

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

**DISEÑO ELÉCTRICO DE LA EXTENSIÓN NORTE DEL SISTEMA
TROLÉBÚS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**ESPINEL JARAMILLO SANDRA ELIZABETH
MORALES MARIÑO ENRIQUE ALFONSO**

DIRECTOR: INGENIERO FAUSTO AVILÉS

Quito, Octubre 2001

DECLARATORIA

Nosotros, ESPINEL JARAMILLO SANDRA ELIZABETH y MORALES MARIÑO ENRIQUE ALFONSO, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.



Espinel Jaramillo Sandra Elizabeth



Morales Mariño Enrique Alfonso

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Espinel Jaramillo Sandra Elizabeth y Morales Mariño Enrique Alfonso, bajo mi supervisión.



Ingeniero Fausto Avilés
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Fausto Avilés, por haber contribuido como director de este trabajo.

Al Ing. Vinicio Montalvo, Subdirector de la U.O.S.T., quien prestó su valiosa ayuda en el desarrollo de este proyecto.

A Enrique, mi compañero de tesis, del cual aprendí durante este tiempo que cualquier cosa en la vida debe hacérsela con la mayor rectitud y responsabilidad.

Sandra Elizabeth Espinel Jaramillo

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional, por el cúmulo de conocimientos impartidos.

Al Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, por confiar en mi desempeño profesional y la experiencia que me ha permitido obtener.

Al ingeniero Fausto Avilés, por su acertada dirección del presente proyecto.

A todos mis maestros.

Enrique Alfonso Morales Mariño

DEDICATORIA

A mis amados Marlon y Ana Sofía, por su apoyo, profundo amor y comprensión.

Sandra Elizabeth Espinel Jaramillo

DEDICATORIA

A mis padres: Laura e Iván

A mi esposa: Irene

A mi querido hijo: Enriquito

Enrique Alfonso Morales Mariño

CONTENIDO

| | |
|---|------------|
| RESUMEN..... | I |
| PRESENTACIÓN..... | III |
| | |
| CAPÍTULO 1. REQUERIMIENTOS OPERACIONALES DE LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE..... | 1 |
| 1.1. Descripción del actual Sistema Integrado de Transporte..... | 1 |
| 1.1.1. Antecedentes..... | 2 |
| 1.1.2. Sistema Trolebús..... | 2 |
| 1.1.2.1. Primera Etapa del Sistema Trolebús..... | 3 |
| 1.1.2.2. Extensión Sur del Sistema Trolebús..... | 5 |
| 1.1.3. Alimentadores del Sistema Integrado..... | 6 |
| 1.1.4. Sistema tarifario..... | 7 |
| 1.2. Estructura urbana de la ciudad de Quito..... | 8 |
| 1.3. Uso de suelo y población..... | 10 |
| 1.4. Oferta y demanda de transporte en la zona norte..... | 12 |
| 1.5. Determinación de la ruta y características de la vialidad..... | 14 |
| 1.6. Dimensionamiento de la flota y sistema operacional..... | 18 |
| | |
| CAPÍTULO 2. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA REQUERIDA POR EL SISTEMA..... | 20 |
| 2.1. Determinación de la potencia del vehículo..... | 20 |
| 2.1.1. Cálculo de fuerza y potencia para vehículo circulando en plano horizontal..... | 25 |
| 2.1.2. Cálculo de fuerza y potencia para vehículo circulando en plano inclinado..... | 26 |
| 2.2. Potencia operacional..... | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.2.1. Ubicación de vehículos en el recorrido de la Extensión Norte del Sistema Trolébus..... | 28 |
| 2.2.2. Determinación de la potencia requerida por el sistema..... | 29 |
| 2.2.3. Disponibilidad de suministro eléctrico para la Extensión Norte del Sistema Trolébus..... | 33 |
| 2.2.4. Determinación de la ubicación de las subestaciones de tracción..... | 35 |
| 2.2.4.1. Alternativa de dos subestaciones de tracción..... | 45 |
| 2.2.4.1.1. Condición de falla de la subestación de tracción N° 2, sentido de circulación sur – norte, con los trolebuses del terminal Ofelia..... | 46 |
| 2.2.4.2. Alternativa de tres subestaciones de tracción..... | 48 |
| 2.2.4.2.1. Condición de falla de la subestación de tracción N° 3, sentido de circulación sur – norte, con los trolebuses del terminal Ofelia..... | 48 |
| 2.2.4.3. Alternativa de cuatro subestaciones de tracción..... | 50 |
| 2.2.4.3.1. Condición de falla de la subestación de tracción N° 4, sentido de circulación sur – norte, con los trolebuses del terminal Ofelia..... | 51 |
| 2.2.4.3.2. Condición de falla de la subestación de tracción N° 4, sentido de circulación norte - sur, sin los trolebuses del terminal Ofelia..... | 53 |
| 2.2.4.3.3. Condición de falla de la subestación de tracción N° 2, para cualquier sentido de circulación..... | 55 |
| 2.2.4.3.4. Condición de falla de la subestación de tracción N° 3, sentido de circulación sur – norte, con los trolebuses del terminal Ofelia..... | 58 |
| 2.2.4.3.5. Condición de falla de la subestación de tracción N° 3, sentido de circulación norte - sur, sin los trolebuses del terminal Ofelia..... | 60 |
| 2.2.4.3.6. Condición de falla de la subestación de tracción N° 1, para cualquier sentido de circulación..... | 62 |
| 2.2.4.3.7. Condición de falla de la subestación de tracción La Y..... | 63 |
| 2.2.4.3.8. Condición normal de trabajo, sin fallas..... | 68 |
| 2.2.5. Determinación de la potencias de las subestaciones de tracción..... | 68 |
| 2.2.5.1. Potencia de la subestación de tracción N° 1..... | 69 |
| 2.2.5.2. Potencia de la subestación de tracción N° 2..... | 70 |
| 2.2.5.3. Potencia de la subestación de tracción N° 3..... | 71 |
| 2.2.5.4. Potencia de la subestación de tracción N° 4..... | 72 |
| 2.2.5.5. Compendio de las potencias de las subestaciones de tracción requeridas para la Extensión Norte del Sistema Trolébus..... | 73 |

CAPÍTULO 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS SUBESTACIONES

| | |
|--|-----|
| DE TRACCIÓN..... | 75 |
| 3.1. Descripción general de la subestación de tracción..... | 75 |
| 3.1.1. (=L1) Celda de entrada de línea..... | 78 |
| 3.1.2. (=L2) Celda de medida..... | 78 |
| 3.1.3. (=L3) Celda de protección del grupo rectificador..... | 78 |
| 3.1.4. (=L4) Celda de servicios auxiliares en media tensión..... | 79 |
| 3.1.5. (=ND1) Grupo transformador – rectificador..... | 79 |
| 3.1.6. (=ND2/=ND3) Celdas de salida de feeder en corriente continua..... | 80 |
| 3.1.7. (=NE/=NK) Servicios auxiliares..... | 80 |
| 3.1.8. Caseta para la instalación de equipos..... | 81 |
| 3.2. Convertidor AC/DC para subestación de tracción..... | 81 |
| 3.2.1. Conexión en serie de dos rectificadores de 6 pulsos..... | 83 |
| 3.2.1.1. Análisis de voltajes..... | 86 |
| 3.2.1.2. Análisis de la corriente..... | 92 |
| 3.2.2. Conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos..... | 94 |
| 3.2.2.1. Análisis de voltajes..... | 99 |
| 3.2.2.2. Análisis de la corriente..... | 101 |
| 3.2.3. Selección de la conexión ha utilizarse en las subestaciones de tracción..... | 103 |
| 3.2.4. Análisis de armónicos para el rectificador seleccionado..... | 105 |
| 3.2.4.1. Armónicos de voltaje a la salida del convertidor..... | 105 |
| 3.2.4.2. Armónicos de corriente a la entrada del convertidor..... | 108 |
| 3.3. Especificaciones técnicas de los equipos de las subestaciones de tracción.. | 112 |
| 3.3.1. (=L1) Celda de entrada de línea..... | 113 |
| 3.3.2. (=L2) Celda de medida..... | 114 |
| 3.3.3. (=L3) Celda de protección del grupo rectificador..... | 115 |
| 3.3.4. (=L4) Celda de servicios auxiliares en media tensión..... | 116 |
| 3.3.5. (=ND1) Grupo transformador – rectificador..... | 116 |
| 3.3.5.1. Especificaciones técnicas de los transformadores..... | 117 |
| 3.3.5.2. Especificaciones técnicas de los rectificadores..... | 118 |
| 3.3.6. (=ND2/=ND3) Celdas de salida de feeder en corriente continua..... | 120 |
| 3.3.7. (=NE/=NK) Servicios auxiliares..... | 121 |
| 3.3.7.1. Transformador de servicios auxiliares..... | 121 |
| 3.3.7.2. Celda de servicios auxiliares..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| 3.3.7.3. Celda del cargador y banco de baterías..... | 122 |
| 3.3.8. Casetas para la instalación de equipos..... | 123 |
| 3.3.8.1. Para las subestaciones de 6.3[kV]..... | 124 |
| 3.3.8.2. Para las subestaciones de 23[kV]..... | 124 |
| 3.3.9. Especificaciones técnicas del resto de instalaciones..... | 125 |
| 3.3.9.1. Malla de tierra..... | 125 |
| 3.3.9.2. Red de tierra..... | 126 |
| 3.3.9.3. Control..... | 126 |
| 3.3.9.4. Cableado..... | 127 |

