

7-32

---

Facultad de Ingeniería

**U.N.A.M.**

**METODO PARA LA INSTALACION DE TROLEBUSES  
MODELO: LA CIUDAD DE TOLUCA EDO. DE MEXICO**

**TESIS PROFESIONAL**

PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

QUE PRESENTAN  
ORLANDO CEJUDO AYALA  
ROBERTO ESPINOSA LORA  
JOSE DE JESUS NERIA CANO  
FERNANDO ROJAS MENDOZA

---

MEXICO, D. F.

1979





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## CONTENIDO

	Página
Prólogo	i
Fuentes de información	iii
CAPITULO PRIMERO	
LINEAMIENTOS GENERALES.	
1.1 Características del área de estudio	1
1.2 Uso actual del suelo	3
1.3 Situación actual del transporte	5
1.4 Tránsito	8
1.5 Proposición de rutas para trolebuses	10
1.6 Demanda de transporte público	16
1.7 Determinación de la cantidad de trolebuses	17
Lista de Figuras	27
Lista de Tablas	28
Lista de Referencias	29
CAPITULO SEGUNDO	
TROLEBUSES	
2.1 Tracción eléctrica	30
2.2 Descripción del trolebus	40
2.3 Funcionamiento	44

2.3.1	Alimentación	44
2.3.2	Control electrónico	46
2.3.3	Chopper	49
2.3.4	Frenado eléctrico con chopper	58
2.3.5	Frenado neumático	64
2.4	Especificaciones de un trolebus de fabricación nacional	67
2.5	Trolebuses para Servicios Sociales	76
2.6	Talleres	78
	Lista de figuras	82
	Lista de referencias	84

### CAPITULO TERCERO

#### SUBESTACION TIPO

3.1	Alimentación de CA	86
3.2	Salida de CD	88
3.3	Circuito de CA	88
3.4	Circuito de CD	88
3.5	Panel de alarmas	90
3.6	Tablero	90
3.7	Distribución del equipo en el terreno	90
3.8	Especificaciones del equipo	90
	Lista de figuras	100
	Lista de referencias	101

## CAPITULO CUARTO

### LINEA ELEVADA

4.1	Alimentación a líneas de trolebuses	102
4.2	Selección de conductores	105
4.3	Conexiones de alimentadores	109
4.4	Resistencias equivalentes unitarias	110
4.5	Alcance de las subestaciones de CD	113
4.6	Subestaciones por ruta	119
4.7	Accesorios y herrajes	127
	Lista de figuras	142
	Lista de referencias	144

## CAPITULO QUINTO

### ESTIMACION ECONOMICA

5.1	Estimación económica	145
5.2	Detalle de los costos unitarios	146
5.3	Resumen de inversiones	149
5.4	Consideraciones para la estimación de los costos	149
5.5	Costo de depreciación anual ( CDA )	150
5.6	Amortización del capital prestado ( AmC )	150
5.7	Gastos anuales	151
5.8	Tarifa 1a. alternativa	152
5.9	Tarifa 2a. alternativa	152
5.10	Tarifa 3a.. alternativa	152

<b>5.11</b>	<b>Costo por kilómetro de servicio instalado</b>	<b>153</b>
<b>5.12</b>	<b>Costo por trolebus</b>	<b>153</b>
	<b>Lista de referencias</b>	<b>154</b>
	<b>Conclusiones</b>	<b>155</b>

## PROLOGO

El acelerado crecimiento de la población en las principales ciudades del país trae consigo la necesidad de satisfacer un mayor número de servicios urbanos : abastecimiento de agua, energía eléctrica, transportes, habitación, escuelas, asistencia médica, etc. : de ellos, el problema de proporcionar un sistema de transporte suficiente, se vuelve grave por el gran aumento en la demanda del mismo, debido al desplazamiento de los habitantes de las áreas urbanas a las zonas en que realizan sus actividades : productivas, culturales, sociales y comerciales, mismas que nos conducen a investigar sobre nuevos sistemas de transporte masivo más eficientes, cómodos, económicos, que ahorren energía y no contaminen el ambiente.

Como una alternativa de solución al problema de transporte anteriormente planteado, en este estudio, se ha propuesto como objetivo, obtener los procedimientos generales que sirvan como guía, en estudios posteriores de planeación de sistemas de transporte urbano por medio de trolebuses, en las diversas ciudades de los estados de la República Mexicana cuya planificación moderna y crecimiento sea factible, entre las que se pueden mencionar Toluca, Puebla, Querétro, Morelia, León y Monterrey entre otras.

En la selección final se optó por desarrollar el estudio para la ciudad de Toluca.

## FUENTES DE INFORMACION.

La obtención de información fuente representó una ardua tarea que requirió muchas horas-hombre para lograrla, ya que su búsqueda se llevó a cabo en lugares muy diversos. Para dar una idea de los lugares en que fué obtenida con mayor o menor amplitud se describen a continuación las principales fuentes :

a ) En la ciudad de Toluca,

Dirección de Comunicaciones y Obras Públicas del Estado de México.

Departamento de Ingeniería de Tránsito ( DSP y T ) del Estado de México.

Departamento de Catastro del Estado de México.

Delegación de CANACINTRA.

Delegación de SEP.

Universidad Autónoma del Estado de México.

Dirección de Estadística del Estado de México.

b ) Fuera de la ciudad de Toluca,

Comisión del Plan Nacional Hidráulico S. A. R. H.

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP)

Comisión Federal de Electricidad ( CFE ).

Ferrocarriles Nacionales de México.

Secretaría de Comercio, Dirección de Estadística.

- c ) Fuera del País a través de las embajadas de :
- Checoslovaquia, Attn : Ing. Jiri Yodas.
  - Francia.
  - Rusia.
  - Inglaterra.
  - Italia.
  - Japón.
  - Estados Unidos de Norteamérica.
  - Canadá.
- d ) Centros que utilizan servicio de transporte eléctrico.
- Empresa de los Servicios de Transportes Eléctricos del Departamento del Distrito Federal. ( STEDDF )
  - Sistema de Transporte Colectivo Metro ( STC )
- e ) Algunas Compañías relacionadas con el tema :
- Skoda Plzen CSSR.
  - Brown Boveri.
  - Mexicana de Autobuses, S.A. ( MASA )
  - Volvo.
  - Allsthöm de México.
  - Industria Eléctrica de México ( IEM )
  - Industrias Unidas, S.A. ( IUSA )
  - Reliance de México, S.A.

- f) Centros de Estudios Superiores y de Investigación .  
Instituto de Investigaciones Eléctricas ( IIE ) .  
Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Industria Eléctrica ( CCONNIE ) .  
División de Estudios Superiores de la Facultad de Ingeniería ( DESFI ) .  
Facultad de Ingeniería UNAM.  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica IPN ( ESIME ) .

El volumen considerable de información recopilada fué ordenada, analizada y estudiada cuidadosamente. Fué además complementada y ampliada con libros, manuales y valiosas experiencias de ingenieros que se dedican al transporte eléctrico de México.

Como resultado de lo anterior, nos ha sido posible realizar -- este modesto estudio dividido en los capítulos que aparecen en seguida.

## CAPITULO PRIMERO

### LINEAMIENTOS GENERALES

#### 1.1 Características del área de estudio.

Para el presente trabajo el área de estudio está delimitada por la ciudad de Toluca y sus alrededores 1/

Toluca, es cabecera del Municipio del mismo nombre y capital del Estado de México ( Fig. 1.1. ), se encuentra a 2,680 metros sobre el nivel del mar y en la longitud  $99^{\circ}39'38''$  Oeste y latitud  $19^{\circ}17'33''$  Norte, su clima es templado, subhúmedo con lluvias en verano, ocupa una área urbana de  $15.8 \text{ km}^2$  y cuenta con una población actual estimada en 201,428 habitantes ( Ref. 1.1 ).

En lo que se refiere a los estratos de la población, industrias,

---

1/ Se consideraron los poblados de : Zinacantepec, Capultitlán, San Felipe, Metepec, San Mateo, San Lorenzo y San Buenaventura.



FIGURA 1.1 CROQUIS DE LOCALIZACION

comercios, escuelas, centros de enseñanza, unidades deportivas y otras áreas que generan viajes tiene características muy marcadas en los diferentes estratos económicos, encontrándose que el de la clase mas alta ocupa un área habitacional del 15 %, el de características regulares ( clase media ) un 62 % y el de clase baja ( popular y marginal ) un 23 %. El nivel económico de los estratos antes mencionados define las posibilidades de transportación de cada uno de ellos de acuerdo a las condiciones físicas de vialidad misma que está formada por vías primarias y secundarias.

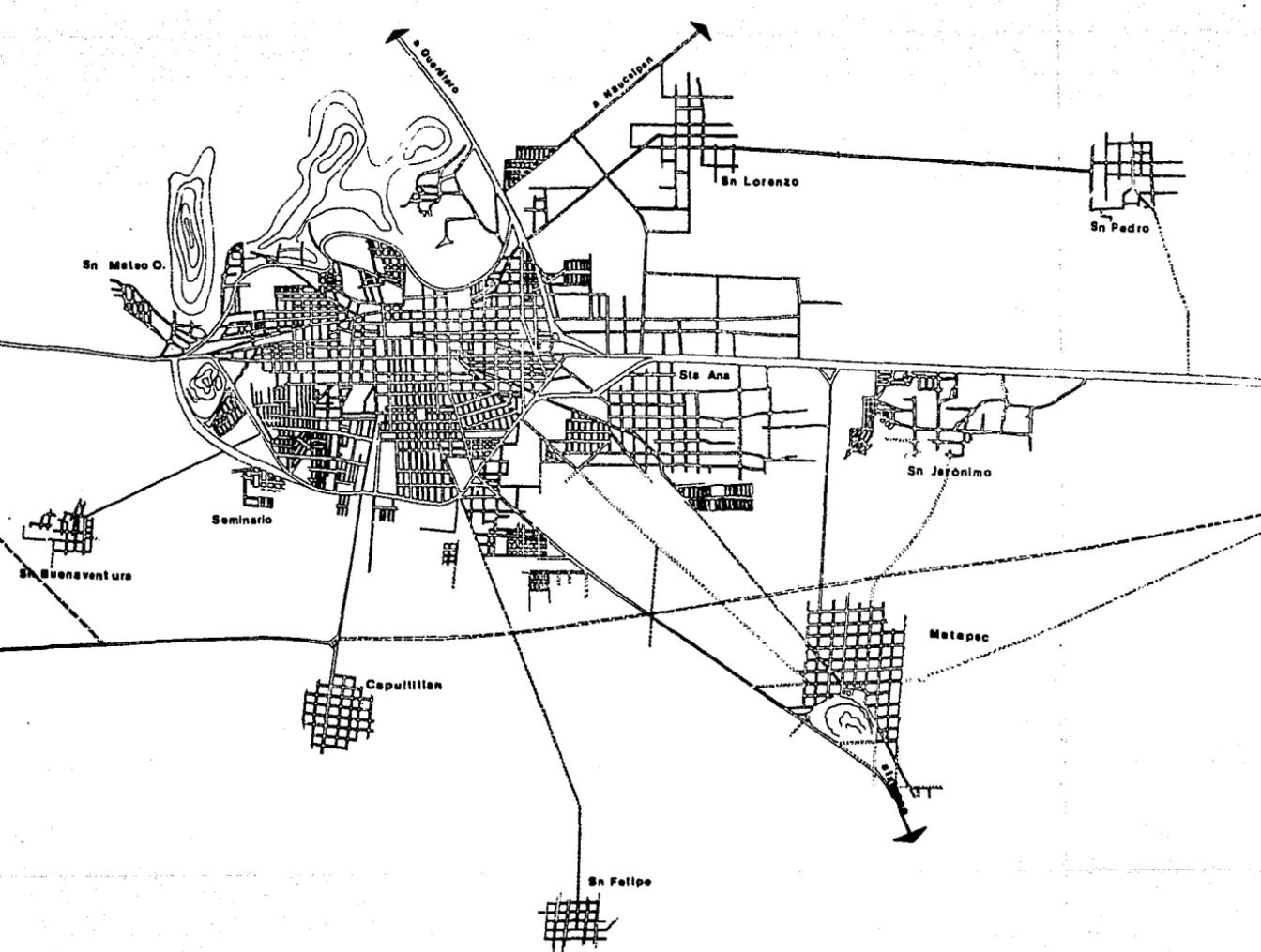
Las vías primarias son :

El Paseo Tollocan, formando un anillo con la Avenida Circunvalación, y aquellas que comunican a la Ciudad con los poblados de Zinacantepec, Capultitlán, San Felipe, Metepec, San Mateo Oxtotitlán, San Lorenzo y San Buenaventura, como se muestra en la Figura 1.2. Las secundarias son aquellas avenidas menores que cruzan o convergen a alguna de las vías primarias.

## 1.2 Uso actual del suelo.

Determinar el uso actual del suelo, en el área de estudio, permitió la localización de las zonas de mayor concentración de población, clasificándolas según el tipo de actividad ( Ref. 1.2 ) como sigue :

Zonas Habitacionales. - Tomando en consideración los recursos eco-



a Querétaro

a Naucalpan

Sn Mateo O.

Sn Lorenzo

Sn Pedro

Seminario

Sta Ana

Sn Jeronimo

Sn Buena Ventura

Capullitlan

Matatepec

Sn Felipe

nómicos de sus habitantes, se dividen en : altas, medias, populares y marginales.

**Zonas Industriales.** - Se localizan principalmente en la parte Norte del Paseo Tollocan y constituyen una zona de concentración obrera.

**Zonas Comerciales.** - Existen dos importantes centros comerciales ubicados en el primer cuadro y el mercado Juárez.

**Centros Educativos.** - Su ubicación es diversa, ya que las escuelas primarias, secundarias, preparatorias, profesionales y otras, se distribuyen por toda la ciudad.

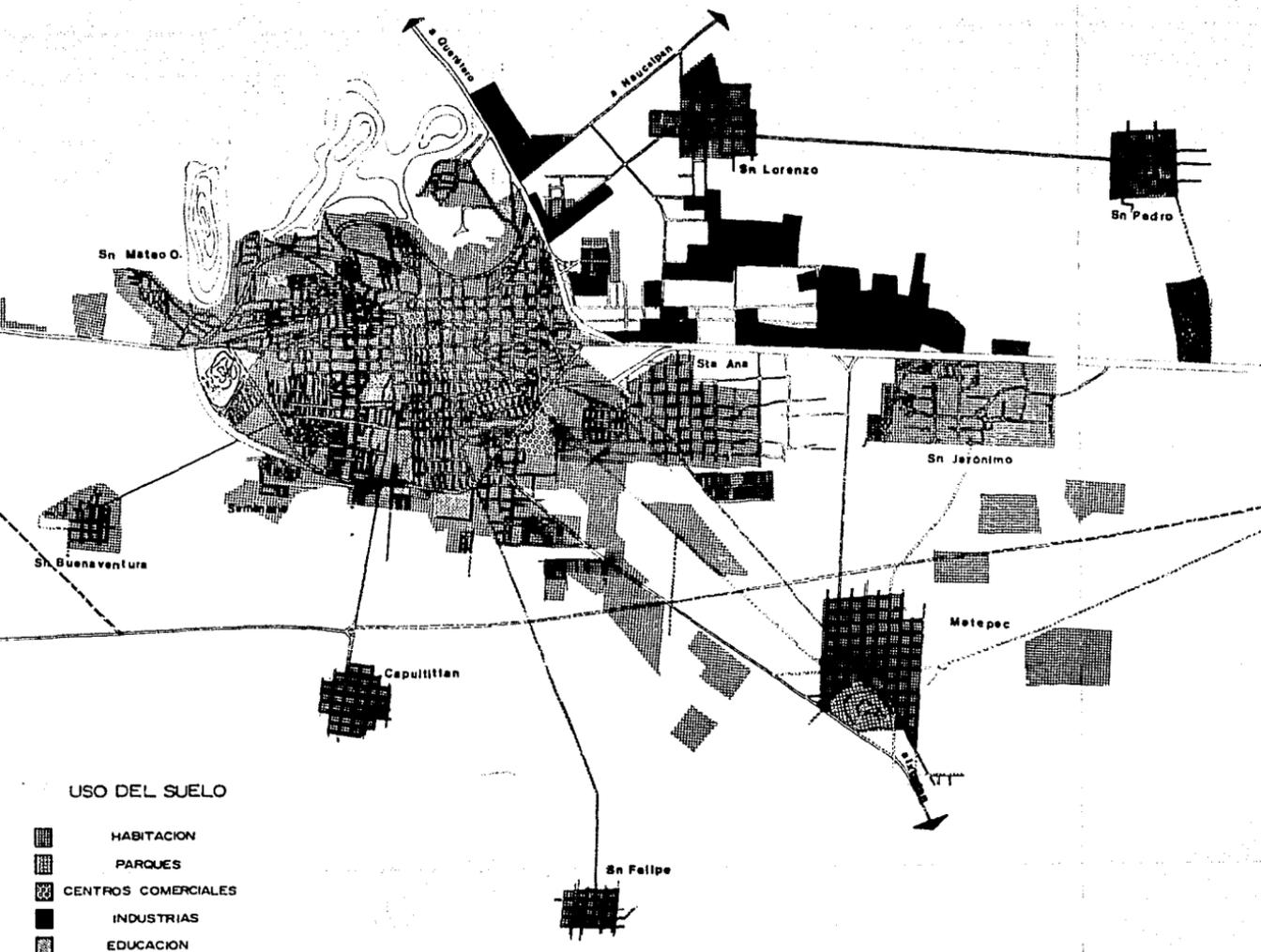
**Centros de Asistencia Social, Recreativos y Religiosos.** - También se distribuyen por toda la ciudad, pero la asistencia de estos lugares no es tan frecuente como en los anteriores.

En la Figura 1.3 se pueden ver las zonas mencionadas.

### 1.3 Situación Actual del Transporte.

El transporte urbano en la Ciudad de Toluca, cuenta con -- 14,781 unidades, distribuidas principalmente en tres tipos, autobuses, automóviles de alquiler y automóviles particulares, como se muestra en la tabla 1.1, donde se observa que la mayor parte de los viajes/persona/día ( 71.5 % ) se realiza en autobuses.

El transporte público por medio de autobuses actual, cuenta con 15 rutas de tipo radial que comunica el centro con cualquier -- punto de la ciudad. La operación de las rutas utiliza 273 autobuses, 233 de ellos denominados de 1a. clase (verdes ) y 40 tipo Tollocan,



Tipo	No. de unidades	Viajes-persona/dfa	%
AUTOBUSES	273	224,872	71.5
AUTOMOVILES DE ALQUILER	742	20,160	6.4
AUTOMOVILES PARTICULARES	13,766	69,280	22.0
OTROS ( bicicletas, motocicletas, etc. )	-	-	0.1
TOTAL	14,781	314,312	100.0

Fuente : La vialidad y el transporte en la Cd. de Toluca, Hernández Espinosa L. ( 1976 ).

Tabla 1.1 CAPACIDAD ACTUAL DEL TRANSPORTE.

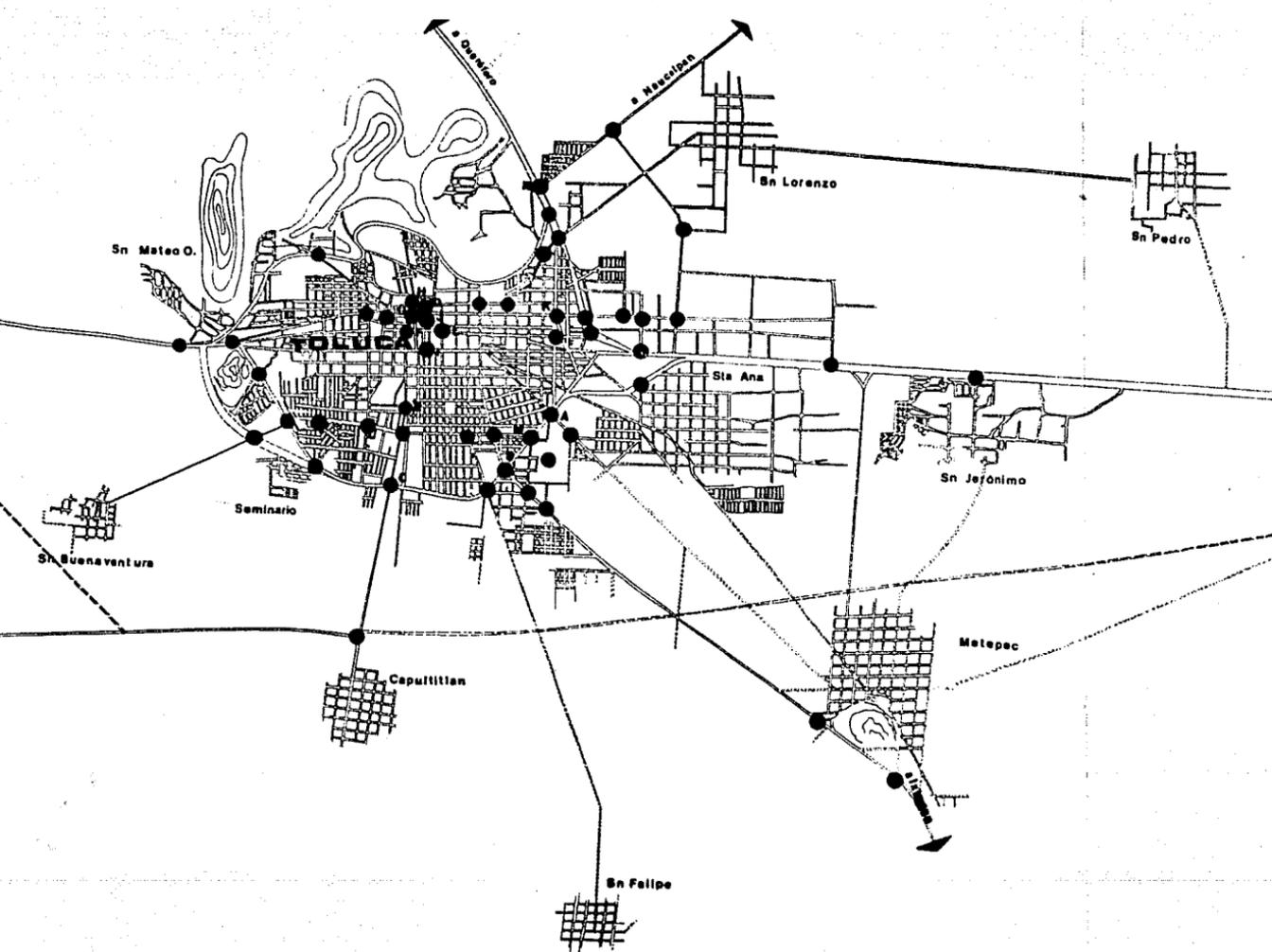
los cuales son administrados por las líneas Colón Nacional, S.A. de C.V. y Transportes Urbanos y Suburbanos de Toluca. Cada autobús trabaja un promedio de 310 días al año con un horario de 6.15 a.m. a 9.30 p.m., con capacidad de 37 asientos para la clase y 43 para el tipo Tollocan. Aparentemente en el aspecto administrativo interno las líneas operan como sociedades anónimas; sin embargo, realmente operan como hombre/autobús en donde cada permisionario se encarga de su unidad.

#### 1.4 Tránsito.

Dentro del tráfico urbano, el constante aumento de vehículos automotores y la demanda creciente del transporte público, agudizan el problema de tránsito caracterizando, así ciertos lugares de la ciudad denominados puntos conflictivos ( Figura 1.4 ), que sobresalen por el congestionamiento de vehículos y el excesivo número de personas que requieren un medio de transporte y que a determinadas horas, no se logra satisfacer plenamente.

Los puntos conflictivos más importantes de la ciudad de Toluca ( Ref. 1.1 ) son en los cruces de las calles o avenidas :

- a ) Paseo Tollocan - Isidro Fabela.
- b ) Paseo Tollocan - Pino Suárez.
- c ) Paseo Tollocan - Paseo Colón.
- d ) Zona Centro.
- e ) Zona comercial de la avenida Juárez.



- f ) Avenida Independencia - Constitución,
- g ) Cinco de Febrero - Nigromante.
- h ) Sebastian Lerdo de Tejada - Nicolás Bravo.
- i ) Morelos - Matamoros.
- j ) Avenida Independencia - Rayón.
- k ) Avenida Independencia - Isidro Fabela.
- l ) Hidalgo - Rayón.
- m ) Terminal Toluca.
- n ) Entradas a la Ciudad provenientes de Querétaro, Distrito Federal, Morelia, Ixtapan, Temascaltepetl y otros.

#### 1.5 Proposición de rutas para trolebuses.

El problema de transporte masivo de personas deberá enfocarse partiendo de las necesidades actuales y al futuro. Para obtener resultados satisfactorios es necesaria la colaboración de las autoridades encargadas del transporte de la localidad donde se planea instalar el sistema de transporte utilizando algún método probado en el cálculo de viajes y rutas. Un cálculo de este tipo desarrollado en forma manual exigiría mucho tiempo y sería costoso por lo que las ventajas de emplear un programa de computadora en rapidez y capacidad de memoria para el manejo de información son evidentes. El programa deberá estar sujeto a las adaptaciones o posibles cambios introducidos por la experiencia del planificador. La forma en que operarfa un programa de este tipo se muestra en la Figura 1.5 ( Ref. 1.3 ) y en donde se propone un sistema de transporte en que se

analiza y evalúan los resultados, elaborando varias alternativas de solución con el uso de programas de optimización.

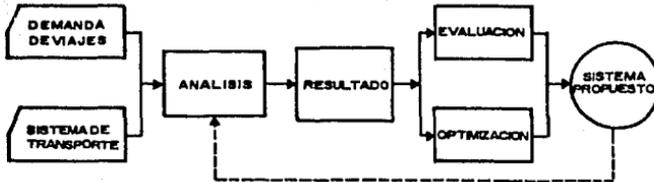


FIGURA 1.5 OPERACION DE UN PROGRAMA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE

Análisis por el programa tipo :

- 1.- Se incorpora a la memoria del programa un modelo de - la red de líneas. Se calculan lugares de cambio posibles entre diferentes líneas.
- 2.- Para cada viaje se buscan rutas opcionales, se supone - que los pasajeros escogen la opción que parte primero - siempre que el tiempo de viaje no sea tan largo que valga la pena esperar otra línea, se considera también que a los pasajeros les desagradan los cambios.
- 3.- Para cada ruta, se calcula el tiempo de espera y de cambio, tiempo total y longitud del viaje.
- 4.- Los viajes se distribuyen entre las rutas opcionales pro-

porcionalmente a las posibilidades de que la línea parta primero.

