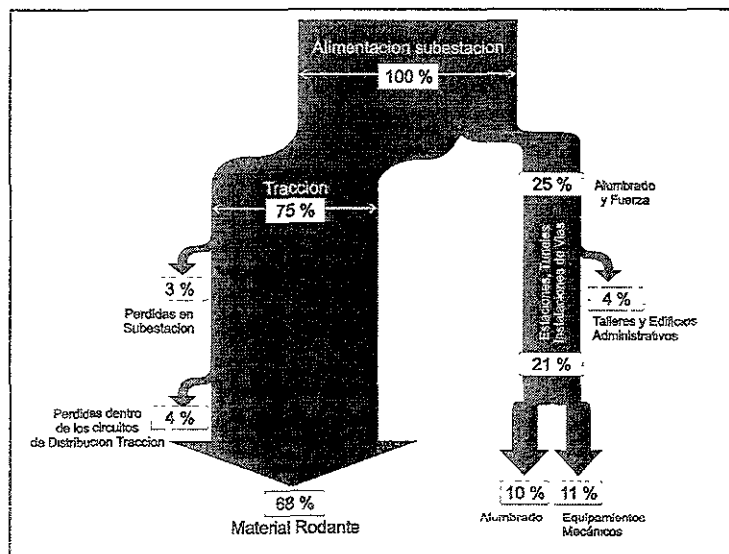


Diagrama de flujo de la repartición de la energía¹²

¹² Idem Revista de la UITP, pág. 20

Como es difícil determinarlas de manera exacta, las cifras indicadas corresponden por lo general a estimaciones. Como se observa en el diagrama de distribución del flujo energético, 68% de la energía total que reciben las redes de metro es absorbida por el material rodante.

En el análisis del consumo de energía en las instalaciones de alumbrado y fuerza, el diagrama de distribución muestra que el 25% de la energía total requerida para los sistemas de metro es utilizado en las instalaciones fijas de alumbrado y fuerza. Con 21%, las estaciones, túneles e instalaciones de vías consumen la mayor parte. También participan otras instalaciones como las vías de garage, los aparatos de vía y los puestos de comando. 10% de la energía total sirve para el alumbrado de estos sectores 11% es utilizado en dispositivos mecánicos, como escaleras móviles, ascensores, bombas, instalaciones de ventilación y de climatización, lo mismo que para la calefacción de locales, aparatos, etc.,

Las instalaciones de iluminación y fuerza de los talleres consumen en promedio cerca de 2% de la energía total.

Igualmente, 2% de la energía total es utilizado en los edificios administrativos. Una parte importante corresponde aquí al alumbrado, pero los equipos mecánicos, los aparatos de ventilación y climatización, los sistemas de comunicación e informáticos contribuyen también, en gran manera, al consumo.

En lo que se refiere a la energía consumida en los talleres y edificios administrativos, las respuestas sólo son parciales, se basan en estimaciones y presentan diferencias relativamente importantes. Puede decirse de manera general que, por causa del uso creciente de máquinas, del aumento en la automatización y de la presencia, en los puestos de trabajo, de equipos suplementarios, el consumo absoluto de energía ha aumentado de forma considerable en estos sectores.

El diagrama general muestra claramente cómo se reparte el consumo energético total en una red de metro o de metro ligero. Permite también poner en evidencia los sectores en los cuales se deberían estudiar las medidas susceptibles de aplicarse provechosamente para reducir el consumo de energía.

Para el caso particular del metro de la ciudad de México, se tiene una distribución aproximada del consumo de energía y sus pérdidas, como se muestra en el siguiente diagrama.

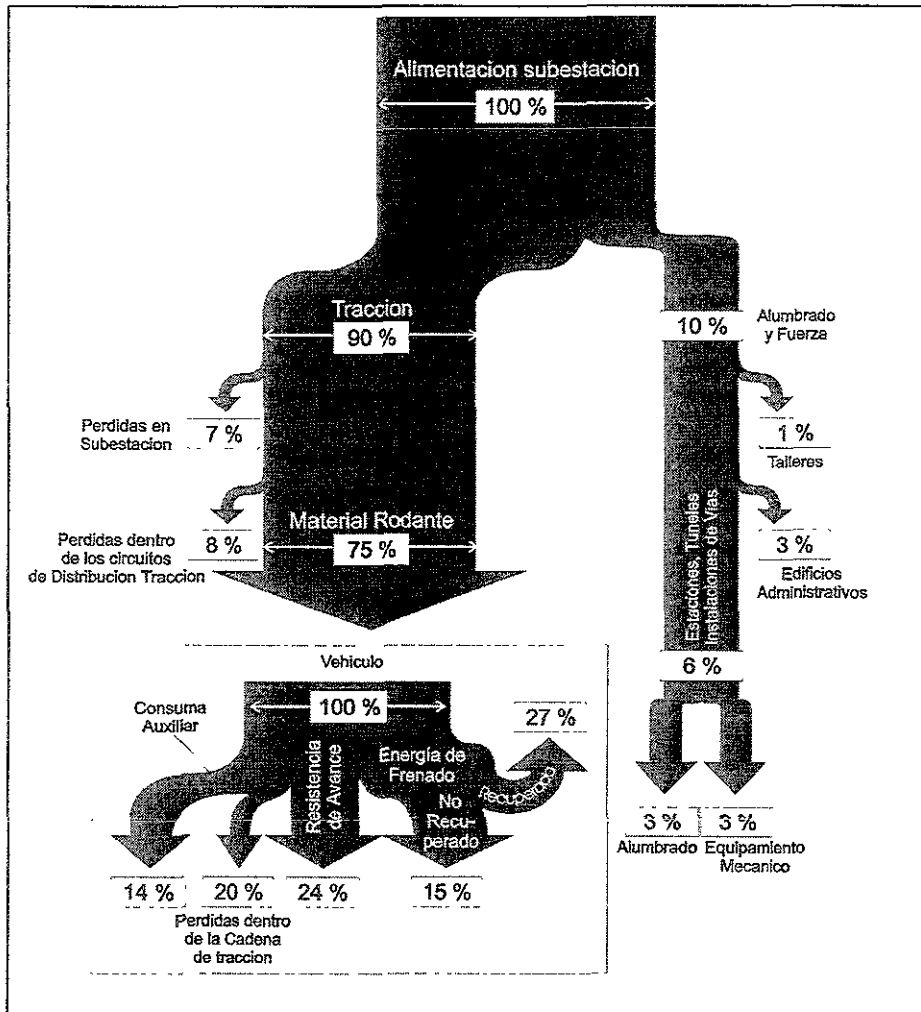


Diagrama de Consumo y Pérdida de Energía del Metro de la Ciudad de México.

CAPITULO II. CONCEPTOS DE LA TECNOLOGÍA METRO

En este capítulo se presenta información la genérica del Sistema de Transporte Colectivo, se explican los conceptos de distribución de la energía eléctrica, qué es y cuál es la función del pilotaje automático, cómo esta integrado un tren de rodadura neumática, cuantos motores tiene y cual es su capacidad, el concepto de la marcha de los trenes y el efecto en cada una de sus fases tales como: tracción, neutro y frenado.

Por otra parte, se explican los conceptos del equipo de tracción – frenado reostático (JH) y del equipo de tracción – frenado (chopper) sistema de control y de tecnología a base de semiconductores de potencia.

2.1 Características Generales

Datos relevantes

El Sistema de Transporte Colectivo, columna vertebral del transporte en la ciudad de México, diariamente da servicio a 4.5 millones de pasajeros; para ello, los trenes recorren un promedio de 103 mil km. por jornada de trabajo, a una velocidad comercial de 36 Km/h. Esto lo convierte en el medio de transporte más seguro, rápido, eficiente, económico y no contaminante de la Ciudad de México.

Para lograr sus objetivos el S.T.C. cuenta con:

- o 11 Líneas
(diez de rodadura sobre neumáticos y una de rodadura férrea)
- o 11 modelos de trenes
- o 269 trenes de rodadura neumática más de 18 carros
- o 27 trenes de rodadura férrea de 6 carros
- o 191 kilómetros de vías dobles
(174 para el Metro neumático y 17 para el Metro férreo)

- 167 estaciones
- 3 puestos centrales de control
- 5 redes de telecomunicaciones
- 161 subestaciones de rectificación
- 6 talleres
- 1 Instituto de Capacitación y Desarrollo
- 10,768 empleados operativos

Distribución de la energía eléctrica¹³

La energía eléctrica utilizada por la red del Metro en las líneas 1, 2 y 3 es suministrada por un sistema trifásico a 60 Hertz por Luz y Fuerza del Centro (LFC) a la Subestación eléctrica de Alta Tensión en Buen Tono, Puesto Central de Control (PCC) perteneciente al Sistema de Transporte Colectivo (STC), a partir de las subestaciones de Jamaica (Metro 1) y Nonoalco (Metro 2), por medio de dos cables trifásicos armados subterráneos e independientes entre sí, enfriados por aceite a presión.

Al ser alimentadas las líneas 1, 2 y 3 a través de dos subestaciones, disminuye la probabilidad de que el servicio se suspenda en su totalidad por falta de energía, ya que estas dos subestaciones forman parte del anillo periférico que abastece y circunda a la ciudad de México.

Estas líneas cuentan con un sistema de alimentación de emergencia mediante cuatro unidades Turbojet instaladas en la Subestación Nonoalco y que utiliza el mismo cable de 85 KV que normalmente alimenta al PCC.

Cada cable de 85 KV alimenta una Subestación de Alta Tensión en el PCC, que asegura el suministro de energía a la mitad de las instalaciones en las líneas 1, 2 y 3. A estas subestaciones se les denomina Subestación A y Subestación B; cada una de ellas está formada por dos transformadores de 38.5 MVA con una relación de transformadores de 85 a 15 Kv.

Para las líneas 4, 5, 6, 7 y 9 y las ampliaciones de las líneas 1, 2 y 3 la energía eléctrica es suministrada bajo un sistema trifásico recepción en 23 Kv. a 60 Hertz por subestaciones independientes de alta tensión

¹³ STC, Documento Técnico No 10, págs. 1 - 388

de LFC, que alimenta a través de cables monofásicos a las subestaciones de rectificación (SR) y a las subestaciones de alumbrado y fuerza (SAF).

En los tramos Coyoacán – Universidad de Línea 3, Panteones – Cuatro Caminos de la Línea 2 y Zaragoza – Pantitlán de la Línea 1, las subestaciones de rectificación se alimentan en 23 Kv., de subestaciones de LFC, por lo que respecta a las subestaciones de alumbrado y fuerza para las líneas 1, 2 y 3 se alimentan desde el PCC.

Las cuatro salidas de distribución de 15 Kv., de las dos subestaciones “A” de alta tensión alimentan por medio de cuatro buses de tracción y dos buses de alumbrado y fuerza, a las líneas 1, 2 y 3. El suministro de energía se puede hacer por cualquiera de sus extremos cerrando el extremo deseado, a través de interruptores automáticos denominados alimentadores de bus.

De los cuatro buses de tracción de 15 Kv. están conectados los cables que alimentan a las subestaciones rectificadoras que suministran la energía del movimiento de los trenes, y de los buses de alumbrado y fuerza del PCC I, y PCC II, Edificio Administrativo, Edificio de INCADE, Talleres de Mantenimiento Mayor y Menor de Ticomán, Plataforma de Pruebas Zaragoza y Talleres Tasqueña. La subestación de rectificación tasqueña y la plataforma de Pruebas de Talleres Ticomán se alimentan por LFC, en 23 Kv.

Subestaciones de Rectificación (SR)

Los cables de 15 Kv, que alimentan a las subestaciones de rectificación con una capacidad de 2500 kW., (también llamadas Puestos de Rectificación) para las líneas 1, 2 y 3, son del tipo trifásico que salen del PCC, en galerías subterráneas, las cuales unen los ductos hasta llegar al túnel, donde son colocados en charolas hasta las mufas de cada Subestación.

Para cada subestación de rectificación existe un cable de alimentación independiente y todas ellas se encuentran alimentando a las barras guías.

En las subestaciones de rectificación de Balbuena, San Lázaro, Pino Suárez, Cuauhtémoc y Tacubaya de la Línea 1; Popotla, Revolución, Zócalo, Pino Suárez, Viaducto y Ermita de la Línea 2, existen dos subestaciones conectadas en paralelo, que son alimentadas desde PCC, a través de un cable de 15 Kv., Trifásico.

En la Línea 3 Sur (Centro Médico – Zapata) y 3 Norte (La Raza – Indios Verdes), se tienen subestaciones de 4000 kW alimentadas por tres cables monofásicos de 15 Kv. Por lo que respecta al tramo Coyoacán – Universidad de Línea 3, también tiene subestaciones de 4000 kW pero con tensión y alimentación de 23 Kv.

Cada subestación de rectificación de 4000 kW del tramo Coyoacán - Universidad de la Línea 3 y de las líneas 4, 5, 6, 7 y 9 es alimentada mediante dos alimentadores de 23 Kv., preferente y emergente, independiente uno de otro, a través de cables monofásicos; en caso de falla de alimentación del lado preferente, se pasa a través de un interruptor de transferencia automática al alimentador emergente.

La función de las subestaciones de rectificación es la de reducir y rectificar la tensión de 15 o 23 KVC.A. a 750 VCC que es la tensión nominal de trabajo de los trenes. Su ubicación se efectuó en base a varios parámetros, entre ellos la caída de tensión máxima permisible, considerando que la puesta en fuera de servicio de una de ellas no afecte el nivel de tensión requerida para el desplazamiento de los trenes, ya que las dos adyacentes podrán absorber la sobrecarga existente. La distancia entre las subestaciones de rectificación es variable para cada una de las líneas.

Las subestaciones de rectificación alimentan a las barras guía (+) y pistas de rodamiento y rieles (-) a través de seccionadores de operación manual sin carga.

Pilotaje automático 135 KHz¹⁴

Tiene por objeto incrementar la seguridad en la circulación de los trenes a través del ATP (Automatic Train Protection) además de proporcionar un modo de conducción conocido como pilotaje automático, confiando a los equipos y dispositivos del tren la ejecución

¹⁴ STC., Documento Técnico No. 3, págs 1 - 80

de funciones repetitivas por medio del ATO(Automatic Train Operation).

Está constituido principalmente por equipo fijo (programa de marcha inscrito en la vía) y equipo embarcado (equipo electrónico dentro del tren). El confort y la precisión en el frenado se logran mediante el control de velocidad que impone el programa de marcha.

A partir de la información del programa se tienen las siguientes funciones:

Salida del tren en estación.

Circulación en interestaciones, respetando los límites de velocidad y señalización establecidos por las condiciones locales de operación.

Arribo y parada del tren en estaciones.

Maniobras de cambio de vía en terminales y servicios provisionales.

Autorización de apertura de puertas.

Equipo Fijo.

Se localiza a lo largo de las vías y en los locales técnicos.

El equipo instalado en las vías es un emisor que alimenta a una línea de transmisión colocado dentro de una canaleta de plástico aislante instalada normalmente sobre la barra guía derecha y, en ocasiones, sobre la izquierda. En los lugares donde no existe barra guía, el dispositivo está colocado en soportes de madera sobre los durmientes; en el caso de los aparatos de vía, la instalación es subterránea.

La línea de transmisión está constituida por cables que presentan, entre sus hilos de ida y vuelta, transposiciones denominadas cruzamientos. La distancia entre dos cruzamientos sucesivos se denomina segmento y es el indicador de la velocidad que se establece para el tren en cada uno de ellos.

La línea se alimenta por una corriente alterna de 80 mA con una frecuencia que puede variar entre 135 y 135.5 kHz denominada frecuencia portadora, la que es modulada a su vez por bajas frecuencias comprendidas en el rango de 1104 a 2352 kHz, con el fin

de proporcionar informaciones al tren para su circulación; estas informaciones se clasifican de la siguiente manera:

Autorización de Marcha (AM).
Zona de Rearme (ZR).
Apertura de Puertas Izquierdas (OG).
Apertura de Puertas Derechas (OD).
Seguridad Larga (SL).
Seguridad Ensanchada (SE).
Velocidad Máxima (VM).

El equipo fijo instalado en los locales técnicos de las estaciones está constituido por un conjunto de armarios con tarjetas electrónicas en donde se recibe la información de la teletransmisión del PCC y del estado que guarda la señalización, a partir de la cual se genera y emite la alimentación al programa de marcha correspondiente a través de la línea de transmisión.

Las vías secundarias, peines y garage no cuentan con equipo fijo, por lo que la circulación de trenes debe realizarse en el modo de Conducción Manual Restringida (CMR) o, eventualmente, en el modo de Conducción Libre Tracción 2 (CLT2).

El programa de marcha es el medio por el cual se controla el tráfico de los trenes en las vías principales, servicios provisionales y maniobras de retorno en las terminales; para tal efecto, dispone de los siguientes programas:

Verdes. Permiten el tránsito libre a los trenes.

Rojos. Ordenan la detención de los trenes ante una señal al alto.

De paro en Estación. Ordenan a los trenes conducidos en el modo PA recorrer un itinerario.

De transferencia. Requieren la existencia de un programa que se inicie en el circuito de vía anterior.

De rearme. Se localizan antes de cada señal y enlazan al programa de marcha con el tren, a condición de que aquella se encuentre en estado permisivo.

Las vías de las líneas del metro, están constituidas por segmentos eléctricos llamados Circuitos de Vía (CDV's), que se utilizan para llevar

una secuencia lógica definida de ocupación/desocupación la que, de no cumplirse, provoca la no-alimentación de una o varias secciones del programa de marcha.

Equipo Embarcado.

Capta las señales que provienen del programa de marcha, las interpreta y las traduce en órdenes dadas al tren. Se localiza a bordo de los trenes, distribuido a lo largo de ellos. Está constituido por:

4 captosres de alta frecuencia localizados en las carretillas del remolque central PR (5º. carro). La seguridad del funcionamiento del equipo embarcado se apoya en el enlace permanente de información entre la vía y el tren; toda interrupción mayor a 0.5 segundos de este enlace, provoca el frenado de urgencia.

Una rueda fónica constituida por un disco metálico dentado con captor magnético, accionada por medio del eje de la segunda rueda portadora izquierda de la carretilla delantera del carro PR. En los trenes conducidos en los modos Pilotaje Automático (PA) y Conducción Manual Controlada (CMC), permite determinar el espacio recorrido y la velocidad real del tren.

En los modos Conducción Manual Limitada (CML) y Conducción Manual Restringida (CMR) la velocidad se mide a partir de las informaciones salidas del transmisor de medida de velocidad que alimenta al cronotaquígrafo y de la rueda fónica; dichas informaciones son enviadas al block CML – CMR.

Block PA – CMC ubicado en el carro PR bajo el segundo asiento doble del lado izquierdo.

En los modos de conducción PA y CMC las informaciones captadas por las antenas de alta frecuencia y enviadas por la rueda fónica son tratados por este equipo, donde se interpretan y traducen en órdenes que garantizan las diferentes funciones de partida, marcha, frenado y paro del tren.

El dispositivo de control de sobrevelocidad verifica que los segmentos sean recorridos en un tiempo acorde con el tipo de marcha comando;

al efecto, recibe las informaciones de las extremidades de los segmentos y las condiciones en que se sanciona la sobrevelocidad.

En los modos PA y CMC el dispositivo de control de sobrevelocidad entrega, a su salida, la señal correctora de la desaceleración de 23 KHz que es enviada a los Amplificadores Locales de Desfrenado (ALD).

Block CML – CMR ubicado en el carro PR bajo el primer asiento doble del lado izquierdo (enfrente del block PA – CMC). en su interior se localiza un equipo de tratamiento de la señal y un dispositivo de control de sobrevelocidad, el block varía de acuerdo al modo de conducción que se tome.

El equipo de tratamiento de la señal recibe las informaciones provenientes de los captosres de alta o baja frecuencia, dependiendo de la vía en que circule el tren. Por su parte, el dispositivo de control de sobrevelocidad recibe las informaciones provenientes del equipo de tratamiento de la señal del transmisor del cronotaquígrafo, la rueda fónica y, eventualmente, de la llave DN (posición conducción restringida) verificando que la velocidad del tren no exceda del valor correspondiente a las condiciones en que circula. A su vez, este dispositivo emite una señal alterna de 23 KHz que es enviada a los ALD.

9 amplificadores locales de desfrenado (ALD) distribuidos uno por cada carro. Tienen la función de asegurar la interfase entre las blocks PA – CMC o CML – CMR, y los órganos de frenado neumático del tren.

Dado que los ALD sólo funcionan en los modos PA, CMC, CML y CMR, toda interrupción de la señal de 23 KHz provocará el frenado de urgencia. Estos amplificadores cuentan con un circuito electrónico que asegura el aislamiento automático de uno de ellos en caso de falla, y si dos o más están averiados, automáticamente se aísla el ALD de la motriz trasera y del carro más cercano a ésta.

2 blocks de conmutación de hilos de línea de tren localizados uno en cada carro M. Estos aseguran los cambios de afectación en los

hilos de línea del tren y la traslación de las órdenes de mando de apertura y cierre de puertas.

Material Rodante (Trenes)

Un tren con rodadura neumática consta de 9 carros(6 motrices y 3 remolques).



- Donde:
- M Motriz con cabina de conducción.
 - N Motriz sin cabina de conducción.
 - R Remolque.
 - PR Remolque con pilotaje automático embarcado.

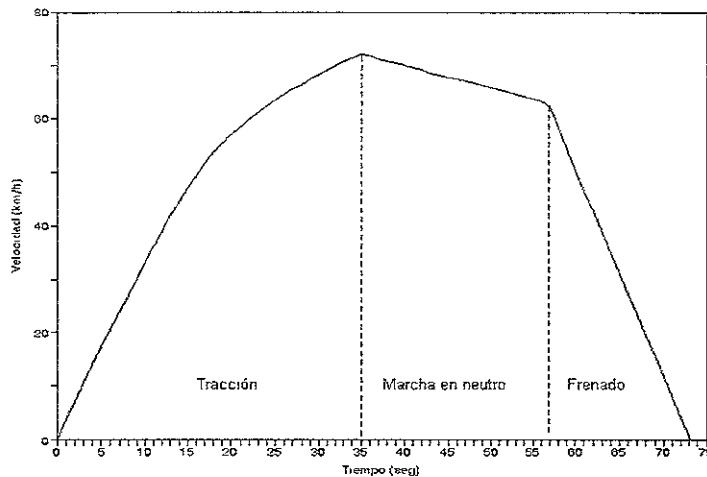
Cada una de las motrices (M o N) consta de 4 motores de tracción de corriente continua, con capacidad aproximada de 125 kW, controlados por un equipo de tracción-frenado reostático (JH), o por uno de tracción-frenado Chopper. Estos equipos permiten el arranque y control de los trenes y ofrecen una amplia gama de características esfuerzo tractivo-velocidad en sus diferentes configuraciones de conexión (serie, serie-paralelo). El frenado puede ser de tipo eléctrico-reostático (JH), eléctrico-regenerativo (Chopper) y neumático-mecánico en ambos casos.

El peso de cada carro no debe superar la carga máxima permitida por sus ejes (46 toneladas por carro con sobrecarga). Se considera una carga nominal (4/4) de 170 pasajeros por carro o 1530 pasajeros por tren (6 pasajeros de pie, por m²); para un peso promedio por pasajero de 70 kg. el tren de 9 carros pesa 338 toneladas a carga nominal.

Principio de funcionamiento de la marcha tipo de los trenes

La marcha de un tren entre dos puntos previstos consta de tres fases típicas, que son: tracción, marcha en neutro y frenado, como se ilustra en la figura 7.

Figura 7: Marcha tipo de un tren.



Tracción

En esta fase los motores proporcionan al tren un esfuerzo tractivo como se ilustra en la figura.8, mismo que se describe a continuación.

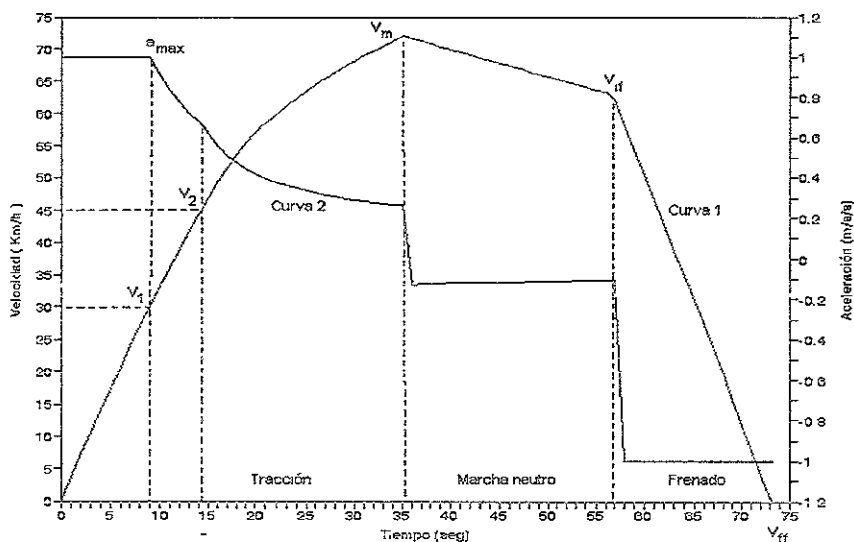


Fig. 8: Recorrido típico de un tren entre dos estaciones.