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN 128

| | |
|--|-----|
| 4.1. Alcance de las instalaciones de línea de media tensión..... | 128 |
| 4.2. Características eléctricas de las líneas de media tensión..... | 130 |
| 4.3. Determinación del cable de media tensión requerido..... | 132 |
| 4.3.1. Aislamiento para el cable subterráneo..... | 132 |
| 4.3.2. Sección del cable subterráneo..... | 133 |
| 4.3.2.1. Sección para la circulación de la corriente nominal..... | 134 |
| 4.3.2.2. Sección para la circulación de la corriente de cortocircuito..... | 135 |
| 4.3.2.3. Caídas de tensión en las líneas de media tensión..... | 136 |
| 4.4. Diseño del recorrido de las líneas de media tensión..... | 139 |
| 4.5. Especificaciones técnicas de la canalización..... | 141 |
| 4.6. Lista de materiales requeridos..... | 143 |

CAPÍTULO 5. DISEÑO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO..... 144

| | |
|---|-----|
| 5.1. Descripción general de la línea aérea de contacto..... | 144 |
| 5.2. Elementos de la línea aérea de contacto..... | 145 |
| 5.2.1. Hilo de contacto..... | 145 |
| 5.2.1.1. Vano del hilo de contacto..... | 146 |
| 5.2.1.2. Tensado del hilo de contacto..... | 147 |
| 5.2.1.3. Esfuerzos producidos por el viento en el hilo de contacto..... | 150 |
| 5.2.2. Feeders de alimentación..... | 151 |
| 5.2.3. Conjuntos de suspensión..... | 152 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.3.1. Cables transversales..... | 153 |
| 5.2.3.2. Ménsula..... | 153 |
| 5.2.3.2.1. Esfuerzo producido por el peso de la ménsula..... | 154 |
| 5.2.3.3. Péndulo..... | 155 |
| 5.2.3.3.1. Tipos de péndulos requeridos..... | 156 |
| 5.2.4. Anclajes..... | 156 |
| 5.2.4.1. Anclaje en muro..... | 156 |
| 5.2.4.2. Anclaje de placa sanduche..... | 157 |
| 5.2.4.3. Anclaje de placa con varillas inclinadas..... | 157 |
| 5.2.5. Encarriladores..... | 157 |
| 5.2.6. Armarios de maniobra..... | 158 |
| 5.2.7. Aisladores de sección..... | 158 |
| 5.2.8. Postes..... | 159 |
| 5.2.8.1. Postes de hormigón..... | 159 |
| 5.2.8.2. Postes metálicos..... | 159 |
| 5.2.8.3. Esfuerzos producidos por el vientos en los postes..... | 160 |
| 5.2.8.4. Cimentaciones..... | 161 |
| 5.3. Cálculos de momentos..... | 162 |
| 5.3.1. Momentos en estructura con ménsula doble..... | 163 |
| 5.3.1.1. Momento debido a los pesos..... | 164 |
| 5.3.1.2. Momentos debido al viento..... | 164 |
| 5.3.1.3. Momento debido al atirantado..... | 165 |
| 5.3.1.4. Momento debido a sismos..... | 165 |
| 5.3.2. Momentos en estructura con transversales..... | 166 |
| 5.4. Determinación de estructuras tipo..... | 168 |
| 5.5. Diseño de la L.A.C..... | 169 |
| 5.5.1. Lista de materiales..... | 170 |

CAPÍTULO 6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS TROLEBUSES..... 171

| | |
|---|-----|
| 6.1. Descripción del funcionamiento del trolebús..... | 171 |
| 6.1.1. Sistema de tracción a diesel..... | 172 |
| 6.1.2. Sistema de tracción eléctrica..... | 173 |
| 6.2. Especificaciones técnicas del equipo de tracción diesel y del chasis | 175 |
| 6.2.1. Motor diesel..... | 175 |

| | |
|--|-----|
| 6.2.2. Caja de cambios..... | 176 |
| 6.2.3. Chasis..... | 176 |
| 6.2.3.1. Rango de dimensiones..... | 177 |
| 6.2.4. Suspensión..... | 178 |
| 6.2.5. Dirección..... | 179 |
| 6.2.6. Ruedas y neumáticos..... | 179 |
| 6.2.7. Ejes..... | 180 |
| 6.2.7.1. Eje delantero..... | 180 |
| 6.2.7.2. Eje central..... | 180 |
| 6.2.7.3. Eje propulsor posterior..... | 180 |
| 6.2.8. Frenos..... | 181 |
| 6.2.8.1. Freno de servicio..... | 181 |
| 6.2.8.2. Freno de estacionamiento..... | 182 |
| 6.2.8.3. Freno de parada..... | 182 |
| 6.2.9. Articulación..... | 182 |
| 6.2.10. Sistema de aire comprimido..... | 183 |
| 6.2.11. Sistema eléctrico..... | 184 |
| 6.2.11.1. Alternador..... | 184 |
| 6.2.11.2. Baterías..... | 184 |
| 6.2.11.3. Arrancador del motor diesel..... | 185 |
| 6.2.11.4. Tomacorrientes..... | 185 |
| 6.2.11.5. Faros..... | 185 |
| 6.2.12. Tanque de combustible..... | 185 |
| 6.2.13. Tubo de escape..... | 186 |
| 6.3. Especificaciones técnicas de la carrocería..... | 186 |
| 6.3.1. Dimensiones generales de la carrocería..... | 186 |
| 6.3.2. Estructura..... | 187 |
| 6.3.3. Red de asideros..... | 189 |
| 6.3.4. Mamparas..... | 190 |
| 6.3.5. Asiento y puesto del conductor..... | 190 |
| 6.3.6. Asientos..... | 190 |
| 6.3.7. Puertas..... | 191 |
| 6.3.8. Ventanas y cristales..... | 192 |
| 6.3.9. Aislamiento sonoro y térmico..... | 192 |
| 6.3.10. Climatización..... | 193 |
| 6.3.11. Sistema de comunicación interna..... | 194 |

| | |
|--|-----|
| 6.3.12. Sistema de iluminación..... | 194 |
| 6.3.12.1. Sistema de iluminación externa..... | 194 |
| 6.3.12.2. Sistema de iluminación interna..... | 195 |
| 6.4. Especificaciones técnicas del equipo de tracción eléctrica..... | 196 |
| 6.4.1. Motor de tracción..... | 198 |
| 6.4.2. Convertidor de impulsos directos..... | 199 |
| 6.4.3. Regulador electrónico de marcha y freno..... | 202 |
| 6.4.4. Filtro de red..... | 204 |
| 6.4.5. Resistencia de freno..... | 205 |
| 6.4.6. Tomacorrientes..... | 205 |
| 6.4.7. Convertidor de abordo..... | 206 |
| 6.4.8. Compresor eléctrico..... | 208 |
| 6.4.9. Bomba hidráulica para la servodirección eléctrica..... | 208 |
| 6.4.10. Traductores digitales de recorrido de los pedales..... | 209 |
| 6.4.11. Vigilador de aislamiento..... | 209 |
| 6.4.12. Detector de peso máximo..... | 209 |
| 6.4.13. Tablero de control del sistema eléctrico..... | 210 |
| 6.4.14. Pequeños componentes..... | 211 |
| 6.4.15. Estructura del cableado..... | 211 |
| 6.4.16. Montaje de los equipos..... | 212 |

CAPÍTULO 7. PRESUPUESTO REFERENCIAL DEL PROYECTO 214

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 217

| | |
|---------------------------|-----|
| 8.1. Conclusiones..... | 217 |
| 8.2. Recomendaciones..... | 220 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 222

ANEXOS

RESUMEN

En el presente Proyecto de Titulación se realiza el diseño eléctrico de las instalaciones y equipos requeridos para la Segunda Etapa del Proyecto Trolebús de la ciudad de Quito.

Se considera como premisas del trabajo los resultados de los estudios de transporte desarrollados en 1996 por el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, que establecen la necesidad de ampliar el Sistema Trolebús, y determinan los requerimientos operacionales de esta ampliación, en términos de demanda de transporte, ruta, flota y plan operacional.

Luego de los cálculos respectivos, se ha determinado que la potencia requerida por un vehículo trolebús, para las condiciones operacionales del Sistema Trolebús de la ciudad de Quito (carga 180 pasajeros, pendiente máxima 14.7%; y, velocidad máxima 60[km/h]), debe ser de 230[kW].

Con el plan operacional previsto en las condiciones más exigentes, despacho de un vehículo cada 2.4[min], se calcula la potencia total requerida por el sistema, 3220[kW]. Considerando las caídas de voltaje en el hilo de contacto y el voltaje mínimo con el que operan los trolebuses (525[V]), se determina que el sistema requiere de cuatro subestaciones de tracción, tres de 1450[kW], y una de 840[kW] ha ubicarse en el terminal Ofelia. La distancia entre subestaciones se ha determinado en 1600[m].