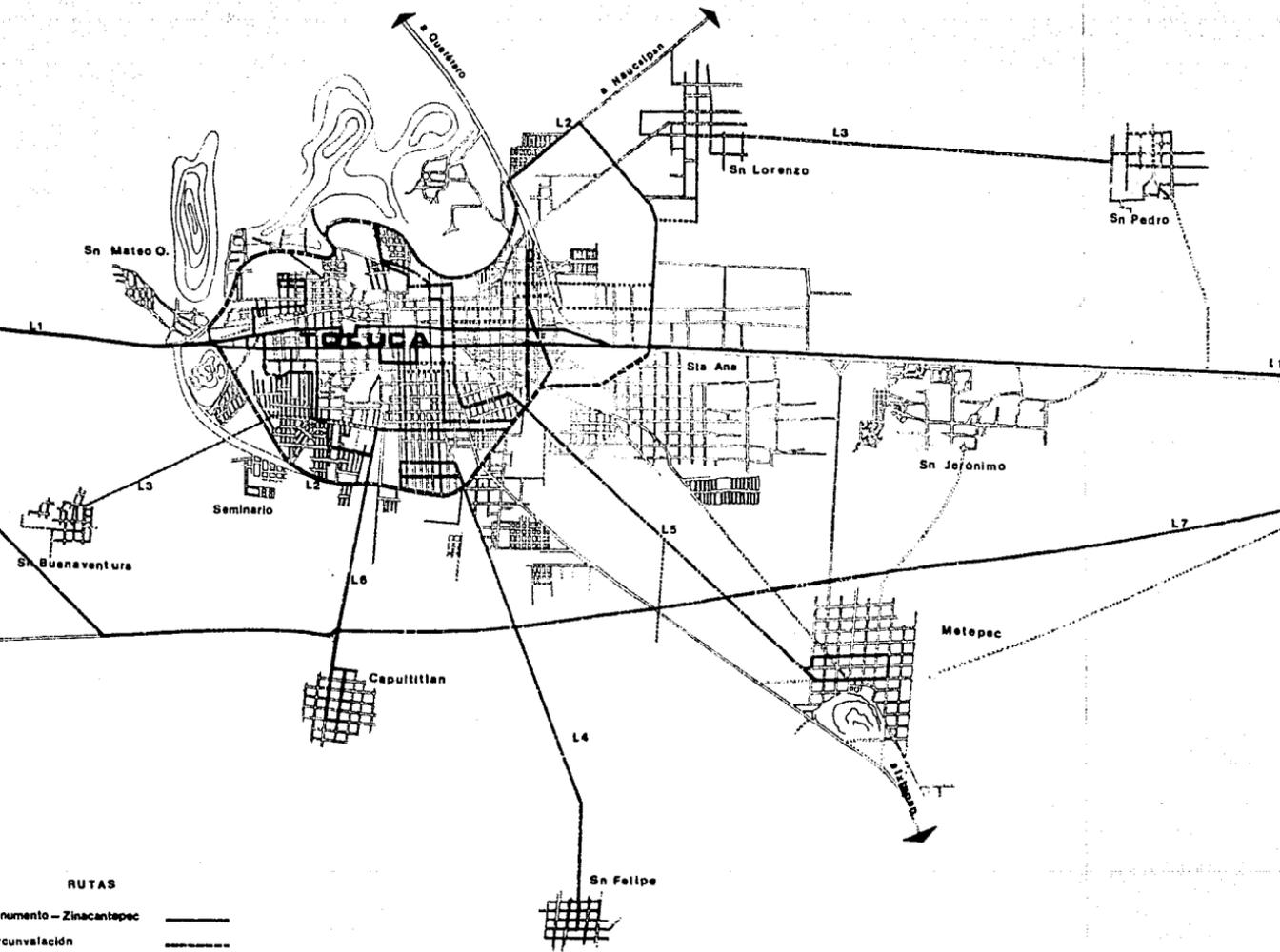
5.- Se actualizan los datos estadísticos de la carga.

La búsqueda de ruta, cálculo de estándar de este viaje, distribución y configuración de la red ( puntos 2-5 ) se hacen en una secuencia para cada viaje, haciendo flexible y eficaz al programa.

Aunque el uso de herramientas del tipo anteriormente descrito es el camino adecuado para el desarrollo de un estudio de planeación de transporte, en el presente no se llevó a cabo debido a que tan sólo la elaboración del mismo podría ser motivo de uno más profundo.

Considerando la existencia de los medios de transporte actual, las demandas máximas que se registran en el movimiento de pasajeros, los lugares o zonas a los que usualmente se dirigen y la expansión urbana de la ciudad de Toluca, se propone como complemento al ya existente, un servicio de transporte eléctrico por medio de trolebuses.

El establecimiento de este servicio mostrado en las figuras 1.6 y 1.7 tiene por objetivo, como ya se dijo complementar los sistemas actuales y futuros de transporte público, con una red de 7 rutas de trolebuses que cubre las áreas urbanas de Toluca y Zonas aledañas, en la tabla 1.2 se muestran los nombres, longitudes y la ubicación propuesta de sus terminales.



Sn Mateo O.

L1

Sn Buena Ventura

L3

Seminario

L6

Capuititlan

L4

Sn Felipe

a Cuernavaca

a Neocatepan

L2

Sn Lorenzo

L3

Sn Pedro

**TOLUCA**

Sra Ana

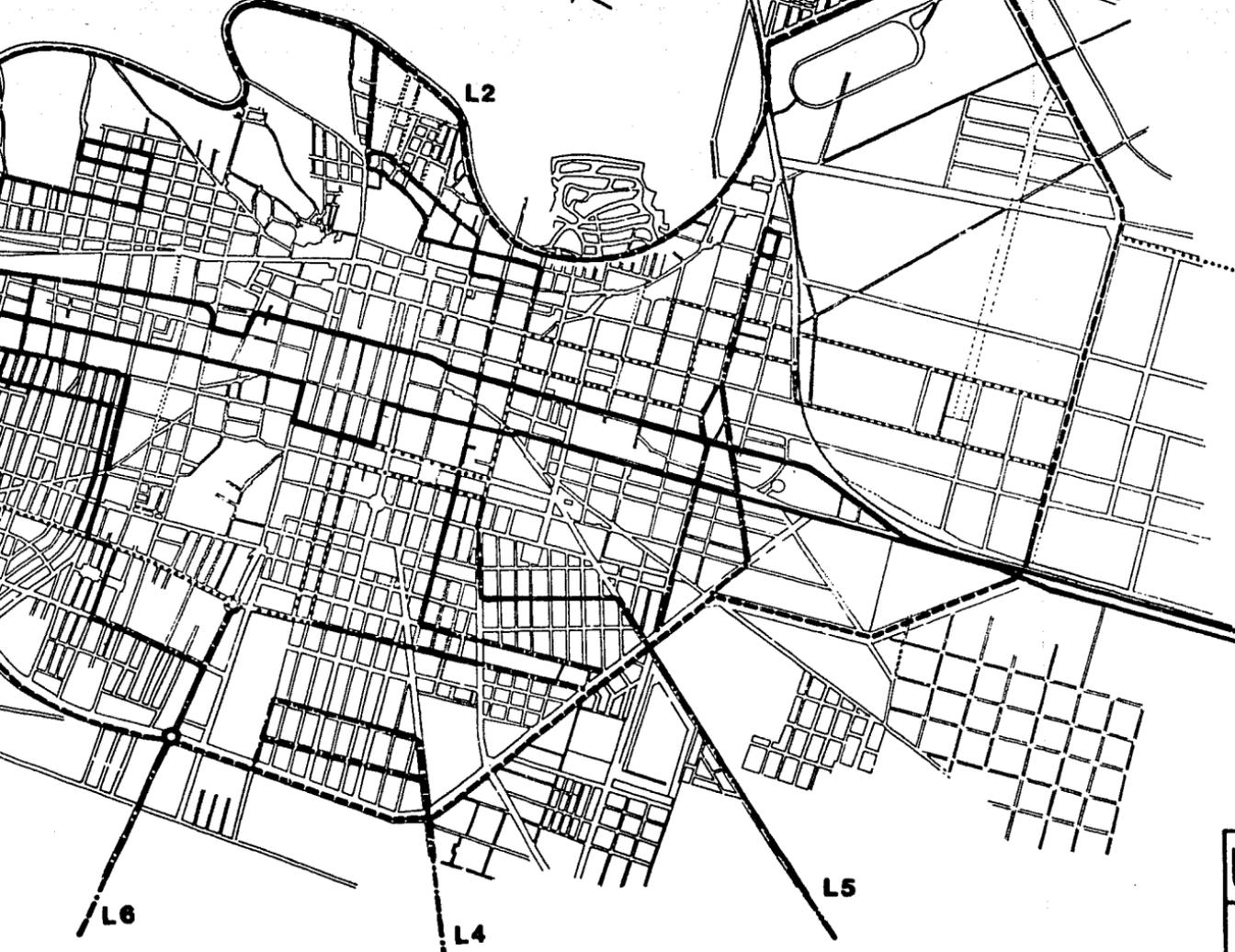
L5

Sn Jofnimo

L7

Metepec

a Metepec



L2

L6

L4

L5

RUTAS	LONGITUD ( KM )	UBICACION PROPUESTA DE LAS TERMINALES
1 ). - Zinacantepec-Monumento	21.640	Poblado de Zinacantepec-Monumento a Emiliano Zapata ( Paseo Tollocan ).
2 ). - Circunvalación	14.630	Paseo Tollocan y Galeana ( sobre Glorleta ).
3 ). - Buenaventura-San Pedro	16.025	Poblado de San Pedro Totoltepec-Poblado de San Buenaventura.
4 ). - San Felipe-Sor Juana	9.078	Poblado de San Felipe-Colonia Sor Juana Inés de la Cruz.
5 ). - Metepec-Los Pinos	7.638	Poblado de Metepec-Colonia Los Pinos.
6 ). - Capultitlán-Hospital General	6.048	Poblado de Capultitlán-Hospital General.
7 ). - Libramiento	22.880	Poblado de San Mateo Oxtotitlán-Monumento a Emiliano Zapata ( Paseo Tollocan ).

TABLA 1.2 RUTAS PROPUESTAS.

### 1.6 Demanda de transporte público.

La demanda de transporte público, se refiere a la cantidad de viajeros que utilizan este medio de transporte para desplazarse. En la ciudad de Toluca se estimaron las siguientes cantidades significativas que sirvieron de base para establecer la demanda :

TIPO DE USUARIO	CANTIDAD	%
Trabajadores <u>1/</u>	79,460	58
Estudiantes <u>2/</u>	35,620	26
Otros <u>3/</u>	21,920	16
Total <u>4/</u>	137,000	100

considerando un mínimo de dos viajes sencillos ( ida y vuelta ) por día se obtiene la demanda diaria de transporte como sigue :

$$D = ( 137\,000 \text{ personas} ) ( 2 \frac{\text{viajes}}{\text{día}} ) = 274\,000 \text{ viajes-persona/día ( vpd )}$$

De los cuales actualmente se cubren 245,032 ( Ref. 1.1 ), existiendo un déficit de 28,960 vpd que pueden ser cubiertos por trolebuses. Según los planes a corto plazo ( cinco años ) la demanda de transporte se incrementará a 360 000 vpd por lo que se deberá aumentar en forma proporcional la cantidad de vehículos del transporte público de los cuales 80 serán trolebuses como se muestra en el siguiente inciso.

- 
- 1/ Porcentaje de la población económicamente activa que utiliza transporte público.
  - 2/ Porcentaje de la población escolar que utiliza el transporte público. Ref. 1.4
  - 3/ Personas que se transportan hacia lugares donde desarrollan actividades no productivas.
  - 4/ Personas que utilizan transporte público estimada en 68 % de la población total.

### 1.7 Determinación de la cantidad de trolebuses.

Esta determinación se realizó en base al análisis anterior y tomando en cuenta los siguientes conceptos : Longitud de las rutas, velocidades promedio según la zona de recorrido, paradas, tiempos de recorrido en un sentido y en viajes redondos, horarios de operación e intervalo estimado entre trolebuses, tiempo de espera en las terminales y capacidad del vehículo.

La cantidad de trolebuses se determinó, en función a la duración de la vuelta ( recorrido ) y del intervalo propuesto 1/ utilizando las siguientes ecuaciones :

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Longitud}}{\text{Tiempo}} \quad (1.0)$$

donde :

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{Longitud}}{\text{Velocidad}}$$

$$t_{x_n} = \frac{L_{x_n}}{V_{x_n}} \quad 60 \quad (1.1)$$

$$T_r = t_{x_1} + t_{x_2} + \dots + t_{x_n} \quad (1.2)$$

$$D_v = 2T_r \quad (1.3)$$

---

1/ Se considera para cada una de las rutas un intervalo propuesto ( Ip ), de acuerdo con la demanda horaria de transporte, que varía entre el 10 y el 15 % del tiempo total de recorrido.

Donde :

$L$  = Longitud de la ruta ( km ). Vuelta completa.

$L_{x_n}$  = Longitud de un tramo de la ruta ( km ).

$V_{x_n}$  = Velocidad comercial de un tramo de ruta ( km/hr ).

$t_{x_n}$  = Tiempo de recorrido de un tramo de ruta ( min ).

Para una mejor apreciación de la forma en que se determinó - el tiempo de duración del recorrido, se tomó como ejemplo el cálculo para la ruta 1 como se muestra en la Figura 1.8, donde un eje horizontal representa la longitud de la ruta, y siguiendo el recorrido real de la misma, se dividió en tramos, cuya velocidad depende del tráfico en la zona de cruce, asignando a cada tramo la velocidad promedio estimada para esa zona.

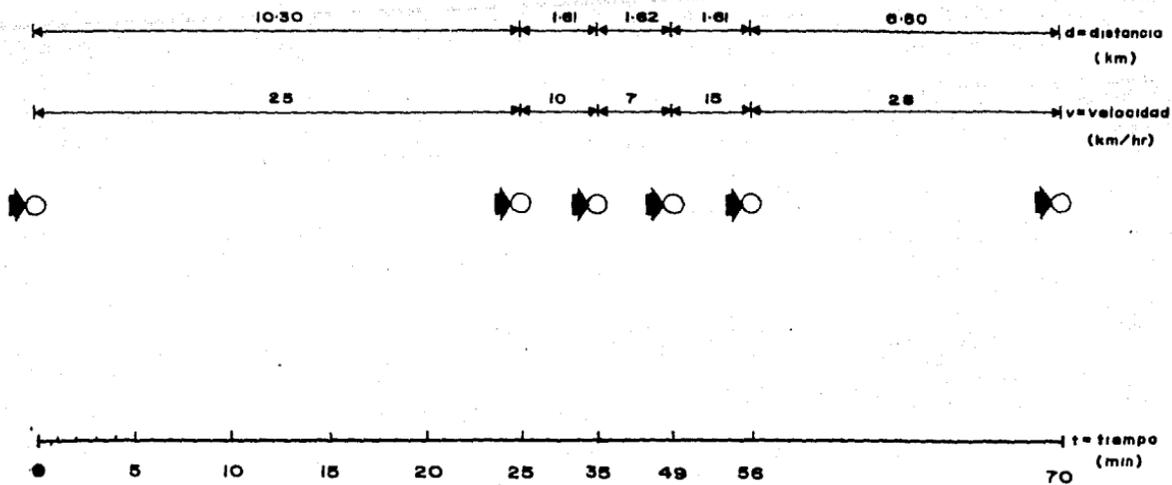
Utilizando las expresiones 1.1, 1.2 y 1.3 y de la Fig. 1.8 obtenemos lo siguiente :

$n = 5$  tramos

$L_{x_1} = 6.5$  kms y  $V_{x_1} = 28$  km/hr

$L_{x_2} = 1.62$  kms y  $V_{x_2} = 7$  km/hr

$L_{x_3} = 1.61$  kms y  $V_{x_3} = 15$  km/hr



 **tralebus**  
 Tr= 70 minutos  
 Dv= 140 minutos

FIGURA 1.8 DURACION DE LA VUELTA RUTA 1

$$L_{x_4} = 1.61 \text{ kms y } V_{x_4} = 10 \text{ km/hr}$$

$$L_{x_5} = 10.3 \text{ kms y } V_{x_5} = 25 \text{ km/hr}$$

aplicando la expresión ( 1.1 ) obtenemos :

$$t_{x_1} = \frac{L_{x_1}}{V_{x_1}} 60 = \frac{6.5}{28} 60 \doteq 14 \text{ minutos}$$

$$t_{x_2} = \frac{L_{x_2}}{V_{x_2}} 60 = \frac{1.62}{7} 60 \doteq 14 \text{ minutos}$$

$$t_{x_3} = \frac{L_{x_3}}{V_{x_3}} 60 = \frac{1.61}{15} 60 \doteq 7 \text{ minutos}$$

$$t_{x_4} = \frac{L_{x_4}}{V_{x_4}} 60 = \frac{1.61}{10} 60 \doteq 10 \text{ minutos}$$

$$t_{x_5} = \frac{L_{x_5}}{V_{x_5}} 60 = \frac{10.3}{25} 60 \doteq 25 \text{ minutos}$$

de la expresión ( 1.2 ) :

$$T_r = t_{x_1} + t_{x_2} + t_{x_3} + t_{x_4} + t_{x_5} = 14+14+7+10+25 = 70 \text{ minutos}$$

y finalmente de la expresión ( 1.3 ) :

$$D_v = 2T_r = 2(70) = 140 \text{ minutos}$$

En la tabla 1.3 se presentan los resultados obtenidos para las 7 rutas, donde se observa que el tiempo de duración del recorrido - en la ruta más larga es 140 minutos y en la más corta 48.8 minutos.

Debido a la falta de información para estimar la demanda real, se utilizó un método para determinar el número de unidades, en el que se relacionan, el intervalo propuesto entre unidades de acuerdo a la demanda horaria de transporte ( Ref. 1.5 ) con el que se determina el número de trolebuses, que satisface cierta demanda de transporte, utilizando las siguientes expresiones :

$$D_m = \frac{D_s}{T_s} \quad (1.4)$$

$$I = \frac{C_v}{D_m} \quad (1.5)$$

$$N_t = \frac{D_v + K}{I} \quad (1.6)$$

$$K = T_1 + T_2 \quad (1.7)$$

$$C_t = \frac{D_s}{T_s} \quad (60) \quad (1.8)$$

Donde :

$D_m$  = Demanda ( pasajeros / min ).

$D_s$  = Demanda a satisfacer ( pasajeros ).

Ruta	Longitud ( Km )	$L_{x_n}$ ( km )	$V_{x_n}$ ( km/hr )	$t_{x_n}$ ( min )	$T_r$ ( min )	$D_v$ ( min )
1	21.64	6.50	28	14.0	70.0	140.0
		1.62	7	14.0		
		1.61	15	7.0		
		1.61	10	10.0		
		10.30	25	25.0		
2	14.63	3.63	10	22.0	59.0	118.0
		4.00	15	16.0		
		7.00	20	21.0		
3	16.02	1.70	28	3.6	48.6	97.2
		1.00	15	4.0		
		1.08	8	8.1		
		1.00	10	6.0		
		11.24	25	26.9		
4	9.08	3.44	28	7.4	33.2	66.4
		4.00	15	16.0		
		1.64	10	10.0		
5	7.64	1.00	15	4.0	27.6	55.2
		2.44	10	14.6		
		4.20	28	9.0		
6	6.05	2.06	28	4.4	24.4	48.8
		2.00	15	8.0		
		1.99	10	11.9		
7	22.88	22.88	28	49.0	49.0	98.0

TABLA 1.3 DURACION DEL RECORRIDO POR RUTAS.

$T_s$  = Tiempo de servicio ( minutos ).

$I$  = Intervalo entre trolebuses ( minutos ).

$C_v$  = Capacidad del trolebus ( pasajeros ).

$N_t$  = Número de unidades ( trolebuses ).

$D_v$  = Duración de la vuelta ( minutos ).

$K$  = Constante de tiempo ( minutos ).

$T_1, T_2$  = Tiempos de espera y maniobras del trolebus, en cada terminal ( minutos ).

$C_t$  = Capacidad de transporte ( pasajeros/hora ).

Despejando de la expresión 1.5  $D_m$  e igualando  $I = I_p$  ( donde

$I_p$  es el intervalo propuesto ) se obtiene que :

$$D_m = \frac{C_v}{I_p} \quad (1.9)$$

Igualando las expresiones ( 1.9 ) con ( 1.4 )

$$\frac{D_s}{T_s} = \frac{C_v}{I_p} \quad (1.10)$$

de 1.10 se despeja  $D_s$

$$D_s = \frac{C_v T_s}{I_p} \quad (1.11)$$

los datos conocidos son :

$$C_v = 100 \text{ pasajeros ( capacidad del trolebus ).}$$

$$T_s = 18 \text{ horas que equivalen a } 1,080 \text{ minutos.}$$

$L_p$  = Intervalo propuesto, que varfa de acuerdo con la hora del día entre las 6 y las 24 horas ( tiempo de servicio ).

Sustituyendo en 1.11 tenemos :

$$D_s = \frac{(100)(1080)}{L_p} = \frac{(108)(10^3)}{L_p} \text{ (pasajeros) (1.12)}$$

Por otra parte, de la expresión ( 1.6 ) obtenemos que :

$$N_t = \frac{D_v + K}{L_p} \quad (1.13)$$

Donde :  $K = T_1 + T_2$

Considerando para nuestro estudio  $T_1 = T_2 = 3$  minutos por lo tanto

$K = 6$  ( tiempo empleado en maniobras en las terminales ):

$$N_t = \frac{D_v + 6}{L_p} \quad ( \text{trolebuses} ) \quad (1.14)$$

Conocidos los valores de  $L_p$  y  $D_v$ , con las expresiones ( 1.12 ) y ( 1.14 ) se calcula el número de unidades y la demanda a satisfacer, dependiendo del intervalo entre unidades. Para cada una de las rutas se obtienen los resultados de la tabla 1.4, en la que se presenta a-

Hora	RUTA 1 Zinacantan Monumento L=45.78 Km D <sub>v</sub> = 140 min			RUTA 2 Circunvalación L= 29.26 Km D <sub>v</sub> = 119 min			RUTA 3 Buenaventura San Pedro L = 32.05 Km D <sub>v</sub> = 97 min			RUTA 4 San Felipe Sor Juana L= 18.135 Km D <sub>v</sub> = 65min			RUTA 5 Metzpac Los Pinos L= 18.175 Km D <sub>v</sub> = 55 min			RUTA 6 Capulitán Hospital Gral. L= 12.035 Km D <sub>v</sub> = 48 min			RUTA 7 Libramiento L=45.76 Km D <sub>v</sub> = 88 min			TOTAL
	I p	N t	D s	I p	N t	D s	I p	N t	D s	I p	N t	D s	I p	N t	D s	I p	N t	D s	D s/H			
6:00 - 7:30	9.0	16	12 000	9.0	14	12 000	10.0	10	10 000	11.0	7	9 818	12.2	6	10 588	10.0	6	10 800	21.0	5	5 142	71,148
7:30 - 10:00	8.0	19	13 500	9.0	14	12 000	8.0	13	13 500	9.0	8	12 000	8.7	7	12 414	8.0	7	13 800	21.0	5	5 142	82,056
10:00 - 11:00	9.0	16	12 000	10.0	13	10 800	9.0	12	12 000	11.0	7	9 818	10.2	6	10 588	9.0	6	12 000	21.0	5	5 142	72,348
11:00 - 13:00	12.0	12	9 000	13.0	10	8 308	12.0	9	9 000	14.0	5	7 714	12.2	5	8 852	12.0	5	9 000	30.0	4	3 600	55,474
13:00 - 14:00	10.0	15	10 800	11.0	12	9 818	10.0	10	10 800	12.5	6	8 640	11.0	6	9 818	12.0	5	9 000	25.0	4	4 320	63 195
14:00 - 15:00	8.0	18	13 800	9.5	14	12 706	8.0	13	13 500	10.0	7	10 800	10.2	6	10 588	10.0	6	10 800	23.0	5	4 695	76,589
15:00 - 16:00	9.0	16	12 000	9.0	14	12 000	10.0	10	10 800	14.0	5	7 714	8.7	7	12 414	9.0	6	12 000	21.0	5	5 142	72,070
16:00 - 18:00	8.0	19	13 500	9.0	14	12 000	8.0	13	13 500	9.0	8	12 000	8.7	7	12 414	8.0	7	13 800	21.0	5	5 142	82,056
18:00 - 21:00	7.5	19	14 400	9.0	14	12 000	9.0	12	12 000	14.0	5	7 714	9.0	7	12 000	8.0	7	13 500	30.0	4	3 600	78,214
21:00 - 24:00	15.0	10	7 200	15.0	8	7 200	15.0	7	7 200	17.0	4	6 353	15.3	4	7 058	14.0	4	7 714	35.0	3	3 085	48,810
N t/h		20			15			14			9			8			8			6		80
D <sub>s</sub> /h		117 900			108 832			113 100			92 571			106 734			111 814			45 010		695 961
C <sub>t</sub>		6 550			6 048			6 283			5 143			5 930			6 212			2 500		38 664
P <sub>r</sub> /h(KW)		2 100			1 575			1 470			945			640			840			630		8 400

Notas: L = Longitud de la ruta (Km); D<sub>v</sub> = duración de la vuelta (minutos); I<sub>p</sub> = intervalo propuesto (minutos); D<sub>s</sub> = demanda a satisfacer (pasajeros); D<sub>s</sub>/h = demanda a satisfacer por hora.

N<sub>t</sub>/h = número de trolebuses por ruta; D<sub>s</sub>/h = demanda teórica a satisfacer por ruta; C<sub>t</sub> = capacidad de transporte horaria por ruta; P<sub>r</sub>/h = potencia requerida por trolebuses por ruta (KW).

TABLA 1.4 RESULTADOS TOTALES POR RUTAS

demás la siguiente información :

$D_{s/R}$  es la demanda teórica a satisfacer por ruta y obtenida sumando los valores de la columna  $D_g$  que corresponden a las demandas de las diferentes horas del día.

$C_t$  es la capacidad de transporte horaria en cada ruta y se obtiene con la expresión 1.8 modificada de la siguiente forma :

$$C_t = \frac{D_{s/R}}{18} \quad (\text{pasajeros / hr})$$

$P_{p/R}$  es la potencia requerida de los trolebuses por ruta, en kilowatts.

Considerando que cada unidad consume 105 Kw, ( dato proporcionado por el S.T.E.D.D.E. 1/ y los fabricantes ).  $P_{p/R}$  se obtiene sumando la capacidad del número de unidades por ruta.

El número de unidades requerido para el complemento del servicio de transporte actual se estima en 80 trolebuses; distribuidos en las diferentes rutas cuya longitud total es de 197.875 km.

---

1/ S.T.E.D.D.E. - Servicio de Transportes Eléctricos del Departamento del Distrito Federal.

## LISTA DE FIGURAS

- 1.1 Croquis de localización.
- 1.2 Plano general.
- 1.3 Uso del suelo.
- 1.4 Puntos de conflicto.
- 1.5 Operación de un programa para un sistema de transporte.
- 1.6 Rutas periféricas.
- 1.7 Rutas zona centro.
- 1.8 Duración de la vuelta ruta 1.

## LISTA DE TABLAS

- 1.1 Capacidad actual del transporte.
- 1.2 Rutas propuestas.
- 1.3 Duración del recorrido por rutas.
- 1.4 Resultados totales por rutas.

## LISTA DE REFERENCIAS

- 1.1 Hernández E. L. Ing., " La vialidad y el transporte en la ciudad de Toluca ", Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería - UAEM, Toluca, Méx., 1976.
- 1.2 Olascoaga R., información directa, Oficina de Estudios y Proyectos de Comunicaciones y Obras Públicas del Estado de México, 1978.
- 1.3 A B Volvo, Bus Division, " Public Transport, Planning Methodology and Applications ", Sweden, 1978.
- 1.4 Secretaría de Educación Pública ( SEP ); Universidad Autónoma del Estado de México ( UAEM ).
- 1.5 Tevel P. O. Ing., " Computaciones gráficas en la explotación de un metro ", revista : Presencia del Metro, núm. 13, mayo 1975, México, D.F.

## CAPITULO SEGUNDO

### TROLEBUS

#### 2.1 Tracción Eléctrica.

En el campo del transporte masivo, se entiende por tracción eléctrica al medio de propulsión en base a la energía de los motores rotatorios que tienen su fuente de alimentación en forma de energía eléctrica ( Ref. 2.1 ).

Los sistemas de tracción eléctrica se dividen en dos grupos principales; en el primer grupo están los vehículos que reciben su alimentación desde una subestación y a través de una malla o línea de distribución; en el segundo, los vehículos que generan o transportan su propia energía. El primer grupo a su vez se divide en : sistemas que operan con corriente directa ( C. D. ), tales como trolebuses, tranvías, trenes urbanos ( metros ); y aquellos que operan con corriente

alterna, como ferrocarriles y trenes suburbanos ( Ref. 2.2 ).