En el intervalo de velocidad de 0 a V_1 Km/h, se desarrolla un esfuerzo tractivo máximo constante ($F = \text{cte}$) que proporciona la aceleración máxima nominal del tren de 1.0 m/s^2 , misma que puede llegar a ser de 1.4 m/s^2 . De V_1 a V_2 km/h, se desarrolla un esfuerzo tractivo a potencia constante ($P = \text{cte}$) con los motores en serie-paralelo; en el intervalo comprendido entre V_2 y V_m , el tren marcha con una característica de campo reducido del motor (aproximadamente $Pv = \text{constante}$), siendo V_m la máxima velocidad permisible del tren, la que puede llegar a 80 km/h.

Para	$0 \leq v \leq v_1$	$F = \text{constante}$
Para	$v_1 \leq v \leq v_2$	$P = \text{constante}$
Para	$v_2 \leq v \leq v_m$	Características del campo reducido del motor $Pv = \text{constante}$

Marcha en neutro

En esta fase, de V_m a V_{if} km/h, los motores se ponen fuera de servicio y sobre el tren actúan únicamente las fuerzas de resistencia al avance, o debidas a las pendientes y las curvaturas en caso de existir.

Frenado

Durante esta fase, de V_{if} a V_{ff} se aplica un esfuerzo de frenado constante, ya sea eléctrico-reostático, para los trenes con equipo JH, o eléctrico-regenerativo para los trenes con equipo Chopper. A bajas velocidades o en caso de falla del frenado eléctrico, éste será sustituido automáticamente por el freno neumático-mecánico de fricción.

2.2 Consumo de energía eléctrica de los trenes

Las máquinas eléctricas son transductores que convierten la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa, basados en las leyes de Faraday, Lenz, Ampere, Kirchoff y de Conservación de la Energía.

Los motores eléctricos poseen una amplia gama de aplicaciones entre las que sobresale la tracción de los trenes, de suma importancia para el transporte eléctrico de pasajeros.

Equipo de tracción-frenado reostático JH

Los primeros trenes del Metro contienen equipos de tracción-frenado del tipo reostático (JH), por lo que del 100 % de la energía eléctrica que se emplea en la fase de esfuerzo tractivo constante, en donde se hace el control de velocidad por variación de resistencia en serie con la armadura (es decir entre 0 y 30 km/h), sólo el 66.66 % es aprovechada y el resto se pierde en forma de calor (efecto Joule) en las resistencias que sirven para su control.

En la fase de marcha en neutro, una parte de la energía cinética se transforma en calor debido al trabajo realizado por las fuerzas de resistencia al avance (ejes, mazas, etc), manifestándose como una reducción en la velocidad del tren.

En la fase de frenado, los motores convierten la energía cinética del tren en energía eléctrica (frenado eléctrico); es decir, actúan como generadores. Sin embargo, toda esta energía es disipada en forma de calor en un banco de resistencias. Cuando no es posible el frenado eléctrico, éste se sustituye por el frenado neumático-mecánico a través de la fricción creada por las zapatas de freno en el tambor de la rueda de seguridad.

Equipo de tracción-frenado chopper

El desarrollo de los semiconductores de potencia dio un gran impulso a la tecnología de control de las máquinas rotativas. Además, el considerable ahorro de energía que trae consigo la aplicación de los mismos en este campo, ha provocado una rápida generalización de su empleo y aprovechamiento.

En los equipos de tracción-frenado por Chopper, existen también tres fases, tracción, marcha en neutro y frenado.

En la fase de tracción, se desarrollan las tres fases antes descritas (esfuerzo tractivo constante, potencia constante y también se consideran las características del motor a campo reducido), con la diferencia de que en lugar de emplear resistencias de arranque para variar la corriente de armadura en función de la velocidad angular, se emplean tiristores, mismos que permiten variar el voltaje promedio de

alimentación, controlando su tiempo de conducción. Para velocidades pequeñas, el tiempo de conducción (T_{ON}) es menor que el tiempo de apagado (T_{OFF}); conforme la velocidad se incrementa, el tiempo T_{ON} crece y el tiempo T_{OFF} disminuye, hasta que la relación del tiempo de conducción T_{ON}/T_{OFF} es del 97%.(figura 11 del anexo B)

La fase de marcha en neutro se desarrolla de la misma manera que en el caso de los equipos de tracción-frenado reostático (JH).

Para la fase de frenado, los motores se comportan de la misma manera que en el caso de los equipos de tracción-frenado reostático, solo que en lugar de disipar la energía eléctrica en forma de calor, ésta regresa a la línea de alimentación para ser utilizada por otro tren que esté en fase de tracción; a este tipo de frenado se le conoce como freno eléctrico regenerativo.

Cuando el empleo del freno eléctrico regenerativo no es posible, se pueden considerar dos soluciones:

Sustituir automáticamente el frenado eléctrico regenerativo por un frenado eléctrico reostático.

Disminuir o sustituir el frenado eléctrico reostático por medio de frenado neumático-mecánico.

El empleo del equipo de tracción-frenado Chopper presenta las siguientes ventajas:

Ahorro de energía por la eliminación de resistencias de arranque y por la adopción del frenado eléctrico regenerativo.

Disminución del mantenimiento al equipo de control al eliminar contactos móviles.

Reducción del calor generado e incremento en la seguridad al suprimir resistencias en el circuito de potencia.

Mayor comodidad para el usuario por la eliminación de cambios bruscos en el esfuerzo de tracción.

CAPITULO III. OPTIMIZACIÓN DEL USO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos de la técnica de eficiencia energética de operación y conducción automática de los trenes eléctricos, conocida como "Marcha optimizada" y con ello se establecen las bases que sustentan este trabajo.

3.1 Eficiencia energética¹⁵

Al hablar de Eficiencia Energética, debemos estar conscientes de los factores que influyen en el consumo de energía, para cualquier sistema de transporte, éstos se clasifican en tres categorías generales: características del vehículo, de la vía, y aspectos operacionales para el servicio.

Las características del vehículo incluyen:

Tecnología, particularmente el tipo de propulsión, control y guiado.

Características de diseño, como peso específico del vehículo (kg/m^2), su relación sentado/de pie y varias comodidades.

Capacidad del vehículo y su utilización.

Desempeño dinámico de los vehículos, incluyendo tasa de aceleración, velocidad máxima y método de frenado.

Tipo de control de motor (resistor, chopper) y transmisión (engranes)

Las características del derecho de vía consisten en:

Tecnología (tipo de guiado y soporte).

Alineación, particularmente perfil de ruta (grados).

Aspectos Operacionales:

Itinerarios.

Condiciones de tráfico (derecho de vía)

Espaciamientos de estaciones y política de detención

Capacitación y/o entrenamiento en la conducción del vehículo.

¹⁵ Libro "Urban Public Transportation", Vukan R. Vuchic , capítulo 3, págs. 174 - 188

Las medidas operativas que incrementan la velocidad promedio de los vehículos, tales como carriles separados, vías preferenciales y menos paradas, resultan también en reducciones de su consumo de energía; así mismo, las prácticas adecuadas de conducción en general pueden mejorar significativamente el consumo de energía en vehículos tipo metro y vehículos en general de combustión interna. En la figura 9a y 9b observamos la relación que existe entre el consumo de energía y la capacidad de vehículo.

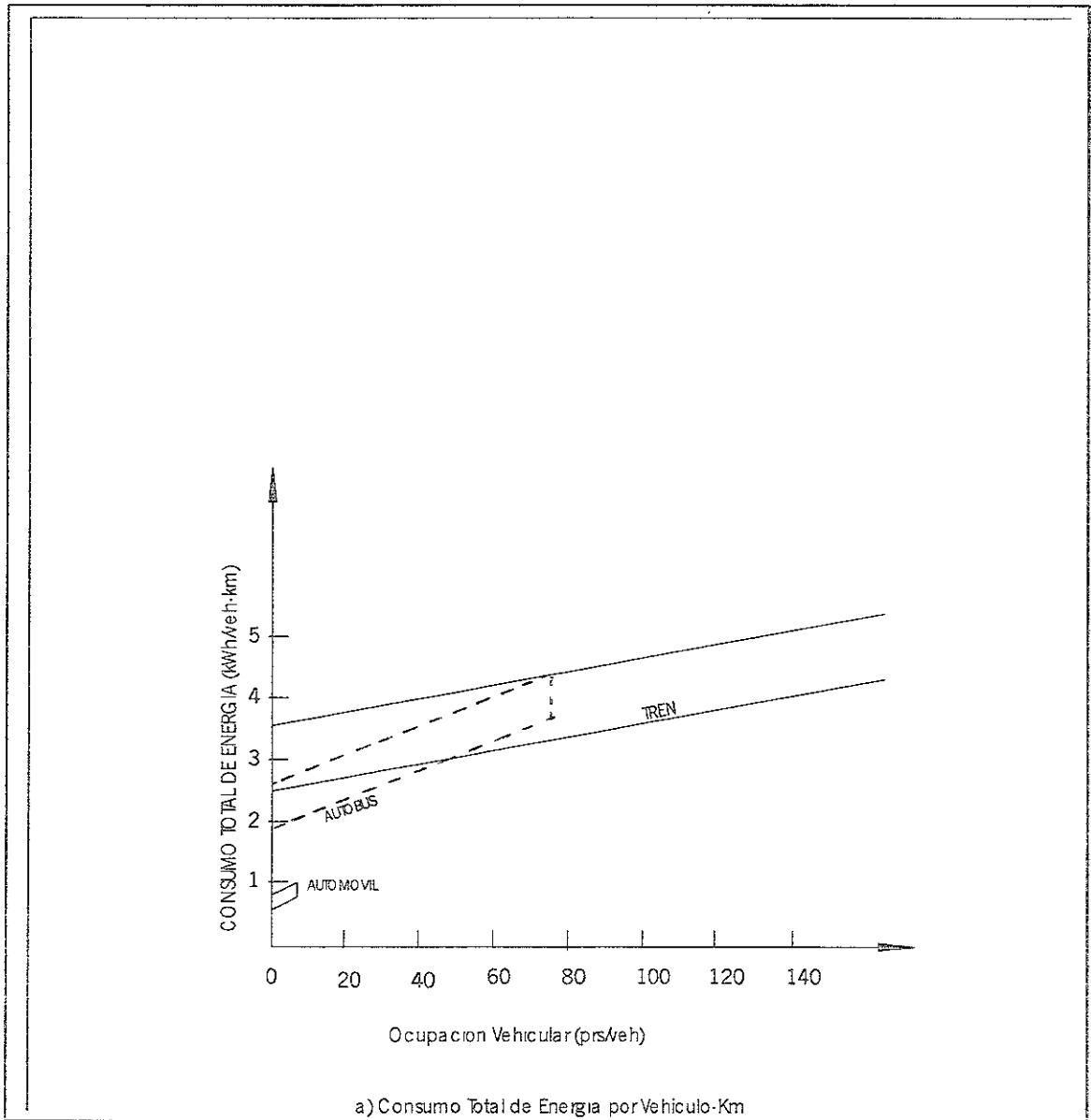
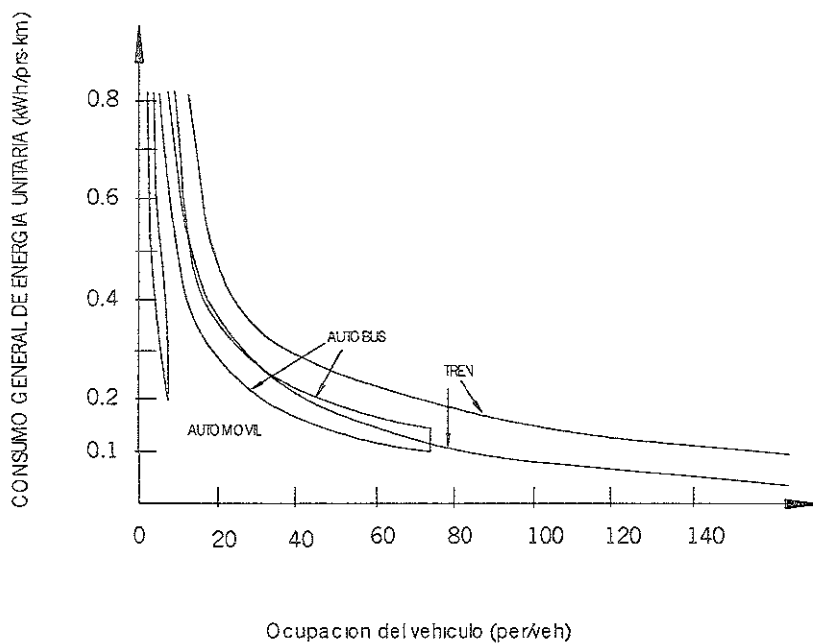


Figura 9. Consumo de energía en función de la capacidad del Vehículo.



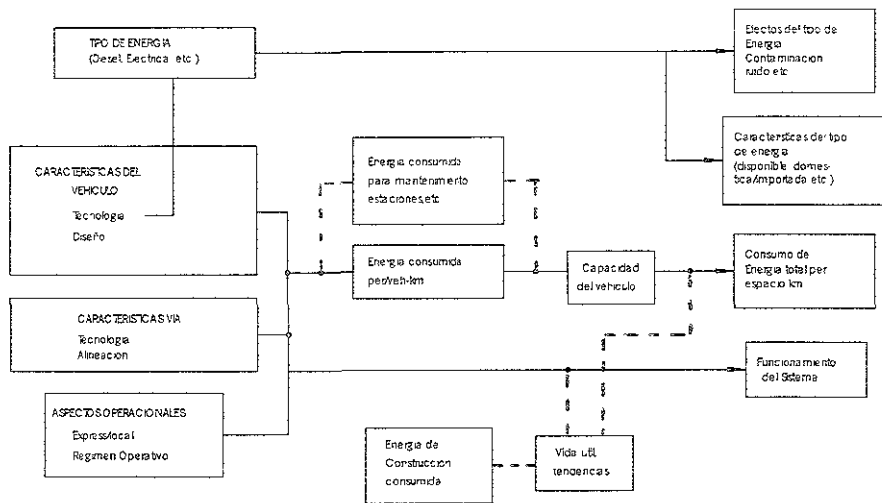
b) Consumo de energia perkm

CONSUMO DE ENERGIA COMO UNA FUNCION DE LA CAPACIDAD DEL VEHICULO

En las figuras anteriores se observa que la eficiencia técnica de combustible de los autobuses de las calles urbanas esta entre 1.3 y

2.1 km./l (3 y 5 millas/galón), mientras que para otros modos de transporte, particularmente los guiados por medio de tracción eléctrica, ésta eficiencia se puede lograr con mayor facilidad, ya que se tiene un mayor control sobre el régimen de conducción, es decir, sobre las fases de tracción, neutro y frenado. Se ha demostrado que el control se logra por un cuidadoso adiestramiento o capacitación del conductor y por el ATO(Automatic Train Operation) y el ATP(Automatic Train Protection) sistemas implícitos del tren . Cada uno de los regímenes básicos del viaje entre estaciones tiene variaciones técnicas y operativas que influyen en el consumo de energía. Estas variables se muestran en la figura 11.

Otros factores adicionales deben ser comparados en los análisis del consumo de energía: (a) efectos secundarios del consumo de cada tipo de energía, como producción de contaminación del aire, polvo y ruido (la electricidad es superior a otras formas de energía en todos estos aspectos); y (b) características de cada tipo de energía en términos de su disponibilidad de fuente primaria, Una visión sistemática de las relaciones entre los factores más importantes discutidos en el consumo de energía de los sistemas de transporte aparece en la figura 10.



CONCEPTO DEL PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LAS CARACTERISTICAS
ENERGETICAS DE ALGUN SISTEMA DE VEHICULOS

Figura 10. Concepto del procedimiento para evaluar las características energéticas de algún sistema de transporte.

Por otra parte, los impactos de largo alcance en diferentes modos sobre el consumo de energía, son otro importante elemento que da ventaja al transporte masivo sobre el auto.

Existen varios estudios sobre la eficiencia energética de los diferentes modos de transporte, pero varían en sus enfoques, metodología y formas de resultados no existiendo un grupo consistente de datos sobre eficiencia energética de éstos diferentes modos de transporte.

Y de existir este grupo de números simples y precisos del consumo de energía por los diferentes modos, no puede ser presentado debido a la gran variedad de factores de influencia, pero, para una orientación general, los alcances típicos de las eficiencias energéticas de varios modos importantes son presentados en la tabla siguiente, derivados de las figuras 9a y 9b, cuyos alcances incluyen a la mayoría de los casos.

Eficiencia energética de los diferentes modos de transporte urbano					
Modo	Capacidad Vehículo	Ocupación del vehículo	Unidades comunes de eficiencia y consumo	Eficiencia Energética	
				(veh-Km/kWh)	(prs-Km/kWh)
Auto estandar	6	1.2-2.8	3.8-6.0	1.04-1.64	1.2-4.6
Auto compacto	4-5	1.2-2.8	7.2-8.1	1.96-2.20	2.4-6.2
Carpool	6	2.0-6.0	3.8-6.0	1.04-1.64	2.1-9.8
SB	45-70	10-70	1.3-2.2	0.35-0.60	3.5-42
			kWh/veh-Km		
TB	45-70	10-70	2.2-4.1	0.24-0.46	4.6-32
SCR/LRT	80-200	15-200	1.6-5.1	0.20-0.62	2.9-125
RRT: old sistemas	130-180	20-180	2.2-3.7	0.27-0.46	5.4-82
RRT: new sistemas	150-200	25-200	3.5-5.1	0.20-0.29	4.9-57

Factores conversion: 1l de DIESEL = 3.67 KWH (=38,500 BTU = 0,2642 gal)

Tabla: Eficiencia energética de diferentes modos de transporte.

Las cifras de la tabla muestran que, aunque los alcances de la mayoría de los modos se traslapan mutuamente, los modos de tránsito

generalmente tienen mucho mayores eficiencias de magnitud que los automóviles. Por ejemplo, usando valores medios de los rangos de personas – km/kwh, un auto privado con 1.3 personas produce 1.7; un carro compartido con 4 personas, 5.4 personas – km/kwh. Un autobús con 15 personas produce 7.1; con 50 personas, 24 personas – km/kwh. Los vehículos LRT con 40 personas tienen una productividad de 16, aquellos con 160 personas, 66; un nuevo RRT de alta velocidad, también con 160 personas, 40 personas – km/kwh. Se señala que estos son solo valores individuales para ilustración; pueden variar considerablemente y por lo tanto, no deben ser usados para cualquier situación específica o como comparaciones exactas de modos.

Más aún, las diferencias de rendimientos entres estos modos deben también ser evaluadas en cualquier situación dada.

Finalmente, estos son valores promedio; para pasajeros agregados a un servicio de tránsito existente, el consumo marginal de energía es usualmente mucho más bajo, con frecuencia insignificante.

El Incrementar la afluencia en los modos masivos es por lo tanto extremadamente efectivo para la reducción del consumo de energía; esto se da en los niveles altos de las eficiencias energéticas de los modos, en los cuales la ventaja del transporte masivo (metro) sobre el auto es la mayor.

Procedimientos utilizados en la operación automática

Como ya se mencionó con anterioridad, la marcha o recorrido de un tren presenta el principio básico de tres fases: figura 11

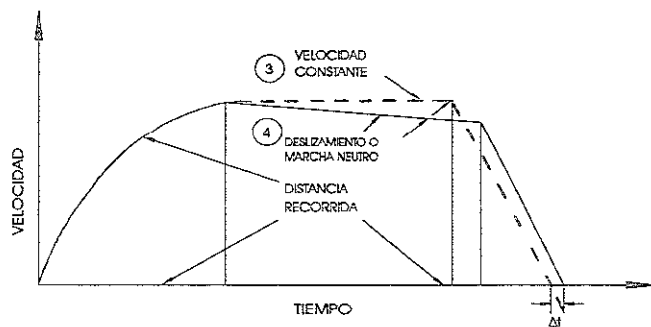
FASE I. La fase de tracción o aceleración puede producir diferentes curvas de consumo de energía, dependiendo del tipo de motores y su control. Dos casos típicos se muestran como curvas 1 y 2 en la parte (b). Para cualquier diseño determinado de vehículo esta curva es fija y con frecuencia, controlada automáticamente durante el régimen de aceleración.

FASE II. Los regímenes de velocidad constante y marcha a neutro aparecen en las partes (a) y (b) por las líneas 3 y 4 respectivamente. Representan un compromiso directo entre mayor velocidad de conducción a potencia total (3) y ahorro de energía con marcha en neutro (4). La mayoría de los sistemas ferroviarios de Estados Unidos usan la alternativa 3, introducida durante los años de energía muy barata. La mayoría de los sistemas europeos y el de México, usan la alternativa 4 como un método regular de conducción, basados en la decisión de que unos pocos segundos de viaje más largo en estaciones con espaciamentos moderadamente largos bien pueden sacrificarse por la muy significativa cantidad de energía ahorrada.

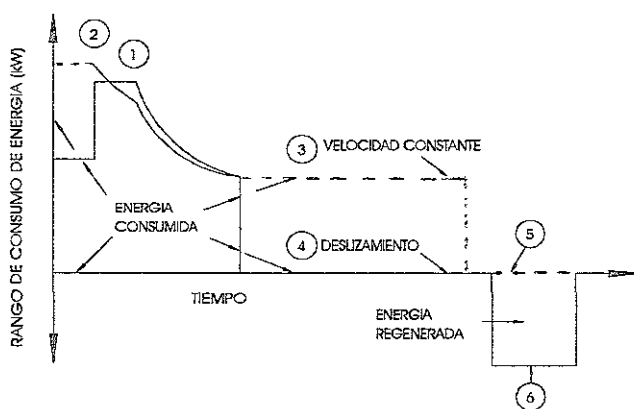
FASE III. El régimen de frenado convencional o regenerativo para las líneas 5 y 6, se muestra en la parte (b). El frenado convencional (línea 5) dinámico o neumático no tiene influencia sobre el consumo de energía, excepto que la potencia producida por frenado dinámico es usada con frecuencia para calentar el vehículo reduciendo así el consumo de energía auxiliar en el material rodante. La línea (6) es utilizada en algunos vehículos modernos con control chopper, resulta en un "consumo negativo" ("retorno" de algo de energía a las líneas de potencia), que es el caso del metro de México.

Los tres grupos de alternativas no están por supuesto, relacionados entre sí; cualquiera de las dos curvas de energía de aceleración puede ser aplicada a vehículos que utilizan cualquiera de las alternativas en los dos últimos regímenes.