Definidas los requerimientos de potencia de las subestaciones de tracción, se establecen las características y especificaciones técnicas de las mismas, para lo cual, luego de un análisis detallado se selecciona un tipo de rectificador, mismo que deberá ser no controlado de 12 pulsos formado por conexión en paralelo de dos rectificadores no controlados de 6 pulsos. Finalmente se contrastan los valores de distorsiones armónicas previstos, con lo establecido en la norma IEEE Std 519-1992 y se establece que las subestaciones de tracción funcionarían, sin

necesidad de filtros de armónicos a la entrada, en los límites permisibles por la norma.

El enlace entre las subestaciones de tracción y las subestaciones de distribución de la Empresa Eléctrica Quito S. A. (EEQ), denominadas Líneas de Media Tensión, se han diseñado considerando las condiciones de distribución determinadas por la EEQ y los requerimientos de confiabilidad y de urbanismo impuestos por el Municipio. Se ha determinado la necesidad de cuatro líneas de media tensión constituidos por primarios expresos subterráneos; dos de ellas a 6.3[kV] alimentadas desde la subestación de distribución N° 17 de la EEQ; y, las otras dos alimentadas a 23[kV] desde la subestación de distribución N° 19 de la EEQ.

Para la distribución de la corriente continua desde las subestaciones de tracción hasta los vehículos trolebuses, se ha considerado la instalación de una red de distribución a lo largo del recorrido de la Extensión Norte del Sistema Trolebús, denominada Línea Aérea de Contacto (L.A.C.). En función de las características físicas de los elementos disponibles para este tipo de instalación y de mantener homogeneidad con el resto de instalaciones del Sistema Trolebús, se ha definido una serie de estructuras tipo, las mismas que en función del recorrido del diseño vial han sido utilizadas en el diseño de la L.A.C.

Considerando los requerimientos de potencia de los vehículos trolebuses y las características de los trolebuses que el Municipio adquirió en la Primera Fase de la Segunda Etapa del Proyecto Trolebús de la ciudad de Quito, se describe las características técnicas de los 28 vehículos necesarios para la Extensión Norte del sistema, en términos de las especificaciones mecánicas del chasis, del sistema de tracción diesel, de la carrocería; y, del equipo de tracción eléctrico.

Finalmente se realiza un presupuesto referencial del proyecto, estableciéndose que al valor para el equipamiento eléctrico descrito y los vehículos trolebuses requeridos para la Extensión Norte, asciende a la suma de US \$24'800,000.00.

PRESENTACIÓN

Sobre la base de los estudios de los requerimientos de transporte realizados por el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, a través de la Unidad de Planificación y Gestión del Transporte, que determinan la necesidad de ampliar el sistema tronco alimentador del Sistema Trolebús, tanto al norte como al sur de la ciudad; y considerando que está pendiente la ejecución de la Extensión Norte del Sistema, en el presente trabajo se realiza el diseño de las instalaciones eléctricas requeridas para el proyecto, a saber:

- Dimensionamiento y ubicación de las subestaciones de tracción requeridas, así como la determinación de sus especificaciones técnicas;
- Diseño de las Líneas de Media Tensión;
- Diseño de la Línea Aérea de Contacto; y,
- Determinación de las especificaciones técnicas de los vehículos trolebuses requeridos para esta etapa del proyecto.

Para ello, el trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera:

En el Capítulo 1. se realiza un análisis de los estudios de transporte realizados por el Municipio que justifican la ejecución de la Extensión Norte del Sistema Trolebús y que determinan su ruta. Para un horizonte de 10 años se determina el dimensionamiento de la flota requerida y el plan operacional previsto.

Con base a la información del Capítulo 1., en el Capítulo 2. se determina la potencia eléctrica demandada por el sistema, el número de subestaciones de tracción requeridas, su potencia y ubicación.

En Capítulo 3. se presentan las especificaciones técnicas de las subestaciones de tracción requeridas para el proyecto. Luego de un análisis detallado de alternativas, se selecciona el tipo de rectificador a utilizarse. Para el rectificador seleccionado se realiza un análisis de las distorsiones armónicas del voltaje de

salida y de la corriente de entrada, contrastando los valores de la distorsión armónica de la corriente de entrada con lo determinado en la norma IEEE Std 519-1992.

En el Capítulo 4, se realiza el diseño de las 4 líneas de media tensión requeridas. Se especifica, justificadamente, el tipo de instalación y cable a utilizarse, la red de canalizaciones requeridas y se realiza el diseño del recorrido de cada una de las líneas de media tensión.

El diseño de la Línea Aérea de Contacto es desarrollado en el Capítulo 5. Se determinan las estructuras tipo a utilizarse y se presentan los planos del diseño de la Línea Aérea de Contacto a lo largo del recorrido de la ruta de la Extensión Norte del Sistema Trolebús.

En el Capítulo 6. se presentan las especificaciones técnicas de los vehículos trolebuses requeridos para la Extensión Norte del Sistema. Las especificaciones han sido desarrolladas buscando homogeneidad con los trolebuses que adquirió el Municipio en la Primera Fase de la Segunda Etapa del Proyecto.

Sin que sea el objeto del presente trabajo, pero por considerarse muy importante para el análisis económico y financiero del proyecto, en el Capítulo 7 se presenta el presupuesto referencial de las instalaciones y equipos diseñados y descritos en el presente trabajo.

Finalmente el Capítulo 8. recoge las conclusiones y recomendaciones a las que han llegado los autores del presente Proyecto de Titulación.

En el desarrollo del trabajo se ha tratado de realizar explicaciones detalladas y didácticas utilizando gráficos y esquemas, por lo que se estima que este proyecto sea una ayuda para otras personas que aborden los temas en él tratados. Por otra parte, los autores consideran que el trabajo es una referencia de cómo tratar y aportar a un proyecto interdisciplinario de gran envergadura y con enfoque social.

CAPÍTULO 1. REQUERIMIENTOS OPERACIONALES DE LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE

En este primer capítulo se tendrá como resultado la información que desde el punto de vista del transporte, es la partida para el diseño eléctrico de la Segunda Fase de la Segunda Etapa del Proyecto Trolebús (Extensión Norte). Al final del capítulo se dispondrá del dimensionamiento de la flota y el plan operacional de la Extensión Norte del Sistema Trolebús, a un horizonte de 10 años; para ello se ha tomado en cuenta la estructura urbana de la ciudad, el uso de suelo y población, la oferta y demanda de transporte en la zona norte; y, la determinación de la ruta y la vialidad de la ampliación.

Para el desarrollo de este capítulo se ha considerado básicamente los estudios de transporte realizados por el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, a través de la Unidad de Planificación y Gestión del Transporte.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL ACTUAL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE

En el presente subcapítulo se realiza una breve descripción del actual Sistema Integrado de Transporte, que comprende la troncal trolebús desde el terminal La Y hasta el Terminal Morán Valverde y sus rutas alimentadoras.

1.1.1 ANTECEDENTES

El Cabildo del cantón Quito, capital de la República del Ecuador, desde 1990 realizó estudios de ingeniería para solucionar el problema de transporte de la ciudad.

Los estudios efectuados en transporte con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), y la participación de expertos de distintas nacionalidades, coincidieron en descartar otras alternativas planteadas como: el metro, el tren ligero, el monorriel; por sus altos costos; y consideraron como válida la del trolebús.

En los estudios se determinó que el 75% del tráfico de pasajeros urbanos que utilizan los sistemas públicos de transporte, se presenta en el eje Villa Flora - Iñaquito. El restante 25% del tráfico de pasajeros se distribuye en los demás ejes paralelos y algunos transversales.

En consecuencia, convenía construir un sistema de transporte económicamente factible que incremente la velocidad media del transporte.

El sistema de transporte escogido además disminuye el nivel del ruido y la contaminación ambiental, al no existir gases de combustión, pues utiliza como accionamiento principal un motor eléctrico de tracción y cuentan con un motor a diesel, que entra a funcionar en caso de problemas en la tracción eléctrica u obstáculos de tráfico.

1.1.2 SISTEMA TROLEBÚS

El Sistema Trolebús se constituye en la troncal del Sistema Integrado de Transporte, actualmente cuenta con un recorrido de 16.1[km] y ha sido implantado en dos etapas, como se describe a continuación.

1.1.2.1 Primera Etapa del Sistema Trolebús

En el año de 1995 el trolebús entró en funcionamiento parcial, y desde abril de 1996 empieza a operar con una flota de 54 trolebuses la cual conforma la primera etapa que comprende la ruta de norte a sur, entre el Terminal de la "Y" hasta el terminal El Recreo.

La infraestructura está compuesta de las vías, estaciones de transferencia, paradas, el taller de mantenimiento (17,000[m²] de área total), el sistema eléctrico, la semaforización centralizada, el boletaje y un sistema de comunicaciones entre las paradas.

El Sistema Trolebús cuenta con carriles exclusivos para su funcionamiento, dispone en sus extremos norte (La Y) y sur (El Recreo), de dos estaciones de transferencia de pasajeros en donde los usuarios del sistema pueden acceder al servicio de los alimentadores y del servicio de Trolebús, produciéndose de esta manera la integración física y tarifaria del sistema de transporte.