Generalmente el tipo de sistema de tracción se selecciona de acuerdo a los siguientes factores :

- . Generación de energía eléctrica,
- . Transmisión de energía al vehículo,
- . Tensión que utiliza el motor de tracción.

Las ventajas de la electrificación de una línea de transporte de tráfico intenso se han conocido desde hace tiempo debido a las experiencias obtenidas en los sistemas instalados. Sin embargo, se ha mantenido como un punto de discusión cuál es el tipo de corriente más conveniente para efectuar dicha alimentación si en corriente directa o en corriente alterna.

La corriente alterna representa la solución más ventajosa para el ingeniero que diseña los circuitos de alimentación que llevan la energía hasta el material móvil, en tanto el que diseña el vehículo, es específicamente el motor que ha de impulsarlo, se inclinará casi invariablemente por la corriente directa. Aunque en realidad, en algunos casos es factible combinar las ventajas de ambos sistemas efectuando la transmisión de energía en corriente alterna de alta tensión, normalmente 13 ó 23 KV y rectificando la corriente en una subestación o en la propia unidad para alimentar el motor con corriente directa. En realidad, la única solución verdaderamente satisfactoria encontrada hasta ahora al problema de la tracción eléctrica es el motor de co

riente directa tipo serie, justificado por el análisis que se hace más adelante.

Esto es cierto en el caso de transporte urbano de pasajeros, como trolebus, donde el motor de tracción se sujeta al servicio más severo debido al gran número de arranques y paradas.

Entre las ventajas del motor serie en el campo de la tracción eléctrica se pueden citar las siguientes :

Este tipo de motor puede proporcionar un par de arranque de un valor muy superior al de cualquier otro tipo. Por ejemplo, si se -- compara con un motor de corriente directa con excitación derivación, que posee un par proporcional al producto del flujo por polo y la corriente de armadura, y que durante el arranque es necesario reducir la tensión de alimentación para evitar una corriente excesiva; inmediatamente se observa que el flujo se reducirá en el momento de arranque en el motor; no así en el motor serie por cuyo devanado de campo circulará una corriente mayor que la de marcha normal. La Figura 2.1 muestra la comparación entre las curvas par-corriente de armadura para los dos tipos de motor y para 100 y 50 por ciento de tensión nominal. En un motor con excitación compuesta el efecto sería similar, pero dependería de la proporción de excitación serie a excitación en derivación.

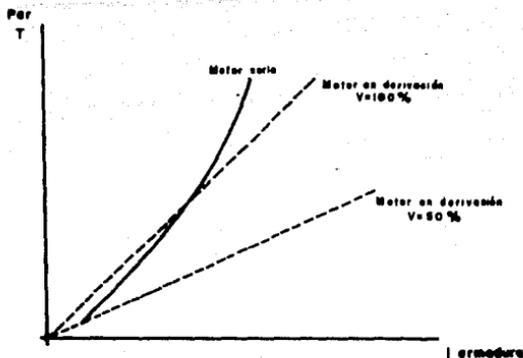


FIGURA 2.1 CURVAS PAR - CORRIENTE PARA DOS TIPOS DE MOTORES DE CD.

La comparación con un motor de Inducción es menos directa, pero puede decirse que en potencias equivalentes, un motor de inducción requiere una corriente de arranque varias veces mayor que la corriente nominal para producir un par de 150 a 275 por ciento del nominal, en tanto que un motor serie de corriente directa puede proporcionar un par de arranque varias veces mayor que el de marcha normal con una corriente de arranque ligeramente mayor que la nominal; es decir, si el motor de inducción tuviera que tomar una corriente de arranque tan reducida como la del motor serie de corriente directa, su par de arranque solo sería una pequeña fracción del nominal que es insuficiente para esta aplicación.

Una variación en el par del motor requerido, ya sea por patinaje, desplazamiento, irregularidad del piso o cualquier otra causa, se tra

duce, en una variación mínima de corriente en un motor tipo serie ;  
no así en un motor en derivación o compuesto, donde una variación de  
par ocasiona una fuerte variación de la corriente de armadura.

Lo anteriormente descrito puede comprobarse como sigue :

Si se denomina  $I$  a la corriente de armadura,  $V$  a la tensión apli-  
cada al devanado de campo, y  $R$  a la resistencia de dicho devanado ;  
las expresiones del par  $T$  en función de la corriente, sin tomar en  
consideración el efecto de saturación, serán :

$$\text{para el motor serie } T = K_1 I^2 \quad (2.1)$$

y

$$\text{para el motor derivación } T = K_2 \frac{VI}{R} \quad (2.2)$$

siendo  $K_1$  y  $K_2$  constantes.

Si diferenciamos las expresiones ( 2.1 ) y ( 2.2 ) obtendremos respec-  
tivamente :

$$dT = 2K_1 I \, dI \quad (2.3)$$

y

$$dT = K_2 \frac{V}{R} dI \quad (2.4)$$

Dividiendo ahora las expresiones ( 2.3 ) - ( 2.1 ) y ( 2.2 ) - ( 2.4 )  
se obtienen las siguientes expresiones :

$$\frac{dT}{T} = \frac{2dI}{I} \quad (2.5)$$

y

$$\frac{dT}{T} = \frac{dI}{I} \quad (2.6)$$

Al comparar las expresiones ( 2.5 ) y ( 2.6 ) se observa que para una variación de par determinada, la variación de corriente en el motor serie es la mitad de la correspondiente a un motor en derivación en las condiciones supuestas.

El motor serie puede considerarse autoprotegido porque su velocidad disminuye rápidamente al aumentar el par resistente, lo cual, además, mantiene una carga prácticamente constante en el sistema.

El par que entrega el motor serie varía solamente con la corriente de armadura y es prácticamente independiente de la tensión en las terminales. Esta característica adquiere una importancia primordialmente cuando se considera que el circuito de tracción es " elástico ", por así decirlo, ya que la resistencia entre la fuente de alimentación y el motor va aumentando con la distancia, y puede ocurrir -- que un trolebus tenga que arrancar a varios kilómetros de la subestación alimentadora con la inevitable caída de la tensión en las líneas, -- que es la que se registrará en sus terminales.

La característica par-velocidad del motor serie es de tal forma que a una variación apreciable de la velocidad, corresponde sólo una pequeña variación del par ( Fig. 2.2 ), lo cual permite una distribución uniforme de la carga del motor del trolebus, siendo diferente para un motor en derivación en el que una pequeña variación de velocidad va acompañada de una gran variación de par.

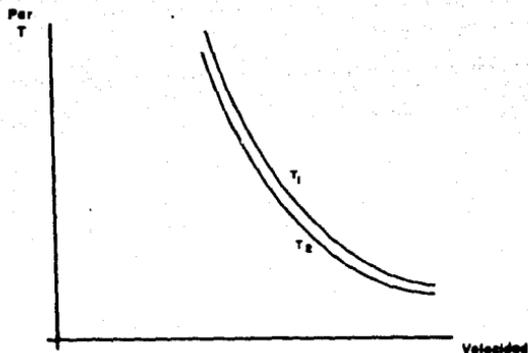


FIGURA 2.2 CARACTERISTICAS PAR - VELOCIDAD PARA MOTOR SERIE

En vista de que la corriente de campo es elevada, el motor serie sólo requiere unas cuantas espiras de sección recta que, en comparación, es grande para producir el flujo necesario; por lo tanto, la proporción cobre/aislamiento de las piezas polares, es mucho más elevada que para un motor en derivación lo que permite una construcción más sólida y resistente a las vibraciones, así como una reducción en las dimensiones, factor de suma importancia en el diseño de un motor de tracción cuyo tamaño está limitado de antemano en un sentido por la distancia entre las caras interiores de las ruedas y en otro sentido por la altura mínima del suelo al piso del vehículo.

La característica par-velocidad es la que mejor define las propiedades del motor serie. Su aspecto es similar al de la curva corriente-velocidad de la cual puede deducirse por medio de la relación

par-corriente.

A su vez, la curva esfuerzo-velocidad se asemeja a una hipérbola equilátera que representa una potencia constante como lo muestra la Figura 2.3.

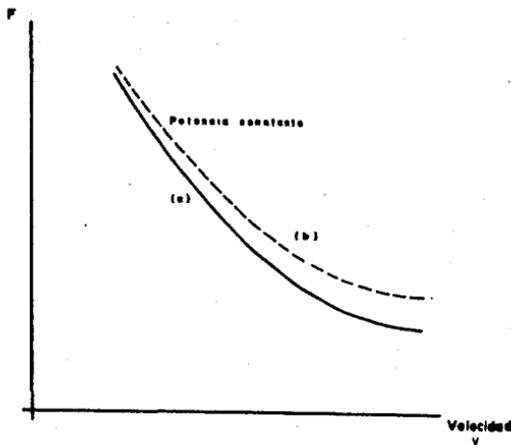


FIGURA 2.3 CURVA ESFUERZO - VELOCIDAD

Si la curva ( b ) representa el límite de utilización del motor, se observa que salvo para un par demasiado elevado, el motor se mantiene siempre muy por debajo de la potencia máxima, lo que confirma que este motor tiene una gran flexibilidad para adaptarse a las condiciones de trabajo.

La curva esfuerzo de tracción-velocidad lineal, se deduce de la velocidad angular del motor por una simple relación, en tanto que para encontrar el esfuerzo de tracción deberá intervenir el rendimiento

de la transmisión ( Ref. 2.3 ).

Para calcular la potencia desarrollada por el motor de tracción - en KW, se utilizó la siguiente expresión :

$$P = \frac{F}{365} \times \frac{V}{N_t} \quad (\text{KW}) \quad (2.7)$$

donde :

**F** Es el esfuerzo de tracción en kg y representa la suma del es fuerzo de aceleración (  $F_a$  ); el esfuerzo de resistencia al avance (  $F_r$  ) y el esfuerzo para vencer las pendientes (  $F_p$  ).

**V** Es la velocidad media ( km/hr ).

**$N_t$**  Es el rendimiento de la transmisión.

**$F_r$**  Comprende la fuerza de resistencia por fricciones externas ta les como, las de neumáticos con el piso y la del aire.

**$F_p$**  Es el esfuerzo requerido para vencer las pendientes del terreno 1 al 2 % ( Ref. 2.4 ).

**$F_a$**  Es la fuerza de aceleración necesaria para mover la masa del vehículo con carga. Se toma un incremento de masa usualmente entre 8 y 10 % debido a las masas de inercia en el arranque del motor ( Ref. 2.2 ).

De acuerdo con lo anterior y con los siguientes datos se calcu lan los valores de  $F_a$ ,  $F_r$  y  $F_p$  como sigue :

Datos :

$$P = \text{Peso del trolebus con carga máxima ( 100 personas )} = 17\,300 \text{ kg.}$$

$$a = \text{Aceleración máxima} = 0,875 \text{ m/s}^2.$$

$$M = \text{Masa} = \frac{P}{g}; \quad g = \text{aceleración de la gravedad} = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

$$m = \text{Incremento de masa de inercia} = 8 \% \text{ de } P.$$

$$V = \text{Velocidad media} 20 \text{ km/hr.}$$

$$A = \text{Area de la sección transversal} = 6,48 \text{ m}^2.$$

$$n_e = \text{Número de ejes} = 2.$$

$$R_p = \text{Constante de resistencia al avance ( kg/ton )}.$$

$$S = \text{Pendiente en } \% = 2 \ \%.$$

$$N_f = 92 \ \%.$$

$$F_a = Ma = \frac{(17\,300)(1,08)}{9,81} (0,875) = 1666,5 \text{ kg.}$$

$$F_r = R_p P$$

$$R_p = 0,6 + \frac{13,2}{P} n_e + 0,0154 V + 0,00226 \frac{AV^2}{P} =$$

$$2,77 \text{ kg/ton ( donde } P \text{ está en toneladas ).}$$

$$\therefore F_r = (2,77)(17,3) = 47,92 \text{ kg.}$$

$$F_p = \frac{P_s}{100} = \frac{(17\,300)(2)}{100} = 346 \text{ kg.}$$

Por lo que la fuerza de tracción será :

$$F = F_a + F_r + F_p = 1666.5 + 47.92 + 346 = 2060.42 \text{ kg.}$$

$$F = 2060.42 \text{ kg.}$$

Sustituyendo en la expresión ( 2.7 ) se tiene :

$$P = \frac{( 2060.42 ) ( 20 )}{( 365 ) ( 0.92 )} = 122.71 \text{ KW}$$

Obteniéndose un valor aproximado de la potencia desarrollada por el motor de tracción de 123 KW.

## 2.2 Descripción del Trolebus.

Se puede definir al trolebus como un vehículo eléctrico para transporte masivo de pasajeros, montado sobre neumáticos y que toma la corriente por medio de un par de conductores aéreos conectados a dispositivos mecánicos, que aseguran la unión eléctrica entre el conductor aéreo y el receptor móvil. El trolebus es por lo tanto un vehículo similar al autobus en apariencia pero que utiliza un motor eléctrico - en lugar de un motor de combustión interna.

Se compone de dos ruedas en el eje delantero y cuatro en el eje - trasero, chasis, carrocería, puertas de entrada y salida, asientos, - ventanillas corredizas, postes de sujeción, travesaños tubulares con asideras de cuero ( orejas ), ventilación y calefacción, alumbrado interior, alumbrado exterior consistente en: faros, luces direccionales, de paro y estacionamiento; limpiadores en el parabrisas frontal. Co-

mo se describirá más adelante el motor va alojado en la parte trasera y acoplado al eje posterior, utiliza un sistema de aire comprimido para frenado, apertura y cierre de puertas, controles eléctrico y electrónico y dos varas en el techo para la toma de energía. Interiormente se pueden disponer los asientos de la forma que mejor convenga según su capacidad. Su parabrisas panorámico permite al conductor una amplia visibilidad en varias direcciones desde su asiento, al frente existe un tablero de mando, el volante de la dirección y pedales en el piso; la ventilación y calefacción del vehículo se adaptan para el tipo de clima de los diferentes lugares en que se vaya a utilizar; la forma estética de los asientos para los pasajeros, el alumbrado interno del vehículo, la vista panorámica que se ofrece al pasajero y los estribos bajos (escalones de ascenso), son otras características que contribuyen a una permanencia cómoda para el usuario durante su viaje.

En cuanto a los dispositivos mecánicos y eléctricos del trolebus, estos se encuentran alojados en diferentes lugares bajo el piso, enfrente, atrás y a los costados.

Se tienen dos tipos de carrocería: la superpuesta y la integral -- (Ref. 2.5). En la primera el esfuerzo mecánico de la estructura está soportado por dos canales paralelos que componen el chasis, apoyados en los ejes delanteros y traseros, a través de una suspensión de muelles con amortiguadores; en la segunda, la estructura actúa mecánicamente soportando los esfuerzos a que se somete la unidad, reduciendo

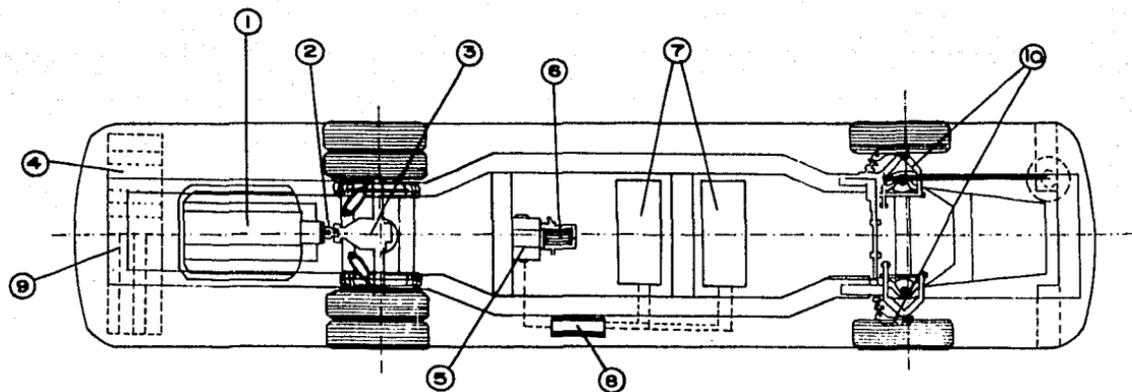
notablemente el peso total de ésta. Actualmente se utiliza una combinación de ambos tipos de carrocería ya que esto permite alargar la vida útil del vehículo.

Otras partes mecánicas del vehículo son la dirección, la transmisión mecánica y los dispositivos de aire comprimido para operaciones de apertura-cierre de puertas y de frenado neumático que se encuentran montadas en el chasis de la unidad ( Fig. 2.4 ).

Los equipos eléctricos, constituyen la mayor parte de los elementos de la unidad y están formados por unidades diferentes según la función que desempeñan, permitiendo probarlos y repararlos en forma independiente, como el caso del motor de tracción eléctrica que se encuentra en la parte posterior.

Otros dispositivos importantes, son los del equipo de control electrónico, el control chopper ( que se describe más adelante ) y un banco de baterías para alumbrado de emergencia alojado en la parte posterior. La resistencia para el frenado regenerativo en el lado izquierdo del vehículo, cuando se utiliza este tipo de frenado.

Para utilizar el control chopper, los trolebuses están equipados con un control electrónico ( Ref. 2.6 ), cuyas funciones coordinan la aceleración y frenado por medio de los pedales que acciona el operador.



- ① MOTOR DE TRACCION
- ② FLECHA CARDAN
- ③ DIFERENCIAL
- ④ BATERIA
- ⑤ COMPRESOR DE AIRE

- ⑥ MOTOR DEL COMPRESOR
- ⑦ TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE AIRE
- ⑧ GOBERNADOR DEL COMPRESOR
- ⑨ CONTROL CHOPPER
- ⑩ DIRECCION

FIGURA 2.4 PRINCIPALES COMPONENTES SOBRE EL CHASIS

## 2.3 Funcionamiento.

### 2.3.1 Alimentación.

La alimentación de CD se hace a una tensión de 600 Volts, valor encontrado como el más adecuado por los fabricantes de trolebuses en el mundo ( Refs. 2.2, 2.7 y 2.8 ).

Por medio de dos zapatas de carbón renovables ( Fig. 2.5 ), una por cada polo eléctrico, los colectores de corriente están en contacto con los alambres de trole. La recepción de energía se efectua mediante el equipo receptor de corriente mostrado en la Figura 2.6 ).

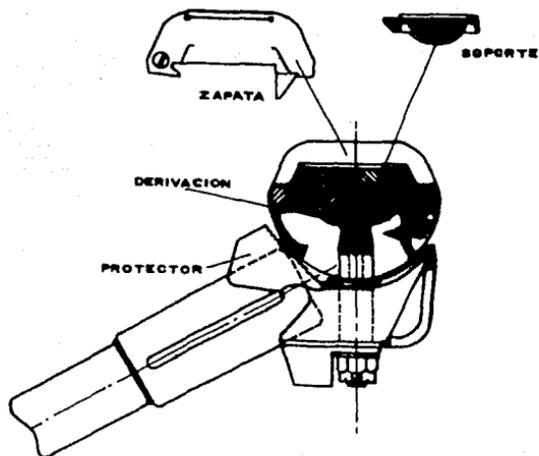


FIGURA 2.5 COLECTOR

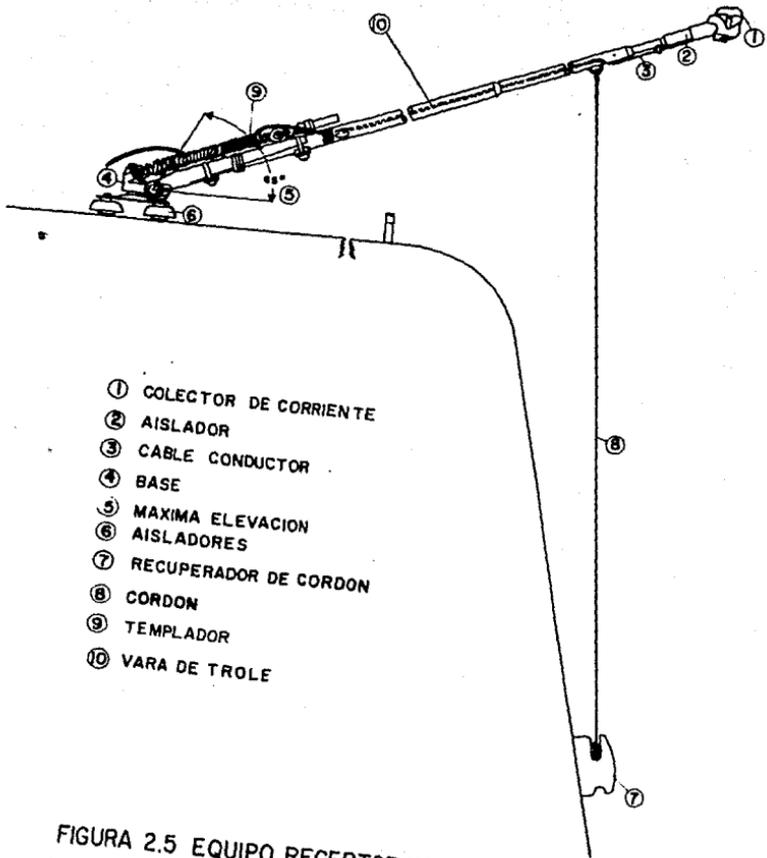


FIGURA 2.5 EQUIPO RECEPTOR DE CORRIENTE

Las dos varas articuladas que contienen al colector están montadas en una base aislada eléctricamente sobre el techo - del trolebus, mismas que son tubulares y contienen los cables de conexión entre los colectores y los diferentes sistemas de la unidad, las varas se van ajustando automáticamente mediante unos resortes en longitud conforme a las maniobras del vehículo en marcha lo requieran ( Ref. 2.9 ).

Existen dos hilos o cuerdas de material aislante conectadas a las varas, que regulan la presión ejercida sobre los colectores jalando hacia abajo ambas varas con ayuda de unos dispositivos llamados recuperadores de cordón, que retraen las cuerdas por la fuerza de un resorte que viene dentro de los recuperadores, éstos fijados en la parte trasera de la unidad, como se ve en la Figura 2.7.

### 2.3.2 Control Electrónico.

El control electrónico y el chopper intervienen en el arranque y frenado.

El control electrónico actúa en las operaciones de aceleración y frenado de acuerdo a un cierto valor de corriente fijado por medio del chopper, para establecer continuidad sobre los elementos que están bajo su influencia logrando las siguientes funciones :

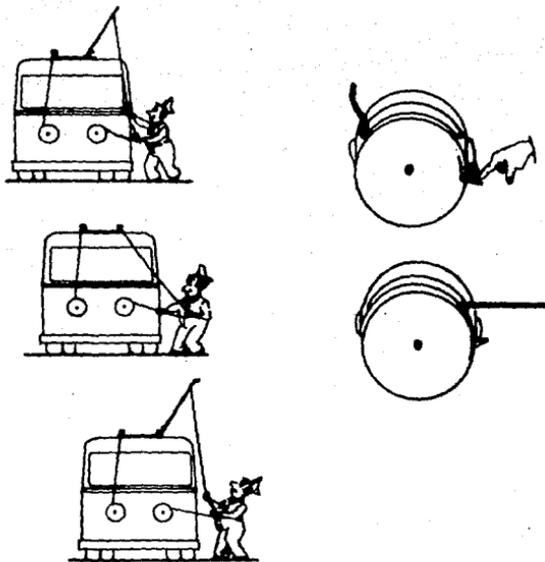


FIGURA 2.7 RECUPERADORES DE CORDÓN

- Establecer mediciones de tensión y de corriente como variables de operación.
- Recibir información y enviarla a los equipos convencionales de control.
- Controlar la corriente del motor a través de un controlador analógico con un sistema lógico de seguridad.

En la Figura 2.8 se muestra el diagrama de bloques del control electrónico para el chopper de tiristores ( Ref. 2. 6 ).

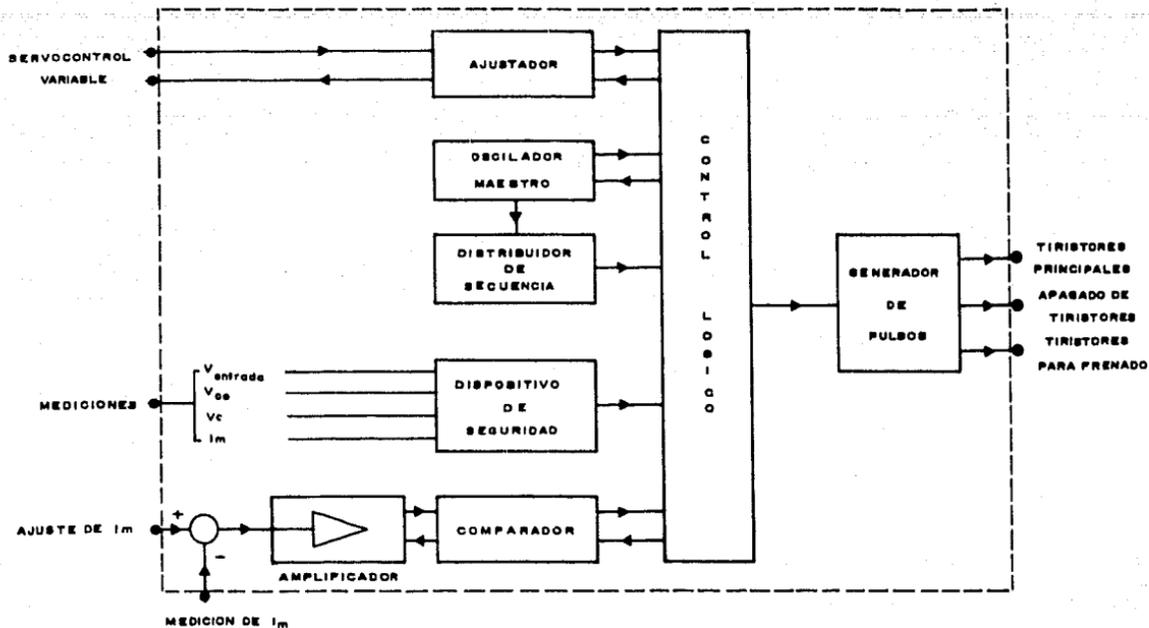
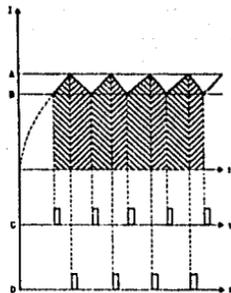


FIGURA 2.8 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL ELECTRONICO

### 2.3.3 Chopper.

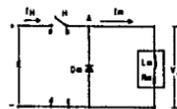
El chopper de tiristores es un convertidor de corriente -  
 continúa controlada que se basa en elementos semiconducto-  
 res funcionando a través de un circuito electrónico de conmutación a base de tiristores y diodos de potencia, que permite el control del motor. Con la operación del chopper, el motor de tracción se conecta a la tensión nominal de alimentación por medio de un tiristor principal, la corriente en el motor aumenta por la posición del pedal de aceleración, y entonces el control electrónico envía una señal de pulso a un tiristor auxiliar que tiene la función de interrumpir el circuito de alimentación cuando se llega a un valor máximo fijado con anterioridad -- ( Ref. 2.9 ). La corriente en el motor de tracción se mantiene por la acción de un diodo conectado en paralelo con el motor y decae exponencialmente hasta un valor límite fijado previamente; en ese momento el control electrónico envía un pulso hacia el chopper para que cierre nuevamente el circuito de alimentación al motor repitiéndose el ciclo continuamente, como se muestra en las curvas de la Figura 2.9 A.