Este principio ha demostrado teóricamente ahorros potenciales de energía mediante conducción pre-programada. Las condiciones de la investigación centraron su estudio en material rodante con frenado regenerativo, tiempos de recorrido diferentes, diferentes intervalos de aceleración, tiempo de marcha en neutro tan largo como lo permita el recorrido, velocidad constante bajo potencia no utilizada, ya que fue considerada no económica en todas las condiciones.



a) RELACION VELOCIDAD-TIEMPO

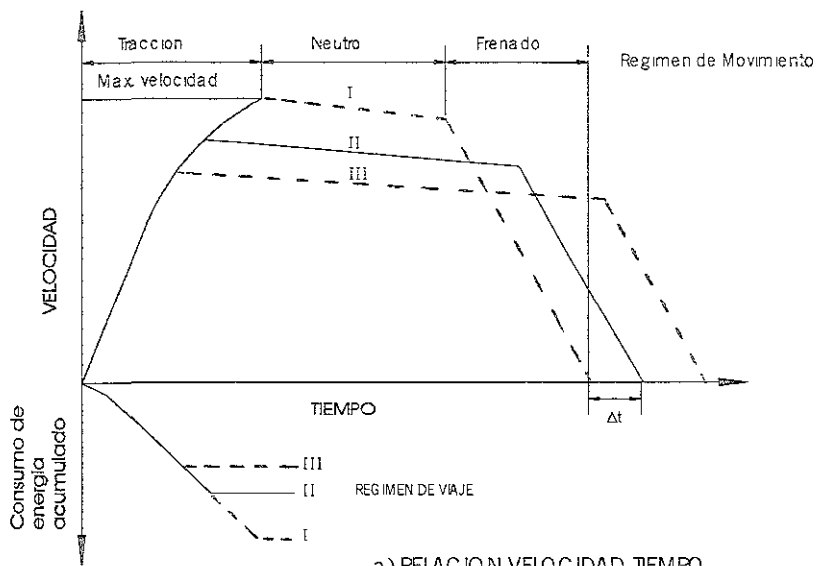


b) RELACION ENERGIA-TIEMPO

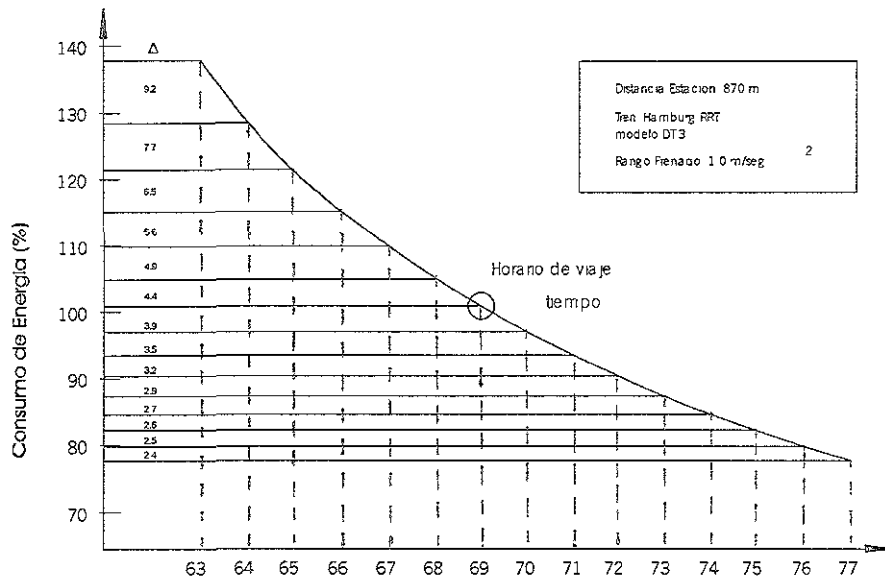
CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA BAJO DISTINTO MODO DE VIA
ENTRE ESTACIONES

Figura 11. Consumo de Energía Eléctrica entre estaciones.

El diagrama de consumo tiempo – velocidad – energía en la figura 12a muestra que acelerar hasta V_{max} , pasar a neutro y frenar hasta la siguiente estación (régimen I), se traduce en el mayor consumo de energía en el menor tiempo de viaje. Los regímenes II y III tienen un menor consumo de energía y mayores tiempos de viaje. El compromiso resultante entre energía y tiempo de viaje está trazado en la figura 12b, el tiempo programado de viaje no puede ser el más corto, porque es necesaria una reserva para conservar un itinerario confiable. El diagrama muestra que, en comparación con el itinerario seleccionado de 69 s, el tiempo más corto (63s) requeriría el 40% más de energía mientras que un 23% adicional de energía podría ahorrarse si el tiempo de viaje se extendiera por otros 8 s.



a) RELACION VELOCIDAD-TIEMPO



a) Tiempo de viaje (s)

b) Tiempo de viaje v.s Consumo de Energía Comercial

CONSUMO DE ENERGIA COMERCIAL Y TIEMPO DE VIAJE CON
DIFERENTES ACCELERACIONES A INTERVALO CONSTANTE

Figura12. Consumo de Energía Eléctrica y tiempo de viaje con diferentes aceleraciones a intervalo constante

Los diagramas en la figura 13 muestran otras influencias del régimen de viaje sobre el consumo de energía.

La parte (a) muestra que con variaciones preprogramadas de viaje el tiempo de alto en estación +69, puede ser corregido mediante la selección de un apropiado régimen de viaje, siempre asegurando el consumo mínimo de energía por ese tiempo particular de viaje. La parte (b) muestra que para un tiempo dado de viaje, niveles más altos de desaceleración en el frenado pueden usarse para acortar el intervalo de aceleración y reducir así el consumo de energía.

Las sustanciales diferencias en porcentajes e consumo de energía en todos estos casos, muestran que la elección del régimen óptimo de viaje puede resultar en muy significativos ahorros de energía. Dado que la energía "neta", la utilizada para la tracción de los vehículos, es considerablemente menor que la energía "bruta" que debe ser producida para él (la diferencia es causada por diferentes pérdidas de transmisión, pérdidas en conducción de trenes, etc.), cada ahorro en energía de tracción significa todavía mayores ahorros totales de energía en la fuente de generación¹⁶.

¹⁶ Medidas para el ahorro de energía. La cantidad utilizada por unidad representa una medida o indicador de consumo de energía. Su inverso, cantidad de salida por unidad de energía consumida, es mencionada como eficiencia energética de un sistema de transporte.

El consumo de energía puede basarse en diferentes unidades de salida, pero las más características son las cuatro siguientes

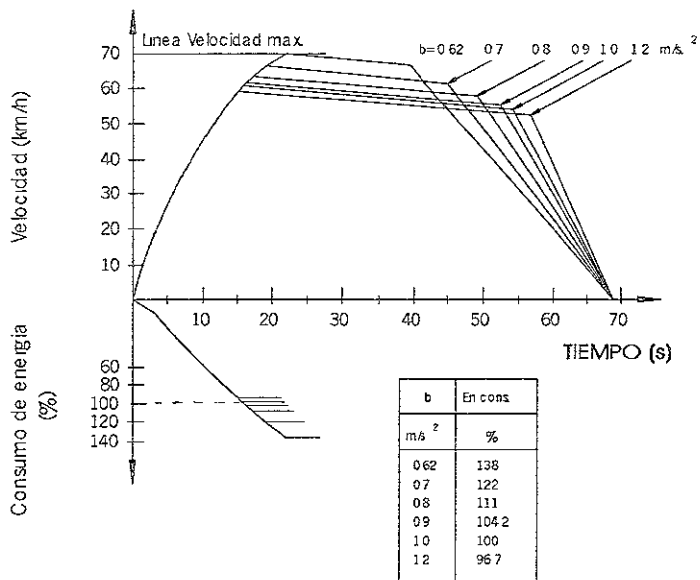
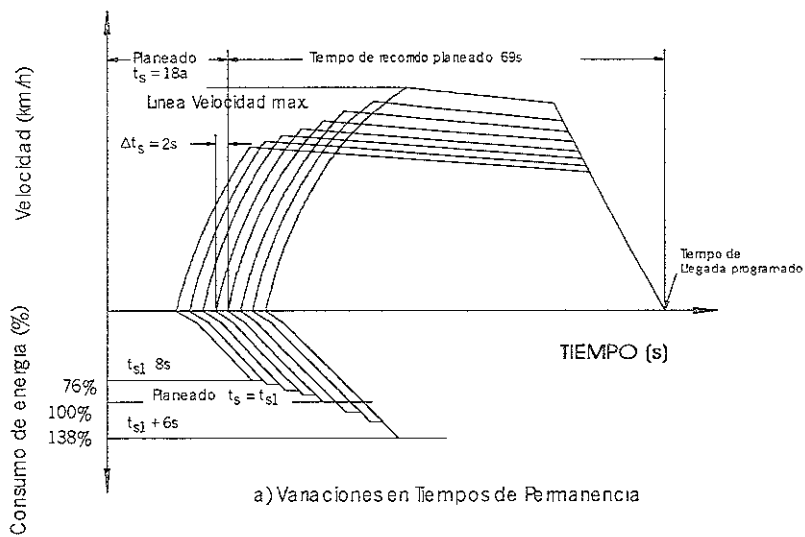
- Kilowatt – hora/ vehículo – kilómetro puede ser medida directamente en operaciones de sistemas de tránsito. Es útil para la comparación de vehículos con capacidades y características de rendimientos similares, o de los mismos tipos de vehículos bajo diferentes condiciones de operación (trazo, espaciamiento de estaciones, condiciones del tráfico)
- Kilowatt – hora/tonelada – kilómetro puede ser usada para los mismos propósitos que el indicador precedente, pero elimina influencias de diferentes pesos de vehículos.
- Kilowatt – hora/espacio – kilómetro es el indicador básico del consumo de energía por unidad de servicio ofrecido. Este es el más importante indicador de consumo de energía de un modo en utilización a capacidad total. Para sistemas de tránsito, esta unidad muestra los valores extremos a los cuales puede reducirse el consumo de energía (o aumentarse la eficiencia del uso de la energía) cuando se logra su utilización máxima; luego, esto representa la eficiencia energética de máximo potencial de los modos.
- Kilowatt – hora/persona – kilómetro representa el consumo de energía realmente obtenido con un nivel determinado de utilización del sistema (o vehículo).

La cantidad medida de energía consumida puede también referirse a varios diferentes puntos. El consumo de energía para viaje de vehículo representa la cantidad usada directamente para transporte. Además de eso, el consumo del sistema incluye la energía usada por instalaciones fijas (para tránsito: estaciones, patios, señales, etc., para auto: autopistas, calles, estacionamientos y otros), y en apoyo de funciones (mantenimiento de vehículos, limpieza, inspección, etc.). Ambas categorías representan consumo "neto".

El consumo total, "bruto", de energía, representa la energía usada para producir la energía utilizada "neta". Para la tracción, la diferencia entre las dos incluyen las pérdidas en generación de energía, en transmisión tomada por vehículos en la línea, y otros. Para convertir consumo "neto" en "bruto" las cantidades netas deben ser divididas por factores de eficiencia de cada uno de los procesos mencionados entre las fuentes originales y los puntos de consumo, tales como: conversión de energía, refinación, transportación y distribución.

Dado que el consumo unitario de energía es también una función del rendimiento del vehículo, con características de rendimiento similares, tasas primarias de aceleración y velocidades máximas, o consumos de modos diferentes con espaciamientos de estaciones similares y promedio similares. Otra manera, cada sistema o modo debe ser evaluado por su relación consumo de energía no es necesariamente el mejor.

Su rendimiento, que afecta beneficios al usuario y atracción de pasajeros, debe además ser comparado con las características correspondientes de otros modos



VARIACIONES EN LOS PROGRAMAS DE VIAJE Y CONSUMO DE ENERGIA CON $t = cte$ ENTRE ESTACIONES

Figura 13. Variaciones en los Programas de viaje y Consumo de Energía con $t = cte$. entre estaciones.

3.2 Principio básico de la marcha optimizada

En el metro se aplicaron los conceptos de la Eficiencia Energética; asimismo, otras soluciones técnicas contribuyeron para reducir aún más el consumo de energía. Entre ellas se ha mencionado el frenado eléctrico regenerativo en sustitución del frenado eléctrico reostático, y el uso del equipo de propulsión de tracción – frenado denominado “Chopper”, en sustitución del equipo reostático.

Sin embargo, como ya describió en las secciones anteriores, se puso en práctica en los trenes del metro de la ciudad de México la técnica conocida como marcha optimizada, que consiste fundamentalmente en optimizar los diversos tipos de marcha de los trenes mediante la operación de éstos a velocidades inferiores a las actuales y la aplicación de aceleraciones mayores a las vigentes para compensar el tiempo de recorrido de los trenes en las interestaciones y aprovechar la marcha en neutro el mayor tiempo posible, así se racionaliza la operación del tren, respetando el horario teórico previsto y se logra reducir el consumo de energía eléctrica de los trenes.

El principio de la “Marcha Optimizada” es el siguiente:

El tiempo asignado a un tren para ir desde una estación “A” a una estación “B”, es superior al tiempo mínimo permitido por las posibilidades del tren y las características de la línea. Esta diferencia llamada **margen o reserva**, permite al tren respetar su horario a pesar de los imprevistos encontrados durante la circulación. En consecuencia, el objetivo es saber utilizar el tiempo de reserva; cuando éste se ha consumido por la acumulación de retrasos, el tren toma la marcha más rápida posible, denominada **marcha tendida**.

De la figura 14, en la que se muestran tres diferentes tipos de marcha, observamos que el tiempo de recorrido más bajo se obtiene cuando la velocidad sigue la marcha de la curva 1: aceleración lo más elevada posible hasta alcanzar la velocidad máxima de la línea, y frenado con desaceleración constante, esta es la **marcha tendida**

que emplea un tiempo de recorrido T_1 , mientras que la curva 2 utiliza un tiempo T_2 , mayor a T_1 . La diferencia en tiempo ($T_2 - T_1$) constituye el tiempo de reserva, que usualmente es del 5 al 10%. Para respetar el tiempo T_2 la misma figura muestra dos formas de lograrlo.

- a) Al iniciar la marcha, utilizar el grado de tracción más alto, para alcanzar la velocidad V_2 inferior a la velocidad límite; se corta el esfuerzo de tracción para que el tren avance en neutro y frena cuando la velocidad alcance V_2 ; todo el tiempo de reserva es utilizado en el transcurso de la marcha en neutro, (curva 2).
- b) Iniciando con el máximo grado de tracción, al alcanzar la velocidad V_3 , inferior a V_2 , se reduce el esfuerzo de tracción para mantener constante esta velocidad hasta el inicio del frenado, (curva 3).

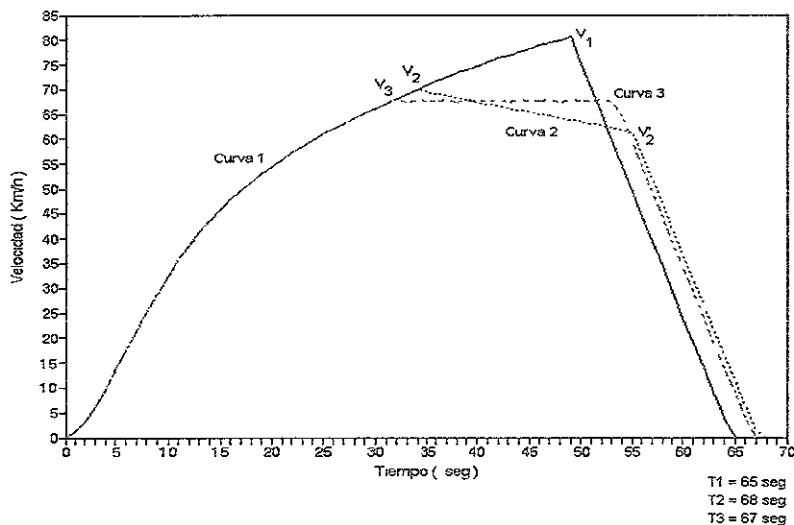


Fig. 14. Curvas de marcha.

En la figura 15, en los parámetros correspondientes a energía consumida contra tiempo, se muestra que el método A, correspondiente a la curva 2, es el que consume menos energía en tracción.

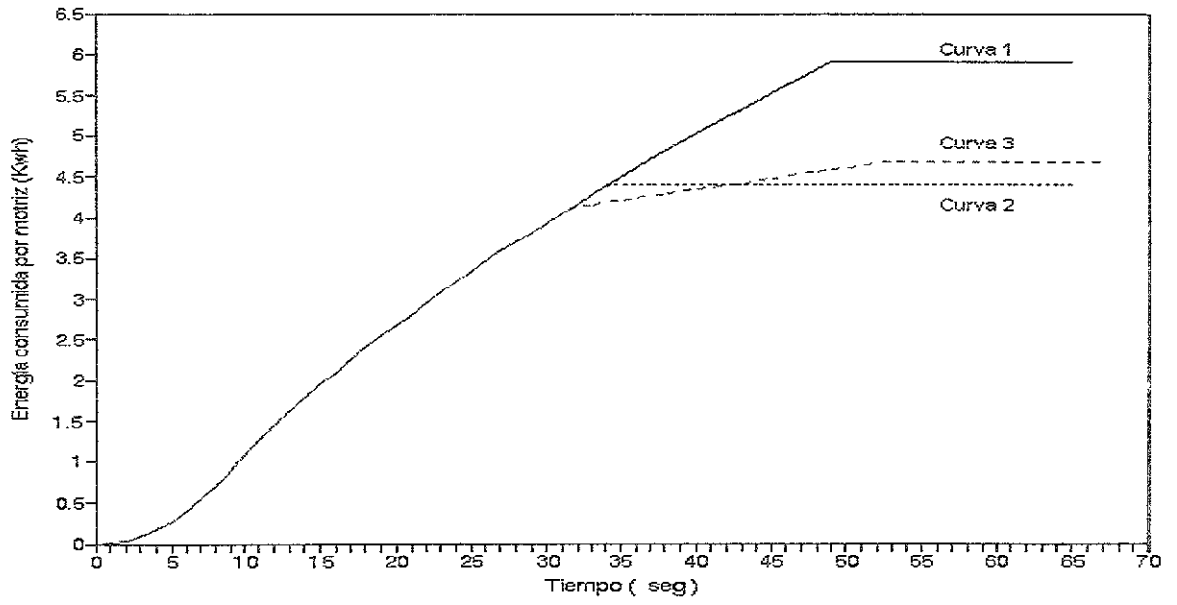


Fig. 15. Energía consumida según la curva de marcha.

CAPITULO IV. AHORRO OBTENIDO CON LA APLICACIÓN DE MARCHA OPTIMIZADA.

En este capítulo se explica fundamentalmente cómo se logró aplicar la técnica de la marcha optimizada a los trenes y se presenta la evolución de los resultados .

4.1 Resultados de la aplicación de la marcha optimizada

Con la información y las bases de la técnica antes descrita, finalmente se logró establecer la forma de aplicarla a los trenes; para ello se llevaron a cabo diversas pruebas de laboratorio y posteriormente pruebas de campo, y así se obtuvieron los primeros resultados de la aplicación de marcha optimizada en el año de 1995.

Pruebas de Laboratorio.- A través de simulaciones efectuadas por computadora, empleando modelos y programas¹⁷ ya validados por el pilotaje automático de 135 KHz., se obtuvieron los siguientes resultados: 11.5% y 6.9% de ahorro de energía, empleando un tiempo de 49 s y 14 s respectivamente más que la marcha actual del tren, en una carrera (recorrido del tren por una sola vía) completa en la Línea 2 por la vía 2 (Tasqueña – Cuatro Caminos) .

Pruebas de Campo.- Mediante pruebas en vacío o sin pasajeros, efectuadas inicialmente por un tren modelo NM83A, motrices M 0422/0423 en la interestación Ermita – Portales de la Línea 2, obteniéndose el 16.6% de ahorro de energía en un recorrido realizado sin la modificación al equipo de pilotaje automático embarcado contra el recorrido efectuado con la modificación. Esto se puede apreciar en las figuras 16 y 17.

En la figura 16, al efectuarse las pruebas con el tren 422-423, sin la modificación, observamos el consumo de energía siguiente:

$$E.c._1 = 1.08 \text{ kWh}$$

¹⁷ Los modelos matemáticos y los programas fueron elaborados en la Gerencia de Ingeniería y Desarrollo.

Ermita - Portales (sin modificar)
Tren 422-423 , V2

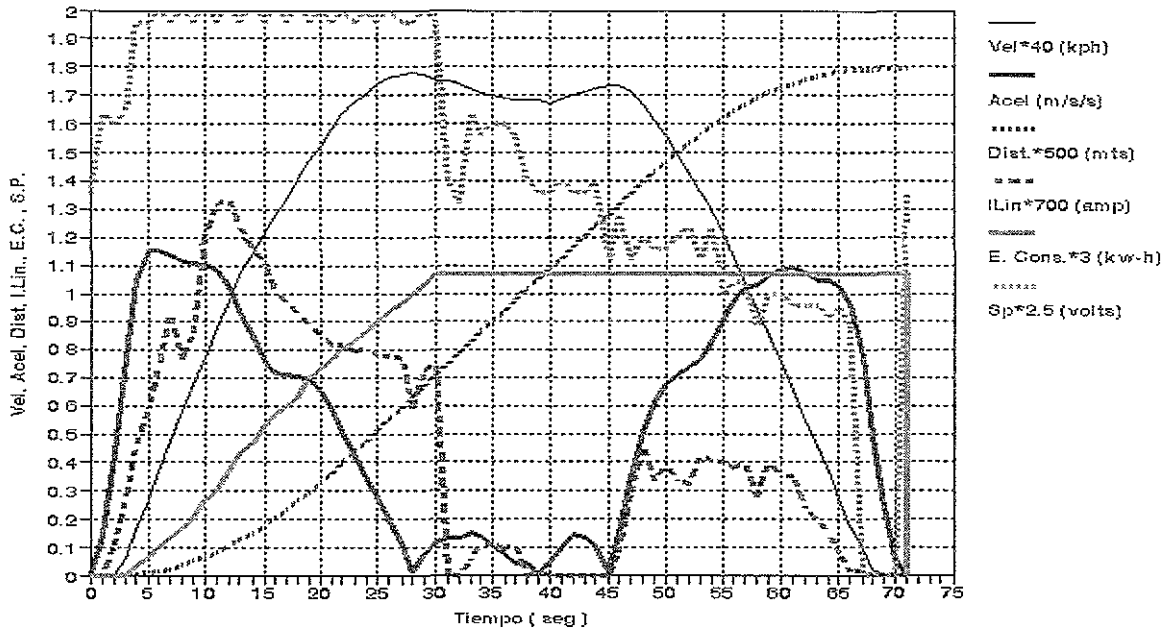


Fig.16. Tren 422 – 423, Ermita - Portales (sin modificar),

En la figura 17, observamos el consumo de energía siguiente al efectuarse el mismo recorrido del tren 422-423: pero con la modificación

$$E.c._2 = 0.9 \text{ kWh}$$

Ermita - Portales (modificado)
Tren 422-423 , V2

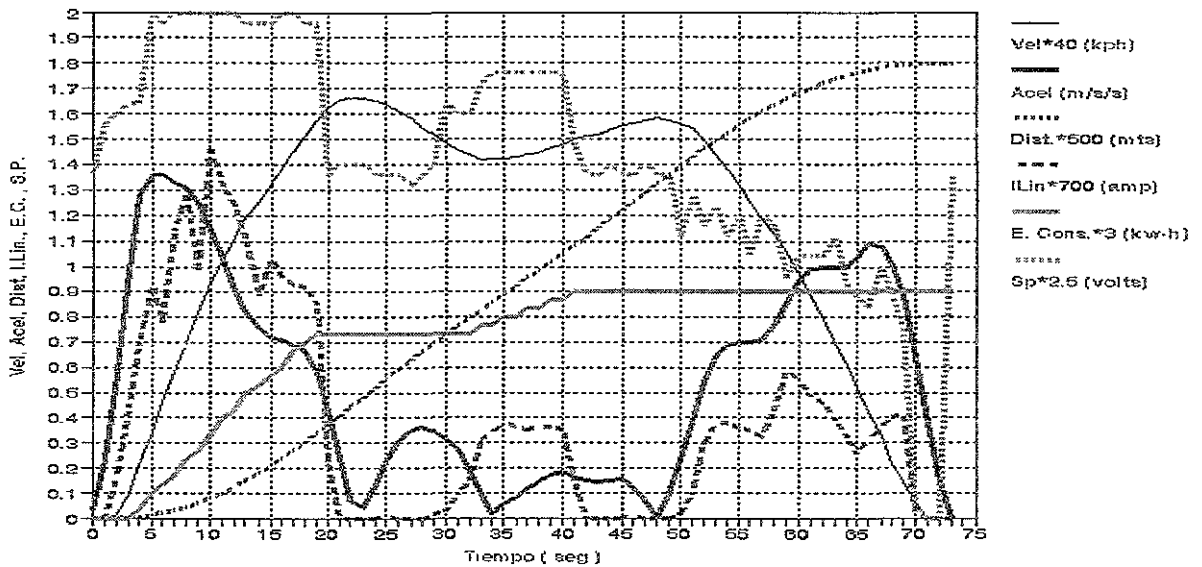


Fig. 17. Tren 422 – 423, Ermita - Portales (modificado),

Por lo tanto el ahorro de energía obtenido es:

$$Ahorro = \left(1 - \frac{Ec_2}{Ec_1}\right) \times 100 = 16.6\%$$

Así, con los resultados de esta prueba piloto se realizaron los cambios para algunos trenes de las líneas 1, 2 y 3. El comparativo de consumo de energía eléctrica de enero a mayo, durante los años de 1996 y 1997, para estas líneas, se muestra en las tablas A, B y C:

Consumo de Energía Eléctrica, años 1996 - 1997

Tabla A - Línea 1.