El sistema está provisto, en el tramo "El Recreo - La Y", de 39 paradas modulares de 75[m²] de área, con una distancia promedio entre ellas de 400[m]. En sentido Norte - Sur están ubicadas 20 paradas, y en el sentido contrario 19 paradas, como se describe en la Tabla 1.1.

Esta primera etapa del sistema trolebús cubre una longitud de 11.2[km] con el siguiente recorrido:

Sentido Sur – Norte: Terminal El Recreo, Av. Pedro Vicente Maldonado, calle Juan José Flores, calle José Mejía Lequerica, calle Juan Pío Montufar, Av. 10 de Agosto, Terminal La Y.

Sentido Norte - Sur: Terminal La Y, Av. 10 de Agosto, Calle Guayaquil, Av. Pedro Vicente Maldonado, Av. Carlos María de la Torre, calle Juan Marquez, Av. Pedro Vicente Maldonado, Terminal El Recreo.

| SENTIDO SUR – NORTE | | SENTIDO NORTE – SUR | |
|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Nº | NOMBRE | Nº | NOMBRE |
| 1 | Villaflora | 1 | La Y |
| 2 | Chimbacalle | 2 | Estadio |
| 3 | La Colina | 3 | Carolina |
| 4 | La Recoleta | 4 | Florón |
| 5 | Cumandá | 5 | Mariana de Jesús |
| 6 | Santo Domingo | 6 | Cuero y Caicedo |
| 7 | La Marín | 7 | La Colón |
| 8 | Hermano Miguel | 8 | Santa Clara |
| 9 | Alameda | 9 | Mariscal |
| 10 | Ejido | 10 | Ejido |
| 11 | Mariscal | 11 | Alameda |
| 12 | Santa Clara | 12 | San Blas |
| 13 | La Colón | 13 | Plaza del Teatro |
| 14 | Cuero y Caicedo | 14 | Plaza Chica |
| 15 | Mariana de Jesús | 15 | Santo Domingo |
| 16 | Florón | 16 | Cumandá |
| 17 | Carolina | 17 | La Recoleta |
| 18 | Estadio | 18 | Machángara |
| 19 | La Y | 19 | Card. de la Torre |
| | | 20 | Villaflora |

Tabla 1.1. Paradas de la Primera Etapa del Sistema Trolebús

En la Figura 1.1. se presenta un esquema del recorrido de la primera fase del Sistema Trolebús de la ciudad de Quito y sus líneas alimentadoras.



Figura 1.1. Tramo EL RECREO - LA Y

1.1.2.2 Extensión Sur del Sistema Trolebús

A finales de 1999 fueron incorporados a la flota 59 nuevos trolebuses (aumentando de esta forma la flota a 113 vehículos), a la vez que se construyó la denominada Primera Fase de la Segunda Etapa del Proyecto Trolebús (Extensión Sur), la misma que comprende el tramo "El Recreo - Morán Valverde". En esta primera ampliación del sistema existen 8 paradas, una estación de transferencia y una parada de integración. Las paradas de la Extensión Sur se describen en la Tabla 1.2.

| PARADAS DE LA EXTENSIÓN SUR DEL SISTEMA TROLEBÚS | |
|--|------------------------------|
| Nº | NOMBRE |
| 1 | El Calzado |
| 2 | Parada de integración España |
| 3 | Quito Sur |
| 4 | La Internacional |
| 5 | Ajaví |
| 6 | Solanda |
| 7 | Mercado Mayorista |
| 8 | Quiniag |
| 9 | Registro Civil |

Tabla 1.2. Paradas de la ruta de la Extensión Sur del Sistema Trolebús

El recorrido de la Extensión Sur, en 4.9[km], es, desde el terminal El Recreo hacia el Sur, el siguiente: Av. Teodoro Gómez de la Torre, calle Moraspungo, calle Pinllopata, calle Circunvalación, Av. Teniente Hugo Ortiz, hasta llegar al terminal Morán Valverde. En la Figura 1.2. se presenta un esquema de la ruta de la Extensión Sur del Sistema Trolebús.

| Línea | | Flota | | | | Longitud ruta en redondo [km] | Número paradas | Tiempo en parad /viaj [min] |
|--------------------------------|------|-----------|-----|-----|-----|--|-------------------|--------------------------------------|
| | | lun-vier | sáb | dom | Fer | | | |
| Solanda | AS10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 11.00 | 26 | 6.50 |
| Chillogallo | AS20 | 7 | 7 | 7 | 7 | 18.00 | 38 | 9.50 |
| Oriente Quiteño | AS30 | 7 | 5 | 5 | 7 | 13.40 | 23 | 5.75 |
| Lucha de los Pobres | AS40 | 7 | 5 | 5 | 7 | 13.70 | 31 | 7.75 |
| Reserva Recreo | R | 5 | 5 | 5 | 5 | 180.00 | 0 | 0.00 |
| Estación Recreo | | 31 | | | | | 118 | |
| Cotocollao | AN10 | 10 | 8 | 8 | 10 | 15.50 | 35 | 8.75 |
| Rumiñahui | AN30 | 7 | 7 | 7 | 7 | 13.50 | 28 | 7.00 |
| Kennedy | AN40 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7.50 | 17 | 4.25 |
| Comité del Pueblo | AN50 | 11 | 6 | 6 | 11 | 13.30 | 32 | 8.00 |
| Laureles | AN60 | 6 | 4 | 4 | 6 | 6.70 | 15 | 3.75 |
| Reserva La Y | R | 5 | 4 | 4 | 5 | 180.00 | 0 | 0.00 |
| Estación La Y | | 44 | | | | | 127 | |
| Santa Rosa* | MV01 | | | | | 8.00 | | 0.00 |
| San Luis* | MV02 | | | | | 10.70 | | 0.00 |
| El Girón | MV03 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8.00 | 16 | 4.00 |
| Cdla. Ibarra | MV04 | 4 | 4 | 4 | 4 | 10.70 | 23 | 5.75 |
| Manuelita Sáenz | MV05 | | | | | 10.00 | 35 | 8.75 |
| Camal Metropolitano* | MV06 | | | | | 12.70 | 29 | 7.25 |
| Guamaní | MV07 | 6 | 4 | 4 | 6 | 13.40 | 39 | 9.75 |
| Cdla. del Ejército | MV08 | 3 | 3 | 3 | 3 | 10.00 | 16 | 4.00 |
| S. Martín de Porres | MV09 | 5 | 4 | 4 | 5 | 12.70 | 23 | 5.75 |
| Reserva Morán Valverde | R | 1 | 1 | 1 | 1 | 180.00 | 0 | 0.00 |
| Estación Morán Valverde | | 22 | | | | | 181 | |

Tabla 1.3. Características de líneas alimentadoras^[1.1]

1.1.4 SISTEMA TARIFARIO

El Sistema Trolebús tiene dos tipos de tarifas de acuerdo a las leyes que rigen en el Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito. Tarifa Diferenciada para niños, discapacitados, personas de la tercera edad (mayores de 65 años), y estudiantes, la Tarifa Normal es para los usuarios comunes.

En la actualidad el costo que debe pagar el usuario es de 20ctvs de dólar en el caso de adultos, y 10ctvs en el caso de personas de la tercera edad y niños.

^[1.1] Datos obtenidos de la Subdirección de Operaciones de la UOST

1.2 ESTRUCTURA URBANA DE LA CIUDAD DE QUITO

La ciudad de Quito presenta una morfología urbana alargada en sentido norte – sur de aproximadamente 40 [km] de largo y 8 [km] de ancho debido a la presencia de dos cordones montañosos laterales (oriente y occidente), lo cual redundará en una acentuada topografía con pendientes de hasta 18% y numerosas quebradas transversales, todo esto en un área de aproximadamente 18,770 hectáreas^[1,2].

El área urbana de la ciudad de Quito está dividida en tres zonas diferenciadas, a saber:

La zona central denominada Yavirac que comprende dos sectores centrales, el primero conformado por el Centro Histórico generatriz de la ciudad y el segundo por el Centro Moderno ubicado en el centro – norte de la ciudad.

La zona norte denominada Anansaya que comprende varios sectores de expansión urbana y de equipamiento urbano caracterizado por la presencia del aeropuerto Mariscal Sucre.

Finalmente la zona sur denominada Irimzaya compuesta por varios sectores de expansión urbana.

La forma urbana generatriz en el centro histórico es cuadrangular la misma que se expande hacia el norte y sur de la ciudad tratando de preservar uniformidad y adaptándose a la topografía irregular del terreno, siempre siguiendo un marcado eje central y longitudinal que atraviesa todo el territorio, este eje vincula las entradas tanto sur como norte de la ciudad, atravesando el Centro Histórico.

El eje central a lo largo de la ciudad de Quito se ha constituido en la columna vertebral de todos los sistemas urbanos y dentro de ellos, el sistema de transporte, como vinculador de las actividades y usos de los suelos.

^[1,2] Según revista “QUITO 2020 PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL” Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Dirección General de Planificación.

El eje central de la ciudad ha generado el corredor central y principal que atraviesa su cuenca longitudinal dividiéndola a su vez en la zona oriental y occidental, donde se han construido corredores y ejes secundarios y paralelos. Esta conformación predominantemente longitudinal produce movimientos también longitudinales mientras que las conexiones transversales son escasas y parciales.