En la Figura 2.9 B se muestra el diagrama del principio del chopper compuesto por una fuente de tensión de C.D. ( de valor " E " ), que alimenta una carga inductiva a través de un interruptor " H ". Además un diodo  $D_m$  está conectado en paralelo con la carga. El interruptor H se cierra regularmente en intervalos de tiempo T y permanece cerrado en un tiempo

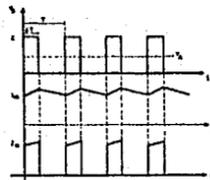


- A. CONDUITE VARIADA
- B. CONDUITE SINUS
- C. PULSO DE SENAL
- D. PULSO DE ABERTURA

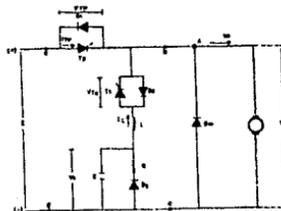
① PRINCIPIO DE CONTROL CHOPPER



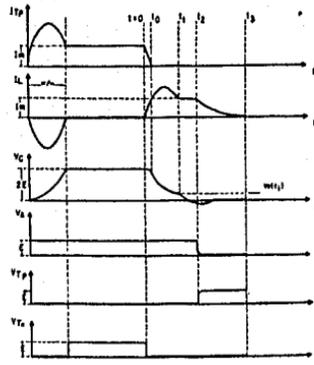
② DIAGRAMA DEL PRINCIPIO CHOPPER



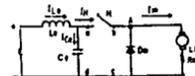
③ FORMAS DE ONDA DEL PRINCIPIO CHOPPER



④ CONTROL DE UN MOTOR CON CHOPPER



⑤ FORMAS DE ONDA DE OPERACION



⑥ CHOPPER CON FILTRO DE ENTRADA

FIGURA 2.9

$\delta T$ , donde  $0 \leq \delta \leq 1$ , como se muestra en la Figura 2.9C; "T" se denomina como el periodo de chopper y  $\delta$  es el ciclo de trabajo. La carga es sometida periódicamente a una tensión igual a la de la fuente por un tiempo  $\delta T$ , y luego a una tensión de cero por un tiempo igual a  $(1 - \delta) T$ .

Cuando el interruptor está abierto, la corriente  $I_m$  en la carga no puede interrumpirse debido a que ésta es inductiva. La función del diodo  $D_m$  llamado diodo de vfa libre, permite que la corriente  $I_m$  fluya en la carga cuando el interruptor  $H$  se abre; si la constante de tiempo  $L_m/R_m$  de la carga es más grande comparada con el periodo de chopper, la corriente no será cero a través de la carga.

Si la carga es un motor :

- a ) Cuando  $H$  está cerrado,  $I_m$  aumenta de acuerdo a la expresión :

$$E = L_m \frac{dI_m}{dt} + R_m I_m + f_{cem}$$

donde  $f_{cem}$  es la fuerza contraelectromotriz ( la carga es un motor ).

- b ) Cuando  $H$  está abierto,  $I_m$  disminuye de acuerdo a la expresión :

$$0 = L_m \frac{dI_m}{dt} + R_m I_m + f_{cem}$$

La tensión media a través de la carga es :

$$V_{med.} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} E dt = \left[ \frac{E}{T} (t) \right]_0^{\delta T} = \frac{E(\delta T)}{T} = \delta E$$

esta tensión es la que determina la corriente media que fluye en la carga.

Para controlar la tensión, corriente media, o cualquier otro parámetro, se puede variar el ciclo de trabajo  $\delta$ , el cual se fija automáticamente mediante una malla de control a un valor ajustado por el par de marcha.

Por lo tanto el chopper mantiene la carga a una tensión variable a partir de una tensión fija de C.D.; en la Figura 2.9 C se observan las formas de onda de esta tensión que se obtiene en la operación del chopper con una tensión de entrada de pulsos rectangulares de duración  $T$ .

El interruptor  $H$  se puede controlar en dos maneras, en la primera, la frecuencia del chopper se fija a un valor  $f = 1/T$ , el tiempo que el interruptor está cerrado, se varía de "0" a "T" mediante la variación del ciclo de trabajo. La segunda, consiste en seleccionar un tiempo fijo de cierre constante fijando  $\delta T$  haciendo variar  $T$ . La operación del chopper se puede entender mejor con ayuda del diagrama de la Figura 2.9 D, que representa el control de un motor con chopper.

Donde el interruptor  $H$  de la Figura 2.9 B se sustituye por un circuito chopper, formado por los elementos semiconductores  $T_p$ ,  $T_a$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ , y el circuito resonante serie LC. " $T_p$ " es el tiristor principal o de encendido y " $T_a$ " el tiristor auxiliar o de apagado. Un cir-

cuito dipolo compuesto del diodo D3 en serie con una resistencia --  
 " R " está conectado en paralelo con el capacitor " C ". El valor de R  
 es igual a  $(1/2) (\sqrt{L/C})$ .

En el proceso de operación del chopper se supone lo siguiente :  
 que opera en estado estable, la constante de tiempo de la carga es --  
 muy grande comparada con el periodo del chopper y que  $I_m$  se man--  
 tiene casi constante.

El proceso de encendido del tiristor principal  $T_p$  en el tiempo -  
 $t = 0$  ( en el origen Fig. 2.9 E ) se inicia aplicando un pulso en su ---  
 compuerta, aplicando la tensión E a las terminales de la carga y al  
 circuito resonante LC por medio del diodo  $D_2$ ; el capacitor C se -  
 carga para que más tarde se descargue durante el proceso de apaga-  
 do; la corriente  $I_L$  que fluye en el circuito de apagado se calcula re-  
 solviendo la siguiente ecuación :

$$E = -L \frac{dI_L}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t -I_L dt + V_0$$

cuyas condiciones iniciales son dadas por :

$$I_L (0) = 0$$

$$V_C (0) = V_0 = 0$$

despreciando las pérdidas en el circuito resonante LC y considerando  
 las condiciones iniciales se obtiene la solución de la ecuación anterior :

$$-I_L = E \sqrt{C/L} \operatorname{sen} \omega t$$

$$V_C = E(1 - \cos \omega t)$$

$$\text{donde } \omega = \sqrt{1/LC} .$$

Analizando las Figuras 2.9 D y 2.9 E se tiene que en  $t = \pi/\omega$ , la corriente  $I_L$  es cero y tiende a cambiar de sentido debido a que el tiristor  $T_a$  no conduce permaneciendo la corriente  $I_L$  en cero y la tensión en el capacitor llega a un valor  $2E$ .

En el tiempo  $t = 0$  el tiristor auxiliar  $T_a$  descarga al capacitor  $C$ , cerrando un circuito formado por el paralelo entre el tiristor  $T_p$  y el diodo  $D_1$ , la fuente  $E$ , el capacitor  $C$  y el reactor  $L$ .

En la Figura 2.9 E se tienen las 3 fases del proceso de apagado de  $T_p$ , como sigue :

#### Primera fase ( $0 \leq t \leq t_1$ )

Durante esta fase el punto "A" del circuito está a un potencial "E" y la corriente  $I_L$  está definida por la ecuación :

$$2E - \frac{1}{C} \int_0^t I_L dt = L \frac{dI_L}{dt} + E$$

donde las condiciones iniciales son :

$$I_L(0) = 0$$

$$V_C(0) = 2E$$

tomando en cuenta esto, tenemos que :

$$I_L = E \sqrt{C/L} (\sin wt)$$

$$V_C = E (1 + \cos wt)$$

para  $0 \leq t \leq t_1$

Entre el tiempo  $t = 0$ , cuando  $I_L = 0$  y el tiempo  $t = t_0$  cuando  $I_L = I_m$ , la corriente disminuye gradualmente en el tiristor  $T_p$  hasta el valor cero. En este punto una corriente de valor  $(I_L - I_m)$  fluye en el diodo  $D1$  hasta que la corriente  $I_L$  sea menor que  $I_m$ . Esto ocurre cuando  $t = t_1$ , el cual está definido por la ecuación :

$$I_L(t_1) = E \sqrt{C/L} (\sin wt_1) = I_m.$$

donde  $\pi/2 < wt_1 < \pi$

En tanto que la tensión en el capacitor  $C$  en el tiempo  $t_1$  es igual a :

$$V_C(t_1) = E(1 + \cos wt_1) = E \left[ 1 - \sqrt{1 - \left| \frac{I_m}{E\sqrt{C/L}} \right|^2} \right]$$

Segunda fase ( $t_1 \leq t \leq t_2$ )

Desde el tiempo  $t = t_0$ , el dipolo formado por  $T_p$  y  $D1$  en paralelo cesa de conducir para que  $(t_1 - t_0)$  sea mayor que el tiempo de encendido del tiristor principal  $T_p$  y el circuito de la Figura 2.9 B esté abierto. Una nueva descarga del capacitor  $C$  en el circuito debe de considerarse desde que  $t = t_1$ . En este punto la tensión  $V_C(t_1)$  a través

de C es todavía positiva y el diodo de vía libre está polarizado en inversa por lo que no puede conducir. Desde este tiempo, el capacitor C se descarga por la corriente de carga  $I_m$ . Manteniendo esta descarga a  $I_m$  constante, continúa hasta que  $t = t_2$  donde la tensión  $V_C$  cambia de signo. Por lo tanto podemos escribir :

$$I_L(t) = I_m$$

$$V_C(t) = V_C(t_1) - \left[ \frac{I_m(t - t_1)}{C} \right] \quad \text{para } t_1 \leq t \leq t_2$$

el tiempo  $t_2$  es definido por la ecuación :

$$V_C(t_2) = V_C(t_1) - \left[ \frac{I_m(t_2 - t_1)}{C} \right] = 0$$

o sea :

$$t_2 = \left[ \frac{CV_C(t_1)}{I_m} \right] + t_1 .$$

Tercera fase ( $t \geq t_2$ )

En  $t = t_2$ , se considerará un nuevo circuito de descarga para C. Cuando la tensión  $V_C$ , tiende a cambiar la polaridad, parte o toda la corriente de carga puede ser eliminada por la acción del diodo  $D_m$ . Para  $t \geq t_2$ , el potencial en el punto "A" es cero. Para conocer el comportamiento de  $I_L$  y  $V_C$  desde que  $t = t_2$ , se toma un nuevo punto de origen en las siguientes ecuaciones :

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_C$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^t \left( -I_L - \frac{V_C}{R} \right) dt$$

donde las condiciones iniciales son :

$$I_L(0) = I_m$$

$$V_C(0) = 0$$

Como  $R = (1/2) \left( \sqrt{L/C} \right)$  tenemos lo siguiente :

$$I_L = I_m \left( e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left( 1 + \frac{t}{\tau} \right).$$

$$\text{donde } \tau = 2RC = \sqrt{LC}$$

$$V_C = -I_m \sqrt{L/C} \left( t/\tau \right) \left( e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Se observa que la corriente  $I_L$  y la tensión  $V_C$  tienden rápidamente a cero. En el tiempo  $t_3$  el proceso de apagado del tiristor  $T_p$  se completa y la tensión  $V_C$  a través del capacitor es cero, por lo que nuevamente puede entrar en operación el tiristor  $T_p$  aplicando un nuevo pulso en su compuerta.

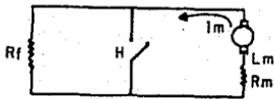
Anteriormente la fuente de alimentación era una fuente " E " de impedancia interna cero ( por ejemplo una batería ) y en esta caso de una fuente de C.D. ( como una subestación rectificadora ) por medio de una línea aérea, en los sistemas de trolebuses, es esencial proveer una sección de filtrado entre el chopper y la línea, compuesta en su forma más simple por un reactor "  $L_e$  " y un capacitor "  $C_e$  ", como el mostrado en la Figura 2.9 F. La función del capacitor "  $C_e$  " es-

almacenar energía, reduciendo las sobretensiones que se presenten en la entrada del chopper. El reactor " L<sub>e</sub> " reduce o amortigua el rizado de la corriente en la línea elevada, hasta una amplitud lo suficientemente baja como para no afectar el funcionamiento de otras unidades.

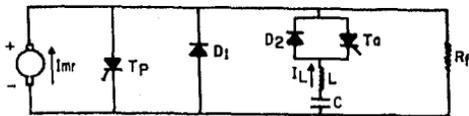
#### 2.3.4 Frenado eléctrico con chopper.

Generalmente se utilizan dos métodos de frenado eléctrico: el frenado reostático y el frenado regenerativo. Cuando el vehículo frena la energía cinética del mismo se convierte en energía eléctrica ya que el motor de tracción en ese momento opera como generador. En el frenado reostático, la energía eléctrica se disipa como calor a través de resistencias instaladas en el vehículo, mientras que en el frenado regenerativo esa energía es " regresada " a la fuente de alimentación por medio de la línea elevada.

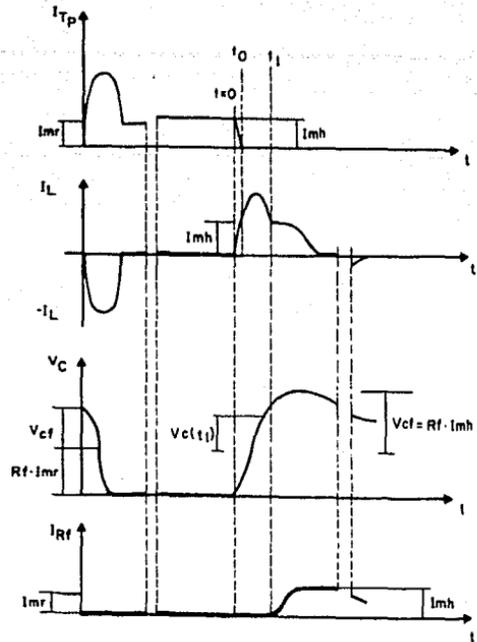
En el diagrama de la Figura 2.10 A se muestra el principio de operación de frenado reostático. El motor con excitación serie se representa con una inductancia  $L_m$  y una resistencia  $R_m$ , además de la resistencia de frenado  $R_f$  y el chopper, representado por el interruptor H conectado en paralelo con el motor funcionando como generador. El interruptor opera a la frecuencia  $f = 1/T$ , permaneciendo cerrado por un tiempo  $\delta T$ , donde  $0 \leq \delta \leq 1$ ; cuando está cerrado la tensión en la resistencia es cero; cuando está abierto es igual a  $R_f \cdot I_m$ .



(A) PRINCIPIO DEL FRENADO REOSTATICO



(B) PRINCIPIO DEL FRENADO REOSTATICO CON CHOPPER



(C) FORMAS DE ONDA DEL FRENADO REOSTATICO

FIGURA 2.10

La tensión media en un período del chopper es  $V_m = I_m \cdot R_f (1 - \delta)$ , además se prevé que  $(L_m/R_f)$  sea mayor que "T". - Este sistema trabaja como si el generador estuviera alimentando una carga resistiva de valor  $R_f (1 - \delta)$ . O sea que este dispositivo varía el valor de la resistencia equivalente del circuito desde cero para  $\delta = 1$ , hasta un valor máximo de  $R_f$  para  $\delta = 0$ . - En la Figura 2.10 B se muestra el diagrama esquemático de un chopper operando durante el frenado reostático.

Cuando el tiristor principal  $T_p$  se enciende como se muestra en la Figura 2.10 C, la corriente del motor es  $I_{mr}$ , el capacitor C se carga a una tensión de  $V_{cf} = R_f \cdot I_{mr}$ . Desde este punto la corriente del motor puede fluir en el tiristor principal y aumentar durante un tiempo  $T_1 = \delta T$ ; sin embargo para un valor máximo de oscilación de la corriente de  $I_L$  la polaridad de la tensión del capacitor se invertirá de  $(V_{cf})$  a  $(-V_{cf})$  a través de L, D2 y  $T_p$ . Cuando la corriente del motor alcanza el valor  $I_{mh}$  al final del período  $T_1$ , el tiristor  $T_a$  se enciende y bloquea a  $T_p$ ; desde que  $t = t_1$ , una corriente senoidal  $I_L$  fluye en el circuito compuesto por el capacitor C, el inductor L, el tiristor  $T_a$  y el dípolo formado por  $T_p$  en paralelo con D1. Desde que  $t = t_1$ , la corriente  $I_L$  en el valor  $I_{mh}$  (suponiendo que durante este proceso la corriente del motor permanece constante) empieza una oscilación amortiguada cuyo comportamiento depende del valor de  $R_f$ . Durante el tiempo  $T_2 = (1 - \delta) T$  la corriente del motor disminuye, pero

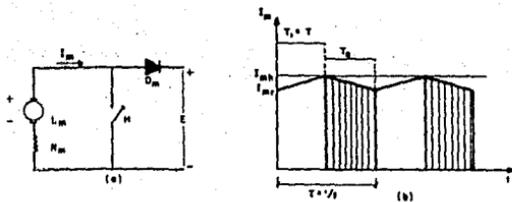
con un tiempo de variación bajo comparado con el periodo natural de oscilación del circuito LC. La tensión a través del capacitor C también continúa casi sin retraso respecto a la tensión de Rf por medio del diodo D1.

En la Figura 2.11 A se muestra el principio de operación del frenado regenerativo y su forma de onda correspondiente a la corriente. El chopper representado por "H", está conectado en paralelo con el motor. La tensión media en el mismo en uno de sus periodos es  $(V_H)_{med.} = E(1 - \delta)$ ; a fin de que la corriente  $I_m$  tenga un rizo pequeño el sistema se comporta como si el generador estuviera alimentando una resistencia de valor  $(E/I_m)(1 - \delta)$ . Para  $\delta = 1$  la resistencia equivale a cero, para  $\delta = 0$  tiene un valor de  $E/I_m$ . La corriente regresada a la línea, es nula cuando el interruptor está cerrado y es  $I_m$  cuando está abierto; debido a esto su valor medio en el periodo del chopper es  $I_m(1 - \delta)$ . Linealizando como anteriormente se hizo, las relaciones entre el flujo y la corriente del generador, la variación de  $I_m$  está dada por las siguientes ecuaciones:

$$I_m = \left[ N_s a / (R_m - N_s b) \right] \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] + I_{mr} e^{-\frac{t}{\tau}}; 0 \leq t \leq \delta T$$

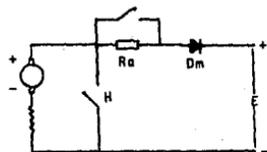
$$I_m = \left[ \frac{(N_s a) - E}{R_m - N_s b} \right] \left[ 1 - e^{-\frac{t - \delta T}{\tau}} \right] + I_{mh} e^{-\frac{t - \delta T}{\tau}}; \delta T \leq t \leq T,$$

donde  $\tau = L_m / (R_m - N_s b)$ ;  $N_s$  = velocidad (rpm); a y b, son ---

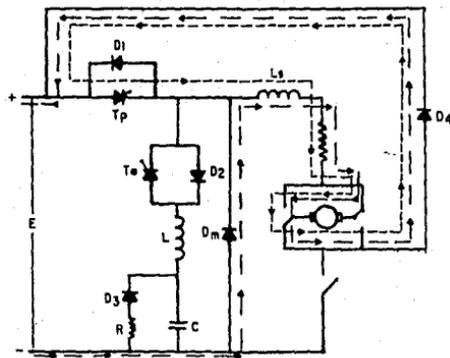


a) Principio de frenado regenerativo con chopper  
 b) Gráfica de la corriente.

Ⓐ FRENADO REGENERATIVO Y FORMAS DE ONDA



Ⓑ FRENADO REGENERATIVO A ALTAS VELOCIDADES



Ⓒ CIRCUITO DE OPERACION DE FRENADO REGENERATIVO

FIGURA 2.11

constantes dependientes del motor.

Para obtener un punto de operación estable se deben satisfacer las siguientes condiciones :

$$R_m < N \cdot b \quad \text{y} \quad (N \cdot a + N \cdot b \cdot I_{mh}) < (E + R_m \cdot I_{mh}).$$

El miembro de la izquierda de la segunda desigualdad nos da el valor de la fem desarrollada por el generador al final del intervalo  $T_1 = \delta T$ . Esta tensión debe por lo tanto ser menor que la tensión de la línea, más la caída óhmica en el motor. Cuando se requiere frenar a altas velocidades, es muy frecuente que no se satisfaga la segunda desigualdad. Para prevenir este caso se utiliza un circuito como el de la Figura 2.11 B en el que la resistencia  $R_a$  se inserta durante el frenado a alta velocidad y es eliminada tan pronto como la desigualdad antes mencionada se cumple, o sea cuando la velocidad del vehículo ha disminuido lo suficiente. La Figura 2.11 C nos muestra los cambios de conexiones que se llevan a cabo para el frenado regenerativo.

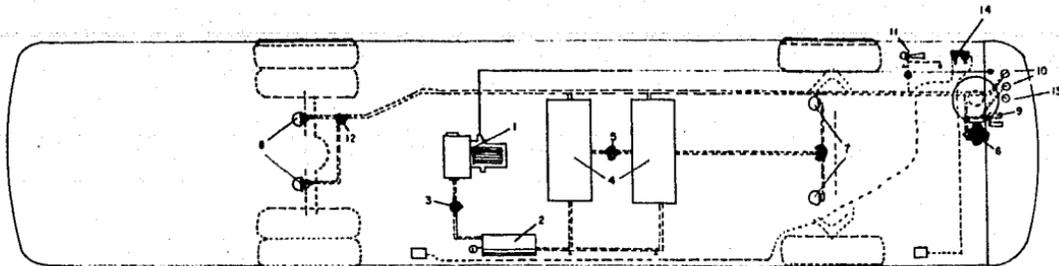
En este diagrama las líneas punteadas indican el circuito cuando el tiristor principal está en conducción; las líneas y puntos indican el circuito de apagado y los contactos se encuentran en la posición de frenado regenerativo.

Comparado con el circuito utilizado para frenado regenerativo, el circuito de frenado compuesto tiene un dipolo extra

en paralelo con el tiristor principal. Este dipolo comprende una resistencia de frenado  $R_f$  en serie con un tiristor de frenado auxiliar. La ventaja del frenado compuesto, es que utiliza un circuito que abarca los dos tipos de frenado descritos anteriormente, enviando solamente parte de la energía a la línea y disipando la restante a través de una resistencia.

### 2.3.5 Frenado Neumático.

Este tipo de frenado opera de manera parecida a la de los vehículos de transporte, con motor de gasolina. Un diagrama de la tubería del equipo de aire para frenado se muestra en la Figura 2.12 con la localización relativa del sistema de frenado de aire y cómo es usado en un trolebus ( Ref. 2.10 ). Un motor acciona el compresor, el cual con ayuda de un filtro abastece el aire comprimido para usar en el sistema de frenado. Un regulador ( gobernador ) del compresor eléctrico controla automáticamente la operación del compresor de aire entre dos valores extremos máximo y mínimo de presión, predeterminados. Una válvula de seguridad protege contra una presión excesiva del tanque principal del gobernador, en cualquier caso de operación anormal. Dos tanques de depósito principales, a los que se conduce el aire comprimido desde el compresor, enfrían el aire y lo almacenan para su uso posterior. Una válvula de retención ( check ) en el tubo de los tanques previene la pérdida de presión del mismo en el caso de una falla en



- |   |                                   |    |  |
|---|-----------------------------------|----|--|
| 1 | motocompresor                     | 8  | cámaras de frenado traseras                                      |
| 2 | governador (regulador)            | 9  | pedal de frenado   |
| 3 | válvula de seguridad              | 10 | mandímetros de aguja   |
| 4 | tanques de almacenamiento de aire | 11 | bocina de aire   |
| 5 | válvula de retención              | 12 | interruptor de parada  |
| 6 | válvula de frenado                | 13 | indicador de baja presión  |
| 7 | cámaras de frenado delanteras     | 14 | válvula de presión diferencial<br>(apertura y cierre de puertas) |

FIGURA 2.12 EQUIPO NEUMATICO

la manguera de conexión de la descarga del tubo y el compresor de aire.

Una válvula de freno, operada por el pedal de frenado, controla la operación en el frenado permitiendo el paso del flujo de aire de los depósitos a las cámaras de frenado de las ruedas cuando se oprime el pedal, y de las cámaras de frenado a la atmósfera cuando se deja en posición libre el pedal.

Dos manómetros de aguja, localizados en el tablero de instrumentos, indican la presión del aire de los tanques y en las cámaras de frenado. La energía almacenada del aire comprimido se convierte en una fuerza mecánica aplicada a las zapatas de freno de las ruedas.

Otros accesorios y conexiones son los siguientes: la señal de alarma, que consiste de una bocina de aire, una válvula de silbato, un filtro, un grifo de salida y un conector de tubería; una válvula de alivio (de expulsión) rápida, en la línea de las cámaras delanteras sirve para aumentar la velocidad de escape del aire en las ruedas delanteras en el frenado al utilizar el interruptor de "parada" localizado en la parte posterior sobre la línea que va a las cámaras posteriores, se cierra el circuito de parada de las luces traseras cada vez que el frenado es aplicado. Un indicador de baja presión, instalado entre los dos tanques de depósito, indica si la presión baja en los mismos a un valor menor al límite fijado previamente. El tubo de metal entre la válvula de frenado y los tanques es el medio por

el que se abastece de aire comprimido; cada cámara de frenado se conecta a la válvula de frenado por conexiones flexibles y también una tubería metálica sirve como medio de comunicación con el que el operador ( por la manipulación propia del pedal de frenado de la válvula ) puede accionarla abasteciéndolo de aire o expulsándolo de las cámaras. El motocompresor es eléctrico y se alimenta directamente de la tensión de la línea del trolebus. La apertura y cierre de puertas opera por medio de una válvula de tipo presión diferencial que acciona los dispositivos de las puertas localizadas abajo de las mismas. Estos dispositivos en forma de cilindro son accionados por un control de válvulas que opera el conductor.

#### 2.4 Especificaciones de un trolebus de fabricación nacional.

La industria mexicana actual ( 1979 ) está en posibilidades de -- construir unidades completas de trolebuses, puesto que todos los elementos que la componen se fabrican en el país, a excepción de algunos elementos semiconductores del control chopper, aunque se cuenta con la infraestructura necesaria para desarrollarlos en un futuro cercano.

Las especificaciones generales de un prototipo de trolebus, hecho por una empresa mexicana ( Ref. 2.11 ) son las siguientes :

##### Características de marcha

Velocidad máxima	60 km/h
Aceleración máxima	3.15 km/h/seg.

Desaceleración máxima	4 km/h/seg.
Pendiente máxima con carga ( Fig. 2.13 )	11° ( 120 ‰ ).
Fuerza de varas a línea de trole	12 kg.
Alturas de la línea de trole :	
	Máxima 7 m
	Mínima 5.5 m
Radio de giro exterior ( Fig. 2.14 )	10.56 m
Radio de giro interior	5.03 m

### Peso

Vehículo completo sin carga	10 500 kg.
Capacidad de carga máxima	6 800 kg.
Vehículo completo con carga	17 300 kg.

### Carrocería

#### Materiales y accesorios :

- . Para la estructura se emplea perfil tubular rectangular de acero y con protección anticorrosiva de fosfato de zinc.
- . Bases para estribos de lámina de acero.
- . Laminación exterior de acero tratada en frío y sujeta con remaches de aluminio con alma de acero.
- . Parabrisas tipo envolvente de vidrio de seguridad laminado dividido al centro, cada cristal a 1.07 metros.
- . Cuatro ventanillas en cada costado, tipo deslizable en la parte superior y fijas en la parte inferior, hechas con material de aluminio pulido.