MES	TRACCION 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	DIFERENCIA 96-97 (KWH)	(%) DE AHORRO DE ENERGÍA
ENERO	11,226,344	9,034,000	2'192,344	19.52%
FEBRERO	10,650,621	8,393,000	2'257,621	21.19%
MARZO	11,488,646	8,747,085	2'741,561	23.86%
ABRIL	10,790,258	8,950,544	1'839,714	17.05%
MAYO	11,121,143	8,948,844	2'172,299	19.53%

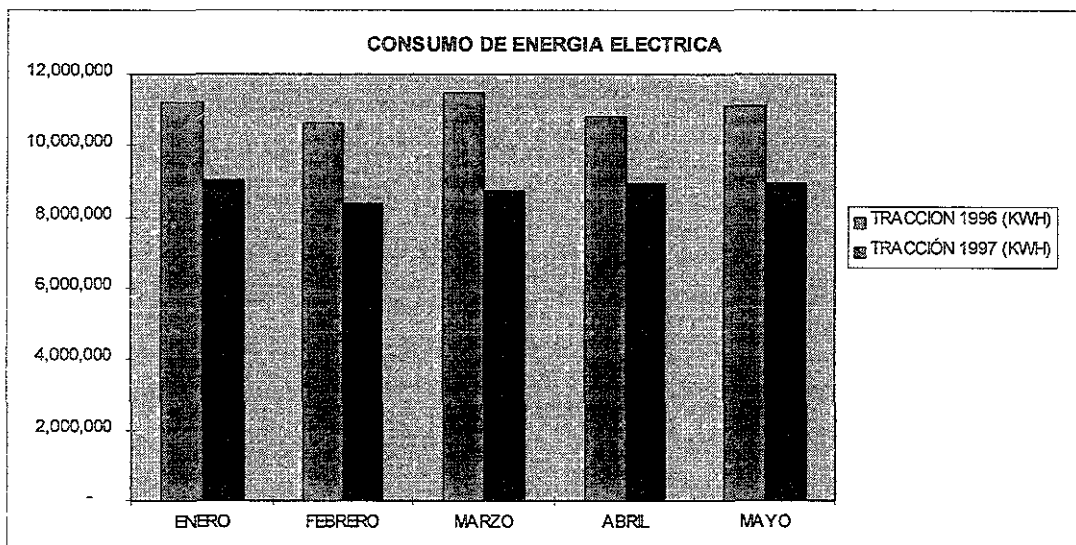


Tabla B - Línea 2.

MES	TRACCION 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	DIFERENCIA 96-97 (KWH)	(%) DE AHORRO DE ENERGÍA
ENERO	11,056,248	8,843,000	2'213,248	20.01%
FEBRERO	10,522,300	8,357,000	2'165,300	20.57%
MARZO	11,350,228	8,970,376	2'379,852	20.96%
ABRIL	10,660,255	9,105,513	1'554,742	14.58%
MAYO	10,987,153	8,985,272	2'001,881	18.22%

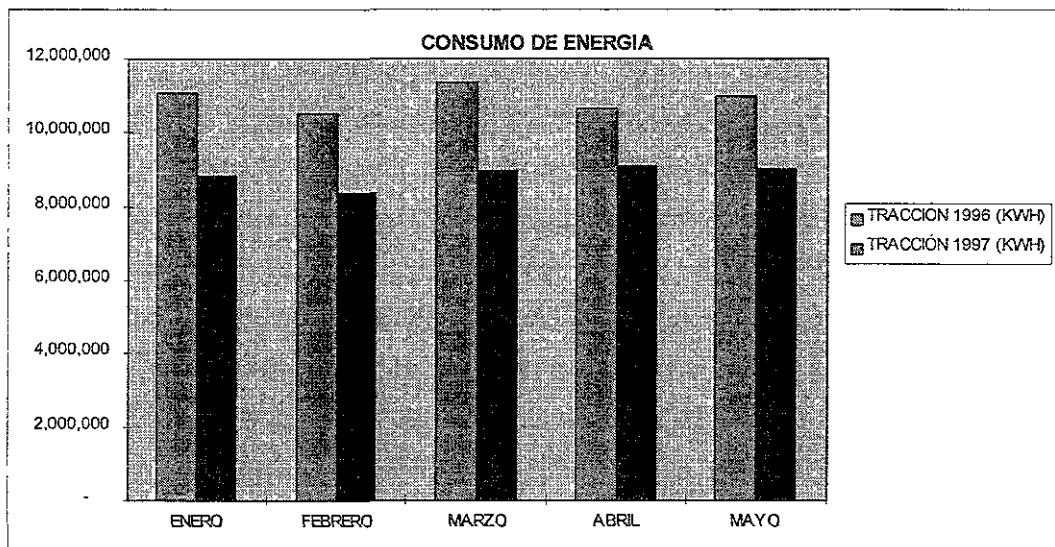
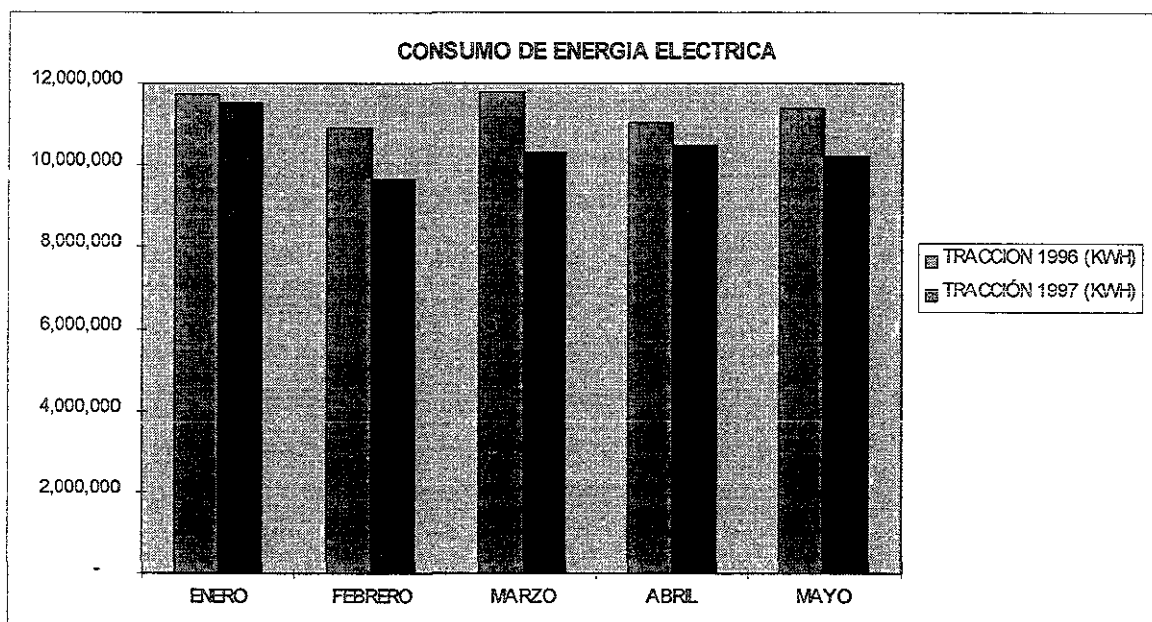


Tabla C - Línea 3.

MES	TRACCION 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	DIFERENCIA 96-97 (KWH)	(%) DE AHORRO DE ENERGÍA
ENERO	11,736,632	11,516,000	220632	1.87%
FEBRERO	10,907,262	9,667,000	1240262	11.37%
MARZO	11,765,481	10,288,989	1476492	12.55%
ABRIL	11,050,264	10,484,178	566086	5.12%
MAYO	11,389,122	10,204,906	1184216	10.40%



El logro del 10.40% en línea 3, se debe a que los trenes ya operaban con una aceleración de 1.4 m/s².

Posteriormente se llevaron a cabo recorridos en vacío con otros cuatro trenes sobre los tramos de Tasqueña – Xola vía 2 y Villa de Cortés – Tasqueña vía 1. Éstos se efectuaron con pilotaje automático bajo las siguientes condiciones :

- Con aceleración 1.0 m/s² y cronometría normal¹⁸
- Con aceleración 1.4 m/s² y cronometría modificada¹⁹

Los resultados reales fueron extraídos del Registrador Electrónico de Eventos o Caja Negra de cada tren y se presentan en la siguiente tabla.

Resultados de las pruebas para la evaluación del consumo de energía de los trenes de la Línea dos, en los tramos de Tasqueña – Xola y Villa de Cortés – Tasqueña

Cronometría Normal y aceleración a 1.0 m/s²

Interestación	434/435	422/423	436/437	423(M)	Cons.prom.
---------------	---------	---------	---------	--------	------------

	1ª. vuelta	2ª. vuelta	1ª. Vuelta	2ª. vuelta	1ª. vuelta	2ªvuelta	1ª. vuelta	2ª. vuelta	KW/h
Tasq – Gana	5.19	5.05	5.06	4.97	5.05		4.57		4.97
Gana – Ermi	3.27		3.37	2.97	3.20	3.06	2.93		3.13
Ermi – Porta	3.42	3.34	3.33	3.25	3.11	3.54	3.15		3.31
Porta – Nativ	3.80	3.63	3.61	3.53		3.44	3.43	3.58	3.57
Nativ – Vilco			2.84	3.01	2.89	2.87	2.99	2.81	2.90
Vilco – Xola	3.25	3.16	3.50		3.00		3.10		3.20
Vilco – Nativ	3.81	3.66	3.91		3.84		3.71		3.79
Nativ – Porta	3.84	3.55	3.63	3.64	3.58	3.96	3.37	3.19	3.60
Porta – Ermi	3.23	3.18	3.30		3.33		3.08		3.22
Ermi – Gana	3.98	3.95	3.91	3.52	3.77	3.55	3.55		3.75
Gana – Tasq	3.83		3.68	3.69	3.72	3.82			3.75

CONSUMO DE ENERGÍA TASQUEÑA – XOLA: 126.53 Kw./h. y 20.45 kw./h.
CONSUMO DE ENERGÍA VILLA DE CORTES – TASQUEÑA: 108.60 kw./h. y 20.34kW/h

¹⁸ STC Documento Técnico No. 13 "Material Rodante", pags 1 – 320. Concepto de la Cronometría Normal.- Son los cambios de Tracción del tren desde T1 hasta T5, incluyendo el Frenado y el Neutro cuando el tren es conducido en el modo Pilotaje Automático.

¹⁹ Cronometría Modificada.- Esta se llevo a cabo a nivel Hardware del cajón del Chopper, sustituyendo una resistencia de la Tarjeta Electrónica PAT 18 ACC y a nivel Software, del cajón de Pilotaje Automático Embarcado para cada tren se modificaron las memorias de la tarjeta de la cronometría, a fin de que los tiempos de cambio de Tracción , Frenado y Neutro fueran menores de lo normal. Todo ello con el objeto de alcanzar en un menor tiempo posible la aceleración máxima y del tren.

Resultados de las pruebas para la evaluación del consumo de energía de los trenes de la Línea dos, en los tramos de Tasqueña – Xola y Villa de Cortés – Tasqueña

Cronometría Modificada y aceleración a 1.4 m/s²

Interestación	434/435	422/423	436/437	423(M)	Cons.prom.
----------------------	----------------	----------------	----------------	---------------	-------------------

	1ª. vuelta	2ª. vuelta	1ª. vuelta	2ª. vuelta	1ª. vuelta	2ª.vuelta	1ª. vuelta	2ª. vuelta	KW/h
Tasq – Gana		4.58	4.35	4.35	4.60	4.42	4.04		4.39
Gana – Ermi	3.01	2.90	2.98	2.79	2.98	2.94	2.86		2.92
Ermi – Porta	2.96	2.87	2.78	2.70	2.76	2.85	2.61		2.79
Porta – Nativ	3.48	3.10		2.97	3.12	3.04			3.14
Nativ – Villco	2.85		3.02	2.79	2.81	2.81	2.70		2.83
Villco – Xola	2.76	2.67	2.68	2.80	2.72	2.93			2.76
Villco – Nativ	3.30	3.12	3.38	3.33		3.17		3.07	3.23
Nativ – Porta	3.34	3.38	3.47	3.21		3.42	3.19		3.34
Porta – Ermi	2.81	2.82	2.95	2.80	2.80	2.73			2.82
Ermi – Gana	3.35	3.59	3.69	3.50	3.65	3.71			3.58
Gana – Tasq	3.26				3.62	3.65			3.51

CONSUMO DE ENERGÍA TASQUEÑA – XOLA: 113.01 Kw./h. y 18.27 kw./h.

CONSUMO DE ENERGÍA VILLA DE CORTES – TASQUEÑA: 98.85 kw./h. y 18.52kW/h

De los resultados anteriores, se obtuvo lo siguiente:

TRAMO	CONSUMO PROMEDIO EN KWh	CONSUMO EN KWh	CONDICIÓN
TAS – XOLA	126.53	20.45	NORMAL
TAS – XOLA	113.01	18.27	MODIFICADO
VILL – TAS	108.60	20.34	NORMAL
VILL - TAS	98.85	18.52	MODIFICADO

Por lo tanto el ahorro de energía resultante es:

TRAMO	AHORRO DE ENERGÍA
TASQUEÑA – XOLA	10.69%
VILLA DE CORTES – TASQUEÑA	08.98%

A raíz de estos resultados, se tomo la decisión de implantar estas medidas en todos los trenes disponibles de las Líneas 1,2 y 3, en total 134 trenes, de los cuales la Línea 1 corresponden 43; a Línea 2, 44 y la Línea 3, 47.

En Días Laborables circulan en horas pico un total de 37, 38 y 40 trenes respectivamente; en Días Sábados circulan 33,36 y 30 respectivamente y los Días Domingos y Días Festivos circulan 24, 25 y 27 respectivamente.

Así a partir de los meses subsecuentes se efectuaron junto con el personal de Material Rodante e Ingeniería y Desarrollo, los cambios a dichos trenes tanto en el Chopper como en el Pilotaje Automático Embarcado. Desde ese momento se lleva un registro y control del consumo de energía como resultado de la operación y explotación del servicio de éstas líneas. Para ello, mes a mes el área de Despacho de Carga de la Gerencia de Instalaciones Fijas realiza sus lecturas del consumo de energía eléctrica de Tracción, con el fin de obtener el consumo total y con ello el desglose de pago por consumo de éste insumo a la Cía. de Luz y Fuerza de I centro. De ahí que a continuación se presentes los resultados siguientes:

CONSUMO DE ENERGÍA CON LA APLICACIÓN DE LA MARCHA OPTIMIZADA DURANTE LOS AÑOS DE 1996 A MAYO DEL 2000

**RESULTADOS OBTENIDOS DEL CONSUMO DE ENERGÍA
CON LA APLICACIÓN DE LA MARCHA OPTIMIZADA EN LOS
AÑOS DE 1996, 1997, 1998, 1999 y 2000**

LÍNEA 1

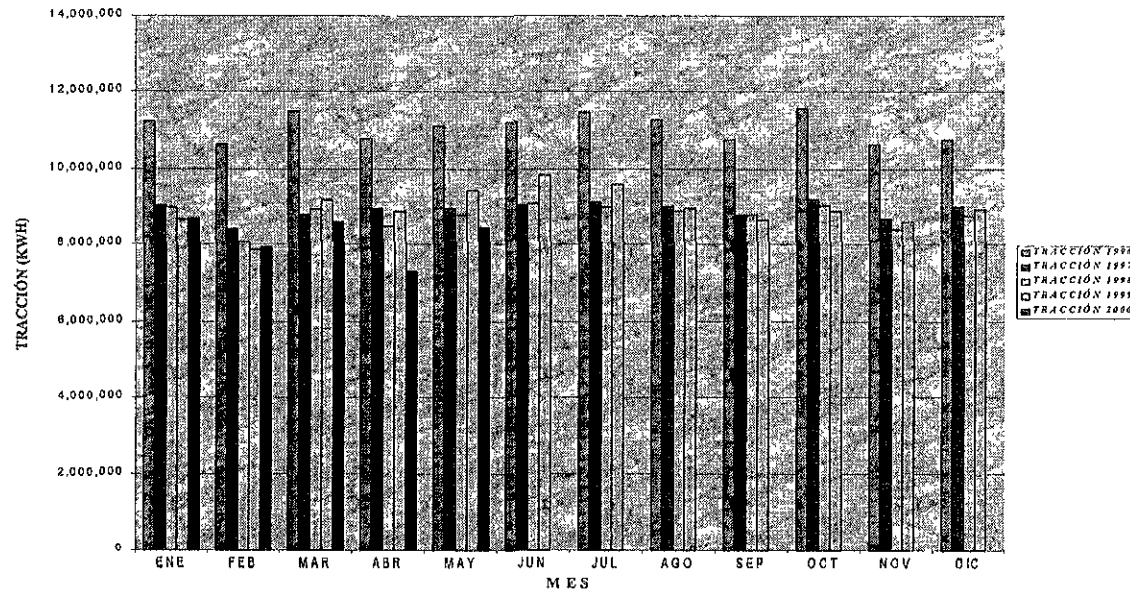
MES	TRACCIÓN 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	TRACCIÓN 1998 (KWH)	TRACCIÓN 1999 (KWH)	TRACCIÓN 2000 (KWH)
ENE	11,226,344.00	9,034,000.00	8,989,092.00	8,653,929.00	8,688,367.00
FEB	10,650,621.00	8,393,000.00	8,060,288.00	7,863,427.00	7,925,080.00
MAR	11,488,646.00	8,787,085.00	8,930,316.00	9,179,200.00	8,591,762.00
ABR	10,790,258.00	8,950,544.00	8,461,123.00	8,871,946.00	7,288,072.00
MAY	11,121,143.00	8,948,844.00	8,780,901.00	9,438,793.00	8,434,861.00
JUN	11,211,529.00	9,047,448.00	9,088,228.00	9,848,934.00	
JUL	11,462,683.00	9,125,129.00	8,984,371.00	9,599,221.00	
AGOS	11,279,890.00	9,008,623.00	8,886,644.00	8,956,712.00	
SEPT	10,763,271.00	8,779,238.00	8,783,470.00	8,642,233.00	
OCT	11,567,806.00	9,191,580.00	9,026,952.00	8,886,389.00	
NOV	10,652,470.00	8,675,810.00	8,384,371.00	8,582,944.00	
DIC	10,766,520.00	9,003,629.00	8,749,487.00	8,938,985.00	
TOTAL	132,981,181.00	106,944,930.00	105,125,243.00	107,462,713.00	40,928,142.00
CONSUMO TOTAL EN KWH:					493,442,209.00

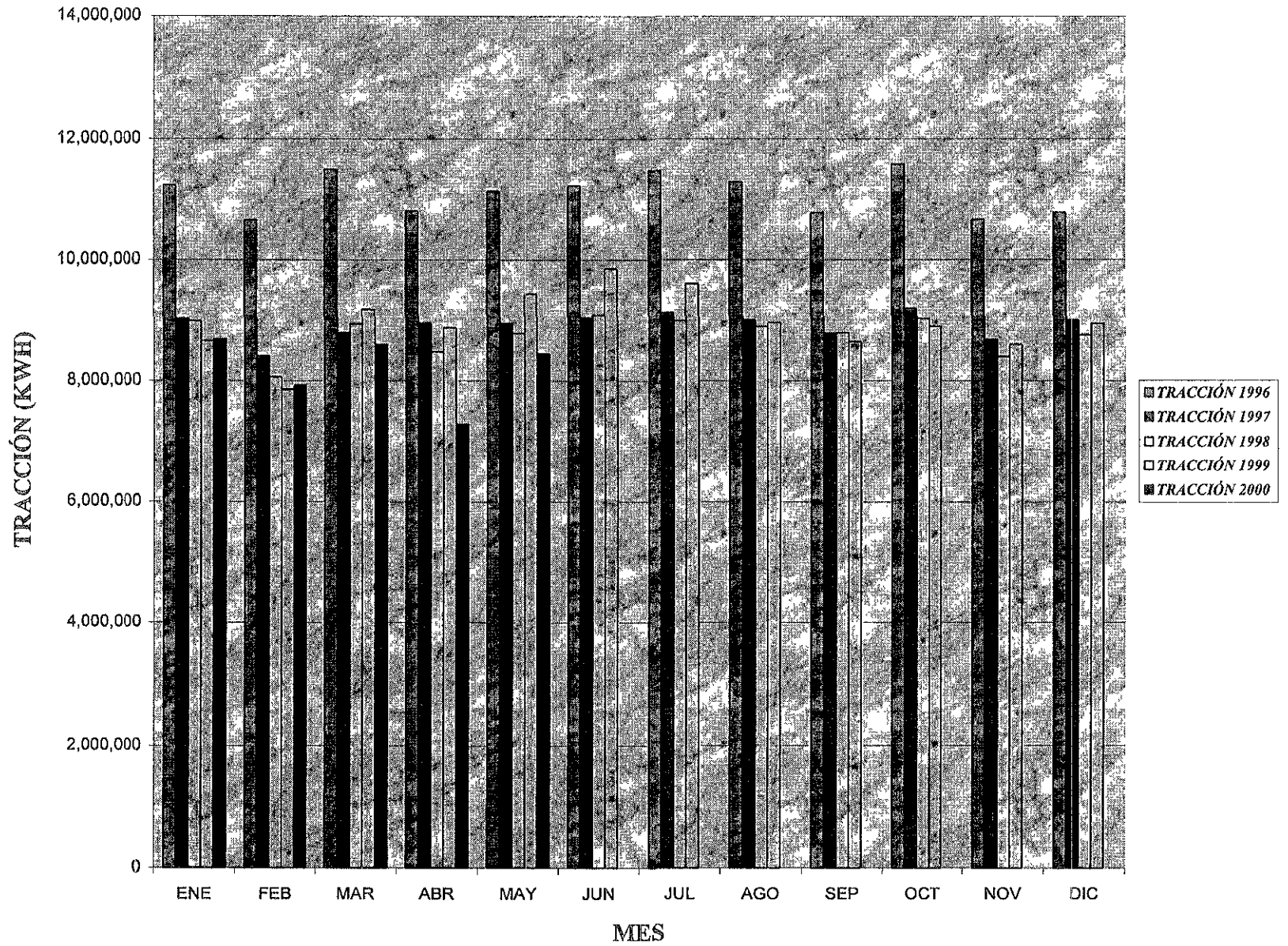
AHORRO EN KWH, LÍNEA 1

MES	DIFERENCIA 96/97 (KWH)	DIFERENCIA 96/98 (KWH)	DIFERENCIA 96/99 (KWH)	DIFERENCIA 96/00 (KWH)
ENE	2,192,344.00	2,237,252.00	2,572,415.00	2,537,977.00
FEB	2,257,621.00	2,590,333.00	2,787,194.00	2,725,541.00
MAR	2,701,561.00	2,558,330.00	2,309,446.00	2,896,884.00
ABR	1,839,714.00	2,329,135.00	1,918,312.00	3,502,186.00
MAY	2,172,299.00	2,340,242.00	1,682,350.00	2,686,282.00
JUN	2,164,081.00	2,123,301.00	1,362,595.00	
JUL	2,337,554.00	2,478,312.00	1,863,462.00	
AGOS	2,271,267.00	2,393,246.00	2,323,178.00	
SEPT	1,984,033.00	1,979,801.00	2,121,038.00	
OCT	2,376,226.00	2,540,854.00	2,681,417.00	
NOV	1,976,660.00	2,268,099.00	2,069,526.00	
DIC	1,762,891.00	2,017,033.00	1,827,535.00	
TOTAL	26,036,251.00	27,855,938.00	25,518,468.00	14,348,870.00
AHORRO TOTAL EN KWH:				93,759,527.00