Adicionalmente a la conformación longitudinal de la ciudad se tiene como característica especial que la zona central presenta una estrangulación en el sector del centro histórico donde el ancho de la ciudad disminuye a 3 km, por lo que, en esta zona los ejes longitudinales se aproximan mucho y los corredores disminuyen su capacidad.

En la Figura 1.3. se esquematiza la forma de la ciudad de Quito con las zonas y ejes descritos.

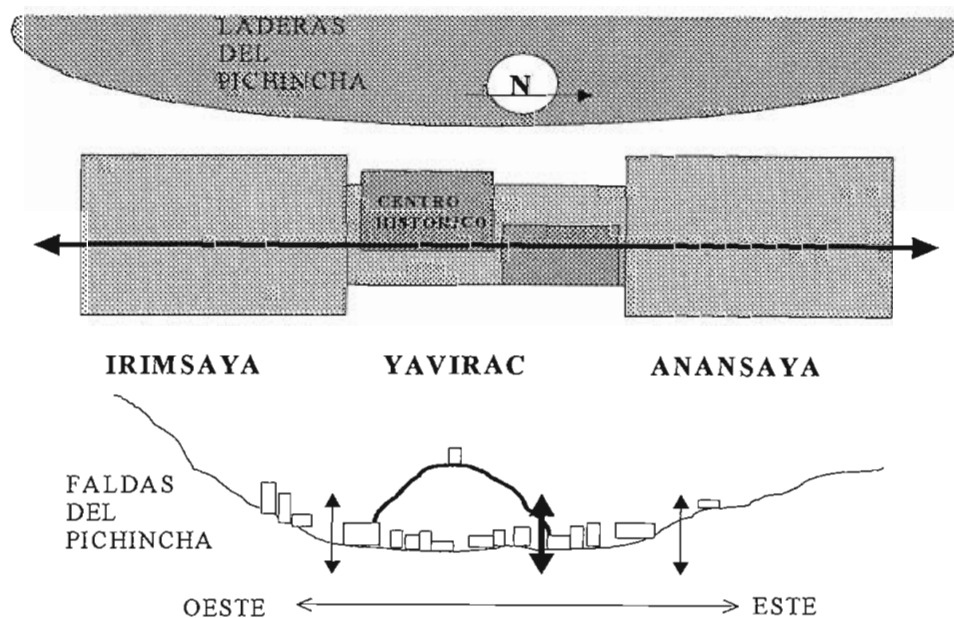


Figura 1.3. Estructura Urbana de la ciudad de Quito

1.3 USO DE SUELO Y POBLACIÓN

El uso de suelos de una urbe y su población determinan las necesidades de transporte de los ciudadanos, en tal sentido las entidades Municipales encargadas de la planificación del transporte analizan minuciosamente estos parámetros para la determinación de los requerimientos de movilidad de los ciudadanos y, en función de ello, plantear sistemas que permitan satisfacer sus necesidades de transporte.

En la ciudad de Quito la zona central se caracteriza por concentrar las actividades comerciales, de servicios; y, de gestión, tanto pública como privada, lo que ha generado usos de suelos múltiples en gran escala, mientras que el uso de suelo para fines residenciales en esta zona está muy disminuido.

La zona norte posee fundamentalmente uso de suelo residencial combinado con usos de suelo comerciales y de servicios acorde con los indicadores poblacionales; en esta zona se dispone también de equipamiento de transporte aéreo con la presencia del aeropuerto Mariscal Sucre; además se tiene presencia de uso de suelo industrial de baja y mediana capacidad productiva. Para el dimensionamiento y ubicación del sistema de transporte de esta zona hay que tomar en cuenta que está previsto la reubicación del aeropuerto, lo cual hará que cambie el uso de suelo de esta área, lo que hace predecir un aumento del uso de suelo residencial y recreacional.

La zona sur al igual que la norte tiene primacía de uso de suelo residencial combinado con usos comerciales y de servicios en proporción a su población; además se tiene usos de suelo industriales de baja y mediana capacidad productiva.

Esta determinación de usos de suelo hace que la zona central sea la mayor generadora de viajes existiendo movimientos poblacionales de tipo radial desde las zonas norte sur hacia la zona centro y viceversa y movimientos poblacionales

de tipo diametrales entre las zonas norte y sur, como se esquematiza en la Figura 1.4.

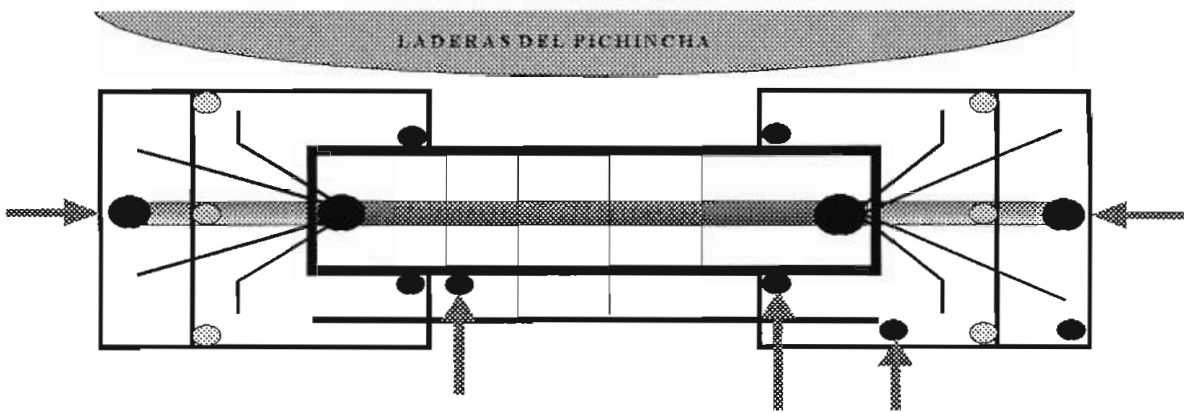


Figura 1.4. Asignación de viajes de transporte público en la ciudad de Quito

Como ya se mencionó anteriormente, la población de una urbe es un parámetro fundamental para la determinación de los requerimientos de transporte de la ciudad, por ello es importante analizar este parámetro para plantear cualquier alternativa de transporte.

De acuerdo a los resultados del censo realizado en el año de 1982, la población de la ciudad de Quito fue de 866,472 habitantes; y, según el censo del año 1990 fue de 1'094,318 habitantes, presentando una tasa de crecimiento anual de 2.96%, la proyección realizada para el año 2010 es de 1'961,625 habitantes.

$$P = P_o(1 + T)^n$$

donde: P: Población final
 Po: Población inicial
 T: Tasa de crecimiento
 n: Número de años

$$P_{2010} = P_{1990}(1 + 0.0296)^{20}$$

$$P_{2010} = 1'961,165$$

La población económicamente activa en 1982 fue de 297,051 habitantes, en 1990 de 375,163 habitantes con una tasa bruta de participación referida a la población urbana de 34.3%, la proyección para el año 2010 es de 672,500 habitantes.

Con estos datos, la Unidad de Planificación y Gestión del Transporte (UPGT) del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito ha definido y compatibilizado las simulaciones de la red integrada de transporte donde la población económicamente activa es la generadora del mayor porcentaje de viajes en la urbe, donde en términos de ciudad aproximadamente el 45% de la población económicamente activa trabaja, el 29% estudia, 23% realiza actividades complementarias o relacionadas; y, 3% no está empleado. Esta estructura económica se complementa con la estructura de ingresos donde en términos de ciudad el 53% tiene ingresos menores al salario mínimo vital, el 21% tiene ingresos entre uno y dos salarios mínimo vitales, en tanto que el 26% tiene ingresos de más de dos salarios mínimo vitales^[1.3].

1.4 OFERTA Y DEMANDA DE TRANSPORTE EN LA ZONA NORTE

Según estudios realizados por la Unidad de Planificación y Gestión del Transporte, luego de la implantación y puesta en funcionamiento de la troncal trolebús, se determinó la necesidad de realizar una serie de cambios en las líneas de transporte público convencional, esto involucró una reestructuración tanto en las rutas de los buses urbanos como en sus frecuencias de operación, llegándose a frecuencias óptimas de hasta 400 vehículos por hora.

El transporte urbano convencional, que representa a la oferta del sistema de transporte, ha venido creciendo en los últimos tiempos en la zona norte de la

^[1.3] Datos de la población tomados del documento "PROYECTO TROLEBÚS II ETAPA", UPGT, Julio de 1996

ciudad, a lo largo de tres ejes bien definidos, que son: Av. 6 de Diciembre, Av. 10 de Agosto; y, con mayor intensidad en la Av. De la Prensa.

Considerando este claro crecimiento de la oferta del transporte urbano convencional en los ejes descritos, El Municipio, con el objeto de modernizar el transporte público, ha ejecutado la troncal 6 de Diciembre "Ecovía" que entró a funcionar de forma provisional a partir de agosto del 2001; y, ha planificado la ampliación del sistema trolebús a lo largo de la Av. De la Prensa y la Av. Diego de Vásquez, hasta el sector de la Ofelia. Toda esta planificación la han realizado considerando una completa jerarquización de vías y rutas para los diferentes tipos de transporte, por ejemplo vías para circulación de solo buses, vehículos livianos y carriles exclusivos.