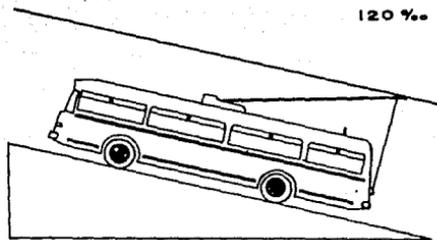


FIGURA 2.13 PENDIENTE MAXIMA

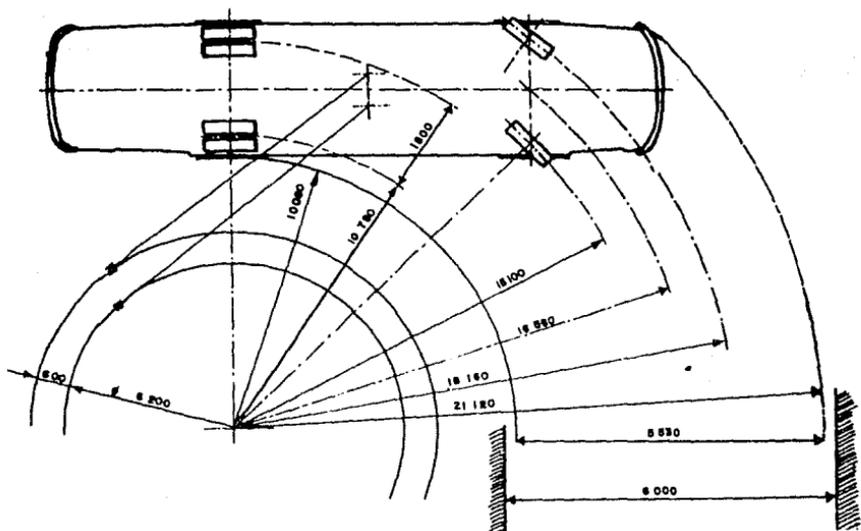


FIGURA 2.14 RADIO DE GIRO

- Registros interiores para mantenimiento de :
  - a ) Motor de tracción.
  - b ) Equipos de control.
- Puertas exteriores para revisión de :
  - a ) Equipos de control.
  - b ) Grupo motor-compresor.
  - c ) Banco de baterías.

En la Figura 2.15 se muestra una vista general de la unidad.

### Equipo mecánico

- Dirección : tipo leva-manual, cuya relación es 27:1, con un volante de diámetro 558.8 mm. Ligada con el eje delantero tipo viga "I" Elliot invertido y capacidad de carga 5 454 kg.
- Transmisión mecánica con cardán : es un dispositivo con juntas universales, y que transmite la potencia de tracción por tornillos sinfín de engranaje diferencial al eje trasero el cual tiene engranajes cónicos helicoidales de relación 11.59:1 y capacidad de carga de 11 363 kg.
- Suspensiones : para el eje delantero es del tipo muelles semielípticos de acero con dos amortiguadores hidráulicos telescópicos; para el eje trasero es del mismo tipo, pero con cuatro amortiguadores.
- Frenos de servicio : neumáticos, tipo expansión interna :
 

Dimensión nominal delantera	41.91 x 12.7 cm.
-----------------------------	------------------



Dimensión nominal trasera 36.83 x 25.4 cm.

Area del diafragma cámara delantera 60.96 cm<sup>2</sup>

Area del diafragma cámara trasera 76.2 cm<sup>2</sup>

- Compresor tipo recíprocante, con dos cilindros, autolubricado y enfriado por aire, capacidad de 340 lts/min.
- Freno de estacionamiento y emergencia: Tipo neumático, a resorte operado en ruedas traseras, operación manual para estacionamiento y automático para emergencia. Presión de accionamiento del freno de emergencia de - - - 2.111 kg/cm<sup>2</sup> ( 30 lb/pulg<sup>2</sup> ).
- Ruedas y llantas : seis ruedas tipo disco con diez birlos de 20.32 x 55.88 cm. ( 8 X 22 pulgadas ); seis llantas - de hule tipo bias con cámara, de 27.94 x 55.86 cm. ---- ( 11 x 22 pulgadas ).

### Equipo eléctrico

#### Motor de tracción

- Motor de C.D. con 4 polos, excitación serie, diseño especial para control chopper.
- Tensión nominal 600 volts C.D.
- Capacidad 105 KW
- Corriente de armadura 195 Amp.
- Corriente de campo 7 Amp.
- Velocidad 1 700 r.p.m.
- Máxima velocidad permisible 4 500 r.p.m.

- . Aislamiento clase F epóxico moldeado.
- . Bastidor : cilindro con soportes de hule y registros para inspección.
- . Armadura : construida de laminación de acero con ductos de ventilación longitudinales y flecha rectificada.
- . Conmutador : segmentos de cobre endurecidos con aislamientos de mica.
- . Bobinas de campo : con doble aislamiento de vacfo con resina epóxica.
- . Porta escobillas : son cuatro, ajustables radialmente con resortes de acero.
- . Ventilador atornillado a la armadura.
- . Polaridad : línea derecha 1/( - ), línea izquierda ( + ), - constante.

#### Motor auxiliar para el compresor

- |             |                |
|-------------|----------------|
| . Tensión   | 600 volts C.D. |
| . Corriente | 3.67 Amp.      |
| . Capacidad | 2.2 KW.        |

#### Control chopper

- . Control principal : con tiristores y diodos con circuito -- impre so.
- . Montaje : caja de fibra de vidrio.

---

1/ Las direcciones ( derecha e izquierda ) se refieren al sentido normal de circulación del trolebus.



### Alumbrado interior

- . 14 lámparas fluorescentes con una capacidad de 40 Watts cada una, con reactor transistorizado, tensión a 12 volts C.D.
- . Luz del operador tipo incandescente, a 12 volts C.D.
- . . Luces de estribos tipo incandescente, a 12 volts C.D.
- . Luces de emergencia, alimentadas por baterías, tipo incandescente, con circuito independiente.

### Alumbrado exterior

- . Luces de camino dobles.
- . Luces de posición.
- . Luces de letrero de ruta.
- . Luces direccionales.
- . Luces de estacionamiento o emergencia.
- . Luces marcadoras laterales.
- . Luces de parada ( alto ).
- . Luces de aviso en tablero.
- . Falla del convertidor C.D. -C.D.
- . Sobrecarga del circuito de tracción.
- . Falla de tensión en la línea.
- . Falla del ventilador del reactor principal.
- . Vehículo listo para operar.
- . Alumbrado del tablero.
- . Freno de mano aplicado.

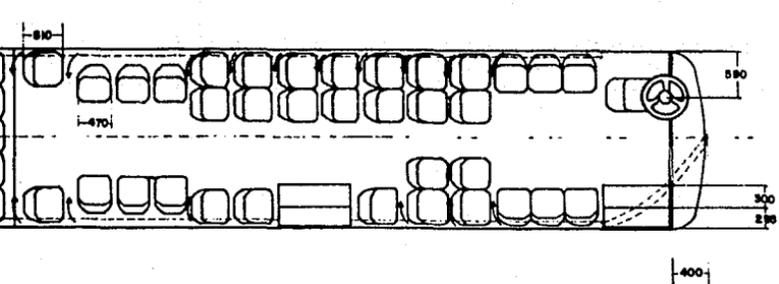
### Accesorios

- . Voltmetro para batería.
- . Ampérmetro para circuito de tracción.
- . Velocímetro con cuenta kilómetros.
- . Manómetro para sistema neumático.
- . Bocinas de claxon : 2, eléctricas.
- . Limpia-parabrisas: 2, neumáticos independientes.
- . Lava-parabrisas: eléctrico, 12 volts C.D., con depósito de 3.5 litros de agua.
- . Desempañador : eléctrico, 12 volts C.D., de aire fresco.
- . Extintor : para incendios, tipo A, B, C, a base de gas -- BCF, capacidad 2.5 litros.
- . Ventilador de operador : eléctrico, 12 volts C.D., dos velocidades.
- . Ventilación : dos ventanillas de toldo, con cubierta metálica de 60 x 65 cm, ajustables a 6 posiciones. ( Figura 2.16)

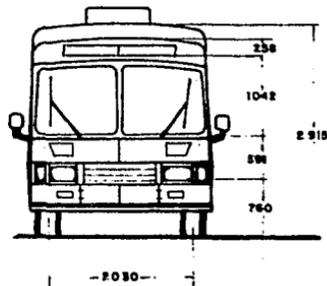
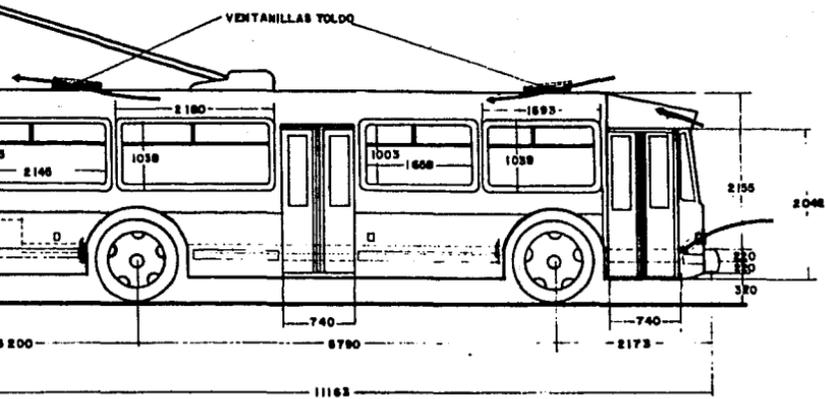
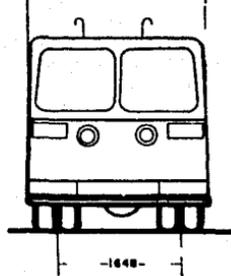
### 2.5 Trolebuses para servicios sociales.

Se ha contemplado como complemento al servicio que prestan los trolebuses, la aplicación de éste para otros servicios sociales a los usuarios mediante unidades especiales adaptadas para :

- Servicio Médico, - Consulta externa, vacunación, rayos "X", análisis clínicos, etc.
- Promociones sociales y culturales, - Divulgación de libros, pro



AREA TOTAL = 80.888 m<sup>2</sup>



ES EN mm

UN

yección de películas educativas, etc.

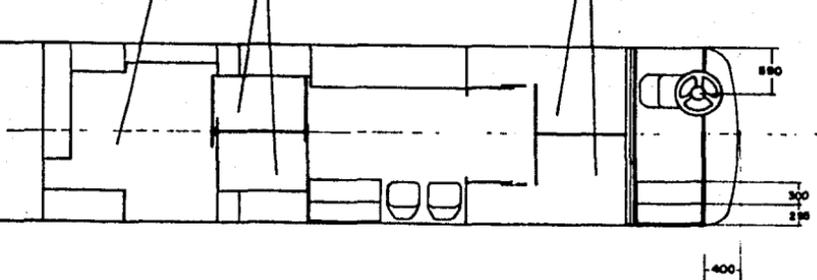
- Servicios comerciales de tipo popular. - Víveres, ropa, etc.
- Cobro de servicios públicos. - Contribución predial, agua, energía eléctrica, etc.
- Servicio de correos y telégrafos.
- Recolección de basura. - sobre las rutas y en las horas fuera de servicio normal del transporte de pasajeros.

A manera de ejemplo se da una idea general en la Figura 2.17 como sería un trolebus para servicio médico. Este vehículo se estacionaría en los diferentes parques o plazas de la ciudad en donde prestaría sus servicios.

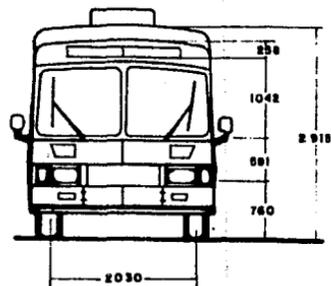
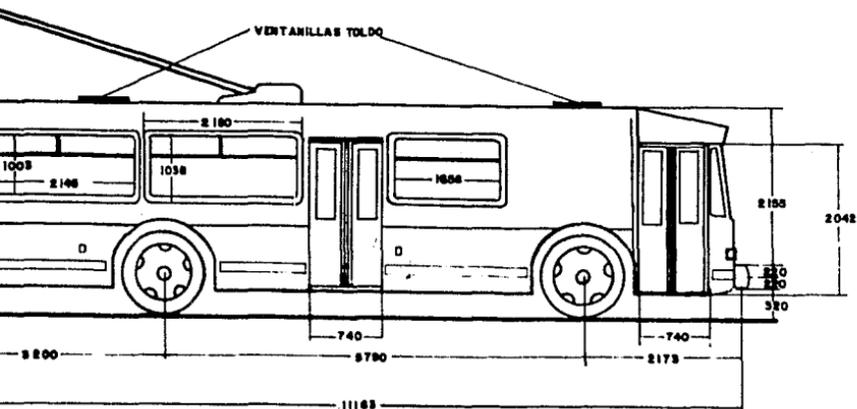
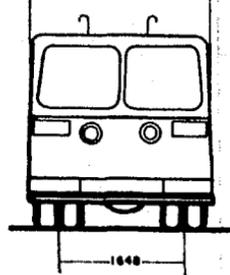
## 2.6 Talleres.

Para la proposición de los talleres de servicio y depósito de trolebuses se deberá realizar un estudio detallado junto con la elaboración de un buen programa de mantenimiento, por lo que en este estudio sólo se presenta una breve descripción del tipo de taller y sus dimensiones ( Ref. 2.9 ), como se muestra en la Figura 2.18 :

- 01 - Talleres de vehículos para todos los grados de mantenimiento preventivo de trolebuses.
- 02 - Edificio operativo de transporte, sala de despacho, sala de boletos, recibo de ingresos, sala para el personal operativo de reserva, guías de trolebuses, etc., combinado con portería.



AREA TOTAL = 20.688 m<sup>2</sup>



IONES EN mm

A - LABORATORIO

B - SALA DE CONSULTA

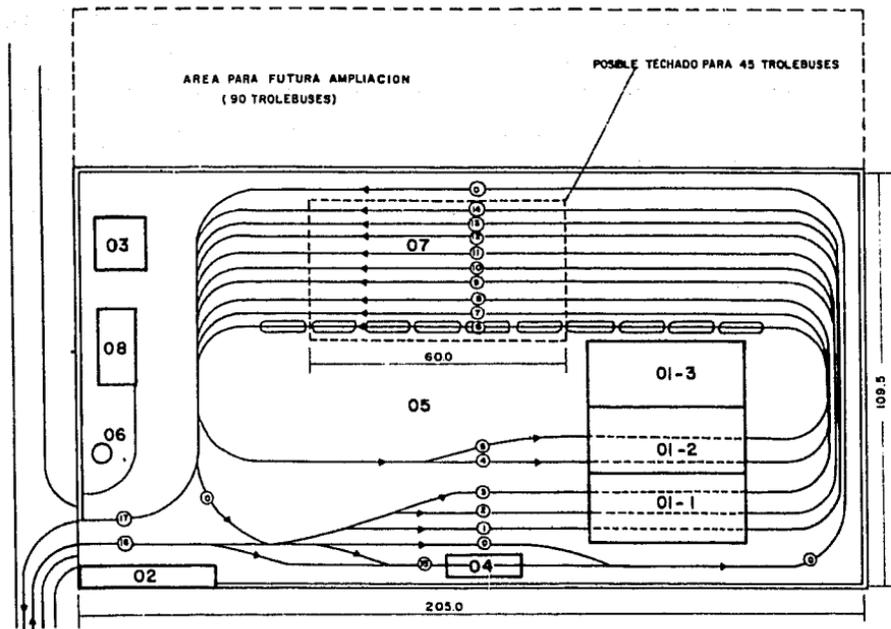


FIGURA 2.18 TALLERES Y DEPOSITO PARA 100 TROLEBUSES

- 03 - Estación conversora y transformadora para uso propio del depósito.
- 04 - Instalación de lavado automático.
- 05 - Superficie libre.
- 06 - Pozo.
- 07 - Estacionamiento de trolebuses.
- 08 - Taller de líneas de tracción, subestaciones y cables.

La proposición del arreglo del estacionamiento y de todas las líneas de trolebuses toma en consideración el sistema progresivo de ejecutar el mantenimiento preventivo en la línea donde los vehículos van al personal de mantenimiento que se encuentra ubicado en un lugar sin necesidad de perder tiempo marchando a los mismos. El estacionamiento y todas sus vías de transporte deben facilitar la circulación en una dirección a los trolebuses evitando volverse atrás.

Además se recomienda no concentrar más de 200 trolebuses <sup>1/</sup> porque esta cantidad, según la Referencia 2.9 es la óptima en la cual existe garantía de perfecto y económico aprovechamiento de las instalaciones. Si en el futuro es necesario aumentar la cantidad de trolebuses a más de 200, se recomienda construir un nuevo estacionamiento en otro extremo de la ciudad. La concentración de mayor cantidad en un lugar tendría en consecuencia el aumento de vehículo-kilómetros desperdiciados por los viajes del estacionamiento a la línea.

---

<sup>1/</sup> Cabe hacer notar que esta indicación es para el caso de contar con una instalación con una cantidad de trolebuses de esta magnitud. En el caso para la ciudad de Toluca las dimensiones son las sugeridas en la Figura 2.13.

## LISTA DE FIGURAS

- 2.1.- Curvas de par-corriente para dos tipos de motores de C.D.
- 2.2.- Características par-velocidad para motor serie.
- 2.3.- Curva esfuerzo-velocidad.
- 2.4.- Principales componentes sobre el chasis.
- 2.5.- Colector.
- 2.6.- Equipo receptor de corriente.
- 2.7.- Recuperadores de cordón.
- 2.8.- Diagrama de bloques del control electrónico.
- 2.9. A.- Principio de control chopper.
- 2.9. B.- Diagrama de principio chopper.
- 2.9. C.- Formas de onda del principio del chopper.
- 2.9. D.- Control de un motor con chopper.
- 2.9. E.- Formas de onda de operación.
- 2.9. F.- Chopper con filtro de entrada.
- 2.10.A.- Principio del frenado reostático.
- 2.10. B.- Frenado reostático con chopper.
- 2.10. C.- Formas de onda del frenado reostático.
- 2.11. A.- Frenado regenerativo y formas de onda.
- 2.11. B.- Frenado regenerativo a altas velocidades.
- 2.11. C.- Circuito de operación de frenado regenerativo.
- 2.12.- Equipo neumático.
- 2.13.- Pendiente máxima.

- 2.14- Radio de giro.
- 2.15. - Vista general del trolebus.
- 2.16.- Ventilación y calefacción.
- 2.17.- Unidad de servicios médicos.
- 2.18.- Talleres y depósito para 100 trolebuses.

## LISTA DE REFERENCIAS

- 2.1 Bianchi S. Ernesto Ing., Ponencia " La tracción eléctrica: futuro - del transporte eléctrico en México ", GI y C. Diesel Nacional, Complejo Industrial, Cd. Sahagún, México, 1977.
- 2.2 Starr A.T., " Generation Transmission and Utilization of Electrical Power ", Sir Isaac Pitman and Sons, LTD.
- 2.3 Padilla Luis Alfonso, " Selección, diseño y fabricación de motores - de tracción eléctrica ", artículo, Boletín de Información del Instituto de Investigaciones Eléctricas ( IIE ), Vol. 2, Número 10, Octubre - 1978.
- 2.4 Chávez E. Baltazar Ing., Información directa, Sistema de Transporte Colectivo, Metro, México, D.F., 1979.
- 2.5 Bianchi S. Ernesto Ing., Información directa, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Palmira Cuernavaca, México, 1978.
- 2.6 J. Gouthier, J. Gregorie and H. Hologne, " Thyristor Choppers in Electric Traction ", Review 2, ACEC, Bélgica, 1976.
- 2.7 Bianchi S. Ernesto Ing., " Estudio a nivel perfil del trolebus", Cd. Sahagún, México, 1977.
- 2.8 The Compagnia Generale di Electricita in Electric Transport, Italia.

- 2.9 Folletos de información de trolebuses Skoda Pzlen Checoslovaquia.
- 2.10 Mitsubishi, Electric Manufacturing Company, " Bus Transportation"  
Vol. 29, McGraw Hill Publishing Co. January-June, 1950 USA.
- 2.11 Especificaciones generales S-500-T de un prototipo de trolebus,  
hecho en Mexicana de Autobuses, S.A. de C.V. ( SOMEX ), Tultitlán,  
Edo. de México, 1978.

## CAPITULO TERCERO

### SUBESTACION TIPO

Descripción de la SE tipo propuesta para trolebuses de la ciudad de Toluca.

#### 3.1 Alimentación de C A .

La alimentación de la SE será de acuerdo a la alta tensión que permita el sistema eléctrico correspondiente a la zona de ubicación de la misma.

Se han propuesto dos subestaciones tipo tomando en cuenta la experiencia y sugerencias obtenidas en el STEDDF ( Ref. 3.1 ) ambas tienen esencialmente el mismo equipo con excepción del transformador cuya capacidad es de 1 200 KVA ó 2 300 KVA respectivamente.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama unifilar de la SE

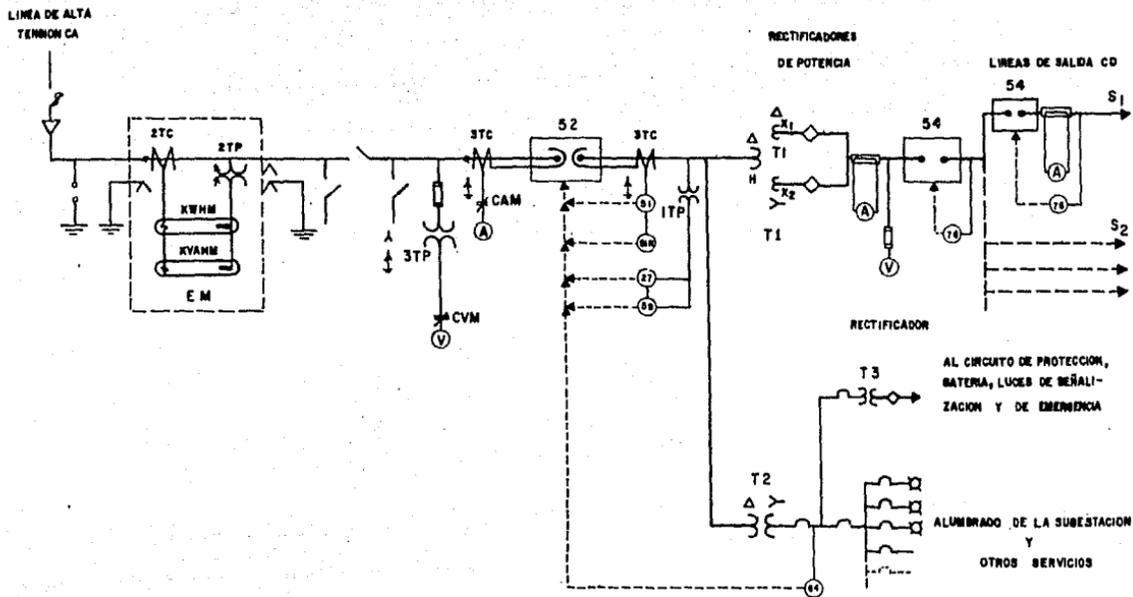


FIGURA 3.1 DIAGRAMA UNIFILAR

propuesta, con entrada en CA y varias salidas en CD.

Para la parte correspondiente a CA se propone una SE de tipo compacto convencional de tres secciones interperie. Externamente mediante un ducto metálico se conectan los transformadores:  $T_1$  que alimenta los rectificadores de potencia y  $T_2$  que proporciona los servicios propios de la SE.

### 3.2 Salida de CD.

El circuito rectificador es de tipo puente y se conecta a las seis fases del doble secundario en delta y estrella del transformador  $T_1$ . A la salida del rectificador se tiene la onda rectificada de CD que se muestra en la Figura 3.2 con un factor de ondulación de 0.010.

### 3.3 Circuito de CA.

La Compañía suministradora de energía proporciona el equipo de medición (EM) para la energía activa y reactiva.

Se considera conveniente para el servicio de la SE medir también tensión y corriente.

Por lo que respecta a protección se propone hacerlo por sobre corriente (50 - 51, 51N), alto voltaje (59) y bajo voltaje (27).

### 3.4 Circuito de CD.

Cuenta con medición de tensión y corriente; protección de sobrecorriente (76) y falla a tierra en el circuito general que opera el in-

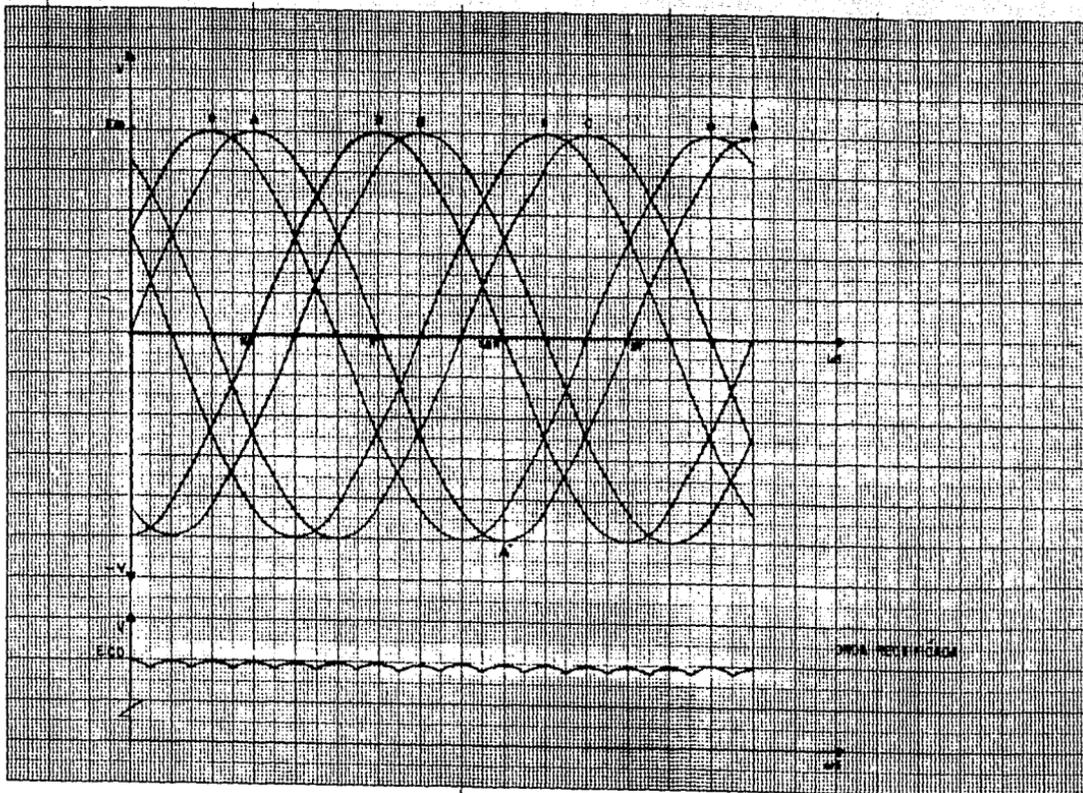


FIGURA 3.2 FORMAS DE ONDA

interruptor principal ( 64 ). Cada línea de salida de CD tiene su propia medición y protección de sobrecorriente ( 76 ).

El diagrama de la Figura 3.3 muestra el circuito de CD de cierre y disparo del interruptor general de la SE ( 52 ), un diagrama similar podrá hacerse para el interruptor principal de CD ó los individuales de cada línea de CD ( 54 ).

### 3.5 Panel de Alarmas.

En la Figura 3.4 se muestra el circuito del panel de alarmas.

### 3.6 Tablero.

Las partes frontal y posterior del tablero tipo túnel o duplex para control y medición se presentan en la Figura 3.5.

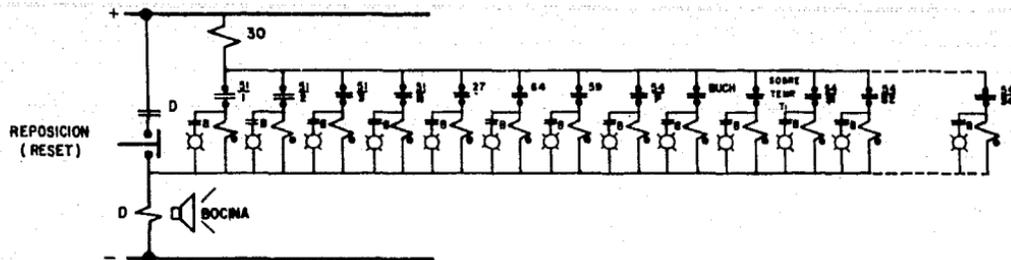
### 3.7 Distribución del equipo en el terreno.