LÍNEA 1

MES	TRACCIÓN 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	TRACCIÓN 1998 (KWH)	TRACCIÓN 1999 (KWH)	TRACCIÓN 2000 (KWH)	DIFERENCIA 96-97 (KWH)	AHORRO 96-97 (PESOS)	DIFERENCIA 96-98 (KWH)	AHORRO 96-98 (PESOS)	DIFERENCIA 96-99 (KWH)	AHORRO 96-99 (PESOS)	DIFERENCIA 96-00 (KWH)	AHORRO 96-00 (PESOS)
ENE	11,226,344	9,034,000	8,989,092	8,653,929	8,688,367	2,192,344	1,089,595	2,237,252	1,111,914	2,572,415	1,278,490	2,537,977	1,261,375
FEB	10,650,621	8,393,000	8,060,288	7,863,427	7,925,080	2,257,621	1,122,038	2,590,333	1,287,395	2,787,194	1,385,235	2,725,541	1,354,594
MAR	11,488,646	8,787,085	8,930,316	9,179,200	8,591,762	2,701,561	1,342,676	2,558,330	1,571,490	2,309,446	1,147,795	2,896,884	1,439,751
ABR	10,790,258	8,950,544	8,461,123	8,871,946	7,288,072	1,839,714	914,338	2,329,135	1,157,580	1,918,312	953,401	3,502,186	1,740,586
MAY	11,121,143	8,948,844	8,780,901	9,438,793	8,434,861	2,172,299	1,079,633	2,340,242	1,163,100	1,682,350	836,128	2,686,282	1,335,082
JUN	11,211,529	9,047,448	9,088,228	9,848,934		2,164,081	1,075,548	2,123,301	1,055,281	1,362,595	677,210		
JUL	11,462,683	9,125,129	8,984,371	9,599,221		2,337,554	1,161,764	2,478,312	1,231,721	1,863,462	926,141		
AGO	11,279,890	9,008,623	8,886,644	8,956,712		2,271,267	1,128,820	2,393,246	1,189,443	2,323,178	1,154,619		
SEP	10,763,271	8,779,238	8,783,470	8,642,233		1,984,033	986,064	1,979,801	983,961	2,121,038	1,054,156		
OCT	11,567,806	9,191,580	9,026,952	8,886,389		2,376,226	1,180,984	2,540,854	1,262,804	2,681,417	1,332,664		
NOV	10,652,470	8,675,810	8,384,371	8,582,944		1,976,660	982,400	2,268,099	1,127,245	2,069,526	1,028,554		
DIC	10,766,520	9,003,629	8,749,487	8,938,985		1,762,891	876,157	2,017,033	1,002,465	1,827,535	908,285		





**RESULTADOS OBTENIDOS DEL CONSUMO DE ENERGÍA
CON LA APLICACIÓN DE LA MARCHA OPTIMIZADA EN LOS
AÑOS DE 1996, 1997, 1998, 1999 y 2000**

LÍNEA 2

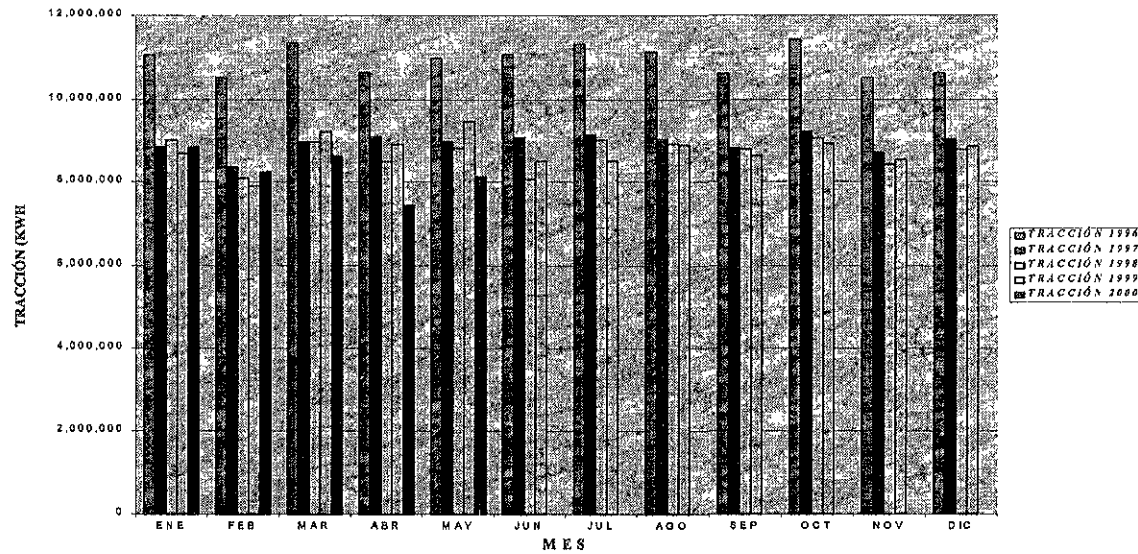
MES	TRACCIÓN 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	TRACCIÓN 1998 (KWH)	TRACCIÓN 1999 (KWH)	TRACCIÓN 2000 (KWH)
ENE	11,056,248.00	8,843,000.00	9,025,683.00	8,689,156.00	8,839,211.00
FEB	10,522,300.00	8,357,000.00	8,093,099.00	7,895,437.00	8,227,769.00
MAR	11,350,228.00	8,970,376.00	8,966,670.00	9,216,566.00	8,631,208.00
ABR	10,660,255.00	9,105,513.00	8,495,565.00	8,908,061.00	7,420,477.00
MAY	10,987,153.00	8,985,272.00	8,816,645.00	9,475,174.00	8,128,204.00
JUN	11,076,451.00	9,084,277.00	8,060,720.00	8,508,053.00	
JUL	11,324,578.00	9,162,276.00	9,020,943.00	8,513,941.00	
AGOS	11,143,988.00	9,045,294.00	8,922,819.00	8,895,283.00	
SEPT	10,633,593.00	8,814,975.00	8,791,901.00	8,644,672.00	
OCT	11,428,435.00	9,228,996.00	9,063,698.00	8,927,552.00	
NOV	10,524,127.00	8,711,127.00	8,418,501.00	8,548,127.00	
DIC	10,636,803.00	9,040,279.00	8,785,104.00	8,860,369.00	
TOTAL	131,344,159.00	107,348,385.00	104,461,348.00	105,082,391.00	41,246,869.00
CONSUMO TOTAL EN KWH:					489,483,152.00

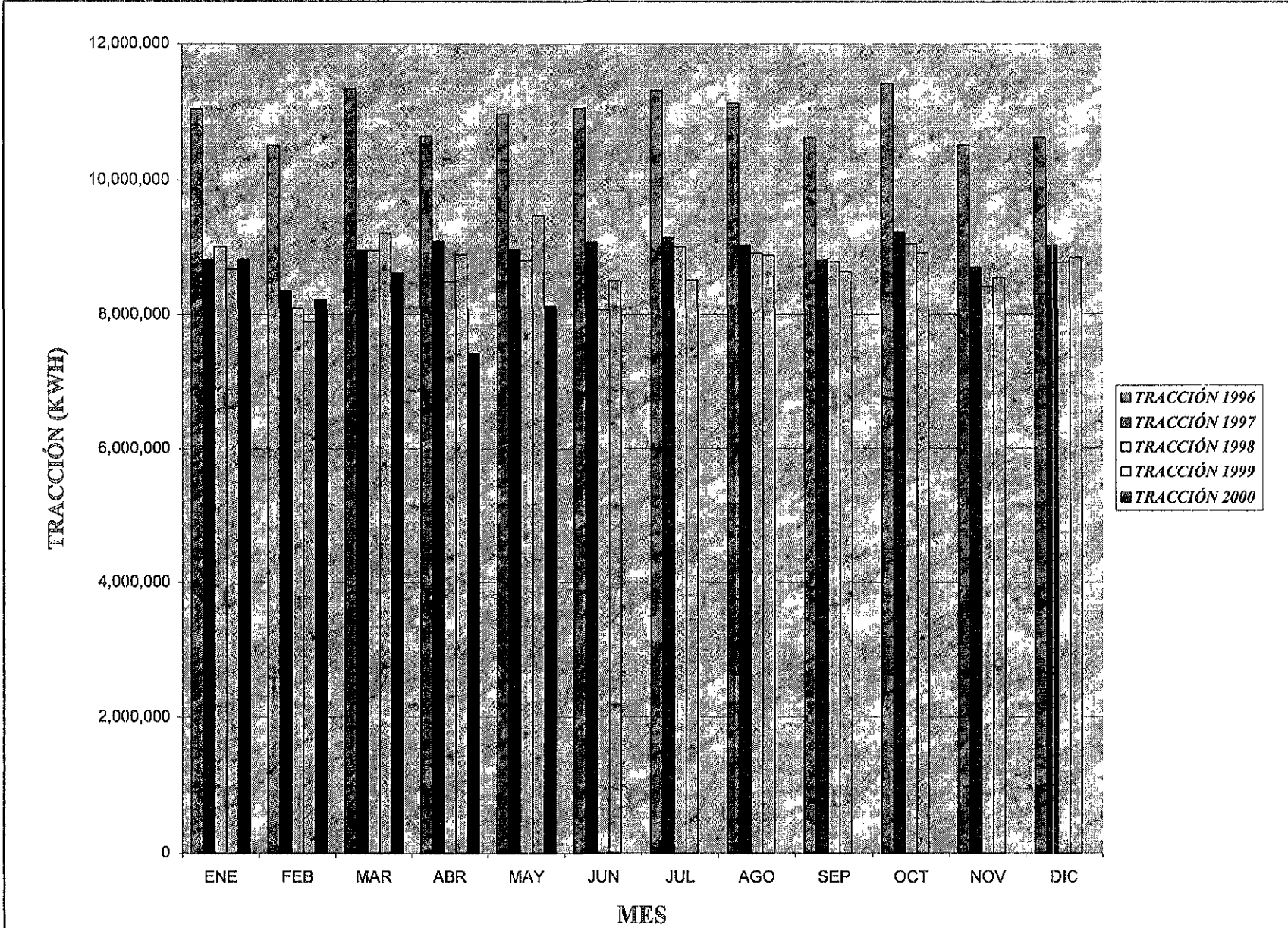
AHORRO EN KWH, LÍNEA 2

MES	DIFERENCIA 96/97 (KWH)	DIFERENCIA 96/98 (KWH)	DIFERENCIA 96/99 (KWH)	DIFERENCIA 96/00 (KWH)
ENE	2,213,248.00	2,030,565.00	2,367,092.00	2,217,037.00
FEB	2,165,300.00	2,429,201.00	2,626,863.00	2,294,531.00
MAR	2,379,852.00	2,383,558.00	2,133,662.00	2,719,020.00
ABR	1,554,742.00	2,164,690.00	1,752,194.00	3,239,778.00
MAY	2,001,881.00	2,170,508.00	1,511,979.00	2,858,949.00
JUN	1,992,174.00	3,015,731.00	2,568,398.00	
JUL	2,162,302.00	2,303,635.00	2,810,637.00	
AGOS	2,098,694.00	2,221,169.00	2,248,705.00	
SEPT	1,818,618.00	1,841,692.00	1,988,921.00	
OCT	2,199,439.00	2,364,737.00	2,500,883.00	
NOV	1,813,000.00	2,105,626.00	1,976,000.00	
DIC	1,596,524.00	1,851,699.00	1,776,434.00	
TOTAL	23,995,774.00	26,882,811.00	26,261,768.00	13,329,315.00
AHORRO TOTAL EN KWH:				90,469,668.00

LÍNEA 2

MES	TRACCIÓN 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	TRACCIÓN 1998 (KWH)	TRACCIÓN 1999 (KWH)	TRACCIÓN 2000 (KWH)	DIFERENCIA 96-97 (KWH)	AHORRO 96-97 (PESOS)	DIFERENCIA 96-98 (KWH)	AHORRO 99-98 (PESOS)	DIFERENCIA 96-99 (KWH)	AHORRO 96-99 (PESOS)	DIFERENCIA 96-00 (KWH)	AHORRO 96-00 (PESOS)
ENE	11,056,248	8,843,000	9,025,683	8,689,156	8,839,211	2,213,248	772,424	2,030,565	1,108,688	2,367,092	1,353,977	2,217,037	1,432,206
FEB	10,522,300	8,357,000	8,093,099	7,895,437	8,227,769	2,165,300	779,508	2,429,201	1,200,025	2,626,863	1,502,566	2,294,531	1,482,267
MAR	11,350,228	8,970,376	8,966,670	9,216,566	8,631,208	2,379,852	878,165	2,383,558	1,151,259	2,133,662	1,220,455	2,719,020	1,756,487
ABR	10,660,255	9,105,513	8,495,565	8,908,061	7,420,477	1,554,742	598,576	2,164,690	991,428	1,752,194	1,002,255	3,239,778	2,092,897
MAY	10,987,153	8,985,272	8,816,645	9,475,174	8,128,204	2,001,881	784,737	2,170,508	942,000	1,511,979	864,852	2,858,949	1,846,881
JUN	11,076,451	9,084,277	8,060,720	8,508,053		1,992,174	810,815	3,015,731	1,257,560	2,568,398	1,469,124		
JUL	11,324,578	9,162,276	9,020,943	8,513,941		2,162,302	931,952	2,303,635	1,008,992	2,810,637	1,607,684		
AGO	11,143,988	9,045,294	8,922,819	8,895,283		2,098,694	936,018	2,221,169	1,057,276	2,248,705	1,286,259		
SEP	10,633,593	8,314,975	8,791,901	8,644,672		1,818,618	820,197	1,841,692	976,097	1,988,921	1,137,663		
OCT	11,428,435	9,228,996	9,063,698	8,927,552		2,199,439	1,007,343	2,364,737	1,352,630	2,500,883	1,430,505		
NOV	10,524,127	8,711,127	8,418,501	8,548,127		1,813,000	844,858	2,105,626	1,252,847	1,976,000	1,130,272		
DIC	10,636,803	9,040,279	8,785,104	8,860,369		1,596,524	734,401	1,851,699	1,090,651	1,776,434	1,016,120		





**RESULTADOS OBTENIDOS DEL CONSUMO DE ENERGÍA
CON LA APLICACIÓN DE LA MARCHA OPTIMIZADA EN LOS
AÑOS DE 1996, 1997, 1998, 1999 y 2000**

LÍNEA 3

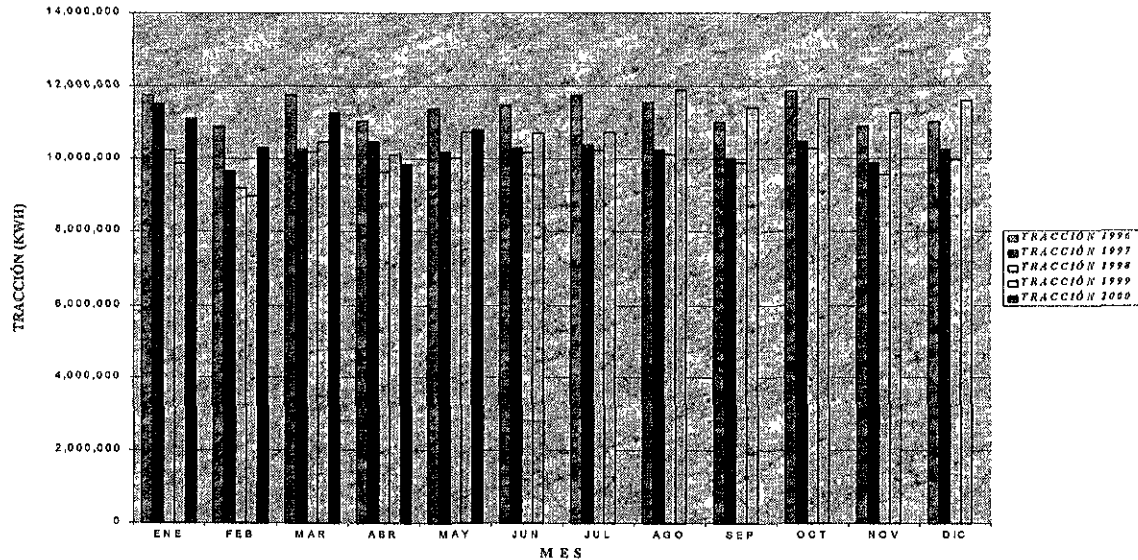
MES	TRACCIÓN 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	TRACCIÓN 1998 (KWH)	TRACCIÓN 1999 (KWH)	TRACCIÓN 2000 (KWH)
ENE	11,736,632.00	11,516,000.00	10,250,803.00	9,880,646.00	11,112,254.00
FEB	10,907,262.00	9,667,000.00	9,191,632.00	8,967,140.00	10,322,688.00
MAR	11,765,481.00	10,288,989.00	10,196,214.00	10,480,376.00	11,271,623.00
ABR	11,050,264.00	10,484,178.00	9,648,728.00	10,117,215.00	9,861,371.00
MAY	11,389,122.00	10,204,906.00	10,013,390.00	10,748,904.00	10,815,746.00
JUN	11,481,687.00	10,317,350.00	10,169,865.00	10,718,483.00	
JUL	11,738,892.00	10,405,935.00	10,245,419.00	10,741,674.00	
AGOS	11,551,695.00	10,273,075.00	10,133,976.00	11,889,095.00	
SEPT	11,022,627.00	10,011,494.00	9,897,814.00	11,413,209.00	
OCT	11,846,548.00	10,481,712.00	10,293,977.00	11,656,291.00	
NOV	10,909,158.00	9,893,549.00	9,561,203.00	11,256,096.00	
DIC	11,025,954.00	10,267,380.00	9,977,567.00	11,610,886.00	
TOTAL	136,425,322.00	123,811,568.00	119,580,588.00	129,480,015.00	53,383,682.00
CONSUMO TOTAL EN KWH:					562,681,175.00

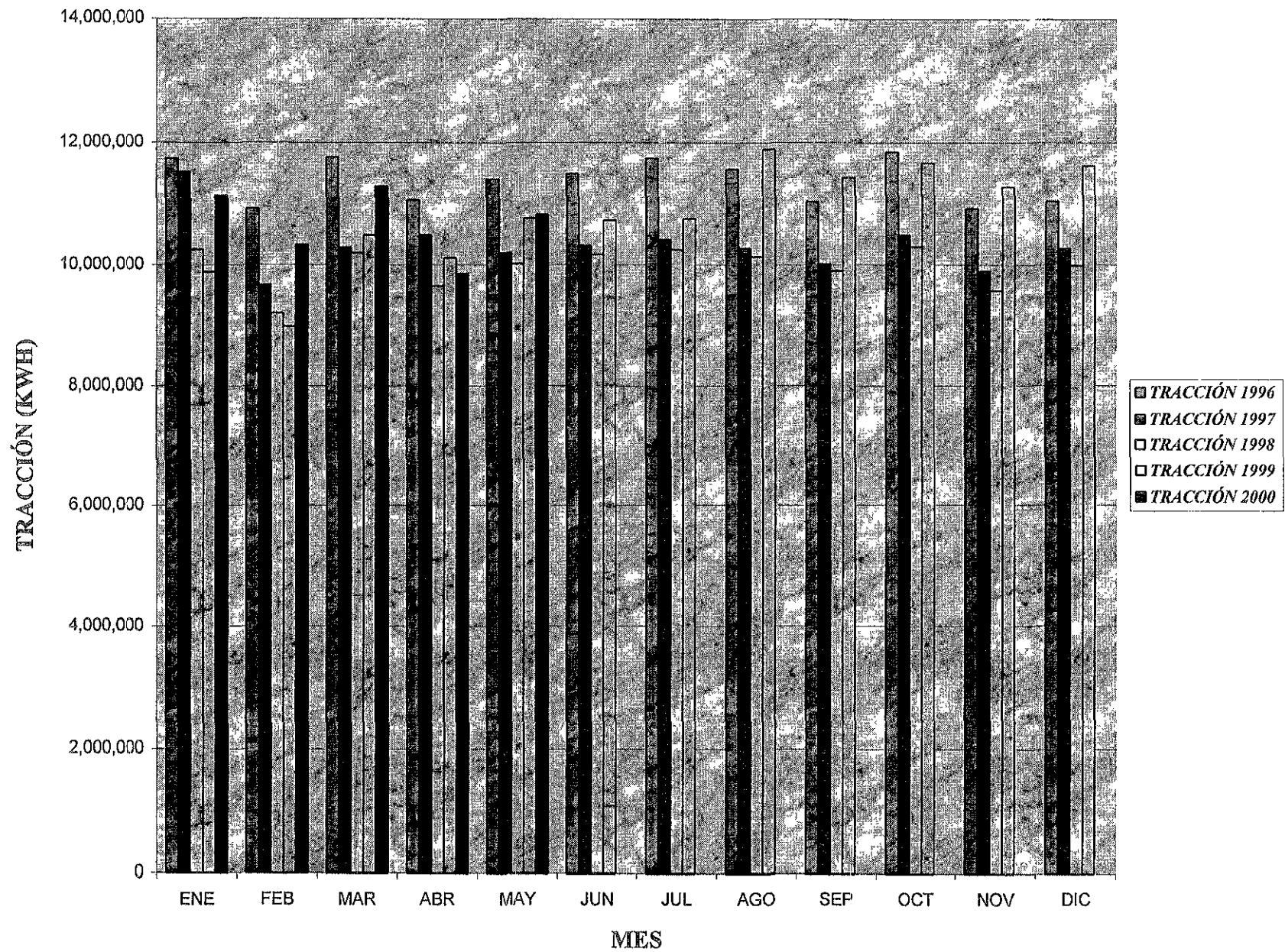
AHORRO EN KWH, LÍNEA 3

MES	DIFERENCIA 96/97 (KWH)	DIFERENCIA 96/98 (KWH)	DIFERENCIA 96/99 (KWH)	DIFERENCIA 96/00 (KWH)
ENE	220,632.00	1,485,829.00	1,855,986.00	624,378.00
FEB	1,240,262.00	1,715,630.00	1,940,122.00	584,574.00
MAR	1,476,492.00	1,569,267.00	1,285,105.00	493,858.00
ABR	566,086.00	1,401,536.00	933,049.00	1,188,893.00
MAY	1,184,216.00	1,375,732.00	640,218.00	573,376.00
JUN	1,164,337.00	1,311,822.00	763,204.00	
JUL	1,332,957.00	1,493,473.00	997,218.00	
AGOS	1,278,620.00	1,417,719.00	-337,400.00	
SEPT	1,011,133.00	1,124,813.00	-390,582.00	
OCT	1,364,836.00	1,552,571.00	190,257.00	
NOV	1,015,609.00	1,347,955.00	-346,938.00	
DIC	758,574.00	1,048,387.00	-584,932.00	
TOTAL	12,613,754.00	16,844,734.00	6,945,307.00	3,465,079.00
AHORRO TOTAL EN KWH:				39,868,874.00

LÍNEA 3

MES	TRACCIÓN 1996 (KWH)	TRACCIÓN 1997 (KWH)	TRACCIÓN 1998 (KWH)	TRACCIÓN 1999 (KWH)	TRACCIÓN 2000 (KWH)	DIFERENCIA 96-97 (KWH)	AHORRO 96-97 (PESOS)	DIFERENCIA 96-98 (KWH)	AHORRO 96-98 (PESOS)	DIFERENCIA 96-99 (KWH)	AHORRO 96-99 (PESOS)	DIFERENCIA 96-00 (KWH)	AHORRO 96-00 (PESOS)
ENE	11,736,632	11,516,000	10,250,803	9,880,646	11,112,254	220,632	109,654	1,485,829	738,457	1,855,986	922,425	624,378	310,316
FEB	10,907,262	9,667,000	9,191,632	8,967,140	10,322,688	1,240,262	616,410	1,715,630	852,668	1,940,122	964,241	584,574	290,533
MAR	11,765,481	10,288,989	10,196,214	10,480,376	11,271,623	1,476,492	733,817	1,569,267	779,926	1,285,105	638,697	493,858	245,447
ABR	11,050,264	10,484,178	9,648,728	10,117,215	9,861,371	566,086	281,345	1,401,536	696,563	933,049	463,725	1,188,893	590,880
MAY	11,389,122	10,204,906	10,013,390	10,748,904	10,815,746	1,184,216	588,555	1,375,732	683,739	640,218	318,188	573,376	284,968
JUN	11,481,687	10,317,350	10,169,865	10,718,483		1,164,337	578,675	1,311,822	651,976	763,204	379,312		
JUL	11,738,892	10,405,935	10,245,419	10,741,674		1,332,957	662,480	1,493,473	742,256	997,218	495,617		
AGO	11,551,695	10,273,075	10,133,976	11,889,095		1,278,620	635,474	1,417,719	704,606	-337,400	-167,688		
SEP	11,022,627	10,011,494	9,897,814	11,413,209		1,011,133	502,533	1,124,813	559,032	-390,582	-194,119		
OCT	11,846,548	10,481,712	10,293,977	11,656,291		1,364,836	678,323	1,552,571	771,628	190,257	94,558		
NOV	10,909,158	9,893,549	9,561,203	11,256,096		1,015,609	504,758	1,347,955	669,934	-346,938	-172,428		
DIC	11,025,954	10,267,380	9,977,567	11,610,886		758,574	377,011	1,048,387	521,048	-584,932	-290,711		





**AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA COMO RESULTADO DE LA
 APLICACIÓN DE LA "MARCHA OPTIMIZADA" EN LAS LÍNEAS
 1, 2 Y 3
 DURANTE LOS AÑOS DE: 1996, 1997, 1998, 1999 Y 2000**

DESCRIPCIÓN	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3	TOTAL
CONSUMO EN KWH	493,442,209.00	489,483,152.00	562,681,175.00	1,545,606,536.00
COSTO EN PESOS	231,175,483.99	225,850,353.45	264,677,116.73	721,702,954.17
AHORRO EN KWH	93,759,527.00	90,469,668.00	39,868,874.00	224,098,069.00
AHORRO EN PESOS	46,598,484.92	46,920,915.77	19,814,830.38	113,334,231.07
% DE AHORRO KWH	19.00	18.48	7.09	44.57
% DE AHORRO (\$)	20.16	20.78	7.49	48.42

NOTA: SE CONSIDERAN LOS MESES DE ENERO A MAYO DEL AÑO 2000

CAPITULO V. CONSUMO DE ENERGÍA Y SUS COSTOS

En este capítulo se comparan los costos de energía del metro de México contra los de otros metros en el mundo, observando también el ahorro que se ha obtenido desde 1996 a mayo del 2000.