Por otro lado, la UPGT ha analizado también el comportamiento de los tres ejes descritos desde el punto de vista de la demanda de transporte público (población), determinándose que el eje de la Av. de la Prensa entre el sector de La Y hasta la Ofelia presenta una mayor demanda de usuarios de transporte público, a la vez que constituye una división geográfica equitativa del valle en el que se asienta la ciudad.

La ejecución de la ampliación del sistema trolebús desde el terminal La Y hasta el sector de la Ofelia permitirá vertebrar la ciudad con un eje central que servirá longitudinalmente a la demanda de transporte, y que de acuerdo a los estudios de transporte hará necesario fortalecer el tramo central del sistema trolebús, entre el terminal de El Recreo y de La Y, por medio de una operación de convoy de dos trolebuses, para pasar luego al tren ligero de superficie.

De acuerdo a los estudios de transporte elaborados por la UPGT, la demanda de pasajeros entre el terminal de La Y y el sector de la Ofelia, a través de la Av. de la Prensa y la Av. Diego de Vásquez se resume en la Tabla 1.4.

| Año | Pasajeros/hora dirección | Pasajeros/día | Pasajeros/año (miles) |
|------|-----------------------------|---------------|--------------------------|
| 1997 | 2.444 | 33.350 | 12.173 |
| 1998 | 2.517 | 35.573 | 12.984 |
| 1999 | 2.593 | 36.000 | 13.140 |
| 2000 | 2.671 | 38.000 | 13.870 |
| 2001 | 2.751 | 38.000 | 13.870 |
| 2002 | 2.834 | 40.000 | 14.600 |
| 2003 | 2.919 | 40.000 | 14.600 |
| 2004 | 3.007 | 42.000 | 15.330 |
| 2005 | 3.097 | 42.000 | 15.330 |
| 2006 | 3.190 | 44.000 | 16.060 |
| 2007 | 3.286 | 46.000 | 16.790 |
| 2008 | 3.385 | 46.000 | 16.790 |
| 2009 | 3.487 | 48.000 | 17.520 |
| 2010 | 3.592 | 48.000 | 17.520 |
| 2011 | 3.700 | 52.000 | 18.980 |
| 2012 | 3.811 | 54.000 | 19.710 |
| 2013 | 3.925 | 56.000 | 20.440 |

Tabla 1.4. Demanda de pasajeros por día para la prolongación La Y– Ofelia (Av. de la Prensa)^[1.4]

1.5 DETERMINACIÓN DE LA RUTA Y CARACTERÍSTICAS DE LA VIALIDAD.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, en términos de demanda, la UPGT ha determinado que para la ampliación del sistema trolebús hacia el norte de la ciudad, la ruta seguirá desde la Estación de Transferencia La Y por la Av. de la Prensa, su prolongación como Av. Diego de Vásquez, hasta el sector de La Esperanza, donde está ubicado el estadio de la Liga Deportiva Universitaria, donde se construirá un nuevo terminal de transferencia de pasajeros denominada “Ofelia”; en este terminal se integrarán: las líneas alimentadoras del extremo norte de la ciudad, el transporte micro regional de la Mitad del Mundo y Calderón; y, las rutas interurbanas que provienen del norte y noroeste del país.

En términos de infraestructura, la extensión del sistema trolebús contará con los mismos sistemas de vías exclusivas, paradas, boletaje, semaforización; y,

^[1.4] Fuente “PROYECTO TROLEBÚS ETAPA II”, UPGT, JULIO DE 1996

señalización, instalados en el resto de la troncal, de esta forma se permitirá la integración física y tarifaria del sistema de transporte.

El diseño vial para la ruta de la extensión del sistema trolebús, desarrollado por la UPGT, toma como base, al igual que en el resto del sistema, la construcción de carriles exclusivos para la circulación de los vehículos trolebuses. Estos carriles exclusivos, de acuerdo al análisis funcional y la experiencia de la Extensión Sur del sistema trolebús (entre el terminal El Recreo y el terminal Morán Valverde) han sido diseñados en el centro de la vía.

Así mismo se ha determinado que con el objeto de optimizar el espacio que utilizarán los carriles exclusivos y las paradas, se ubicará un solo parterre central, sobre el cual se construirán las paradas y junto a este los dos carriles exclusivos, separados del resto del tránsito mediante bordillos prefabricados y para no requerir de un parterre adicional se realizará la circulación de los vehículos en contravía, al igual que en la extensión sur del sistema trolebús, de tal manera que las puertas de los trolebuses estén siempre hacia el parterre, permitiendo de esta forma una fácil relación vehículo – parada y ahorro de espacio.

La sección transversal típica y más favorable para el diseño vial se presenta en la Figura 1.5., como se observa, se dispone de dos carriles exclusivos de 3.50[m] cada uno; y, tres carriles para vehículos particulares por cada sentido. En el diseño vial se ha considerado siempre la maximización del ancho de las aceras, las que tienen ancho variable, pues se trata de mantener el ancho de la calzada constante.

Debido a que en las paradas el ancho del parterre debe ser de 3.50[m], el diseño considera en estos tramos una disminución del ancho de los carriles exclusivos a 3.25[m]. Como se puede apreciar en la Figura 1.6., el cambio de sección se lo ha realizado mediante una transición de 20[m] de largo a la llegada a la parada y de 15[m] de largo a la salida.

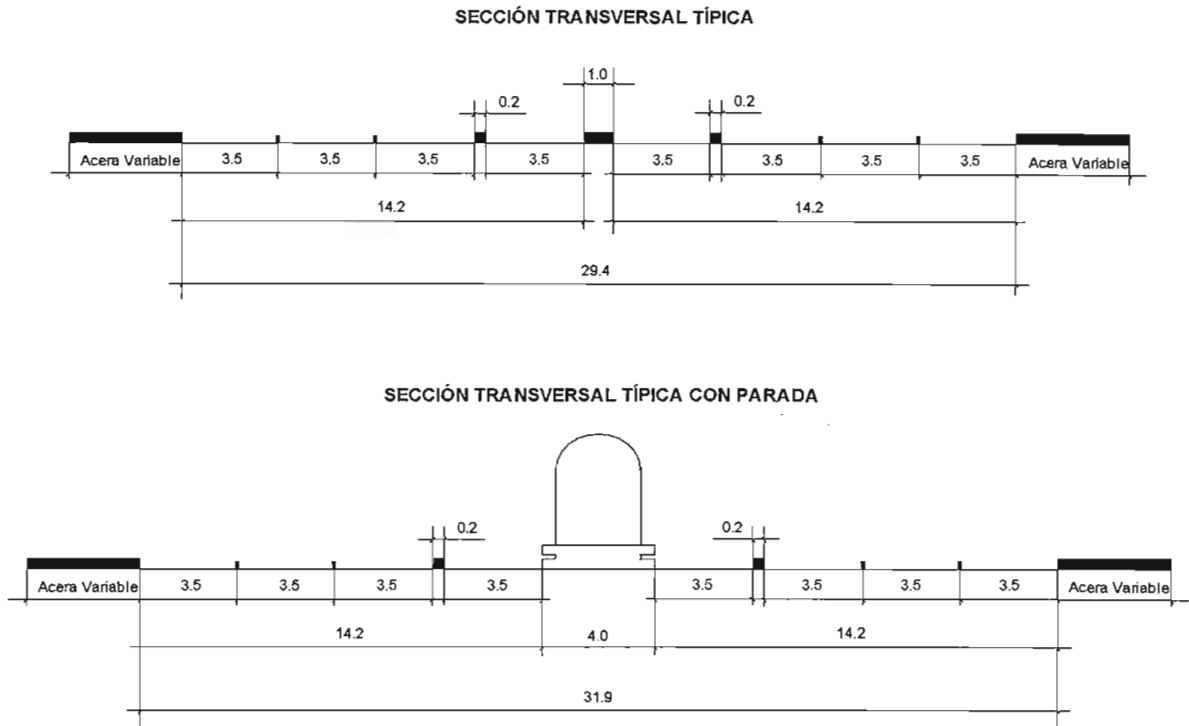


Figura 1.5. Secciones Transversales Típicas del Diseño Vial

En lo referente a las paradas, se ha determinado que existan 14 paradas a lo largo de la ruta de la extensión, las paradas han sido diseñadas para que, al igual que en el resto del sistema, cuenten con un sistema de prepago y que el nivel del piso de la parada esté a 65cm. de la calzada, lo que permite que se tenga un paso directo desde y hacia los trolebuses, evitando el uso de gradas, lo que redundaría en ahorro de tiempo en el embarque y desembarque.

Como ya se ha dicho, las paradas estarán ubicadas en el parterre central del corredor, por lo que cada parada será utilizada por sus dos lados longitudinales, para los dos sentidos de circulación de los trolebuses, como se puede apreciar en la Figura 1.6.