En la Figura 3.6 se tiene en planta la forma de como podría distribuirse el equipo en el terreno destinado para una SE.

### 3.8 Especificaciones del equipo.

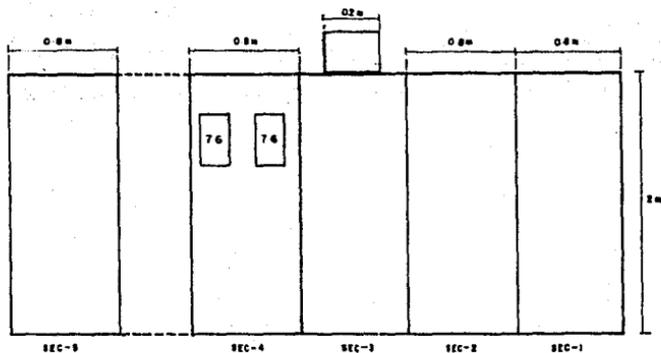
En las páginas siguientes se da un listado con las especificaciones de los equipos principales de la SE.



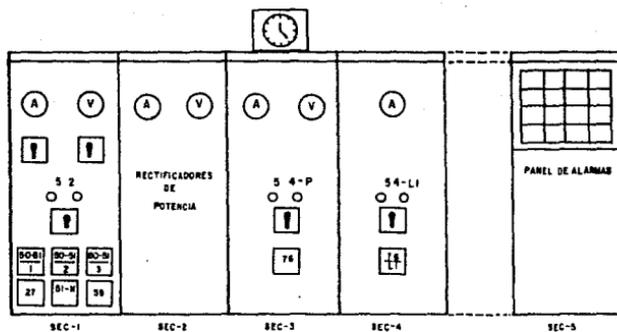


S1 SOBRE CORR	S1 SOBRE CORR NEUTRO	S9 SOBRE VOLT	SOBRE TEMP T1	S5
S1 SOBRE CORR	S7 BAJO VOLT	S4 V	S1	-
S1 SOBRE CORR	S4 FALLA A TIERRA	BUCH	S2	S8

FIGURA 3.4 PANEL DE ALARMAS



VISTA POSTERIOR



VISTA FRONTAL

FIGURA 3.5 TABLERO DE CONTROL Y MEDICION

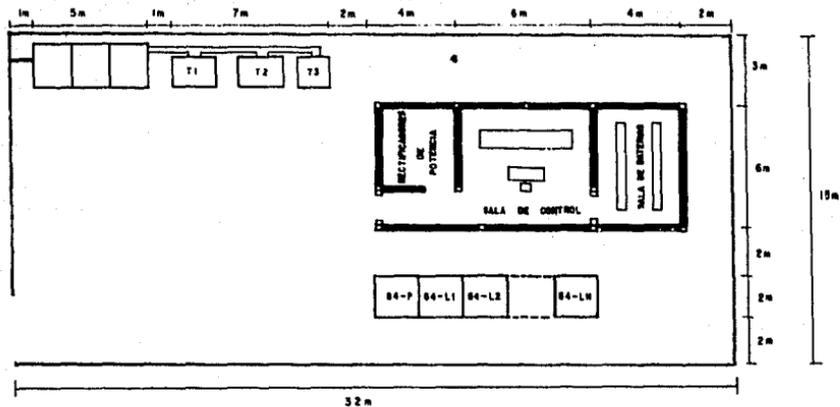


FIGURA 3-6 DISTRIBUCION DEL EQUIPO

NOMBRE DEL EQUIPO	CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	VALORES PARA CADA SE		NORMAS SEGUN NOTAS	
<b>CUCHILLAS DE PRUEBA</b>	CAPACIDAD NOMINAL	KVA	1000	2000		
	Tensión nominal	KV	23			
	Corriente nominal	A	600			
	Corriente instantánea	KA	61			
	Corriente a los 4 segundos	KA	38			
	Nivel básico de impulso (Bil)	KV	150			
	Onda de impulso	microseg.	1,2 x 50			
	Flameo en seco 60 Hz/min	KV	42			
	Perforación	KV				
	Radio influencia	60 Hz	KV	10		
		100 KHz	microvolts	50		
	Número de polos	-	3			
	Número de tiros	-	uno/polo			
	Servicio	-	interior			
Mecanismo de operación ( sólo para las cuchillas en grupo)	-	manual				
Altura de operación ( Toluca )	m. s. n. m.	2 700				
<b>APARTARRAYOS</b>	Tensión o capacidad nominal	KV	21			
	Tensión de descarga mínima a 60 Hz	KV	31,5			
	Tensión máxima de impulso cresta con onda de 1,5 x 40	KV	63			
	Tensión de impulso en cresta con onda ASA de frente plano	Prom.	KV	94		
		max.	KV	100		
	Tipo	-	autovalvular			
	Clase	KV	23			
	Servicio	-	intemperie			
	Altura ( Toluca )	m. s. n. m.	2700			
Tensión del sistema	KV	23				

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO Y DISPOSITIVOS PARA 2 TIPOS DE SUBESTACIONES SEGUN CAPACIDAD						
NOMBRE DEL EQUIPO	CARACTERISTICAS	UNIDAD	VALORES PARA CADA SE		NORMAS SEGUN NOTAS	
	CAPACIDAD NOMINAL	KVA	1000	2000		
TRANSFORMADOR T1	A.T.	Tensión nominal	KV	1/ 23 ( Del sistema )		
		Clase de aislamiento	KV	23 ( Del sistema )		
		Nivel básico de impulso ( BIL )	KV	150		
		Conexión	—	Delta		
		Derivaciones a la tensión nominal en H	%	+ 2.5		
	B.T.	SEGUN ESPECIFICACIONES GENERALES	Tensión nominal	V	620	
			Clase de aislamiento	V	600	
			Nivel básico de aislamiento (BIL)	KV	10	
			Conexión	—	Delta	
		SEGUN ESPECIFICACIONES GENERALES	Tensión nominal	V	570 entre fases	
			Clase de aislamiento	V	600	
			Nivel básico de aislamiento (BIL)	KV	10	
			Conexión	—	Estrella	
	GENERALES	Cantidad de fases	—	3 en H / 6 en X		
		Frecuencia	Hz	60		
		Clase de enfriamiento	—	OA/FA		
		Impedancia	—	5 al 8 %		
		Tipo de núcleo	—	columna		
		Sobre elevación de temperatura	°C	65		
		Altitud ( Toluca )	m. s. n. m.	2700		
Preservación de aceite		—	tanque sellado			
Sobre presión		—	válvula			
Tipo de servicio		—	Intemperie			
ACCESORIOS	Termómetro	—	X 2/			
	Nivel de aceite	—	X			
	Buccholtz	—	X			
	Válvulas de globo para filtrado de aceite	Pieza	2			
	Grifo de muestreo	—	X			
	Orejás de izado	—	X			
	Ruedas en la base	—	X			
Cambiador de taps sin carga	—	X				

1/ Para este ejemplo se tomó como base de AT la de 23 KV.

2/ Se requiere.

NOMBRE DEL EQUIPO	CARACTERISTICAS	UNIDAD	VALORES PARA CADA SE		NORMAS SEGUN NOTAS	
TRANSFORMADOR T2	CAPACIDAD NOMINAL	KVA	1000	2000		
	A.T.	Tensión nominal	KV	23		
		Clase de aislamiento	KV	23		
		Nivel básico de aislamiento ( BIL )	KV	150		
		Conexión	—	Delta		
		Derivaciones a la tensión nominal en II	%	± 2.5		
	B.I.	Tensión nominal	V	220/127		
		Clase de aislamiento	V	220		
		Nivel básico de aislamiento ( BIL )	KV	10		
		Conexión	—	Estrella		
	GENERALES	Capacidad nominal	KVA	15		
		Cantidad de fases	—	3 en II y 3 en X		
		Frecuencia	Hiz	60		
		Clase de enfriamiento	—	OA/FA		
		Impedancia	—	5 al 8 %		
Tipo de núcleo		—	columna			
Sobre elevación de temperatura		°C	65			
Altitud ( Toluca )		m. s. n. m.	2700			
Preservación de aceite		—	tanque sellado			
Sobre presión		—	Válvula			
Tipo de servicio	—	Intemperie				
TRANSFORMADOR T3	Tensión nominal	V	127			
	Clase de aislamiento	V	600			
	Nivel básico de impulso ( BIL )	KV	10			
	Tensión nominal	V	127			
	Clase de aislamiento	V	127			
	Nivel básico de impulso ( BIL )	KV	10			
	Capacidad nominal	KVA	10			
	Cantidad de fases	—	1 en II y 1 en X			
	Frecuencia	Hiz	60			
	Clase de enfriamiento	—	OA/FA			
	Impedancia	—	5 al 8 %			
	Tipo de núcleo	—	columna			
	Sobre elevación de temperatura	°C	65			
	Altitud ( Toluca )	m. s. n. m.	2700			
	Preservación de aceite	—	tanque sellado			
Sobrepresión	—	válvula				
Tipo de servicio	—	Intemperie				

NOMBRE DEL EQUIPO	CARACTERISTICAS	UNIDAD	VALORES PARA CADA SE		NORMAS SEGUN NOTAS
			1000	2000	
INTERRUPTOR PRINCIPAL C A	JAPACIDAD NOMINAL	KVA			
	ELECTRICAS				
	Tensión nominal	KV		23	
	Corriente nominal	A		1200	
	Corriente instantánea	KA		61	
	Corriente a los 4 segundos	KA		38	
	Capacidad interruptiva	MVA		1500	
	Nivel básico de impulso ( BIL )	KV		150	
	Tiempo de interrupción	Hz		4	
	Flameo en seco	KV		42	
	Flameo en húmedo	KV		36	
	Radio Interferencia 60 HZ	KV		10	
	100 KHZ	microvolts		50	
	ACCESORIOS				
	T.C. tipo boquilla				
	Relación de transformación	-		5:1	10:1
	Precisión	-		0,3	
	Clase de aislamiento	KV		23	
	T.P. ( T.P.1 ) :				
	Relación de transformación	-		1/	
Precisión	-		0,3		
Clase de aislamiento	KV		23		
GRAL.					
Tipo de servicio	-		interior		
Altura de operación ( Toluca )	m.s.n.m.		2700		
Mecanismo de operación	-		eléctrico y manual		
INTERRUPTOR DE SALIDA C D	Tipo	-		celda ( interno )	
	Tensión de régimen	V		600	
	Corriente de régimen	KA		6	
	Corriente de desconexión	KA		75	
	Tensión de operación	V		100	
	Mecanismo de operación	-		eléctrico	
	Altura de operación ( Toluca )	m.s.n.m.		2700	

1/ Según el tipo de conexión en H, X y la cantidad de transformadores.

NOMBRE DEL EQUIPO	CARACTERISTICAS	UNIDAD	VALORES PARA CADA SE		NORMAS SEGUN NOTAS
EQUIPO DE MEDICION	CAPACIDAD NOMINAL	KVA	1000	2000	
	T. P.	Relacion de transformaci3n	—	13 278/120 ( V )	
		Precisi3n	—	0.3	
		Clase de aislamiento	KV	23	
	Fusible	—	uno por fase		
V3lmetro		X			
Amp3rmetro		X			
EQUIPO DE RECTIFICACION	DIODOS DE POTENCIA	Tipo	—	silicio	
		Instalaci3n	—	interior	
		Capacidad	KW	180	
		Tipo de enfriamiento	—	aire natural	
		Servicio	—	interior	
		Conexi3n	—	tipo puente	
		Tensi3n nominal a plena carga	V	615	
		Tensi3n nominal sin carga	V	652	
		Tensi3n de pico en inversa	V	1 600	
		Clase de aislamiento	V	2 000	
	Altura ( Toluca )	m. s. n. m.	2 700		
	SOBRECARGA	Continuamente	%	100	
		Durante 2 hs seguida de 100 %	%	150	
Durante un minuto seguida del 100 %		%	200		
BATERIA	Capacidad	AH	100 ( 4 AH )		
	Tipo de separado	—	Bolsa		
	Cantidad de pilas	—	85		
	Tensi3n de flote	V	1.4		
	T. de carga profunda	V	1.7		
	T. de min. descarga	V	1.14		
	Tipo	—	Alcalina ( Ni - Cd )		
	Cargador de bateria :				
	Conexi3n	—	puente trif3sico		
	Enfriamiento	—	aire natural		

## LISTA DE FIGURAS

- 3.1 Diagrama unifilar.
- 3.2 Formas de onda.
- 3.3 Circuito de protección.
- 3.4 Panel de alarmas.
- 3.5 Tablero de control y medición.
- 3.6 Distribución del equipo.

**LISTA DE REFERENCIAS**

- 3.1 Departamento de Ingeniería Eléctrica, STEDDF.
- 3.2 Silicon Rectifier Equipment for trolleybus system by English Electric, Co. LTD. Stafford England, 1967.

## CAPITULO CUARTO

### LINEA ELEVADA

#### 4.1 Alimentación a líneas de trolebuses.

Existen tres alternativas de alimentación a líneas de trolebuses :

- a ) Alimentación centralizada. - Con una o varias subestaciones rectificadoras, para alimentar grandes áreas de líneas.
- b ) Alimentación descentralizada. - Con un número mayor de pequeñas y/o medianas subestaciones rectificadoras, para alimentar solamente secciones de líneas inmediatas.
- c ) Alimentación compuesta o combinada. - Comprende las dos formas anteriores y es la que se utiliza con mayor frecuencia ( Ref. 4.1 ).

La elección del tipo de alimentación, depende de las característi

cas de la red, ya que cada alternativa tiene sus propias ventajas, especialmente desde el punto de vista de los costos de inversión y mantenimiento, mismos que deberán optimizarse por medio de un estudio detallado para la proposición de líneas de trolebuses.

En la optimización de la forma de alimentación, se toman en cuenta los siguientes factores :

Las posibilidades de alimentación de energía ( corriente alterna ) para las subestaciones de corriente directa de acuerdo a la disponibilidad de energía eléctrica de la Ciudad; equipamiento de subestaciones ( equipos eléctricos ), las posibilidades de crecimiento urbano, terrenos disponibles para construcción de subestaciones y áreas libres en las aceras para los postes y herrajes de la línea.

La alimentación de corriente directa en las terminales de la línea se puede llevar a cabo de las siguientes formas :

La terminal negativa ( - ) de la salida de la SE se conecta directamente al cable alimentador negativo; la positiva ( + ) alimenta a la línea de toma de corriente a través de un interruptor, como se observa en la Figura 4.1.

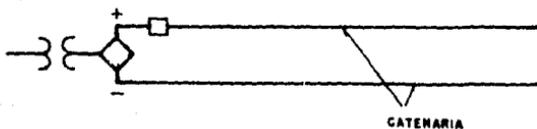


FIGURA 4.1 LINEA UNICA

La sección de la línea de contacto está limitada por el área del colector de corriente, restringiendo con ello su capacidad de alimenta-  
ción por lo que en las líneas con poco tráfico bastará conectar directa-  
mente la salida de la SE a la catenaria ; cuando se requiera aumentar  
la capacidad se utilizan cables alimentadores en paralelo con la cate-  
naria obteniéndose el mismo resultado que si se aumentara la sección  
de los alambres de trole. El tipo de alimentación anteriormente des-  
crito se conoce como sistema escalonado y se muestra en la Figura  
4.2.

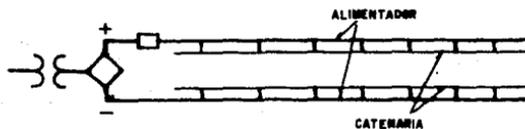


FIGURA 4.2 CONEXIÓN ESCALONADA

La configuración de algunas rutas de gran capacidad requiere dis-  
poner de varios alimentadores, conectando cada alimentador a través  
de un interruptor como se muestra en la Figura 4.3.

En las ciudades en las que el tráfico de vehículos es muy intenso,  
no se debe correr el riesgo de que toda la red quede paralizada por  
una falla en un punto cualquiera, por lo tanto, la catenaria se seccio-  
na, dividiéndola en partes aisladas, cada una de las cuales se alimenta  
separadamente, según se vé en la Figura 4.4; una falla en una sec-

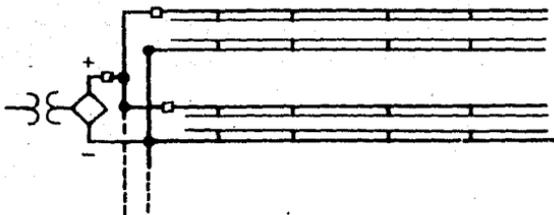


FIGURA 4.3 CONEXION MULTIPLE DE ALIMENTADORES

ción no repercute en las otras asegurando la continuidad en el servicio.

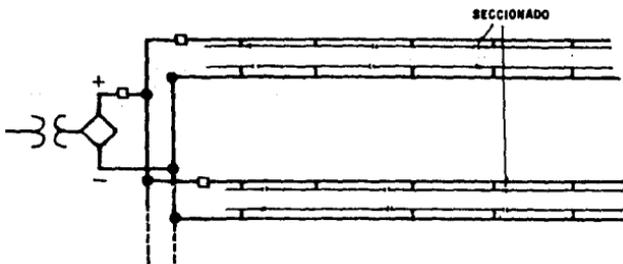


FIGURA 4.4 ALIMENTADORES MULTIPLES Y SECCIONAMIENTO

#### 4.2 Selección de conductores.

Para determinar el área de la sección de los conductores se deben considerar los siguientes factores :

- 1 ) Eléctrico. - Determinando la caída máxima de tensión hasta el extremo de la línea correspondiente al receptor.
- 2 ) Mecánico. - Los conductores deben soportar todos los esfuerzos a

que se encuentran sometidas las líneas. Según las normas de instalación ( Ref. 4.3 ) cuando los cables se apoyan en postes no es aconsejable utilizar conductores de sección inferior a  $10 \text{ mm}^2$  que equivalen a 19.7 mil circular mils ( MCM ).

- 3 ) Térmico. - Para evitar las consecuentes pérdidas de potencia, debidas al efecto Joule.
- 4 ) Económico. - Seleccionando el calibre mas adecuado ya que al aumentar la sección del conductor se incrementa el costo de la instalación.

En este estudio para calcular el calibre del alimentador, se consideró únicamente el aspecto de caída de tensión, siendo pertinente aclarar que aunque la tensión de salida de la SE es 600 Volts, el motor del trolebus podría operar con una tensión mínima de 480 Volts, como se muestra en la Figura 4.5.

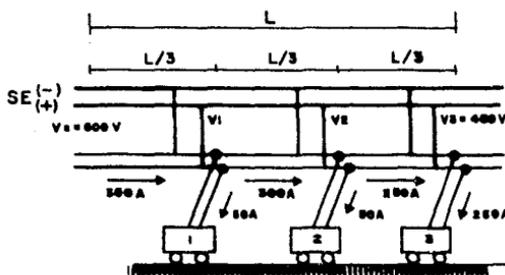


FIGURA 4.5 LONGITUD DEL ALIMENTADOR

Donde L .- Es la longitud máxima supuesta del alcance de la SE = 3.589 km.

Vs .- Es la tensión de salida de la SE = 600 Volts.

$V_3$  . - Es la tensión mínima requerida para que el motor del trolebus No. 3 opere = 480 V.

Además se considera que los trolebuses No. 1 y 2 se encuentran en situación de marcha a velocidad uniforme y el No. 3 en situación de arranque.

De acuerdo con lo anterior se tiene que :

$$V_3 = V_2 - 250 R_t \quad (4.1)$$

donde  $R_t$  es la resistencia total del paralelo de ambos polos del alimentador y la catenaria de la distancia  $L/3$ .

$$R_t = 2R \quad (4.2)$$

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (4.3)$$

donde  $r_1$  es la resistencia del cable alimentador y  $r_2$  la del alambre de catenaria.

Sustituyendo 4.3 en 4.2 se obtiene :

$$R = \frac{2 ( r_1 r_2 )}{r_1 + r_2} \quad (4.4)$$

sustituyendo  $V_3 = 480$  Volts y despejando  $V_2$  en la expresión 4.1

$$V_2 = 480 + 250 R_t \quad (4.5)$$

además de la Figura 4.5 se tiene que :

$$V_2 = V_1 - 300 R_t \quad (4.6)$$

y

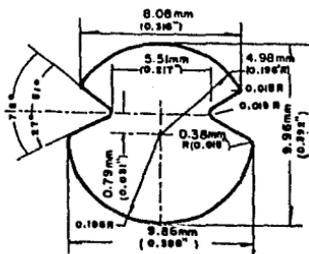
$$V_1 = 600 - 350 R_t \quad (4.7)$$

resolviendo el sistema de ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7 obtenemos :

$$R_t = 0.133 \Omega$$

Por otro lado se sabe que el valor de la resistencia de la catenaria es de  $r_{2/0} = 0.2734 \frac{\Omega}{\text{km}}$ , que corresponde a un alambre especial ranurado ( de trole ) calibre 2/0, 133.2 MCM que es el único que se fabrica en México ( Figura 4.6 ). Por lo tanto se tendrá un valor para  $r_2$  de :

$$r_2 = ( r_{2/0} ) \left( \frac{L}{3} \right) = ( 0.2734 \frac{\Omega}{\text{km}} ) \left( \frac{3.589 \text{ km}}{3} \right) = 0.3269 \Omega$$



Notas:

Alambre acanalado de cobre  
 Circular mils nominales 133 200  
 Area actual (0.1003 pulg<sup>2</sup>) 6 9.9 mm<sup>2</sup>  
 Peso calculado por milie 2 203 lbs.  
 Peso por metro 0.620 kg

FIGURA 4.6 ALAMBRE DE COBRE ACANALADO

De la expresión 4.4 se despeja  $r_1$  y se obtiene :

$$r_1 = \frac{(R_t)(r_2)}{2r_2 - R_t} \quad (4.8)$$

sustituyendo los valores de  $R_t$  y  $r_2$  en la expresión anterior se tiene que,  $r_1 = 0.083 \Omega$

De la relación :

$$r_1 = \rho \frac{L}{A} \quad (4.9)$$

donde  $\rho$  es la resistencia específica del cobre =  $17 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$

$$L = 1.196 \text{ km}$$

$$r_1 = 0.083 \Omega$$

despejando el área A de la expresión 4.9

$$A = \rho \frac{L}{r_1} = \frac{(17)(1.196)}{0.083}$$

$$A = 244.964 \text{ mm}^2$$

Consultando las tablas para conductores de cobre normalizado ( Ref. 4.3 ) se observa que para el área calculada se tiene una sección de 500 MCM como la más apropiada.

#### 4.3 Conexiones de alimentadores.

Las conexiones de alimentación se hacen por medio de derivaciones del alimentador con cable forrado de 250 MCM, (llamados alimentadores secundarios), uniendo los cables de la línea de alimentación principal, positivo y negativo con la catenaria por medio de dos tipos de conexión: sencilla y doble.

Conexión sencilla. - Este tipo de conexión se encuentra únicamente

te en calles en donde se tiene un sentido de circulación, como se muestra en la Figura 4.7. El par de cables de la línea de alimentación se conecta al par de alambres de la catenaria, en tramos de longitudes iguales.

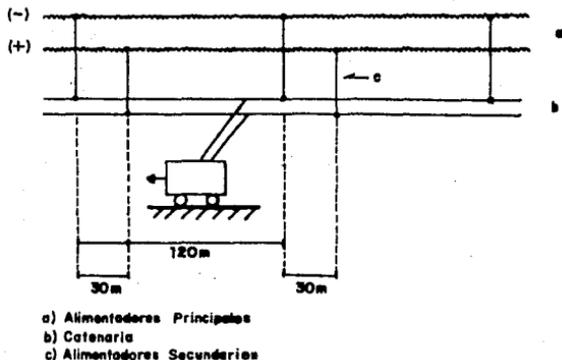


FIGURA 4.7 CONEXION SENCILLA

Conexión doble. - Se encuentra en las calles con doble circulación; una sola línea de cables alimentadores se conecta a dos pares de alambres de la catenaria, como se muestra en la Figura 4.8.

En ambos tipos de conexiones para evitar pérdidas por caídas de tensión en la línea de alimentación conviene conectar el alimentador secundario en tramos lo más corto posible. Para este estudio se tomó una longitud de 120 metros, que es la que usualmente se utiliza para las líneas de trolebuses de la Ciudad de México ( Ref. 4.2 ).

#### 4.4. Resistencias equivalentes unitarias.

La configuración de las rutas establecidas para trolebuses, puede contener los dos tipos de conexiones ( sencilla y doble ). Las resis

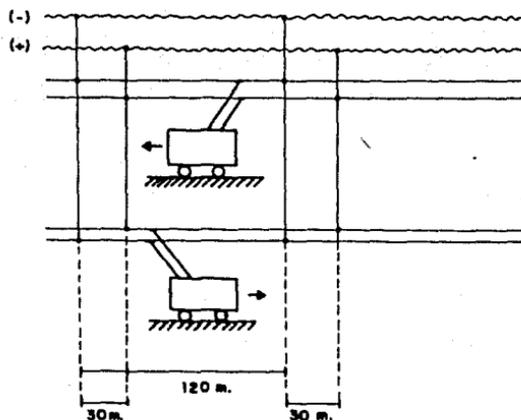


FIGURA 4.8 CONEXION DOBLE

tencias de las líneas de alimentación y la catenaria, se pueden representar por la resistencia equivalente que se tenga en la longitud determinada de los arreglos en paralelo entre los polos y sus alambres de trole correspondientes, denominándose a esta resistencia como resistencia equivalente unitaria.

Lo anterior se apreciará mejor al obtener las resistencias equivalentes unitarias, para ambos tipos de conexión, utilizando los valores de las resistencias siguientes ( Ref. 4.4 ) :

Cable alimentador	500 MCM	resistencia 0.0727 $\Omega$ /km.
Catenaria	133.2 MCM ( 2/0 )	resistencia 0.2734 $\Omega$ /km.

- a) Para la conexión sencilla se conecta primero un solo polo como se ve en la Figura 4.9.

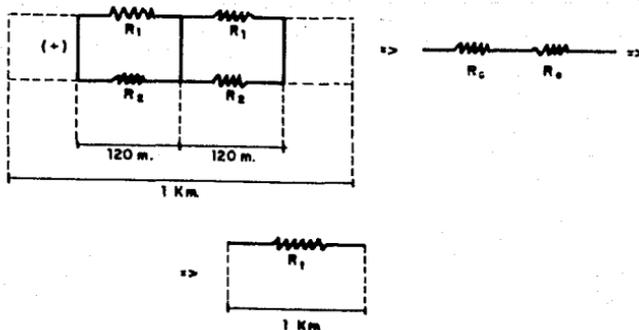


FIGURA 4.9 RESISTENCIA EQUIVALENTE UNITARIA  
CONEXIÓN SENCILLA

De acuerdo a los datos tenemos :

$$R_1 = \text{Resistencia del cable alimentador en 120 m} = 0.008724 \Omega$$

$$R_2 = \text{Resistencia del alambre de trole en 120 m} = 0.032808 \Omega$$

$$R_e = \text{Resistencia equivalente del paralelo en 120 m} = 0.00689 \Omega$$

$$R_e = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$R_t = \text{Resistencia equivalente total para un polo en un kilómetro} = 0.0574 \text{ Ohms/km}$$

Como la conexión para el otro polo es la misma, la resistencia equivalente que se obtiene es del mismo valor que en el caso anterior, por lo que una carga que se conecta a un kilómetro de distancia con este tipo de conexión entre ambos polos encontrará una resistencia del siguiente valor :

$$R_{US} = 2 R_t = 2 ( 0.0574 ) = 0.1148 \text{ Ohms/km}$$

donde :  $R_{US}$  = resistencia unitaria en conexión sencilla ( Ohms/km ).