5.1. Evolución de los costos de la energía.

La UITP, en su 52° Congreso celebrado en Stuttgart Alemania en octubre de 1995, a través del Subcomité de Asuntos Financieros y Comerciales, realizó una encuesta entre 25 sistemas de transporte tipo metro en el mundo, y a partir de las respuestas de ésta, se pudo determinar en el año de 1994, que el conjunto de las redes de metro gasta en total cerca de 2,000 millones de dólares en energía eléctrica.

Se pudo observar también, no obstante que este promedio fue establecido a partir de 17 redes solamente, que el costo de la energía acusó variaciones muy diferentes de una empresa a otra.

Así, el precio del Kw/h experimentó fluctuaciones que van de -48% a +151%, según las redes.

La figura 18 compara la evolución de los costos de energía con el del consumo energético, prestaciones de transporte (pasajeros - Km.) y prestaciones de operación (lugares-km) durante los años 1984-1994.

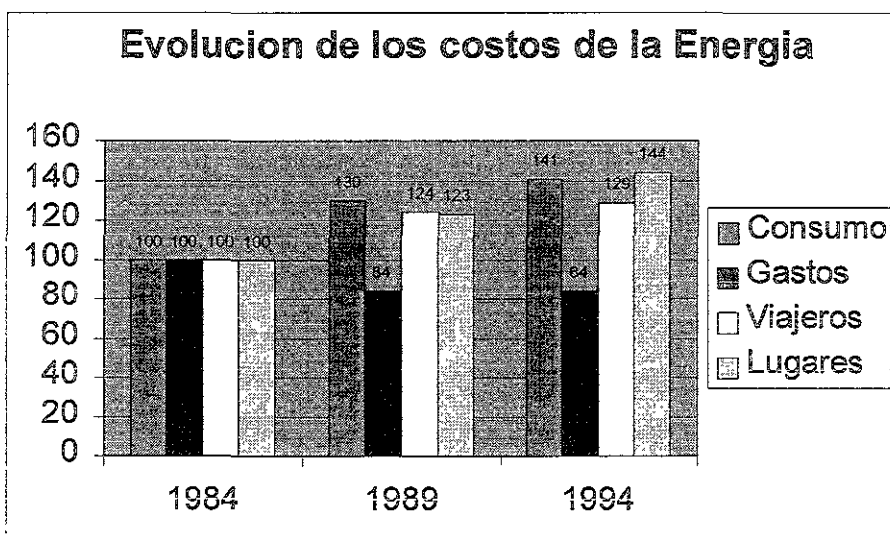


Figura 18. Evolución de los costos de la Energía

La figura anterior, muestra claramente que los costos de energía han disminuido mientras que el consumo y las prestaciones de transporte han aumentado.

Por otra parte, ése subcomité argumenta también que los costos de energía en los gastos totales de las empresas han sido en promedio de 6.5% en 1984, de 7.3% en 1989 y de 6.7% en 1994. Sin embargo, cualquiera que sea el año considerado, las cifras varían de 2 a 20 según la empresa. Para ello, la figura 19 representa los porcentajes indicados para el año 1994. En un caso extremo, la energía representa 23.4 % de los gastos de la empresa, lo que se explica por restricciones de política económica de la mayoría de los países, incluso hasta nuestros días.

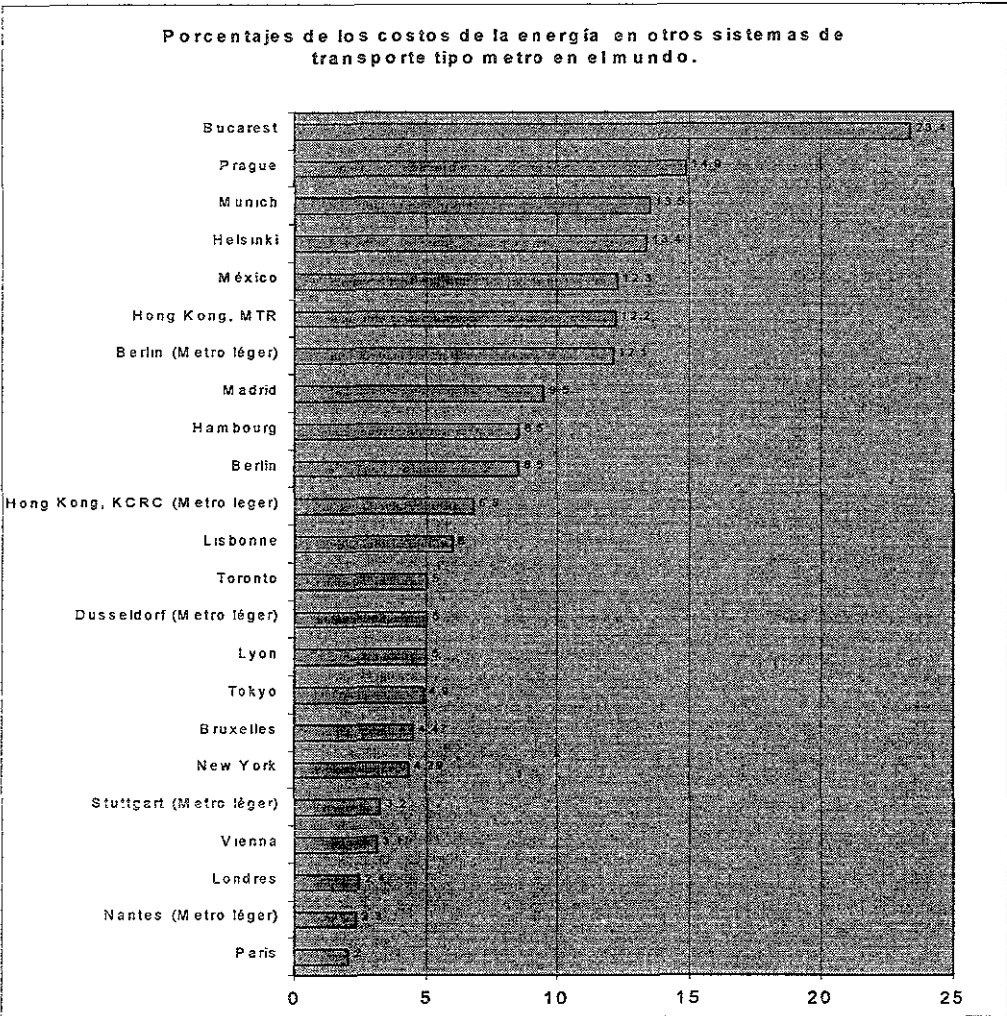


Figura 19. Porcentajes de los costos de la energía en otros sistemas de transporte tipo metro en el mundo.

Cabe aclarar que los porcentajes respectivos dependen del precio de la energía, de la cantidad de energía utilizada y de los rendimientos, pero también de los costos de mano de obra y material, así como del monto de los costos de financiamiento de las inversiones, lo que significa que el querer comparar directamente a las diferentes redes de transporte es inapropiado.

El precio de la corriente se fija tomando en cuenta diferentes criterios de modo que los costos de producción y distribución de la energía sean facturados a los diferentes consumidores lo más equitativamente posible.

El precio de base es un componente que se relaciona con la potencia, por ejemplo, con la potencia instalada de los equipos del cliente (potencia suscrita en kw), o con una potencia máxima (en kw) que el cliente conviene en requerir. Toma la forma de un precio global.

El precio correspondiente a la potencia suscrita considera los costos fijos de distribución de la energía. En general, se multiplica un precio específico (US \$ por kw) por la potencia de esta medida o por un valor promedio definido a partir de varias crestas de potencia.

El precio de suministro considera la cantidad de energía variable que ha sido consumida. Esto se obtiene multiplicando el precio unitario (US \$/kw/h) por el consumo medido.

Este difiere a veces en el día o la noche y, en ciertos casos, en invierno o verano.

Las propuestas de 30 redes muestran que estos criterios entran más o menos en juego para el cálculo de los precios de la corriente. La diferencia entre las tarifas aplicadas en el día y la noche es de 33% en promedio, con un máximo de 70%. En 10 redes, los precios difieren igualmente en invierno o en verano un promedio de 27% y, en un caso, en 67%.

Una sola empresa no paga en función de su consumo, sino solo el precio de base y la potencia suscrita. Cinco redes no pagan más que su consumo, a veces con una parte global.

Los resultados de la encuesta muestran que los componentes que consideran la potencia han tomado un poco más de peso entre 1984 y 1994. Se establece igualmente la diferencia entre los precios del kw/h en el día y la noche y, aunque a una escala menor hasta aquí, entre el verano y el invierno.

Jugando con los diferentes componentes del precio, las compañías de distribución de la electricidad se esfuerzan por adaptar mejor sus tarifas a los costos de producción y al mercado.

El objetivo que persiguen consiste en asignar más equitativamente los costos en aquellos que los ocasionan y en regular el consumo. Problema mayor para las redes de metro: dada la gran proporción de energía de tracción, su curva de consumo de energía depende principalmente del horario. Las horas punta, la mañana y la tarde en general, sirven así de base para la potencia a suscribir.

La figura 20 representa la parte de cada uno de los componentes del precio en el costo total de la energía consumida por las redes. Cerca de 3/4 de los costos de energía corresponden al consumo. No hay cambio notable a este respecto en el curso de los últimos diez años.

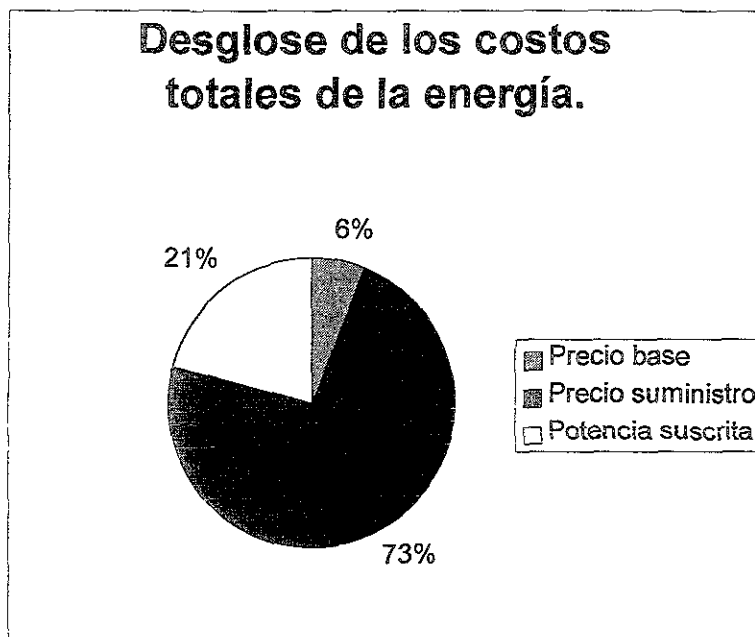


Figura 20. Desglose de lo costos totales de la energía

La encuesta muestra que el precio promedio de la corriente descendió entre 1984 y 1994.

1984	:	0.195 US \$/kwh	100%
1989	:	0.144 US \$/kwh	74%
1994	:	0.130 US \$/kwh	67%

No se tomaron en cuenta más que las 18 redes que proporcionaron indicaciones para los tres años de referencia.

No se incluyó una empresa, cuyos precios facturados se habían elevado más de cuatro veces entre 1989 y 1994, por razones de orden político – económico, mientras que el precio promedio de la corriente disminuyó en 33% entre 1984 y 1994, se notan variaciones que van de -67% a +52% según la red.

Esto se debe a diferentes factores de la política económica – subsidios o impuestos específicos, por ejemplo.

El precio de la energía es relativamente bajo en algunos países, lo que se explica, por ejemplo, por la gran proporción de la hidroelectricidad, por la existencia de importantes yacimientos nacionales de petróleo o gas natural o por una proporción elevada de electricidad de origen nuclear.

Para el caso del metro de la ciudad de México se presentan unas tablas que muestran claramente los costos del consumo de la energía eléctrica de las Líneas 1, 2, y 3, durante el periodo de 1996 – a mayo del 2000.

Concepto	Línea 1 \$	Línea 2 \$	Línea 3 \$	Total \$
Costos por consumo de energía (\$)	231'175,483.99	225'850,353.45	264'677,116.73	721'702,954.17
Costos promedio de energía eléctrica(\$)	0.497	0.497	0.497	1.491
Ahorro económico(\$)	46'598,484.92	46'920,915.77	19'814,830.38	113'334,231.07

COSTOS POR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN TRACCIÓN (L-1)

MES	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO
	1996	1997	1998	1999	2000
	N\$/KWH	N\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH
ENE	3,367,903.20	3,152,866.00	4,908,044.23	4,950,047.39	5,612,685.08
FEB	3,312,343.13	3,021,480.00	3,981,782.27	4,497,880.24	5,119,601.68
MAR	3,607,434.84	3,242,434.37	3,893,119.10	5,250,502.40	5,550,278.25
ABR	3,657,897.46	3,445,959.44	3,875,194.33	5,074,753.11	4,708,094.51
MAY	3,870,157.76	3,507,946.85	3,810,911.03	5,398,989.60	5,448,920.21
JUN	4,002,515.85	3,682,311.34	3,789,791.08	5,633,590.25	
JUL	4,206,804.66	3,932,930.60	3,935,154.50	5,490,754.41	
AGOS	4,252,518.53	4,017,845.86	4,230,042.54	5,123,239.26	
SEPT	4,154,622.61	3,959,436.34	4,655,239.10	4,943,357.28	
OCT	4,384,198.47	4,209,743.64	5,163,416.54	5,083,014.51	
NOV	4,058,591.07	4,042,927.46	4,988,700.75	4,909,443.97	
DIC	3,649,850.28	4,141,669.34	5,153,447.84	5,113,099.42	
TOTAL	46,524,837.88	44,357,551.22	52,384,843.33	61,468,671.84	26,439,579.73
COSTO TOTAL EN PESOS:					231,175,483.99

COSTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR KWH (L-1)

MES	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO
	1996	1997	1998	1999	2000
	N\$/KWH	N\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH
ENE	0.300	0.349	0.546	<0.572>	<0.646>
FEB	0.311	0.360	0.494	<0.572>	<0.646>
MAR	0.314	0.369	0.483	<0.572>	<0.646>
ABR	0.339	0.385	0.458	<0.572>	<0.646>
MAY	0.348	0.392	0.434	<0.572>	<0.646>
JUN	0.357	0.407	0.417	<0.572>	
JUL	0.367	0.431	0.438	<0.572>	
AGOS	0.377	0.446	0.476	<0.572>	
SEPT	0.386	0.451	0.530	<0.572>	
OCT	0.379	0.458	0.572	<0.572>	
NOV	0.381	0.466	0.595	<0.572>	
DIC	0.339	0.460	0.589	<0.572>	
PROM	0.349	0.415	0.503	0.572	0.646
PROMEDIO GENERAL EN PESOS:					0.497

AHORRO ECÓNOMICO EN PESOS (L-1)

MES	AHORRO	AHORRO	AHORRO	AHORRO
	96/97	96/98	96/99	96/00
	PESOS	PESOS	PESOS	PESOS
ENE	1,089,594.97	1,111,914.24	1,278,490.26	1,261,374.57
FEB	1,122,037.64	1,287,395.50	1,385,235.42	1,354,593.88
MAR	1,342,675.82	1,271,490.01	1,147,794.66	1,439,751.35
ABR	914,337.86	1,157,580.10	953,401.06	1,740,586.44
MAY	1,079,632.60	1,163,100.27	836,127.95	1,335,082.15
JUN	1,075,548.26	1,055,280.60	677,209.72	
JUL	1,161,764.34	1,231,721.06	926,140.61	
AGOS	1,128,819.70	1,189,443.26	1,154,619.47	
SEPT	986,064.40	983,961.10	1,054,155.89	
OCT	1,180,984.32	1,262,804.44	1,332,664.25	
NOV	982,400.02	1,127,245.20	1,028,554.42	
DIC	876,156.83	1,002,465.40	908,284.90	
TOTAL	12,940,016.75	13,844,401.19	12,682,678.60	7,131,388.39
AHORRO TOTAL EN PESOS:				46,598,484.92

COSTOS POR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN TRACCIÓN (L-2)

MES	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO
	1996	1997	1998	1999	2000
	NS/KWH	NS/KWH	\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH
ENE	3,316,874.40	3,086,207.00	4,928,022.92	4,970,197.23	5,710,130.31
FEB	3,272,435.30	3,008,520.00	3,997,990.91	4,516,189.96	5,315,138.77
MAR	3,563,971.59	3,310,068.74	4,330,901.61	5,271,875.75	5,575,760.37
ABR	3,613,826.45	3,505,622.51	3,890,968.77	5,095,410.89	4,793,628.14
MAY	3,823,529.24	3,522,226.62	3,826,423.93	5,419,799.53	5,250,819.78
JUN	3,954,293.01	3,697,300.74	3,361,320.24	4,866,606.32	
JUL	4,156,120.13	3,948,940.96	FALSO	4,869,974.25	
AGOS	4,201,283.48	4,034,201.12	4,247,261.84	5,088,101.88	
SEPT	4,104,566.90	3,975,553.73	4,659,707.53	4,944,752.38	
OCT	4,331,376.87	4,226,880.17	5,184,435.26	5,106,559.74	
NOV	4,009,692.39	4,059,385.18	5,009,008.10	4,889,528.64	
DIC	3,605,876.22	4,158,528.34	5,174,426.26	5,068,131.07	
TOTAL	45,953,845.96	44,533,435.11	48,610,467.36	60,107,127.65	26,645,477.37
COSTO TOTAL EN PESOS:					225,850,353.45

COSTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR KWH (L-2)

MES	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO
	1996	1997	1998	1999	2000
	NS/KWH	NS/KWH	\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH
ENE	0.300	0.349	0.546	<0.572>	<0.646>
FEB	0.311	0.360	0.494	<0.572>	<0.646>
MAR	0.314	0.369	0.483	<0.572>	<0.646>
ABR	0.339	0.385	0.458	<0.572>	<0.646>
MAY	0.348	0.392	0.434	<0.572>	<0.646>
JUN	0.357	0.407	0.417	<0.572>	
JUL	0.367	0.431	0.438	<0.572>	
AGOS	0.377	0.446	0.476	<0.572>	
SEPT	0.386	0.451	0.530	<0.572>	
OCT	0.379	0.458	0.572	<0.572>	
NOV	0.381	0.466	0.595	<0.572>	
DIC	0.339	0.460	0.589	<0.572>	
PROM	0.349	0.415	0.503	0.572	0.646

AHORRO ECÓNOMICO EN PESOS (L-2)

MES	AHORRO	AHORRO	AHORRO	AHORRO
	96/97	96/98	96/99	96/00
	PESOS	PESOS	PESOS	PESOS
ENE	772,423.55	1,108,688.49	1,353,976.62	1,432,205.90
FEB	779,508.00	1,200,025.29	1,502,565.64	1,482,267.03
MAR	878,165.39	1,151,258.51	1,220,454.66	1,756,486.92
ABR	598,575.67	991,428.02	1,002,254.97	2,092,896.59
MAY	784,737.35	942,000.47	864,851.99	1,846,881.05
JUN	810,814.82	1,257,559.83	1,469,123.66	
JUL	931,952.16	1,008,992.13	1,607,684.36	
AGOS	936,017.52	1,057,276.44	1,286,259.26	
SEPT	820,196.72	976,096.76	1,137,662.81	
OCT	1,007,343.06	1,352,629.56	1,430,505.08	
NOV	844,858.00	1,252,847.47	1,130,272.00	
DIC	734,401.04	1,090,650.71	1,016,120.25	
TOTAL	9,898,993.29	13,389,453.70	15,021,731.30	8,610,737.49
AHORRO TOTAL: \$ 40,364,929.18				46,920,915.77

COSTOS POR CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN TRACCIÓN (L-3)

MES	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO
	1996	1997	1998	1999	2000
	N\$/KWH	N\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH
ENE	3,520,989.60	4,019,084.00	5,596,938.44	5,651,729.51	7,178,516.08
FEB	3,392,158.48	3,480,120.00	4,540,666.21	5,129,204.08	6,668,456.45
MAR	3,694,361.03	3,796,636.94	4,924,771.36	5,994,775.07	7,281,468.46
ABR	3,746,039.50	4,036,408.53	4,419,117.42	5,787,046.98	6,370,445.67
MAY	3,963,414.46	4,000,323.15	4,345,811.26	6,148,373.09	6,986,971.92
JUN	4,098,962.26	1,283,216.46	4,240,833.71	6,130,972.28	
JUL	4,308,173.36	4,484,957.99	4,487,493.52	6,144,237.53	
AGOS	4,354,989.02	4,581,791.45	4,823,772.58	6,800,562.34	
SEPT	4,254,734.02	4,515,183.79	5,245,841.42	6,528,355.55	
OCT	4,489,841.69	4,800,624.10	5,888,154.84	6,667,398.45	
NOV	4,156,389.20	4,610,393.83	5,688,915.79	6,438,486.91	
DIC	3,737,798.41	4,722,994.80	5,876,786.96	6,641,426.79	
TOTAL	47,717,851.02	48,331,735.04	60,079,103.51	74,062,568.58	34,485,858.57
COSTO TOTAL EN PESOS:					264,677,116.73

COSTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR KWH (L-3)

MES	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO	COSTO
	1996	1997	1998	1999	2000
	N\$/KWH	N\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH	\$/KWH
ENE	0.300	0.349	0.546	<0.572>	<0.646>
FEB	0.311	0.360	0.494	<0.572>	<0.646>
MAR	0.314	0.369	0.483	<0.572>	<0.646>
ABR	0.339	0.385	0.458	<0.572>	<0.646>
MAY	0.348	0.392	0.434	<0.572>	<0.646>
JUN	0.357	0.407	0.417	<0.572>	
JUL	0.367	0.431	0.438	<0.572>	
AGOS	0.377	0.446	0.476	<0.572>	
SEPT	0.386	0.451	0.530	<0.572>	
OCT	0.379	0.458	0.572	<0.572>	
NOV	0.381	0.466	0.595	<0.572>	
DIC	0.339	0.460	0.589	<0.572>	
PROM	0.349	0.415	0.503	0.572	0.646
PROMEDIO TOTAL EN PESOS: 0.497					

AHORRO ECÓNOMICO (L-3)

MES	AHORRO	AHORRO	AHORRO	AHORRO
	96/97	96/98	96/99	96/00
	PESOS	PESOS	PESOS	PESOS
ENE	109,654.10	738,457.01	922,425.04	310,315.87
FEB	616,410.21	852,668.11	964,240.63	290,533.28
MAR	733,816.52	779,925.70	638,697.19	245,447.43
ABR	281,344.74	696,563.39	463,725.35	590,879.82
MAY	588,555.35	683,738.80	318,188.35	284,967.87
JUN	578,675.49	651,975.53	379,312.39	
JUL	662,479.63	742,256.08	495,617.35	
AGOS	635,474.14	704,606.34	-167,687.80	
SEPT	502,533.10	559,032.06	-194,119.25	
OCT	678,323.49	771,627.79	94,557.73	
NOV	504,757.67	669,933.64	-172,428.19	
DIC	377,011.28	521,048.34	-290,711.20	
TOTAL	6,269,035.74	8,371,832.80	3,451,817.58	1,722,144.26
AHORRO TOTAL EN PESOS:				19,814,830.38

CONCLUSIONES

La imagen que el Sistema de Transporte Colectivo ha tenido por muchos años ante sus miles de usuarios, es el contar con los sistemas y/o equipos más modernos y seguros que permitan garantizar el transporte a millones de personas por día. Por este hecho, la mística del organismo ha sido estar siempre a la vanguardia tecnológica y con ello ser el mejor sistema de transporte público de pasajeros de la ciudad.