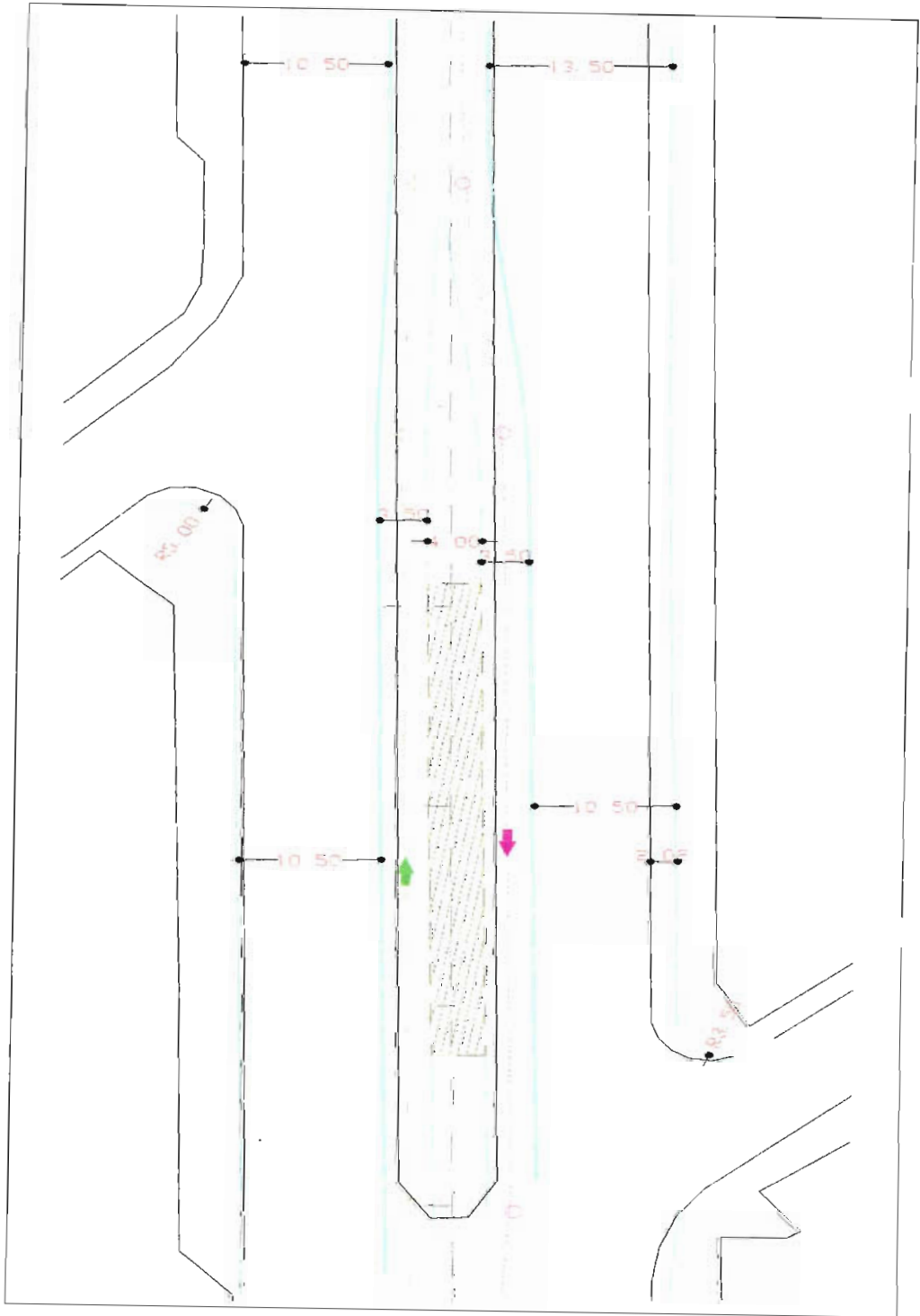


Figura 1.6. Implantación Típica de una Parada

Con estas premisas la UPGT ha realizado el diseño vial de la ruta de la Extensión del Trolebús, entre el terminal La Y y el terminal la Ofelia, en una longitud de 6,380m., diseño que se lo presenta en el Anexo 1.1

1.6 DIMENSIONAMIENTO DE LA FLOTA Y SISTEMA OPERACIONAL.

Para satisfacer la demanda de transporte público descrita en el numeral 1.4., la planificación, desde el punto de vista de transporte, ha considerado la tecnología de trolebuses articulados con capacidad para 180 pasajeros, considerando que para este tipo de vehículo, el índice óptimo de ocupación^[1.5] es de 1.14.

La planificación ha considerado un análisis para satisfacer la demanda en un horizonte de 10 años, es decir, hasta el año 2013, considerando que el sistema estará implantado en el año 2003. El plan operacional y dimensionamiento de la flota realizado por la UPGT se resume en la Tabla 1.5

^[1.5] Se define como "Índice de Ocupación" al número de veces que el autobús es renovado totalmente en su capacidad. Según los estudios de transporte, para un trolebús articulado el valor adecuado de éste índice es 1.14, que quiere decir que en el recorrido del trolebús éste ha renovado su carga (180 pasajeros) 1.14 veces.

| Año | Pasajeros/hora dirección | Frecuencia [troles/hora] | Flota de troles | Intervalo [min] |
|------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| 1997 | 2.444 | 15 | 17 | 4.0 |
| 1998 | 2.517 | 16 | 18 | 3.8 |
| 1999 | 2.593 | 16 | 18 | 3.8 |
| 2000 | 2.671 | 17 | 19 | 3.5 |
| 2001 | 2.751 | 17 | 19 | 3.5 |
| 2002 | 2.834 | 18 | 20 | 3.3 |
| 2003 | 2.919 | 18 | 20 | 3.3 |
| 2004 | 3.007 | 19 | 21 | 3.2 |
| 2005 | 3.097 | 19 | 21 | 3.2 |
| 2006 | 3.190 | 20 | 22 | 3.0 |
| 2007 | 3.286 | 21 | 23 | 2.9 |
| 2008 | 3.385 | 21 | 23 | 2.9 |
| 2009 | 3.487 | 22 | 24 | 2.7 |
| 2010 | 3.592 | 22 | 24 | 2.7 |
| 2011 | 3.700 | 23 | 26 | 2.6 |
| 2012 | 3.811 | 24 | 27 | 2.5 |
| 2013 | 3.925 | 25 | 28 | 2.4 |

Tabla 1.5. Demanda, plan operacional y dimensionamiento de la flota para la prolongación La Y – Ofelia (Av. de la Prensa)

La velocidad operacional promedio prevista, como resultado de las simulaciones realizadas por la UPGT, es de 16[km/h]

En conclusión, los resultados de los estudios de transporte y las simulaciones realizadas por la UPGT, establecen que, en las condiciones más exigentes del sistema se requerirá de una flota de 28 trolebuses, mismos que operarán con un período de despacho de 2.4[min] y tendrán una velocidad promedio de 16[km/h]. Bajo estas condiciones operacionales en los siguientes capítulos se realizará el dimensionamiento eléctrico de las instalaciones requeridas para el sistema.

CAPÍTULO 2. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA REQUERIDA POR EL SISTEMA

El objetivo del presente capítulo es el determinar la potencia eléctrica requerida para la operación de la Extensión Norte del Sistema Trolebús, para ello, en función de los requerimientos operacionales establecidos en el Capítulo 1, se determina en primer lugar la potencia de un trolebús, luego, en función de la planificación operacional y considerando parámetros característicos de la Primera Etapa del Sistema Trolebús se determinará la potencia eléctrica total requerida para la operación del Sistema.

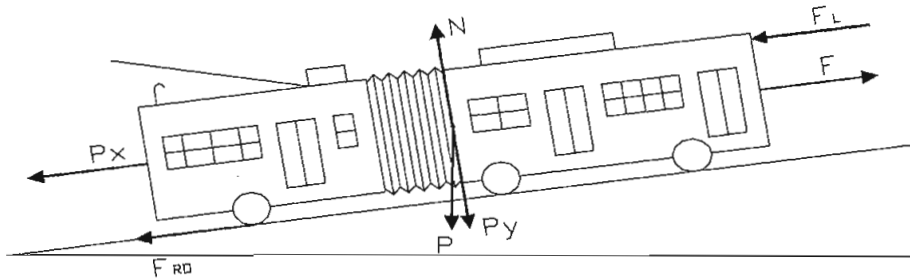
Se analizará en función de la disponibilidad de energía a suministrar por la Empresa Eléctrica Quito S.A., y de las características de la red de distribución de corriente continua (Línea Aérea de Contacto), el número de subestaciones de tracción requeridas, su ubicación y potencia.

2.1 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DEL VEHÍCULO

Para determinar la potencia del vehículo, es necesario considerar todas las fuerzas que se oponen a su movimiento. Cuando un autobús entra en marcha, actúan fuerzas que tratan de frenarlo, a estas fuerzas se les conoce como resistencias a la circulación del vehículo y básicamente son:

- ✓ Resistencia a la Rodadura,
- ✓ Resistencia del Aire; y,
- ✓ Resistencia a la subida.

Para determinar la magnitud de cada una de estas fuerzas, se realiza el análisis de cuerpo libre del trolebús en un plano inclinado, de la siguiente forma, según el esquema de la Figura 2.1.