- b ) Para la conexión doble, siguiendo la misma secuencia que en el inciso anterior, tenemos un arreglo en paralelo de resistencias como se muestra en la Figura 4.10.

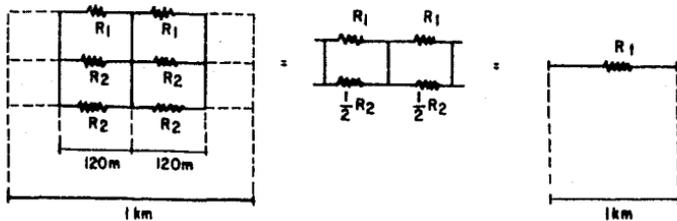


FIGURA 4.10 RESISTENCIA EQUIVALENTE UNITARIA CONEXION DOBLE

En donde :

$$R_t = R_1 \parallel ( R_2 \parallel R_2 ) = R_1 \parallel ( 0.5R_2 ) = \frac{R_1 R_2}{2 ( R_1 + R_2 )} = 0.04745 \text{ Ohms/km}$$

por lo que :

$$R_{ud} = 2 R_t = 2 ( 0.04745 ) = 0.0949 \text{ Ohms/km}$$

donde  $R_{ud}$  = resistencia unitaria en conexión doble.

#### 4.5 Alcance de las subestaciones de C.D.

La longitud máxima de alcance de una subestación rectificadora en una ruta de trolebuses, es aquella en la que los valores de la tensión y la corriente que se tienen en el extremo de ella son los requeridos para que un trolebus ubicado ahí, opere en condiciones de arranque, aun

que a lo largo de su longitud estén en marcha otros trolebuses que también requieren energía. Esta longitud de alcance se considera para una sola salida de la subestación y el máximo de alcance dependerá del tipo de conexión de alimentación que se tenga en la ruta, y la cantidad de trolebuses que se considere van a operar en ella.

En la Figura 4.11 se ha representado la salida de una subestación rectificadora, que tiene conectada una carga consistente de una serie de trolebuses a lo largo de la longitud (  $L$  ) de alcance de la misma :

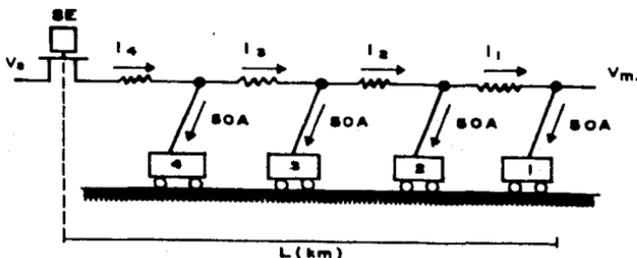


FIGURA 4.11 LONGITUD DE ALCANCE

Esta representación se utiliza para deducir las expresiones necesarias en el cálculo de la cantidad de subestaciones requeridas de las rutas propuestas, y la ubicación y distancia que abarquen ( alcance ), con la seguridad de que se tendrán las condiciones que permitan la operación adecuada de los trolebuses que estén circulando por la misma.

Notación utilizada :

S.E. = Subestación rectificadora para líneas de trolebus.

$V_s$  = Tensión de salida de la subestación ( Volts C.D. )

- $V_m$  = Tensión mínima de operación del trolebus en condición de arranque ( Volts C.D. ).  
 $L$  = Longitud máxima de alcance de la subestación ( kilómetros ).  
 $R$  = Resistencia del tramo de la línea entre dos trolebuses consecutivos ( Ohms ).  
 $n$  = Cantidad de trolebuses ubicados a lo largo de la longitud de alcance y equidistantes entre sí; también "  $n$  " define la cantidad de veces en que se divide la resistencia total de la longitud "  $L$  " para obtener el valor de "  $R$  ".  
 $I_1, I_2, I_3, I_4$  = Corrientes que circulan en cada uno de los "  $n$  " tramos en que se dividió "  $L$  ".

De acuerdo a la notación anterior y a la Figura 4.11 la expresión general para la tensión mínima en el extremo de "  $L$  " es :

$$V_m = V_s - \sum_{j=1}^n I_j \cdot R \quad (\text{Volts C.D.}) \quad (4.10)$$

la resistencia entre trolebuses es :

$$R = R_L / n \quad (\text{Ohms}) \quad (4.11)$$

En donde  $R_L$  es la resistencia total en Ohms de la longitud "  $L$  ", y está dada por :

$$R_L = R_u \cdot L \quad (\text{Ohms}) \quad (4.12)$$

y en donde  $R_u$  es la resistencia unitaria en Ohms/km, cuyo valor depende del tipo de conexión de los alimentadores que se tengan en la longitud de la ruta considerada.

Sustituyendo 4.12 en 4.11

$$R = R_u \cdot L / n \quad (\text{Ohms}) \quad (4.13)$$

y 4.13 en 4.10

$$V_m = V_s - \sum_{j=1}^n I_j (R_u \cdot L / n) \quad (\text{Volts C.D.}) \quad (4.14)$$

La expresión general 4.14, nos da la tensión mínima en función de la cantidad de trolebuses que circulen en una longitud de alcance - considerada. En ella, la tensión  $V_s$  está en Volts C.D.,  $I_j$  en Amperes,  $R_u$  en Ohms/km, "  $L$  " en kilómetros y "  $n$  " adimensional. Más adelante se verá que el término  $\sum_{j=1}^n I_j$  también se puede poner en función de "  $n$  ".

Si ahora lo que se quiere determinar es la longitud de alcance, entonces despejamos "  $L$  " de 4.14.

$$L = \frac{n (V_s - V_m)}{\sum_{j=1}^n I_j \cdot R_u} \quad (\text{kilómetros}) \quad (4.15)$$

Es necesario destacar la siguiente condición; como se ve en la Figura 4.11, de los "  $n$  " trolebuses que se tienen distribuidos en "  $L$  ",

el que está colocado en el extremo de alcance máximo, se encuentra en situación de arranque, y los restantes ( n - 1 ) trolebuses, se encuentran a velocidad uniforme. Con lo que se puede decir que es crítica, asegurando la operación adecuada de las unidades y de la subestación.

Por otra parte, usualmente la tensión de salida de las subestaciones rectificadoras, es a 600 Volts C.D., por lo que  $V_s = 600$  Volts C.D.; para este análisis, la tensión mínima considerada es del 80% de la tensión de salida, o sea 480 Volts C.D.; sustituyendo estos valores en la expresión 4.15 se obtiene :

$$L = \frac{(120) n}{\sum_{j=1}^n I_j \cdot R_u} \quad (\text{kilómetros}) \quad (4.16)$$

Una subestación que tuviera dos salidas cubriría la distancia siguiente :

$$d = 2 \cdot L \quad (\text{kilómetros}) \quad (4.17)$$

La expresión 4.16 depende de la cantidad de unidades consideradas, y de la forma en que se realiza la conexión de los alimentadores. En la anterior expresión y en la 4.14, la cantidad de corriente que circula en los tramos de resistencia en que se divide " L " dependen también de " n ".

Tomando en cuenta lo anterior, se considera que en el arranque,

el trolebus requiere 250 Amperes, a velocidad uniforme requiere 50 Amperes y al frenar o estar detenido 7.5 Amperes ( Ref. 4.2 ).

Si ahora se presenta la situación crítica considerada en la Figura 4.12 utilizando  $n = 6$  trolebus, se tiene que :

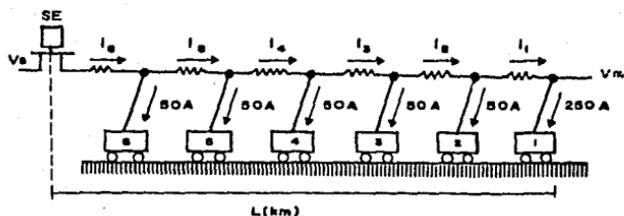


FIGURA 4.12 SITUACION CRITICA

Desglosando el término  $\sum_{j=1}^n I_j$  para este caso, tenemos :

$$\sum_{j=1}^6 I_j = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (\text{Amperes}) \quad (4.18)$$

el valor de cada una de las corrientes que pasan en los tramos es :

$$I_1 = 250 = 250$$

$$I_2 = 300 = 250 + 50$$

$$I_3 = 350 = 250 + 50 + 50$$

$$I_4 = 400 = 250 + 50 + 50 +$$

$$I_5 = 450 = 250 + 50 + 50 + 50$$

$$I_6 = 500 = 250 + 50 + 50 + 50 + 50$$

con el arreglo anterior, se puede observar lo siguiente :

$$\sum_{j=1}^6 I_j = 2 \cdot 250 = 6(250) + 6(6-1)(50) / 2 \quad (\text{Amperes})$$

de este resultado, podemos deducir lo siguiente :

$$\sum_{j=1}^n I_j = n (250) + n (n - 1) (50) / 2 \quad (\text{Ampers}) \quad (4.19)$$

simplificando esta expresión, obtenemos :

$$\sum_{j=1}^n I_j = n \left[ 250 + (50) (n - 1) / 2 \right] \quad (\text{Ampers}) \quad (4.20)$$

sustituyendo esta última expresión en ( 4.16 ), obtenemos :

$$L = \frac{4.8}{Ru (9 + n)} \quad (\text{kilómetros}) \quad (4.21)$$

Por otro lado, si también sustituimos 4.20 en 4.14, obtenemos :

$$V_m = V_s - 25 Ru \cdot L (9 + n) \quad (\text{Volts C.D.}) \quad (4.22)$$

Las expresiones 4.21 y 4.22, son las que se aplican en el caso particular con  $V_s = 600$  Volts C.D. y  $V_m = 480$  Volts C.D., para obtener las condiciones óptimas de longitud y tensión, en la ubicación de una subestación en una ruta.

#### 4.6 Subestaciones por ruta.

El procedimiento para determinar la cantidad de subestaciones que se deberán utilizar por ruta, es semejante al desarrollado a continuación para la ruta 1. ( Zinacantepec-Monumento ).

Tomando en cuenta que en algunos casos las subestaciones de dos ó mas rutas pudieran coincidir en el mismo sitio por lo que se pueden reducir a una sola subestación equivalente en capacidad.

Para el análisis, se indica la longitud de la línea de alimentación, que resulta de una medición a lo largo de la ruta, que incluye tramos en uno ó dos sentidos como se muestra en la Figura 4.13 donde los tramos  $L_1$  y  $L_4$  son dobles y  $L_2$  y  $L_3$  sencillos.

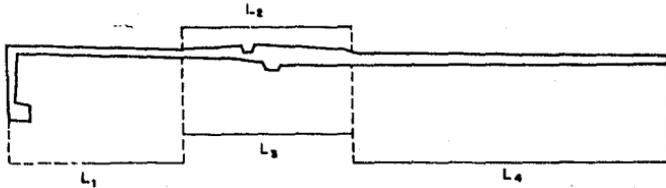


FIGURA 4.13 CONFIGURACION REAL DE LA RUTA 1

En base a los resultados del capítulo primero la cantidad de trolebuses obtenidos para cada ruta ( tabla 1.4 ) se distribuirán de acuerdo a las zonas de mayor demanda de transporte.

Para el tramo  $L_1$  se estableció que  $n = 3$  para una subestación con dos salidas.

Aplicando la expresión 4.21 se obtiene el valor de  $L$ .

$$L = \frac{4.8}{Ru ( 9 + n )}$$

donde :

$$Ru = 0.0949 \frac{\Omega}{\text{km}} \text{ ( para doble sentido en el tramo } L_1 \text{ )}$$

$n = 3$  trolebuses.

$$L = \frac{4.8}{0.0949 ( 9 + 3 )} = 4.2 \text{ km}$$

$$L = 4.2 \text{ km}$$

La tensión mínima en el extremo de  $L_1$  se obtiene aplicando la expresión 4.22.

$$V_m = V_s - 25 R_u \cdot L (9 + n)$$

donde :

$$V_s = 600 \text{ Volts.}$$

$$V_m = 600 - 25 (0.0949) (4.2) (9 + 3) = 480.426$$

$$V_m = 480.426 \text{ Volts.}$$

Para el tramo  $L_2$  se tiene que :  $n = 2$  con una subestación de dos salidas .

$$R_u = 0.1148 \frac{\Omega}{\text{km}} \text{ ( para un sólo sentido ) . O sea :}$$

$$L = \frac{4.8}{0.1148 (9 + 2)} = 4.8 \text{ km}$$

$$V_m = 600 - 25 (0.1148) (3.8) (9 + 2) = 480 \text{ Volts.}$$

como  $L_2 = L_3$  los valores son los mismos que los obtenidos para  $L_2$

Para el tramo  $L_4$  se tiene que :  $n = 3$  con una subestación de dos salidas por lo tanto es semejante al tramo  $L_1$  obteniendo los mismos valores de  $L$  y  $V_m$ .

En los tramos  $L_2$  y  $L_3$  bastará ubicar una subestación 1/ con cuatro salidas y capacidad de 1000 KW 2/, siendo pertinente aclarar

- 
- 1/ La ubicación de las subestaciones en este primer intento se localiza a la mitad de los tramos respectivos.  
2/ La capacidad señalada se debe a que ese valor es la capacidad comercial más cercana al valor que requieren los trolebuses en los tramos considerados.

que la longitud del alcance de las salidas está sobrada con respecto al valor de la longitud del tramo.

El tramo  $L_1$  requiere una subestación de 1000 KW con dos salidas cuyas longitudes de alcance al igual que el caso anterior están " sobradas " .

En el tramo  $L_4$  la subestación de 1000 KW no es suficiente para cubrir la demanda de energía en la longitud del tramo, por lo que es necesario reubicarla. Aprovechando que la subestación del tramo  $L_2$  esta sobrada en cuanto a su longitud de alcance se recorre ésta a una distancia tal que se cubra la longitud faltante de  $L_4$  transformándola en conexión sencilla.

Debido a la reubicación de las subestaciones en  $L_2$  y  $L_4$  se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Figura 4.14, donde se tiene :

SE - 1A. - Es la subestación del tramo  $L_1 = T_1A$

$L_1A$  . - Es la longitud de alcance de la subestación SE-1A

SE - 1B. - Es la subestación de los tramos  $L_2 = L_3 = T_1B$

$L_1B$ . - Es la longitud de alcance de la subestación SE-1B

SE - 1C. - Es la subestación del tramo  $L_4 = T_1C$

$L_1C$ . - Es la longitud de alcance de la subestación SE-1C

Rd. - Es el valor de la resistencia unitaria en conexión doble

Rs. - Es el valor de la resistencia unitaria en conexión sencilla

$N_t$  . - Es el número de trolebuses de la ruta

$L_r$  - Es la suma de las longitudes de alcance de todos los tramos.

Ubicación y cantidad de subestaciones.

Ruta 1 (Z-M)       $N_t = 20$        $L_r = 31.156$  kms

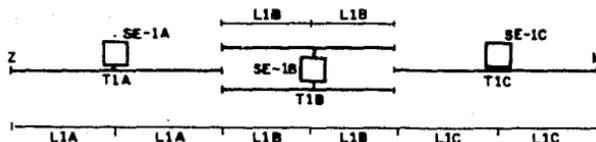


FIGURA 4.14 SUBESTACIONES EN LA RUTA 1

T1A = T1C

$n = 3$

$R_d = 0.0949$  Ohms/km

$L_{1A} = L_{1C} = 4.2$  Kms.

$V_m = 480.426$  Volts. C.D.

SE-1A = SE-1C = 1000 KW

con 2 salidas c/u

T1B

$n = 2$

$R_s = 0.1148$  Ohms/km

$L_{1B} = 3.589$  Kms.

$V_m = 486.69$  Volts C.D.

SE-1B = 1000 KW

con 4 salidas

El método así descrito se utilizó para la ubicación de las subestaciones de las rutas restantes por lo que a continuación se presentarán los resultados en las Figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20.

Ruta 2 ( C - C )

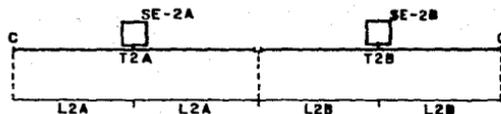
 $N_t = 15$  $L_r = 14.63 \text{ kms}$ 

FIGURA 4.15 SUBESTACIONES EN LA RUTA 2

 $T2A = T2B$  $n = 4$  $R_d = 0.0949 \text{ Ohms/km}$  $L2A = L2B = 3.6575 \text{ Kms}$  $V_m = 487.19 \text{ Volts C.D.}$  $SE - 2A = SE - 2B = 1000 \text{ KW}$ 

con 2 salidas c/u

Ruta 3 ( S.B. - S.P. )

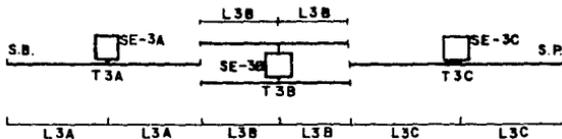
 $N_t = 14$  $L_r = 24.936 \text{ kms.}$ 

FIGURA 4.16 SUBESTACIONES EN LA RUTA 3

T3A $n = 4$  $R_d = 0.0949 \text{ Ohms/km}$  $L3A = 3.32 \text{ Kms.}$  $V_m = 497.6 \text{ Volts C.D.}$  $SE - 3A = 1000 \text{ KW}$ 

con 2 salidas

T3B $n = 3$  $R_s = 0.1143 \text{ Ohms/km}$  $L3B = 2.65 \text{ Kms.}$  $V_m = 501.12 \text{ Volts C.D.}$  $SE - 3B = 1000 \text{ KW}$ 

con 2 salidas

T3C $n = 4$  $R_d = 0.0949 \text{ Ohms/km}$  $L3C = 3.848 \text{ Kms.}$  $V_m = 481.56 \text{ Volts C.D.}$  $SE - 3C = 1000 \text{ KW}$ 

con 2 salidas

Ruta 4 ( S.F. - S.J.I. )

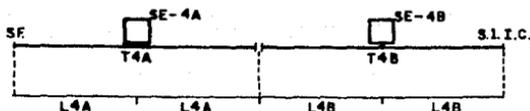
 $N_t = 9$  $L_r = 11.51$  km

FIGURA 4.17 SUBESTACIONES EN LA RUTA 4

T4A $n = 3$  $R_d = 0.0949$  Ohms/km. $L_{4A} = 2.815$  Kms $V_m = 519.85$  Volts C.D.

SE - 4A = 1000 KW

con 2 salidas

T4B $n = 4$  $R_d = 0.0949$  Ohms/km $L_{4B} = 2.94$  kms $V_m = 509.3$  Volts C.D.

SE - 4B = 1000 KW

con 2 salidas

Ruta 5 ( M - L.P. )

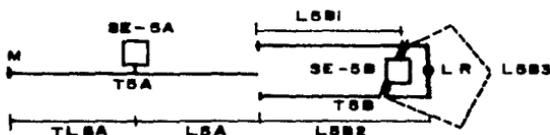
 $N_t = 8$  $L_r = 13.1744$  kms

FIGURA 4.18 SUBESTACIONES EN LA RUTA 5

T5A $n = 3$  $R_d = 0.0949$  Ohms/km $L_{5A} = 3.07$  Kms $V_m = 512.59$  Volts C.D.

SE - 5A = 1000 KW

con 2 salidas

T5B $n = 3$  $R_s = 0.1148$  Ohms/km $L_{5B1} = 2.1112$  Kms ;  $V_m = 527.26$  Volts C.D. $L_{5B2} = 1.7632$  Kms ;  $V_m = 539.27$  Volts C.D. $L_{5B3} = 3.16$  Kms ;  $V_m = 490.93$  Volts C.D.

SE - 5B = 1000 KW, con 3 salidas.

Ruta 6 ( C - H.G. )

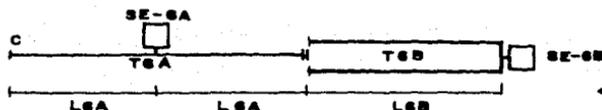
 $N_t = 8$  $L_r = 10.913$  Kms

FIGURA 4.19 SUBESTACIONES EN LA RUTA 6

T6A $n = 4$  $R_d = 0.0949$  Ohms/km $L_{6A} = 2.62$  Kms $V_m = 519.19$  Volts C.D.

SE - 6A = 1000 KW

con 2 salidas

T6B $n = 3$  $R_s = 0.1148$  Ohms/km $L_{6B} = 2.839$  Kms $V_m = 502.22$  Kms

SE - 6B = 1000 KW

con 2 salidas

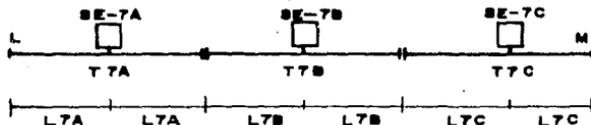
Ruta 7 ( L - M ) $N_t = 6$  $L_r = 21.06$  Kms

FIGURA 4.20 SUBESTACIONES EN LA RUTA 7

T7A = T7B = T7C $n = 2$  $R_d = 0.0949$  Ohms/km $L_{7A} = L_{7B} = L_{7C} = 3.51$  kms $V_m = 508.39$  Volts C.D.

SE - 7A = SE - 7B = SE - 7C = 1000 KW

con 2 salidas c/u

De los resultados anteriores se concluye que para las rutas propuestas se requieren 17 subestaciones rectificadoras de 1 000 KW cada una; pudiéndose reducir a 13 subestaciones siendo 9 de 1 000 KW y 4 de 2 000 KW como se muestra en la Figura 4.21 .

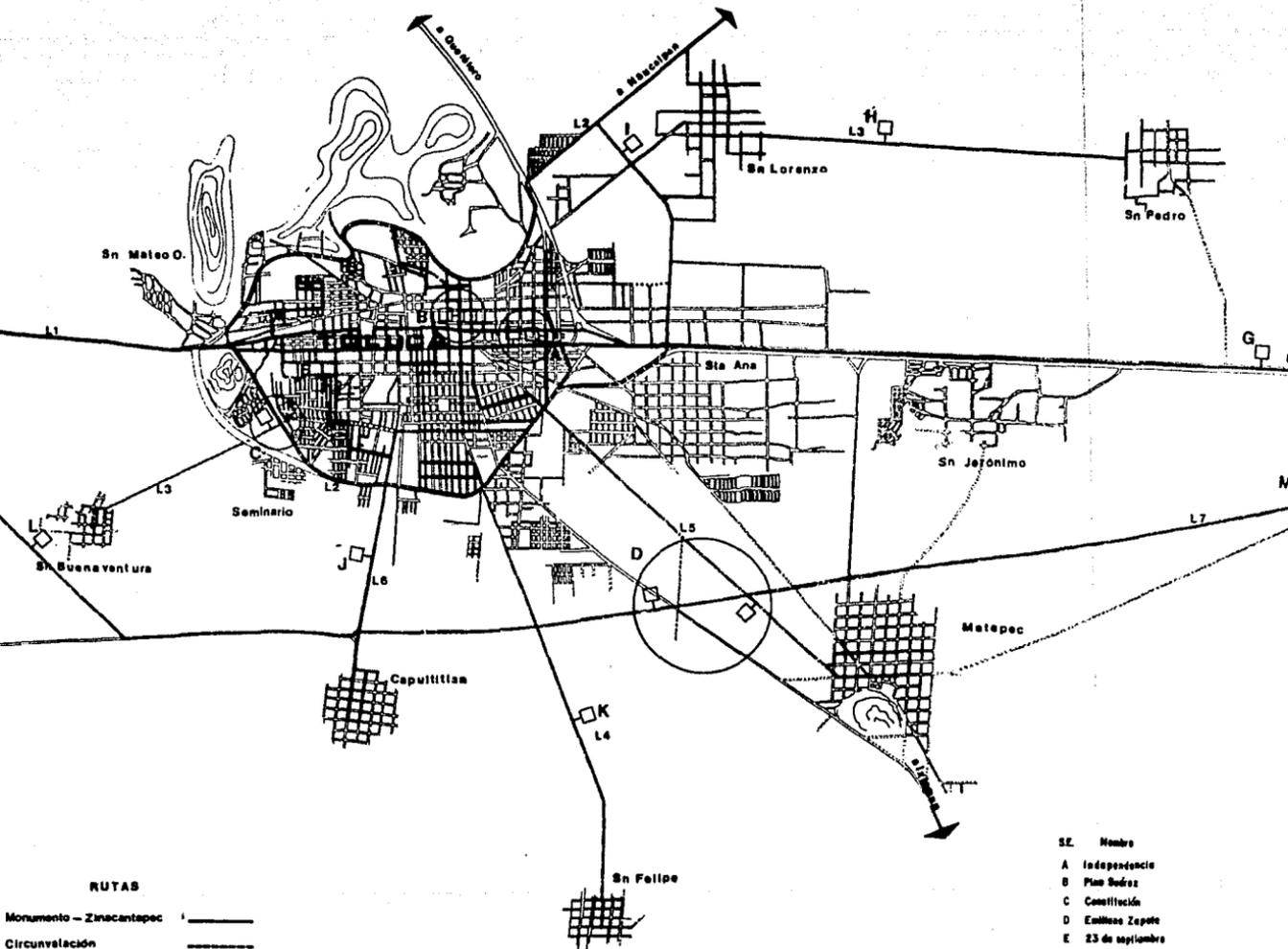
#### 4.7 Accesorios y Herrajes.

Para mantener la línea elevada ( cables de alimentación y alambres de trole ) a la altura, tensión, aislamiento, dirección y separación convenientes dentro de zonas urbanas, se tienen elementos especiales que proporcionan seguridad y flexibilidad de operación a estos sistemas de alimentación.