Esta evolución constante ha generado en el STC inversiones importantes en la adquisición de nuevos sistemas y/o equipos para la operación y mantenimiento de las instalaciones fijas y el material rodante; por ejemplo, en el año de 1969, los primeros trenes que se utilizaron en la operación eran grandes consumidores y derrochadores de energía eléctrica; diez años más tarde se logra emigrar a una tecnología a base de semiconductores de potencia dando un gran impulso al control de los motores y para beneficiar en gran medida la operación y mantenimiento de los trenes.

Posteriormente se logró sustituir los equipos de propulsión (eléctrico regenerativo por eléctrico reostático y equipo reostático por chopper); paralelamente a esto se invirtió en la rehabilitación de los primeros trenes y así en 1989 y 1990 se integró la tecnología de los semiconductores a casi todo el parque vehicular y se sentó el precedente para la adquisición de nuevos trenes. Con estas medidas se logró abatir un poco el consumo de energía eléctrica de los trenes.

Cuatro años más tarde, la Gerencia de Ingeniería y Desarrollo del STC se da a la tarea de analizar e investigar nuevos sistemas y/o equipos que hagan más eficiente la operación de los trenes y para reducir aún más el consumo de energía eléctrica. Como consecuencia de lo anterior aparece la técnica de eficiencia energética de operación y conducción de trenes eléctricos conocida como Marcha Optimizada, que se logró aplicar a partir de 1996 en las líneas 1,2 y 3, donde se han obtenido ahorros promedio del 10 al 15% mensual al reducir el gasto por pago del insumo eléctrico un promedio de \$20,000 por mes, lo cual prevalece hasta nuestros días.

Contribuciones como estas sin duda representan avances importantes para el transporte y la sociedad en general, pero lo más significativo quizás, sea el hecho de reconocer que no debemos mantener una actitud pasiva ante los problemas y tener que esperar a que nos digan qué debemos hacer, sino todo lo contrario, debemos explotar nuestra creatividad e ingenio y ser profesionales, proponiendo soluciones prácticas y sencillas, cuya inversión no represente problemas a los directivos y se alcance, el beneficio propuesto.

Por otra parte, también debemos exigir una política agresiva que favorezca a los transportes públicos urbanos asignando más recursos a las tareas energéticas y los programas de reducción del consumo de energía y con ello preservar el ambiente.

Esto quiere decir que las decisiones políticas no deben orientarse únicamente a la duración de los mandatos parlamentarios, sino inscribirse en el marco de estrategias que continúen más allá de las posiciones electorales.

Las empresas de transporte y sus agrupamientos deben involucrarse activamente en este proceso de formación mostrando voluntad popular y económica en un marco de gestión de mercado político pro – ahorro de energía y de financiamiento, haciendo más publicidad para los servicios ofrecidos e insistiendo en el aspecto ecológico, de manera que los políticos y la población estén más conscientes de la contribución que pueden aportar los transportes públicos urbanos a la protección del ambiente.

Evidentemente, estas iniciativas obligan a las empresas junto con el gobierno a proceder a los análisis correspondientes sobre el consumo de energía y por ende sobre los ahorros obtenidos, resaltando igualmente que se pueden llegar a tener economías sensibles gracias a modos de funcionamiento adecuados.

Convendría por otra parte, recurrir sistemáticamente a la construcción de metro ligero, ya que este ayuda a minimizar las cargas financieras, dar más apoyo a la industria nacional de transporte y reiterar que las relaciones de la política, la legislación y la opinión pública, se integren y reclamen enérgicamente una mejora en la situación de los transportes públicos urbanos.



ANEXOS

CONCEPTOS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE TRACCIÓN

ANEXO A

- A.1 ARRANQUE REOSTÁTICO PARA MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA
- A.2 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS DE ARRANQUE PARA UN MOTOR SHUNT DE C.D.
- A.3 ANÁLISIS DEL CONSUMO DE ENERGÍA PARA LOS MOTORES DE C.D. DE ARRANQUE REOSTÁTICO
- A.4 FRENADO

ANEXO B

- B.1 EL CHOPPER
- B.2 PRINCIPIO BÁSICO DEL CHOPPER
- B.3 CIRCUITO DE TRACCIÓN
- B.4 FRENADO REGENERATIVO

ANEXO C

- C.1 DINÁMICA DE LOS TRENES
- C.1.1 CÁLCULO DE LA MARCHA DE LOS TRENES

ANEXO A

A.1 ARRANQUE REOSTÁTICO PARA MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

A.2 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS DE ARRANQUE PARA UN MOTOR SHUNT DE C.D.

A.3 ANÁLISIS DEL CONSUMO DE ENERGÍA PARA LOS MOTORES DE C.D. DE ARRANQUE REOSTÁTICO.

A.4 FRENADO EN MOTORES REOSTÁTICOS DE C.D.

A.1 ARRANQUE REOSTÁTICO PARA MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

Un motor se arranca conectándolo a la fuente de alimentación. Sin embargo existen tres aspectos que deben ser considerados:

- Interferencia con la fuente de alimentación, de manera que se presente una caída de voltaje que sea mayor a la tolerada por otros equipos u otros consumidores.
- Daños al motor mismo por sobrecorrientes.
- Daños a la carga conectada a través de una sobreaceleración.

Por lo anterior, para la mayoría de los motores de corriente directa es necesario limitar la corriente de arranque insertando una resistencia en serie con el devanado de la armadura.

A velocidad angular cero (ω), la f.c.e.m. (E) es cero y la ecuación :

$$V_A = R_A I_A + E \quad (\text{A.1})$$

nos lleva directamente a :

$$I_A = \frac{V_A}{R_A} \quad (\text{A.2})$$

donde:

V_A	es el voltaje constante que se aplica en la armadura.
I_A	es la corriente que circula por la armadura.
R_A	es la resistencia de armadura.

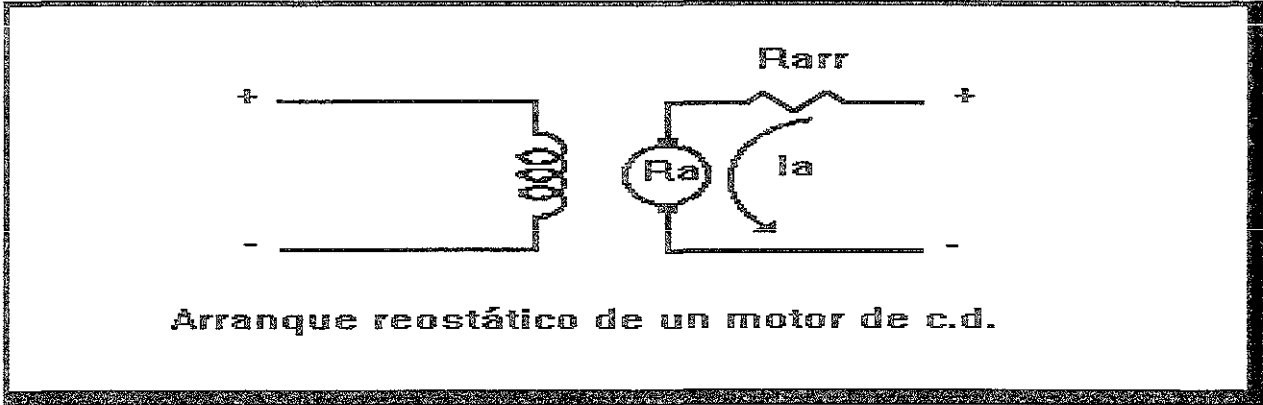
El circuito resistivo requerido en el primer paso es determinado directamente por el valor máximo permisible de corriente de arranque. Conforme el motor acelera, E crece suavemente desde cero y la corriente de armadura viene a ser :

$$I_A = \frac{V_A - E}{R} \quad (\text{A.3})$$

donde R es la resistencia equivalente de la armadura y la resistencia de arranque en serie.

Para obtener una aceleración lo suficientemente alta en la carga, es necesario reducir R a medida que E se incrementa con el fin de mantener un valor relativamente alto de I_A , manteniendo así un par adecuado para impulsar y acelerar la carga.

Dado que no es posible reducir físicamente R de forma continua, ésta es disminuida en secciones de resistencias finitas. Esto provoca un crecimiento en la magnitud de I_A hasta un valor límite superior cada vez que se elimina una sección de resistencia y cae lentamente a un valor límite inferior conforme la velocidad del motor aumenta.



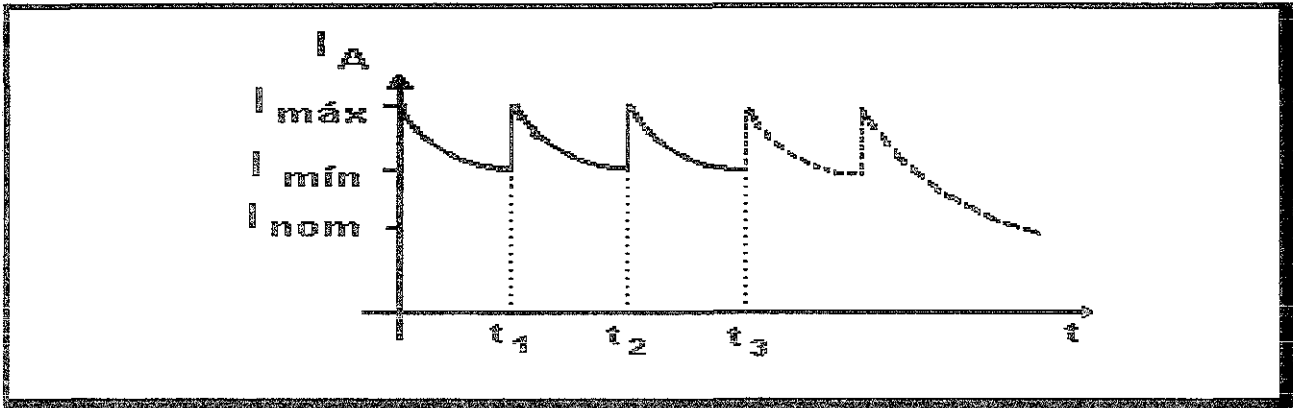
A.2 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS DE ARRANQUE PARA UN MOTOR SHUNT DE C.D.

Sean I_{max} e I_{min} las corrientes máximas y mínimas durante el arranque y ρ la razón entre I_{min} e I_{max} .

Inmediatamente antes de cambiar de R_x a $R_{(x+1)}$ la corriente es I_{min} ; por lo tanto:

$$I_{min} = \frac{V - E_x}{R_x} \tag{A.4}$$

donde E_x es la fuerza contraelectromotriz final en el paso de la resistencia R_x , que es la resistencia total del circuito de armadura. Inmediatamente después de cambiar a $R_{(x+1)}$, tanto la velocidad como E son invariables, pero ahora la corriente es I_{max} y la resistencia total del circuito de armadura es $R_{(x+1)}$, de donde:



$$I_{max} = \frac{V - E_x}{R_{x+1}} \tag{A.5}$$

$$\rho = \frac{R_{x+1}}{R_x} = \frac{I_{min}}{I_{max}} \tag{A.6}$$

por lo que se puede calcular el siguiente valor de resistencia en función del valor anterior y de la razón ρ .

$$R_{x+1} = \rho R_x \quad (\text{A.7})$$

supóngase que se conoce el valor de R_1 , el cual es el valor de la resistencia cuando la velocidad y E son cero; se calculan las demás resistencias a partir de la ec. (A.7) :

$$\begin{aligned} R_2 &= \rho R_1 \\ R_3 &= \rho R_2 = \rho^2 R_1 \\ &\vdots \\ R_n &= \rho R_{n-1} = \rho^{n-1} R_1 \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Cuando se eliminan todas las resistencias, la resistencia en el circuito de armadura es únicamente R_a , por lo que el número de pasos necesarios se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} R_a &= \rho^{n-1} R_1 \\ \text{Log} \frac{R_a}{R_1} &= (n-1) \text{Log} \rho \quad (\text{A.9}) \\ n &= 1 + \frac{\text{Log} \frac{R_a}{R_1}}{\text{Log} \rho} \end{aligned}$$

Una vez determinado el número de pasos o secciones, es fácil determinar el valor de las resistencias que forman el grupo.

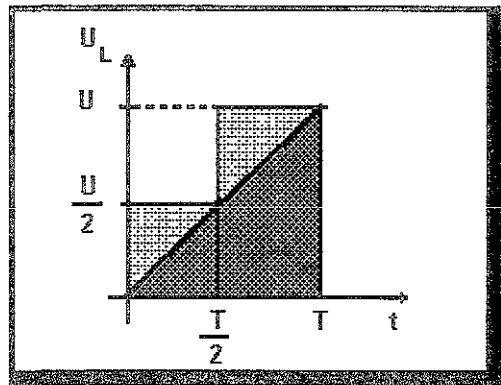
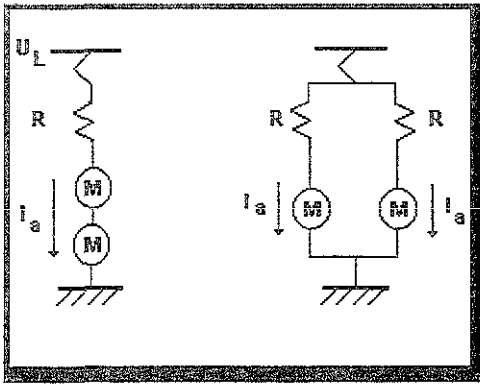
$$\begin{aligned} r_x &= R_x - R_{x+1} \\ r_x &= R_x - \rho R_x \\ r_x &= R_x (1 - \rho) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

El arranque y control de velocidad reostático de un tren entre la velocidad 0 km/h y hasta que el tren alcanza una velocidad de 30 km/h; a esta primera fase se le conoce como tracción a esfuerzo constante (aceleración constante); después, se efectúa un control de velocidad por reducción del campo de los motores, la cual constituye la fase de potencia constante, lo que se presenta a velocidades de 30 a 45 km/h y, por último, se establece un arreglo con los motores en serie paralelo y campo reducido al mínimo, lo que permite alcanzar velocidades mayores

A.3 ANÁLISIS DEL CONSUMO DE ENERGÍA PARA LOS MOTORES DE C.D. DE ARRANQUE REOSTÁTICO

Sea un sistema de arranque reostático para dos motores en serie; U_L es la tensión de alimentación que se supone constante y T es el tiempo que se emplea para llevar al tren desde 0 hasta 30 km/h.

En el intervalo de 0 a $T/2$, los motores se arrancan en serie, por lo que la tensión máxima para cada motor es $U/2$ y el cálculo de la energía aprovechada por el motor es el área bajo la curva; la diferencia del total en este intervalo es consumida en las resistencias, como se ilustra en la siguientes figuras.



La energía suministrada por la fuente es : $ESF = UI_a \frac{T}{2}$ (A.11)

La energía aprovechada por los motores es : $EAM = UI_a \frac{T}{4}$ (A.12)

La energía consumida en el reóstato es : $ECR = UI_a \frac{T}{4}$ (A.13)

Cuando se cambia la configuración de serie a paralelo, el consumo es :

La energía suministrada por la fuente es : $ESF = UI_a T$ (A.14)

La energía aprovechada por los motores es : $EAM = \frac{3}{4} UI_a T$ (A.15)

Sumando las ecuaciones (A.11) y (A.14), (A.12) y (A.15), (A.13) y (A.16) , tenemos que:

La energía consumida en el reóstato es : $ECR = UI_a \frac{T}{4}$ (A.16)

La energía suministrada por la fuente es : $ESF = \frac{3}{2} UI_a T$ (A.17)

La energía aprovechada por los motores es : $EAM = UI_a T$ (A.18)

La energía consumida en el reóstato es : $ECR = \frac{1}{2} UI_a T$ (A.19)

La ecuación (A.17) indica el 100 % de la energía que suministra la fuente; la ec. (A.18) muestra que del 100 % sólo se aprovecha el 66.66 % en la tracción, y la ec. (A.19) determina el 33 % de energía perdida en el reóstato de arranque.

A.4 FRENADO EN MOTORES REOSTÁTICOS DE C.D.

En general, los frenos utilizados en los controles de motores de c.d. son el freno mecánico y el freno dinámico.

El freno mecánico consiste en aplicar una fuerza a la flecha del motor mediante un juego de zapatas, y provocar el paro rápido por la acción de la fricción ejercida en las mismas.

El freno dinámico consiste en quitar la alimentación de las terminales del inducido del motor y colocarlas inmediatamente en una resistencia de protección R_p sin quitar el campo. En esta forma el motor se convierte en generador, pues la corriente invierte su sentido; por esta razón, el par producido cambia su dirección y provoca que el motor se detenga rápidamente.

El paro total se producirá más rápido conforme la resistencia R_p sea menor, pues la energía mecánica del motor se convertirá más rápido en calor por el efecto Joule. Esto provocaría un calentamiento excesivo en el motor durante este período, por lo que se debe hacer un cálculo adecuado de las resistencias de frenado dinámico, para evitar un daño al motor. Normalmente, el valor que se sugiere para realizar este frenado es el mismo que se puede permitir en el período de arranque, y puede ser entre 1.2 a 1.3 veces la corriente nominal.

ANEXO B

B.1 EL CHOPPER

B.2 PRINCIPIO BÁSICO DEL CHOPPER

B.3 CIRCUITO DE TRACCIÓN

B.4 FRENADO REGENERATIVO

B.1 EL CHOPPER

La mayoría de los motores de tracción son motores C.D. serie. Una de las características de este motor es que tiene un par grande de arranque y su potencia de carga disminuye durante la operación a altas velocidades.

Más aún, puesto que su armadura y devanado de campo están conectados en serie, el operador solamente tiene que controlar el voltaje en sus terminales y la corriente que alimenta la carga.

Suponiendo que la razón de engranes y el diámetro de ruedas sean fijos, entonces la eficiencia en tracción (o eficiencia de frenado) es :

$$F = K\phi I_M = KI_M^2 \quad (\text{B.1})$$

y la velocidad está definida por :

$$Vel = K_1 \frac{V_M - I_M R}{\phi} = K_1 \frac{V_M}{I_M} \quad (\text{B.2})$$

donde ϕ es el flujo magnético, I_M la corriente de armadura, V_M el voltaje en terminales y R la resistencia interna.

Para realizar el control constante de aceleración (desaceleración), solamente se necesita controlar a I_M de la ecuación (B.1); en la ecuación (B.2) se ve que controlando el voltaje en sus terminales se controla la velocidad.

Por esta razón, los sistemas de control convencionales han dependido del siguiente método: durante la tracción, el voltaje aplicado al motor de tracción es ajustado cambiando la conexión de la resistencia y, durante el frenado, el motor principal se cambia a generador y la potencia generada es disipada por la resistencia, para obtener la fuerza de frenado.

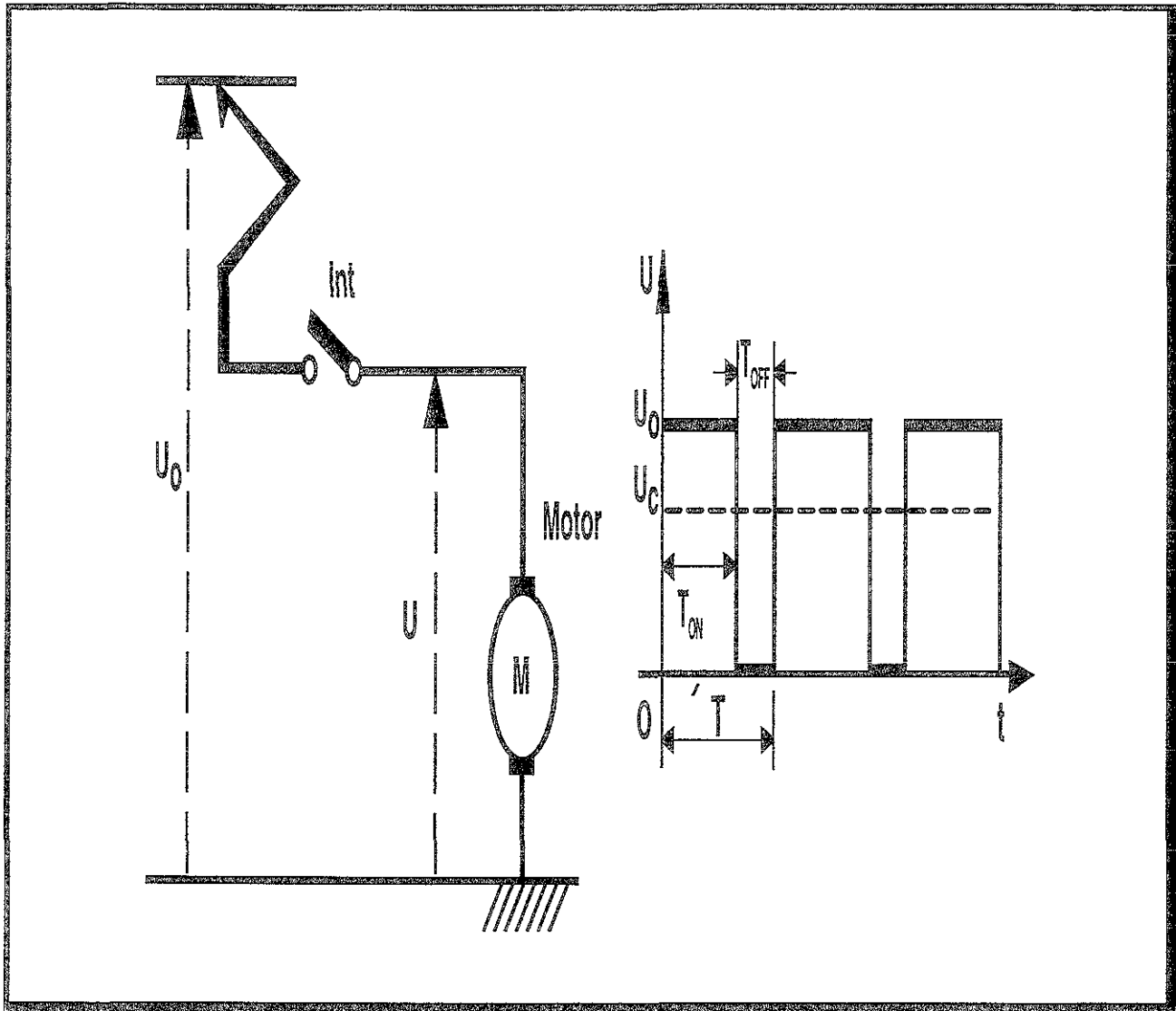
En el sistema de control por chopper, un interruptor especial se emplea en lugar de la resistencia; así, la acción de este interruptor puede alimentar la potencia necesaria al motor de tracción mientras que, en el frenado, la potencia generada es regresada a la línea principal para ser consumida por otros trenes en tracción; además, se obtiene como resultado una fuerza de frenado. El principio básico es el siguiente:

B.2 PRINCIPIO BÁSICO DEL CHOPPER

Como se muestra en la figura B.1, si un circuito que tiene una resistencia de carga (motor) es abierto o cerrado por un interruptor ideal, el voltaje de salida será un pulso de onda cuadrada variando entre cero y el valor de la fuente U_0 , y el valor promedio será U_C .

Esto significa que U_c varía con el promedio del tiempo durante el cual el interruptor está cerrado; con una regulación apropiada del promedio de este tiempo y con el control del voltaje, es posible la aplicación de este principio al control de un carro eléctrico de la siguiente manera:

Fig. B.1



$$U_c = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} U_0 = \frac{T_{ON}}{T} U_0 = \alpha U_0 \quad (B.3)$$

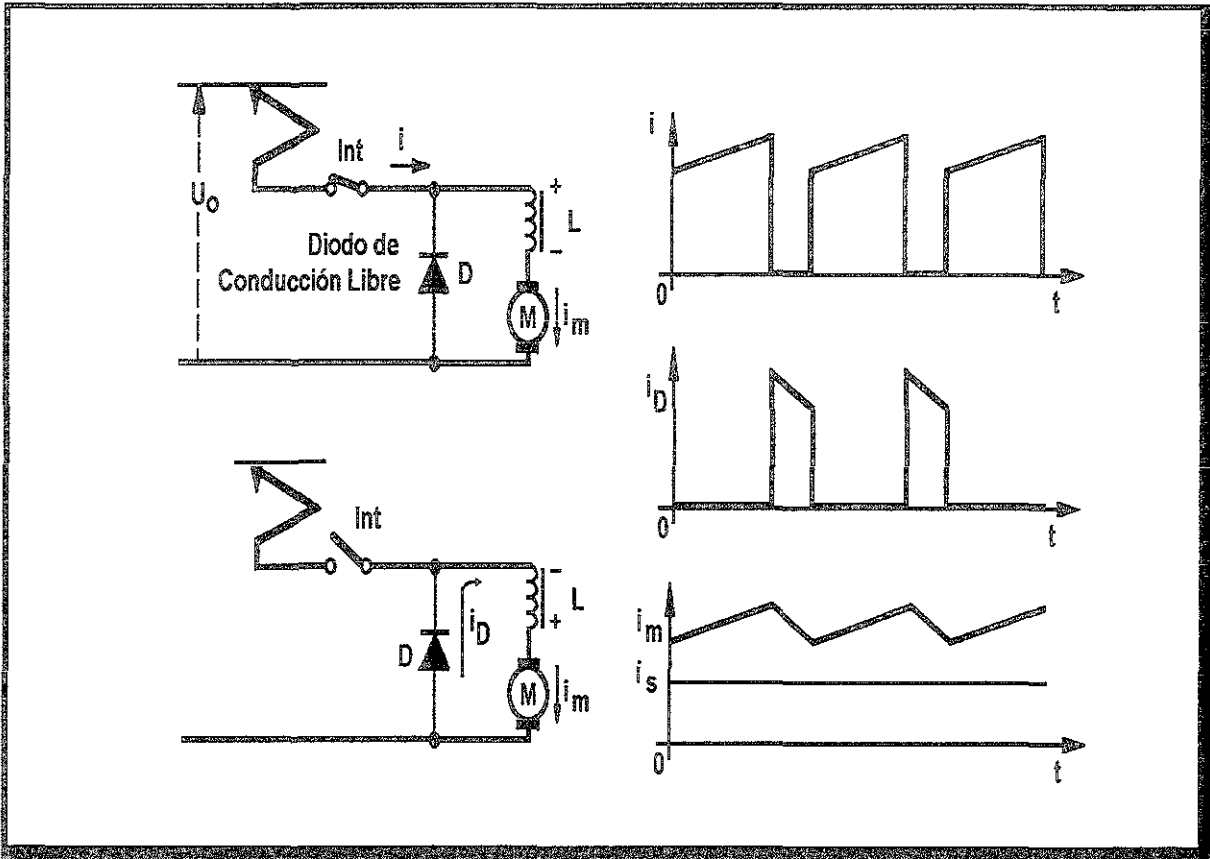
U_0	fuelle de voltaje
Int	interruptor (chopper)
R	carga (motores)
U_c	voltaje promedio aplicado a la carga
T_{ON}	intervalo ON del interruptor Int
T_{OFF}	intervalo OFF del interruptor Int
T	intervalo de conmutacion ($T_{ON} + T_{OFF}$)

B.3 CIRCUITO DE TRACCIÓN

Si el motor de tracción es controlado por el circuito mostrado anteriormente, la corriente se interrumpe, así que la variación del par llega a ser muy grande: al mismo tiempo, puesto que la carga es inductiva, un voltaje anormal se genera por el ciclo ON/OFF del interruptor.

Así, el reactor L se conecta en serie con el motor de tracción y el diodo de conducción libre D se conecta inversamente en paralelo, como se muestra en la figura B.2; haciendo esto, que la variación de corriente sea a través del diodo, absorbiendo el voltaje anormal debido a la operación del interruptor.

Fig. B.2



Cuando se cierra el interruptor Int , la corriente del motor de tracción i_m entra desde la fuente de potencia y aumenta mientras se almacena energía en el reactor L . Cuando el interruptor Int es abierto, la corriente de la fuente de alimentación llega a cero y la corriente i_m , debida a la energía almacenada en el reactor, fluye a través del diodo D y la atenúa; dado que la corriente del motor decae repitiendo la operación ON/OFF, el valor promedio i_m de la corriente del motor de tracción se mantiene en un cierto valor. Se demuestra con esta explicación que la corriente promedio i_s es menor que i_m .

Suponiendo que no hay pérdidas en el circuito, el valor promedio de la potencia de entrada es igual a la potencia de salida durante la operación normal, por razón de la Ley de la Conservación de la Energía.

$$P_S = V_S I_S = V_M I_M = P_M \quad (\text{B.4})$$

por lo tanto :

$$I_S = \frac{V_M I_M}{V_S} = \alpha I_M \quad (\text{B.5})$$

Por lo tanto, la entrada P_S es :

$$P_S = \alpha V_S I_M \quad (\text{B.6})$$

El producto $V_S I_M$ es una constante, la entrada P_S es proporcional a α ; por otro lado, puesto que es proporcional a V_M/V_S , α varía con V_M y con la velocidad. Consecuentemente, la entrada P_S varía con la velocidad. Esto es, solamente la potencia para avanzar es suministrada por la fuente de alimentación. Esta es la diferencia más importante entre un sistema de alimentación por chopper y un sistema convencional, el cual controla el suministro de potencia mediante el cambio de resistencia.

B.4 FRENADO REGENERATIVO

En la actualidad, el freno eléctrico se realiza de dos maneras fundamentales: frenado eléctrico reostático o frenado eléctrico por recuperación. La energía cinética del vehículo es transformada en energía eléctrica por los motores (funcionando ahora como generadores) y disipada en reóstatos en el primer caso; en el segundo, la energía se redirige a la fuente de alimentación.

Hasta hace pocos años, el frenado reostático había sido el más común. Ello se debe principalmente a que, en los equipos convencionales, el funcionamiento como generador de un motor a excitación serie sobre la red de alimentación, es inestable.

Otra dificultad consiste en el hecho de que este tipo de frenado únicamente se mantiene hasta un cuarto o un tercio de la velocidad máxima. A esta velocidad, la f.e.m. se vuelve inferior a la tensión de la fuente de alimentación.

La técnica de recortadores a tiristores ofrece grandes posibilidades al frenado por recuperación, ya que posee una dinámica elevada que hace posible una marcha estable en frenado casi hasta el paro total del vehículo. Persiste, sin embargo, una restricción para esta técnica : la mayoría de las subestaciones que alimentan las catenarias en c.d., son equipadas con rectificadores a diodos que no permiten el reenvío de la energía a la red alterna. Así pues, la energía regenerada en frenado debe ser inmediatamente utilizada por otros consumidores (trenes que en ese momento estén traccionando).

Cuando la recuperación de energía no es posible, se pueden considerar dos soluciones :

- a) Disminuir o sustituir el frenado eléctrico por frenado mecánico.
- b) Sustituir automáticamente el frenado por recuperación por un frenado reostático.

Refiriéndose a la figura B.3, si el interruptor (Int) se cierra, una corriente inicial debida al voltaje generado por el flujo residual o a alguna excitación anterior, fluye a través del interruptor hacia el

reactor L, donde es almacenada como energía. Si el interruptor se abre, la corriente tiende a mantener el flujo en la misma dirección como resultado de la acción del reactor, hacia la fuente de alimentación a través de D. Esto es una regeneración de potencia que está representada por la parte sombreada de la misma figura B.3.

Cuando tomamos el valor promedio de la corriente del motor como I_M , el valor promedio de la corriente de línea I_s que regresa a la fuente de potencia es :

$$I_s = \frac{T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}} I_M = (1 - \alpha) I_M \quad (B.7)$$

El voltaje promedio del reactor durante, operación normal llega a cero si la resistencia interna del reactor se desprecia. Así, el voltaje promedio V_M del motor es igual al voltaje promedio V_s de la línea principal:

$$V_M = \frac{T_2}{T_1 + T_2} V_s = (1 - \alpha) V_s \quad (B.8)$$

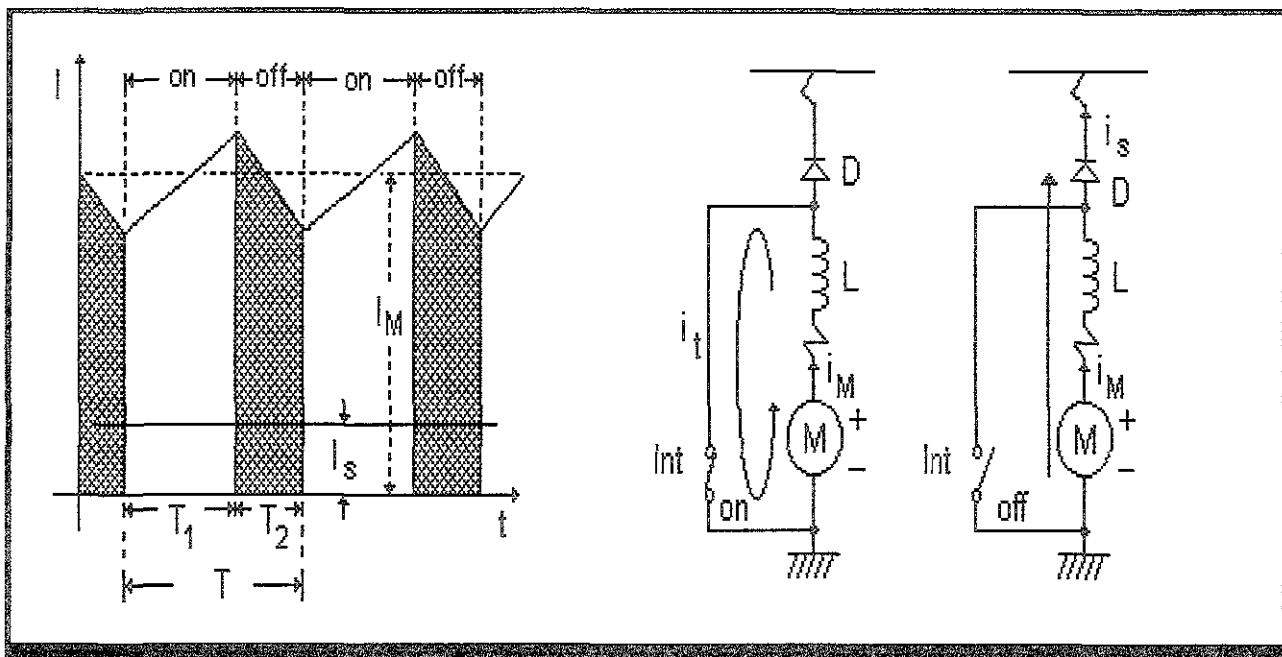


Fig. B.3

Como contraparte del tiempo de alimentación de potencia (tracción), el motor funciona durante el frenado regenerativo como un transformador de pasos, en el cual la razón de transformación varía con la razón de tiempo durante el cual el interruptor está abierto, así que la regeneración de potencia se da en casi la totalidad del rango de velocidades, bastando que el:

$$f.e.m. + L \frac{di}{dt} > V_L$$

ANEXO C

C.1 DINÁMICA DE LOS TRENES

C.1.1 CÁLCULO DE LA MARCHA DE LOS TRENES

C.1 DINÁMICA DE LOS TRENES

C.1.1 CÁLCULO DE LA MARCHA DE LOS TRENES

Conocer la marcha de los trenes es necesario por varios propósitos, tales como :

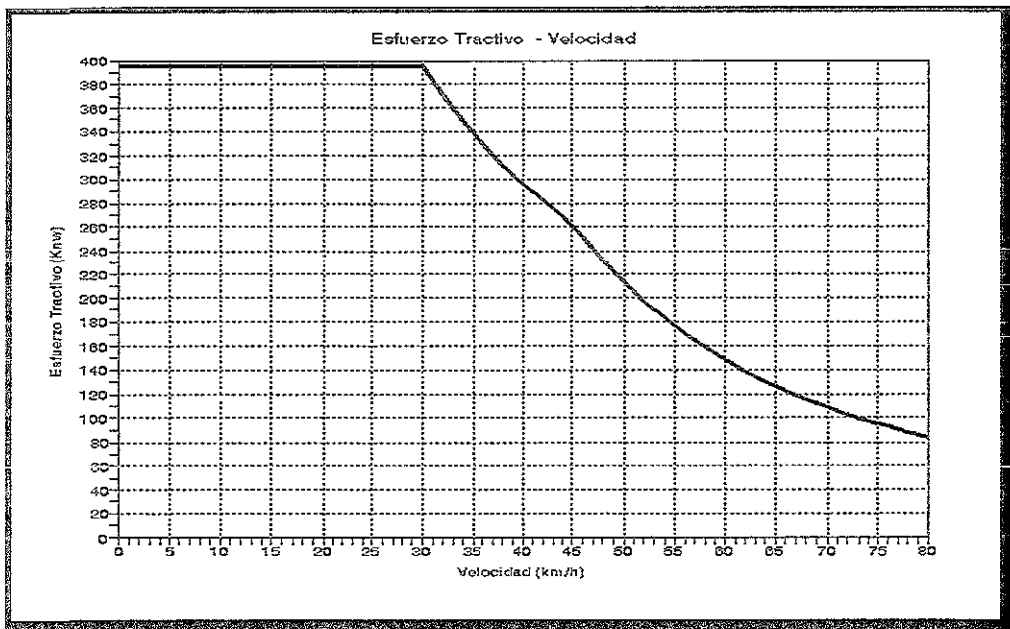
- La determinación de los intervalos entre trenes.
- El conocimiento de los tiempos de recorrido en interestaciones a lo largo de la línea.
- La determinación del número total de trenes en operación simultánea en una línea.
- La implantación de las señalizaciones.
- La utilización de un automatismo para la conducción de los trenes.
- El consumo de energía requerido en los trenes y la determinación de la capacidad de las subestaciones a lo largo de la línea.
- La orientación, en general, para la conducción manual de los trenes y el respeto a los señalamientos de limitación de velocidad.

Para el cálculo de la marcha de los trenes se requieren, como base de datos, la característica del esfuerzo tractivo-velocidad, la resistencia al avance del tren, la topografía del terreno donde circula y la relación potencia-velocidad de los trenes.

A partir del conocimiento de los datos anteriores y de la utilización de los conceptos básicos de la física, en particular la Segunda Ley de Newton, es posible determinar la característica velocidad/espacio, tiempo/espacio y el consumo de energía.

El comportamiento del esfuerzo tractivo-velocidad (F_t) se deriva directamente de las características de los motores de tracción y del tipo de control que sobre ellos se realiza, el cual generalmente comprende diferentes etapas :

- Esfuerzo tractivo constante.
- Potencia constante.
- Característica natural del motor de tracción en cuestión o de acuerdo al tipo de control que se realiza.



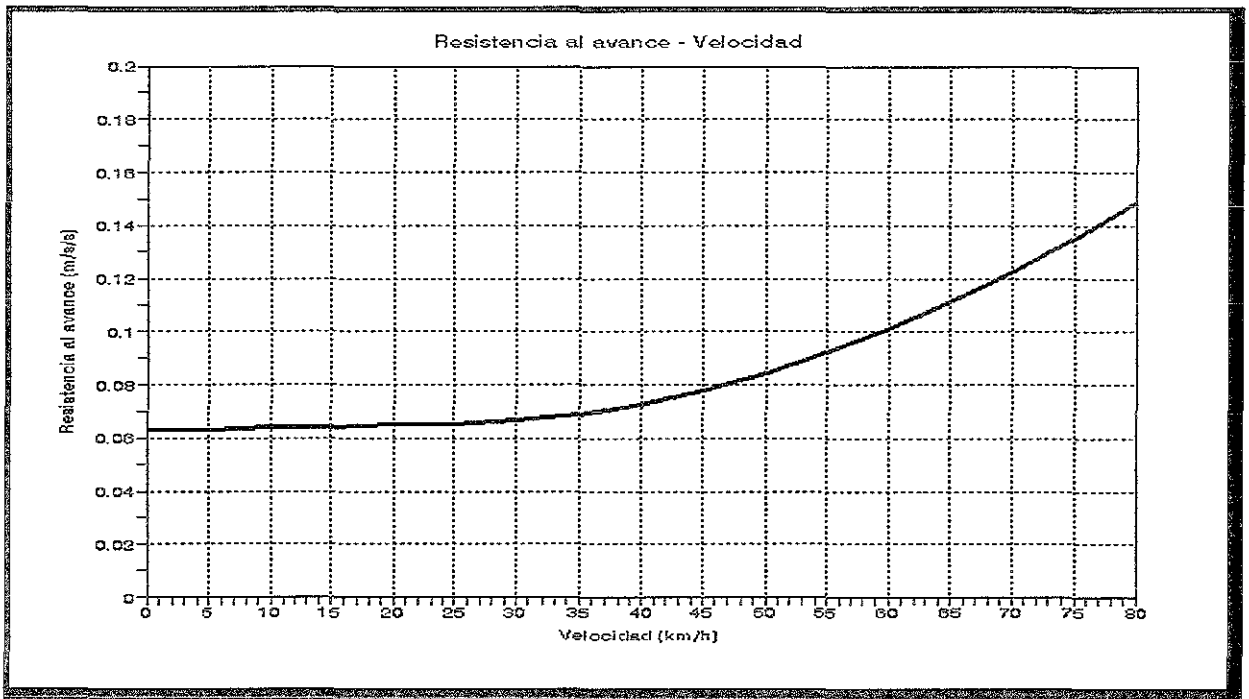
La característica de resistencia al avance define las fuerzas que se oponen al movimiento del tren cuando marcha en terreno plano y recto, obedeciendo una ley que está función de la velocidad, y tiene la siguiente expresión :

$$Fra(v) = A + Bv + Cv^2 \quad (m/s^2) \quad (C.1)$$

A=0.078116 B=-0.00115 C=2.55x10⁻⁵

Su magnitud se determina en forma experimental; por lo general, se expresa en unidades de fuerza sobre unidades de peso o en (m/s²). En la ec. (C.1) el término independiente de la velocidad "A" depende del peso estático del vehículo y del coeficiente de fricción de las ruedas con el riel; el coeficiente "B" indica la resistencia viscosa que presentan los trenes en su movimiento, y "C" depende de la sección transversal del vehículo, de su geometría, y de las asperezas y discontinuidades que presentan los costados. En general, representa la fuerza ejercida por el aire.

Además de la resistencia al avance, cuando un tren circula, ya sea ascendiendo o descendiendo, existe una componente de su peso en la dirección del plano inclinado que favorece o se contrapone al movimiento del vehículo. La magnitud de esta fuerza depende del peso del mismo y del valor de la pendiente del terreno sobre la que circula. Esta fuerza se determina mediante la siguiente ecuación:



$$Frp = M_s g i \quad (C.2)$$

M_s	Masa estática del vehículo
g	Fuerza de gravedad
i	Pendiente del terreno expresada en % o ‰.

Cuando un tren circula por una curva, se presenta también una fuerza que se opone al movimiento, debido a la fricción de la pestaña de la rueda de seguridad sobre el riel de apoyo; experimentalmente, el valor de esta fuerza en las curvas se calcula mediante la siguiente expresión

$$F_{rc} = \frac{500}{R} \quad (C.3)$$

donde:

R es el radio de curvatura.

La determinación de la dinámica del tren parte de la aplicación de la Segunda Ley de Newton, la cual establece : *La suma geométrica de las fuerzas que actúan sobre el vehículo es igual a la masa del mismo, multiplicada por la aceleración en la dirección de la fuerza resultante.*

Matemáticamente, esto se expresa como :

$$\sum F = M_D a \quad (C.4)$$

Donde :

M_D Masa dinámica del tren
 a Aceleración.

La masa considerada en esta expresión será la masa dinámica del vehículo, la cual se calcula de la masa estática del mismo (peso), afectada por un coeficiente que depende de la magnitud de las masas rotativas del vehículo. Estas se deben tomar en cuenta, ya que no sólo es necesario considerar el movimiento de traslación del coche y por ello su energía cinética de traslación (que es $mv^2/2$), sino también la energía cinética que se debe suministrar a las piezas de rotación (motor, puente diferencial, mazas, ejes, etc), misma que está determinada por el momento de inercia (J) y el cuadrado de la velocidad angular (ω^2). Para facilitar el cálculo de la dinámica del vehículo, la energía que se tiene que aportar a las partes en rotación es reemplazada por una masa adicional a la del vehículo, de tal manera que la masa dinámica resultante, normalmente de $1.12M_S$, es superior a la masa estática.

La marcha de los trenes se puede realizar por el método gráfico o analítico; el primero requiere de muchos recursos materiales y humanos, siendo muy tediosa cualquier modificación de la marcha sobre el desarrollo de una proyección para una línea de metro. En la actualidad, con el avance de la tecnología en los computadores personales, se pueden desarrollar programas en lenguajes de alto nivel para calcular la marcha de un tren en una interestación cualquiera, lo que permite simular diferentes tipos de marcha para una misma interestación.

Por esta razón, actualmente se ha desarrollado un programa para computadoras personales que puede calcular y simular el tipo de marcha deseado con una excelente rapidez y exactitud. Este programa está basado en métodos matemáticos ya establecidos y en bases de datos formadas por las características del tren y de la interestación (longitud, pendientes, curvas, límites de velocidad, velocidad comercial, etc).

Partiendo de la ec. (C.4), sabemos que la aceleración es :

$$a = \frac{\sum F}{M_D} \quad (\text{C.5})$$

pero :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 e}{dt^2} = \frac{\sum F}{M_D} = \frac{Ft \pm Frp - Frc - Fra}{M_D} \quad (\text{C.6a})$$

$$v = \frac{de}{dt} \quad (\text{C.7})$$

Resolviendo cada una de las expresiones en (C.6.a) y (C.7) por el método de Runge-Kutta tenemos:

$$v_{i+1} = v_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

donde:

$$k_1 = \Delta t f(v_i)$$

$$k_2 = \Delta t f\left(v_i + \frac{k_1}{2}\right) \quad (\text{C.8})$$

$$k_3 = \Delta t f\left(v_i + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_4 = \Delta t f\left(v_i + \frac{k_3}{2}\right)$$

y por lo tanto el espacio puede ser calculado como :

$$e_{i+1} = e_i + \Delta t v_i + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + k_2 + k_3) \quad (\text{C.9})$$

y el tiempo de recorrido puede ser calculado de la siguiente manera :

$$T_{i+1} = T_i + \Delta t \quad (\text{C.10})$$

Las expresiones (C.6.a), (C.8), (C.9) y (C.10) son empleadas en general para todo el desarrollo de la marcha; sin embargo, la expresión (C.6.a) cambia ligeramente en las fases de neutro y frenado, como se indica a continuación.

En la fase de neutro no existe esfuerzo tractivo alguno, por lo que la expresión (C.6.a) se reduce a:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 e}{dt^2} = \frac{\sum F}{M_D} = \frac{\pm Frp - Frc - Fra}{M_D} \quad (\text{C.6b})$$

En la fase de frenado, dependiendo del grado de frenado solicitado ya sea por el automatismo u operador, se tiene :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2e}{dt^2} = \frac{\sum F}{M_D} = \frac{F_f \pm F_{rp} - F_{rc} - F_{ra}}{M_D} \quad (\text{C.6c})$$

Para el cálculo del consumo de energía, es necesario conocer el comportamiento de la corriente de línea, la cual depende de las características del motor y es un dato proporcionado por el fabricante; también se asume una tensión de alimentación promedio constante, normalmente 680 volts, aunque la nominal sea de 750 volts para el caso del metro de México. De esta manera, para cada intervalo de tiempo Δt en la fase de tracción, se determina la potencia instantánea:

$$P_i = V_L I_{L_i} \quad (\text{C.11})$$

y la energía consumida instantánea es :

$$Ec_i = P_i \Delta t \quad (\text{C.12})$$

de esta manera, la energía total consumida es :

$$Ec_T = \sum Ec_i \quad (\text{C.13})$$

BIBLIOGRAFÍA

- Apuntes de la materia Eficiencia Energética en el Transporte.
- Balance Nacional de Energía 1997, Secretaría de Energía.
- Documento Técnico No. 10 del STC 1997, Distribución de la Energía.
- Documento Técnico No. 3 del STC 1998, Pilotaje Automático.
- Documento Técnico No. 13 del STC 1996, Material Rodante.
- Energy Use and Emissions from Passenger Transport in London, Final Report, 1994
- Janes's Urban Transport Systems, Chris Bushell, 17th Edition 98.
- Metro's in the Europa, Riechers, D., Alkmaar(NL), 1995
- Operación de los Transportes, Angel Alceda Hernández, 1997
- Poverty, Population and the Environment, Mink, S., Document de la Banque mondiale No. 189, 1993
- Revista Técnica de la UITP, volúmenes I, II Y III del 52° Congreso Internacional de Transporte celebrado en Stuttgart Alemania. 1997.
- Urban Public Transportation, Vukan R. Vuchivic, 1996.
- Urban Transportation and Environment, editado por Oscar Díaz; González Palomas y Christian Jamet, International Scientific Committee, CODATU
- The Energy Challenge in the Developing World, Goldemberg, The SAAB-Scania Griffin, 1992
- Transporte Público, Angel Molinero y Luis Sánchez, 1997.
- Transportation for Livable cities, Vukan R. Vuchivic, 1999.