Los accesorios y herrajes de la línea elevada se instalan en las líneas de acuerdo al sentido que tengan como se muestra en las Figuras 4.22 y 4.23. A continuación se describen los accesorios y herrajes más comunes :

- 1 ) Postes .- Son elementos que constituyen el soporte fundamental de todos los accesorios, herrajes y elementos auxiliares, generalmente son de concreto o de fierro, los cuales se fijan al piso a una profundidad de 1.80 m., utilizando grava, arena y cemento, a -- continuación se presenta un breve análisis de los esfuerzos a que se encuentran sometidos :

En la Figura 4.24 se observan los esfuerzos a que se encuentra sometido un poste típico para líneas de trolebuses :



**RUTAS**

- Monumento - Zinacantepec
- Circunvalación
- Buenaventura - Sn Pedro

- SE. Nombre**
- A Independencia
  - B Plan Suárez
  - C Constitución
  - D Embalse Zapote
  - E 23 de septiembre
  - F Zinacantepec
  - G Tlalman

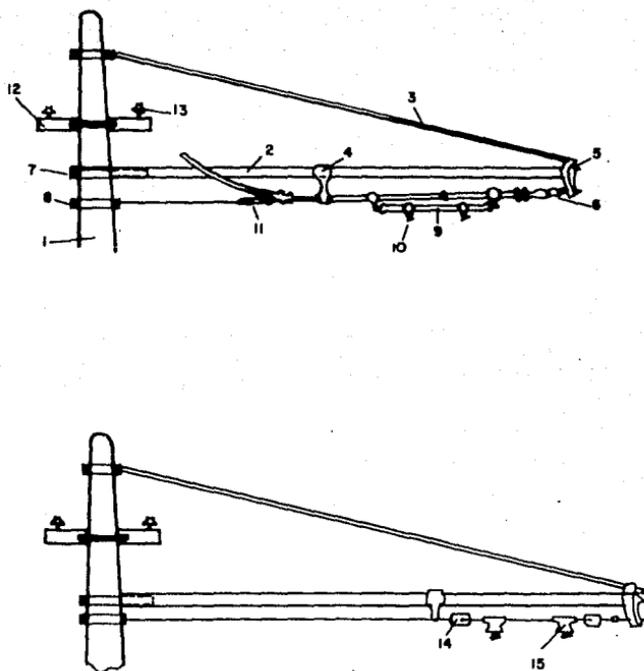


FIGURA 4.22 SOPORTES DE LINEA ELEVADA EN CALLES DE UN SENTIDO

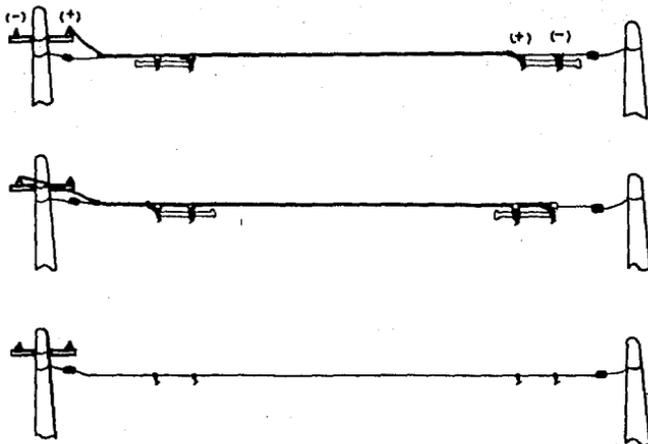


FIGURA 4.23 SOPORTES DE LÍNEA LEVADA EN  
CARRILES DE DOBLE SENTIDO

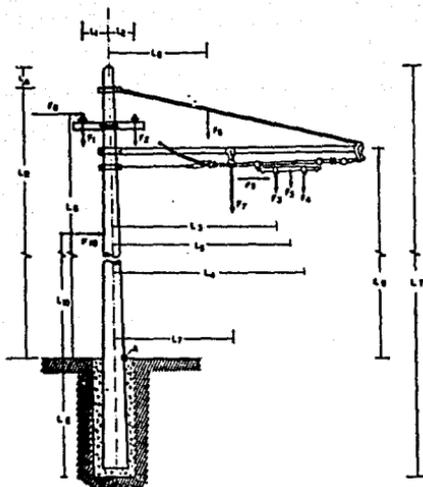


FIGURA 4.24 ESFUERZOS SOBRE EL POSTE

- $F_1$  = Peso del alimentador positivo =  $30 \text{ m} \times 2.293 \text{ kg/m} = 68.796 \text{ kg}$  <sup>1/</sup>  
 $F_2$  = Peso del alimentador negativo =  $F_1 = 68.796 \text{ kg}$   
 $F_3$  = Peso del alambre de trole negativo =  $30 \text{ m} \times 0.622 \text{ kg/m} = 18.66 \text{ kg}$   
 $F_4$  = Peso del alambre de trole positivo =  $F_3 = 18.66 \text{ kg}$   
 $F_5$  = Peso de las canillas alimentadoras y demás accesorios  $\approx 10 \text{ kg}$   
 ( Ref. 4.4 )  
 $F_6$  = Peso de la varilla con cuerda =  $5.264 \text{ kg}$   
 $F_7$  = Peso del tubo galvanizado =  $5.432 \text{ kg/m} \times 4.88 \text{ m} = 26.508 \text{ kg}$ .  
 ( Ref. 4.5 )  
 $F_8$  = Fuerza del viento sobre los 2 alimentadores ( Ref. 4.6 )  
 $2 \times 39 \text{ kg/m}^2 \times 0.6195 \text{ m}^2 = 48.321 \text{ kg}$

<sup>1/</sup> Se considera que cada poste soporta 30 m de cada alimentador y 30 m de catenarias.

$$F_9 = \text{Fuerza del viento sobre las catenarias}$$

$$= 2 \times 39 \text{ kg/m}^2 \times 0.00995 \text{ m} \times 30 \text{ m} = 23.283 \text{ kg.}$$

$$F_{10} = \text{Fuerza del viento sobre el poste}$$

$$= 39 \text{ kg/m}^2 \times 7.35 \text{ m} \times \frac{(0.283 + 0.154)}{2} \text{ m} = 64.066 \text{ kg}$$

Si consideramos el momento flexionante respecto al punto " A " tomando el sentido positivo según la convención horaria para los mis mos.

$$M_{F_A} = \sum_{i=1}^{10} F_i L_i \quad (\text{kg} - \text{m})$$

$$M_{F_A} = F_1 L_1 - F_2 L_2 + F_3 L_3 + F_4 L_4 + F_5 L_5 + F_6 L_6 + F_7 L_7$$

$$+ F_8 L_8 + F_9 L_9 + F_{10} L_{10}$$

sustituyendo valores

$$M_{F_A} = 68.796 \times 0.40 - 68.796 \times 0.40 + 18.66 \times 3.66 + 18.66 \times$$

$$4.26 + 10 \times 3.96 + 5.26 \times 2.44 + 26.508 \times 2.44 +$$

$$48.321 \times 6.37 + 23.283 \times 5.67 + 64.066 \times 3.675$$

$$M_{F_A} = 940.163 \text{ kg} - \text{m}$$

Consultando las Normas L.F.C. 2.7680.30 LA ( Ref. 4.7 ) para el poste de concreto C-30 se obtuvo lo siguiente :

Carga de ruptura =  $F_R = 550 \text{ kg}$  ( aplicada a una distancia

$L_A = 0.30 \text{ mt.}$  de la punta, te-  
niéndose el poste empotrado )

Distancia de ruptura =  $L_R$

$$L_R = L_T - L_E - L_A$$

$L_R$  = longitud total - longitud de empotramiento - longitud de aplicación.

$$L_R = 9.144 - 1.50 - 0.30 = 7.344$$

sustituyendo los datos obtenidos en :

$$M_{FR} = (F_R) (L_R)$$

se tiene que :

$$M_{FR} = 550 \times 7.344 = 4039.2 \text{ kg} - \text{m}$$

$$M_{FR} = 4039.2 \text{ kg m}$$

De donde se concluye que el poste de concreto C-30 resiste perfectamente los esfuerzos de los elementos de línea elevada, así como a los provocados por la posición del viento. Siendo pertinente aclarar que también se utilizan postes de fierro en lugares donde los esfuerzos son mayores, como en el caso de las glorietas y curvas pronunciadas.

La distribución de postes, sobre las aceras en calles de uno y doble sentido se muestra en la Figura 4.25. La separación entre dos postes es usualmente de 30 m., siendo de 120 m. la separación entre dos alimentadores de la misma polaridad.

- 2) Travesañó tubular. - Su función consiste en soportar en una forma más directa a los elementos de aislamiento, separación y alimentación. Tiene un diámetro de 2" y de longitudes de 10' a 15'.

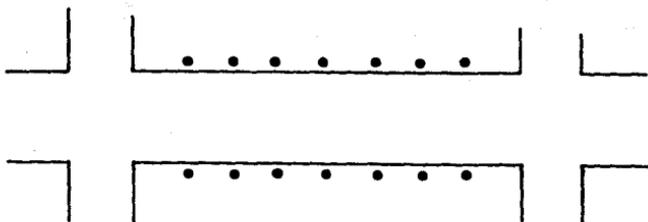
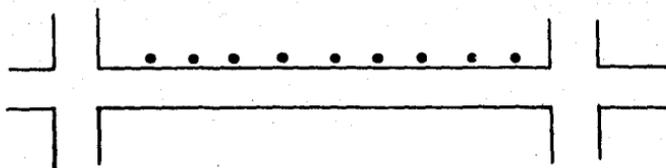
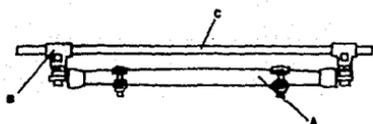


FIGURA 4.25 DISTRIBUCION DE POSTES

- 3 ) Varillas con cuerda y ojo. - Soporta al travesaño tubular con ayuda del poste, tiene una longitud variable de 13'8" a 17'9" y un diámetro de ojo de 1/2".
- 4 ) Remate de Centro. - Separa y aísla al travesaño tubular y al alimentador secundario, tiene un diámetro interior de 2".
- 5 ) Remate de Punta. - Sirve de unión para el travesaño tubular, la varilla con cuerda de ojo y un tornillo de ojo.
- 6 ) Tornillo de ojo. - Asegura, por medio del remate de punta a la terminal del alimentador secundario, sus menciónes son 1/2" x 6 1/2".
- 7 ) Anillo con Espiga. - Por medio de este dispositivo se une el travesaño tubular a una altura conveniente de los postes, para mantenerlo en una posición horizontal. Tiene un diámetro interior de 5 1/2".
- 8 ) Anillo sin espiga. - Es un elemento de sujeción para elementos auxiliares.
- 9 ) Canillas Alimentadoras positivas y negativas. - Este dispositivo se monta sobre el alimentador secundario, por medio de grapas en sus extremos. Su función consiste en aislar y mantener la distancia conveniente de los puntos de alimentación ( 24" ). Existen de varios tipos, clasificados de acuerdo a la configuración de catenarias y a la posición de sus elementos, como se observa en la

Figura 4.26.



A- CANILLA AISLANTE

B- GRAPA PARA ALIMENTADOR SECUNDARIO

C- ALIMENTADOR SECUNDARIO

FIGURA 4.26 CANILLA ALIMENTADORA

- 10) Suspensión alimentadora. - Su función es alimentar directamente a la zapata deslizante, asegurando un buen contacto. En sus extremos se sujetan las catenarias como se observa en la Figura 4.27.



FIGURA 4.27 SUSPENSION ALIMENTADORA

- 11) Canillas aislantes. - Es un dispositivo construido en madera que tiene como función la de aislar y proporcionar la tensión mecánica requerida para el alimentador secundario, Figura 4.28.

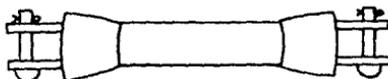


FIGURA 4.28 CANILLA AISLANTE

- 12 ) Cruceta de dos alfileres. - Es un travesaño de fierro, que se coloca en la parte superior del poste, cuya función es soportar a los aisladores del alfiler, como se muestra en la Figura 4.22, se sujeta a los postes por medio de una abrazadera en " U ".
- 13 ) Aislador tipo alfiler. - La función de este dispositivo es aislar al alimentador principal, que atraviesa por la cruceta del poste. Su fabricación se realiza en porcelana, teniendo una distancia de arco de  $3 \frac{1}{4}$  ", una tensión de arqueo en seco de 50 KV y una tensión de arqueo en húmedo de 25 KV. Figura 4.29.



FIGURA 4.29 AISLADOR TIPO ALFILER

- 14 ) Aislador de tensión. - Su fabricación se realiza en porcelana, siendo rígidos no sufren roturas debido a esfuerzos mecánicos, su capacidad de amarre como se observa en la Figura 4.30, lo hacen fácilmente eslabonarse a otros dispositivos por medio de cables, su función principal es aislar terminales de cable alimentador secundario.
- 15 ) Aislador de Centro. - Consiste de una unidad de aislamiento, dentro de una cáscara de metal, formando un hueco de aire que pre-

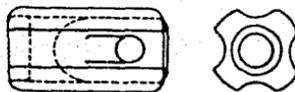


FIGURA 4.30 AISLADOR DE TENSION

viene el flameo y los arcos eléctricos protegiendo a la línea elevada. En su parte inferior, se coloca una suspensión alimentadora, la cual sirve de elemento deslizante de las catenarias. En la Figura 4.31 se muestra su aspecto físico.

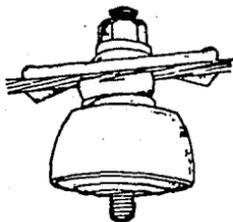
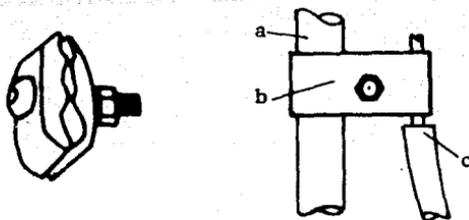


FIGURA 4.31 AISLADOR DE CENTRO

16 ) Grapa universal. - Son un par de piezas de bronce acopladas por medio de un tornillo, cuya función es unir mecánica y eléctricamente a los alimentadores principal y secundario. Figura 4.32.

Existen otros elementos que se utilizan en la instalación de la línea y sirven para cruces y cambios de dirección como se describe a continuación :

Segmentos flexibles de curva. - Simplifican la construcción de



- a ) Alimentador Principal
- b ) Grapa Universal
- c ) Alimentador Secundario

FIGURA 4.32 GRAPA UNIVERSAL

curvas, además de mejorar la apariencia de la línea elevada al reducir el número de elementos requeridos y existen para un amplio rango de ángulos. El aspecto flexibilidad tiene un valor muy importante ya que ayuda a mantener una suave unión entre los diferentes dispositivos y evita una brusca transición de la zapata del colector. En la Figura 4.33, se observa un segmento de curva con una aplicación de  $28^\circ$  a  $47^\circ$ , en la práctica existen para rangos de aplicación desde  $2^\circ$  hasta  $47^\circ$ .

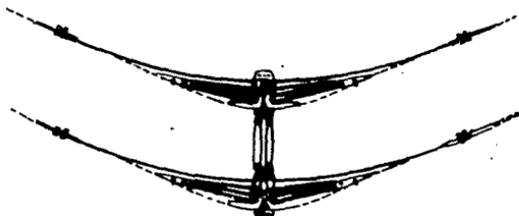


FIGURA 4.33 SEGMENTO DE CURVA

**Cruces : Rígidos y Ajustables.** - Cuando en las instalaciones de Línea Elevada, se tienen cruces de catenarias, estos dispositivos proporcionan protección a la inserción de la zapata del colector, proporcionando una suave operación. Prácticamente su rango de angularidad es de  $12^\circ$  a  $90^\circ$ .

Los cruces rígidos, como su nombre lo indica, sólo pueden aplicarse para un ángulo fijo; en cambio los cruces ajustables tienen una angularidad de aplicación variable. Para mantener una separación y un aislamiento convenientes se usan separadores aislantes, como se observa en la Figura 4.34.

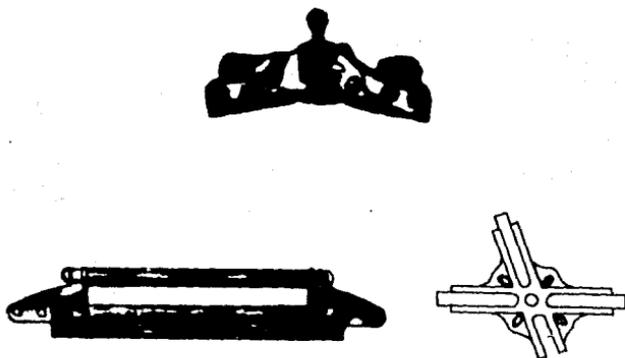


FIGURA 4.34 CRUCES Y SEPARADORES AISLANTES

**Cambios mecánicos y automáticos.** - Estos dispositivos se usan en lugares donde existen bifurcaciones y convergencia de líneas y actúan como elementos que seleccionan el camino a seguir, ya sea por



## LISTA DE FIGURAS

- 4.1 Línea única.
- 4.2 Conexión escalonada.
- 4.3 Conexión múltiple de alimentadores.
- 4.4 Alimentadores múltiples y seccionamiento.
- 4.5 Longitud del alimentador.
- 4.6 Alambre de cobre acanalado.
- 4.7 Conexión sencilla.
- 4.8 Conexión doble.
- 4.9 Resistencia equivalente unitaria. Conexión sencilla.
- 4.10 Resistencia equivalente unitaria. Conexión doble.
- 4.11 Longitud de alcance.
- 4.12 Situación crítica.
- 4.13 Configuración de la ruta 1.
- 4.14 Subestaciones en la ruta 1.
- 4.15 Subestaciones en la ruta 2.
- 4.16 Subestaciones en la ruta 3.
- 4.17 Subestaciones en la ruta 4.
- 4.18 Subestaciones en la ruta 5.
- 4.19 Subestaciones en la ruta 6.
- 4.20 Subestaciones en la ruta 7.
- 4.21 Subestaciones de C.D.
- 4.22 Soportes de línea elevada en calles de un sentido.

- 4.23 Soportes de línea elevada en calles de doble sentido.
- 4.24 Esfuerzos sobre el poste.
- 4.25 Distribución de postes.
- 4.26 Canilla alimentadora.
- 4.27 Suspensión alimentadora.
- 4.28 Canilla aislante.
- 4.29 Aislador tipo alfiler.
- 4.30 Aislador de tensión.
- 4.31 Aislador de centro.
- 4.32 Grapa universal.
- 4.33 Segmento de curva.
- 4.34 Cruces y separadores aislantes.
- 4.35 Cambio automático.

## REFERENCIAS

- 4.1 Productor SKODA PLZEN, Folletos de información de trolebuses, Checoslovaquia, Cortesía de la Embajada en México, 1976.
- 4.2 Depto. de Ingeniería Eléctrica, del Servicio de Transportes Eléctricos del DDF, México, 1979, Información directa.
- 4.3 L. Dawes C., " Tratado de Electricidad, Tomo I, Corriente Continua ", Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, España.
- 4.4 Transist Catalog No. 25, Ohio Brass Company, Mansfield, Ohio, USA.
- 4.5 Manual Monterrey, 1965, México.
- 4.6 Reglamento de Instalaciones Eléctricas.
- 4.7 Normas de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro ( en liquidación ).

## **CAPITULO QUINTO**

### **ESTIMACION ECONOMICA**

#### **5.1 Estimación económica.**

En base a la red de trolebuses propuesta en los capítulos anteriores se realizó la siguiente estimación económica para proporcionar una idea de los costos de las inversiones necesarias para las instalaciones, la operación y las tarifas para el cobro del servicio.

## 5.2 Detalle de los costos unitarios.

CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO EN PESOS ( M.N. ) ( 1979 )	PRECIO TOTAL EN PESOS ( M.N. ) ( 1979 )
Poste de concreto C-30	7,238	pieza	2,200	15,923,600
Poste de fierro de 30' x 5.5 "	200	pieza	7,915	1,583,000
Cable de cobre desnudo 500 MCM	254,768.8	metro	126	32,258,825
Alambre de trole ranurado 2/0	434,200.8	metro	48	21,063,080
Cable de cobre forrado 250 MCM	66,567.8	metro	106	7,102,784
Abrazaderas de 5/8 " x 5.5 "	4,247	pieza	165	700,755
Cruceta de 4 alfileres	4,247	pieza	525	2,229,675
Aislador tipo alfiler	8,494	pieza	26	226,025
Anillo sin espiga de 5.5 "	8,494	pieza	150	1,274,100
Anillo con espiga de 5.5 "	1,256	pieza	180	226,080
Tubo galvanizado de 2" x 16'	1,256	pieza	1,545	1,940,520

Varilla con cuerda y ojo de 1/2 " x 16.4 "	1,256	pieza	360	452,160
Grapa universal	6,610	pieza	53	350,330
Remate de punta de 2 "	1,256	pieza	150	188,400
Remate de centro de 2 "	1,256	pieza	150	188,400
Canilla aislante	5,024	pieza	25	125,600
Tornillo de ojo con tuerca de 1/2 " x 6.5 "	1,256	pieza	78	97,968
Canilla alimentadora positiva	1,810	pieza	1,600	2,896,000
Canilla alimentadora negativa	1,810	pieza	1,600	2,896,000
Suspensión alimentadora	16,988	pieza	156	2,650,128
Aislador de centro	5,982	pieza	153	915,246
Aislador de tensión	5,982	pieza	26	157,565
Cable galvanizado de 3/8 "	59,820	metro	26	1,555,320
Cable galvanizado de 1/4 "	3,080	metro	8	27,627

Segmento de curva flexible de 30° - 45°	274	pieza	14,805	4,056,586
Segmento de curva Flexible de 15° - 25°	34	pieza	10,671	362,864
Cambio mecánico de 45°	32	pieza	40,670	1,301,447
Cambio automático de 45°	32	pieza	80,034	2,561,106
Cruce rígido de 90°	184	pieza	26,000	4,784,000
Cruce rígido de 60°	12	pieza	26,000	312,000
Cruce rígido de 45°	24	pieza	26,000	624,000
Separador aislante	220	pieza	500	110,000
			SUBTOTAL	111,141,196
			Gastos de instalación	16,671,179
Línea elevada			TOTAL	127,812,375
Terreno para SE	250	m <sup>2</sup>	500	1,625,000
SE 1000 KW ( Ref.5.1 )	9	grupo	11,000,000	99,000,000
SE 2000 KW ( Ref.5.1 )	4	grupo	13,500,000	54,000,000
			SUBTOTAL	154,625,000

Trolebus ( Ref.5.2 )	80	pieza	3,578,800	286,304,000
Taller y depósito ( se consideró el costo del terreno más el 10 % del costo de equipo ).	1	grupo	—	67,935,387

### 5.3 Resumen de Inversiones :

Línea elevada	127,812,375
Trolebuses	286,304,000
Subestaciones	154,625,000
Talleres y Depósito	<u>67,935,387</u>
<b>TOTAL</b>	<b>636,676,762</b>

### 5.4 Consideraciones para la estimación de los costos :

#### a ) Vida útil :

Línea elevada	30 años
Trolebuses	20 "
Subestaciones	50 "
Taller y depósito	20 "

b ) Depreciación, se utilizó el método de línea recta ( Ref.5.3 ).

c ) Regreso del capital prestado a tasa de interés  $i = 12\%$  anual.

d ) Los costos de operación y mantenimiento permanecen constantes.

e ) Costo de energía eléctrica = ( 4.56 Kwh/km ) ( 0.75 \$/kwh )

( 7,905,618 km/año ) = 27,037,213.56 \$/año ( Ref.5.2 y 5.4 ).

f ) Costo llantas = ( 1 juego de 6 + 2 renovaciones ) ( 80 trolebuses )

$$= (6 \times 3500) + (6 \times 2 \times 1400) \times 80 = 3,024,000$$

- g) Gastos de administración estimados como 5 % del capital invertido.
- h) Operación y mantenimiento ( sueldos 2 operadores x 18 horas /día x año x 80 trolebuses ); se consideró que los costos de mantenimiento son << que los de operación.
- i) Imprevistos 10 % del importe de los gastos totales de operación.

### 5.5 Costo de depreciación anual ( CDA ).

$$CDA = \frac{\text{costo del equipo} - \text{valor de salvamento}}{\text{vida útil}} = \$/\text{año.}$$

$$CDA \text{ Línea elevada} = \frac{127,812,375 - 0}{30} = 4,260,412 \$/\text{año.}$$

$$CDA \text{ Trolebuses} = \frac{286,304,000 - 28,630,400}{20} = 12,883,680 \$/\text{año}$$

$$CDA \text{ Subestaciones} = \frac{154,625,000 - 0}{50} = 3,092,500 \$/\text{año.}$$

$$CDA \text{ Talleres y depósito} = \frac{67,935,387 - 6,793,539}{20} = 3,057,092 \$/\text{año}$$

$$CDA_T = 23,293,684 \$/\text{año}$$

### 5.6 Amortización del capital prestado AmC :

$$AmC = \text{costo de la inversión} ( A/F, i, n ).$$

donde :

$A/F$  = factor de recuperación de capital ( Ref. 5.3 ).

$i$  = tasa de descuento = 12 % anual.

$n$  = vida útil.

AmC Línea elevada = 127,812,375 ( 0.1241 ) = 15,866,628 \$/año.

AmC Trolebuses = 286,304,000 ( 0.1339 ) = 38,336,106 \$/año.

AmC Subestaciones = 154,625,000 ( 0.1204 ) = 18,619,942 \$/año.

AmC Talleres y depósito = 67,935,386 ( 0.1339 ) = 9,096,548 \$/año

$AmC_T$  = 81,919,224 \$/año

### 5.7 Gastos anuales :

Costo depreciación anual ( CDA )<sub>T</sub> = 23,293,684

Amortización anual del capital ( AmC ) = 81,919,224

Energía eléctrica ( e ) = 27,037,214

Llantas ( f ) = 3,024,000

Operación y mantenimiento = 11,520,000

Gastos generales y de administración = 6,351,721

Imprevistos	=	<u>15,314,584</u>
Total	=	168,460,427

### 5.8 Tarifa, 1a. Alternativa:

GTO = Gastos totales de operación = 168,460,427 \$/año.

VPD = Viajes -persona/día ( de la tabla 1.4 ) = 250,545,960

$$\frac{\text{GTO/año}}{\text{VPD/año}} = \frac{168,460,427}{250,545,960} = 0.67 \text{ \$/VPD}$$

Tarifa 0.67 \$/boleto.

### 5.9 Tarifa, 2a. Alternativa :

Considera la reposición de 80 trolebuses a los 20 años.

Gastos totales de operación anual	168,460,427
Inversión anual del segundo equipo	<u>51,219,786</u>
Total	\$ 219,680,213

$$( \text{GTO} )_2 = 219,680,213$$

$$\text{Tarifa} = \frac{219,680,213}{250,545,960} = 0.88 \text{ \$/boleto.}$$

### 5.10 Tarifa, 3a. Alternativa :

Considerando lo incluido en las anteriores alternativas y la creación de un fondo para investigación y desarrollo de tecnología en equipos de transporte, así como mejoras en las prestaciones de empleados.

Gastos totales de operación anual	168, 460, 427
Amortización anual del segundo equipo	51, 219, 786
Investigación y desarrollo de tecnología	20, 000, 000
Mejoras en las prestaciones a los trabajadores	<u>10, 865, 747</u>
	250, 545, 960

$$(GTO)_3 = 250, 545, 960 \text{ \$/año}$$

$$\text{Tarifa} = \frac{250, 545, 960 \text{ \$/año}}{250, 545, 960 \text{ boletos/año}} = 1.00 \text{ \$/boleto.}$$

#### 5.11 Costo por kilómetro de servicio instalado.

$$\frac{\text{Costo de inversión total}}{\text{Kilómetro de servicio instalado}} = \frac{636.7 \times 10^6}{197.9} = 3.22 \times 10^6 \text{ \$/km.}$$

$$\frac{\text{Gastos totales de operación anual}}{\text{Kilómetros de servicio instalado}} = \frac{168.5 \times 10^6}{197.9} = 0.85 \times 10^6 \frac{\text{\$/año}}{\text{km}}$$

#### 5.12 Costo por trolebus.

$$\frac{\text{Costo de inversión total}}{\text{Cantidad total de trolebuses}} = \frac{636.7 \times 10^6}{80} = 7.96 \times 10^6 \text{ \$/trolebus.}$$

$$\frac{\text{Gastos totales de operación anual}}{\text{Cantidad total de trolebuses}} = \frac{168.5 \times 10^6}{80} = 2.1 \times 10^6 \frac{\text{\$/año}}{\text{trolebus}}$$

## LISTA DE REFERENCIAS

- 5.1 Departamento de Ingeniería Eléctrica STEDDF.
- 5.2 Bianchi E. Estudio a nivel perfil del trolebus, Cd. Sahagún, Hgo. México.
- 5.3 Grant, Eugene L., Principles of Engineering Economy, The Ronald Press, Co. New York, Sixth Edition, 1976, pp. 37, 157 y 591.
- 5.4 Proyecto Trolebuses, ISTME, 2 marzo, 1979.

## CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente estudio, se han podido obtener algunas observaciones y conclusiones que se apuntan en seguida como las principales :

- El trolebus es un medio de transporte colectivo que cumple a satisfacción con los requerimientos exigidos a ese tipo de transporte como son, por ejemplo : capacidad, comodidad, velocidades permitidas en las ciudades, etc.
- Es un equipo de operación silencioso.
- No produce contaminación del aire.
- Sólo consume energía eléctrica cuando se encuentra en movimiento.
- Por la característica especial de su motor, éste devuelve al sistema, una mínima cantidad de energía durante el frenado o cuando baja una pendiente.
- No consume energéticos No renovables.

Los puntos anteriores aunados a un estudio económico mucho más detallado que el presentado en el capítulo quinto hacen preveer que resultará interesante realizar un estudio similar para otras ciudades de la República Mexicana, que cuenten con energía eléctrica y pudiéndose asegurar que en muchos casos resultará rentable el transporte masivo por medio de trolebuses.