Donde:

- P : Peso del vehículo
- P_y : Componente del peso en el eje vertical
- P_x : Componente del peso en el eje horizontal
- F_{RO} : Fuerza debida a la rodadura
- F_L : Fuerza debida a la resistencia del aire
- N : Fuerza normal al plano de circulación
- F : Fuerza a aplicar al vehículo

Figura 2.1. Diagrama de Cuerpo Libre del vehículo en un plano inclinado

Para mantener velocidad constante, de acuerdo a la Primera Ley de Newton se debe conseguir que la sumatoria de fuerzas tanto en el eje del plano de circulación como en eje normal a éste sean cero. Se tiene entonces:

$$\sum F_x = 0$$

$$P_x + F_L + F_{RO} - F = 0$$

$$F = P_x + F_{RO} + F_L$$

$$\sum F_y = 0$$

$$N - P_y = 0$$

$$N = P_y$$

$$P_x = P * \text{sen} \alpha$$

$$P_y = P * \text{cos} \alpha$$

$$P = m * g$$

$$F_{RO} = f * N$$

Donde: m : masa del vehículo [kg]
 g : aceleración de la gravedad
 f : índice de resistencia a la rodadura de los neumáticos

La fuerza de resistencia del aire F_L , ha sido determinada de forma empírica en bancos de pruebas de los fabricantes de vehículos, y depende de la superficie frontal del vehículo, la velocidad de marcha; y, el coeficiente denominado Índice de la Resistencia del aire C_w . Según el "Manual de Tablas Autobuses", editado por Mercedes Benz en diciembre de 1990, la fuerza debida a la resistencia del aire se la obtiene aplicando la siguiente ecuación ^[2.1]:

$$F_L = \frac{46.39 * C_w * A * V^2}{1,000}$$

Donde: F_L : Fuerza de la resistencia del aire [N]
 A : Superficie frontal del vehículo [m²]
 V : Velocidad del vehículo [km/h]
 C_w : Índice de la resistencia del aire

Entonces la fuerza requerida para mantener la condición de equilibrio del vehículo será:

$$F = P_x + F_{RO} + F_L$$

$$F = P * \text{sen} \alpha + f * N + \frac{46.39 * C_w * A * V^2}{1,000}$$

$$F = P * \text{sen} \alpha + f * P * \cos \alpha + \frac{46.39 * C_w * A * V^2}{1,000}$$

$$F = m * g * \text{sen} \alpha + f * m * g * \cos \alpha + \frac{46.39 * C_w * A * V^2}{1,000} \quad (2.1)$$

La potencia necesaria para mantener el vehículo en determinada condición de velocidad está dada por el producto de entre la fuerza necesaria para la condición

^[2.1] "Manual de Tablas Autobuses"; Mercedes-Benz AG; N° de ref. 6460 1700 04; pág. 66; Mercedes Benz; 1990; Mannheim - Alemania.

de equilibrio del sistema ($\sum F = 0$) y la velocidad del vehículo, de la siguiente forma:

$$Pot = \frac{F \cdot V}{3,600} \quad (2.2)$$

Donde: *Pot*: Potencia requerida para mantener una velocidad *V* [kW]
F: Fuerza aplicada para la condición de equilibrio [N]
V: Velocidad del vehículo [km/h]

Para calcular el valor de la potencia requerida para que el vehículo circule a determinada velocidad en un plano inclinado con ángulo α es necesario conocer:

- ✓ La masa del vehículo ***m*** [kg]
- ✓ La aceleración de la gravedad ***g***
- ✓ La inclinación del plano de circulación **α** [°]
- ✓ El Índice de resistencia a la rodadura de los neumáticos ***f***
- ✓ El Índice de la resistencia del aire ***C_w***
- ✓ El área frontal del vehículo ***A*** [m²]
- ✓ La velocidad de circulación ***V*** [km/h]

Los valores del Índice de resistencia a la rodadura de los neumáticos ***f***, y, del Índice de la resistencia del aire ***C_w***, se han tomado del libro "Manual del Ingeniero Mecánico", que indica para una aplicación de un vehículo autobús circulando en pavimento, los siguientes valores^[2.2]:

$$f = 0.008$$

$$C_w = 0.5$$

Por otra parte, la pendiente de una vía generalmente se expresa en porcentaje (***p***%), por lo que el valor del ángulo α sería:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P}{100}\right)$$

^[2.2] "Manual del Ingeniero Mecánico"; pág. 3-27, 3-28; McGraw – Hill; 8° Edición; 1978

En la Figura 2.2. se esquematiza el significado de la pendiente de una vía, para un valor de 14.7%:

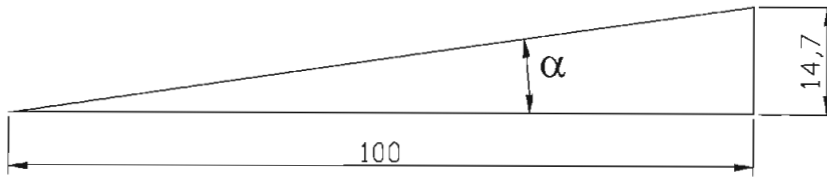


Figura 2.2. Pendiente de la vía de 14.7%

Para el caso en competencia, a continuación se calculará el valor de fuerza y potencia requerida para la operación de un trolebús articulado en la geometría vial de la ciudad de Quito con las condiciones operativas expuestas en el capítulo 1. Los datos de partida serán entonces los que constan en la Tabla 2.1.

| PARAMETRO | VALOR |
|---|-------------------------|
| Velocidad máxima en plano horizontal V | 60 [km/h] |
| Pendiente máxima p | 14.7% |
| Velocidad máxima en pendiente máxima V | 20[km/h] |
| Ancho del vehículo | 2.5[m] |
| Altura del vehículo | 3.5[m] |
| Índice de resistencia a la rodadura de los neumáticos f | 0.008 |
| Índice de la resistencia del aire C_w | 0.5 |
| Masa bruta de un autobús articulado (valor promedio) m | 27,000[kg] |
| Aceleración de la gravedad g | 9.8 [m/s ²] |

Tabla 2.1. Parámetros para el cálculo de la potencia del vehículo

De los parámetros para el cálculo, se tiene los siguientes valores, sobre la base de las fórmulas indicadas anteriormente:

- ✓ Ángulo de inclinación del plano inclinado, α , para la pendiente máxima

$$\alpha = \arctan\left(\frac{p}{100}\right)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{14.7}{100}\right)$$

$$\alpha = 8.363^\circ$$

✓ Superficie frontal del vehículo **A**

$$A = \text{Ancho del vehículo} * \text{Altura del vehículo}$$

$$A = 3.5[\text{m}] * 2.5 [\text{m}]$$

$$A = 8.75 [\text{m}^2]$$

A continuación se calculan los valores de fuerza y potencia necesarios para la operación del vehículo, tanto en plano horizontal como en el plano de pendiente máxima (14.7%).

2.1.1 CALCULO DE FUERZA Y POTENCIA PARA VEHÍCULO CIRCULANDO EN PLANO HORIZONTAL

Para este caso, el valor de la pendiente de la vía es $p = 0\%$, por lo que el valor del ángulo del plano inclinado es $\alpha = 0^\circ$.

Para la operación en plano horizontal, la peor condición será la de velocidad máxima, es decir, la velocidad $V = 60[\text{km/h}]$.

La fuerza a aplicar al vehículo será entonces, aplicando la ecuación (2.1), la siguiente:

$$F = m * g * \text{sen}\alpha + f * m * g * \text{cos}\alpha + \frac{46.39 * C_w * A * V^2}{1,000}$$

$$F = f * m * g + \frac{46.39 * C_w * A * V^2}{1,000}$$

$$F = (0.008 * 27,000 * 9.8) + \left(\frac{46.39 * 0.5 * 8.75 * 60^2}{1,000} \right)$$

$$F = 2,116.8 + 730.643$$

$$F = 2,847.443[\text{N}]$$

Aplicando la ecuación (2.2) se calcula la potencia de la siguiente manera

$$Pot = \frac{F * V}{3,600}$$

$$Pot = \frac{2,847.443 * 60}{3,600}$$

$$Pot = 47.457[kW]$$

2.1.2 CALCULO DE FUERZA Y POTENCIA PARA VEHÍCULO CIRCULANDO EN PLANO INCLINADO

Para este caso, consideremos la máxima pendiente de la vía del recorrido del Sistema Trolebús, es decir, $p = 14.7\%$, por lo que el valor del ángulo del plano inclinado es $\alpha = 8.363^\circ$.

Para la operación en la máxima pendiente, la peor condición será la de velocidad máxima definida para esta zona, es decir, la velocidad $V = 20[km/h]$.

La fuerza a aplicar al vehículo será entonces, aplicando la ecuación (2.1), la siguiente:

$$F = m * g * \text{sen} \alpha + f * m * g * \cos \alpha + \frac{46.39 * C_w * A * V^2}{1,000}$$

$$F = (27,000 * 9.8 * \text{sen}(8.363^\circ)) + (0.008 * 27,000 * 9.8 * \cos(8.363^\circ)) + \left(\frac{46.39 * 0.5 * 8.75 * 20^2}{1,000} \right)$$

$$F = 38,484.523 + 2,094.291 + 81.183$$

$$F = 40,659.996[N]$$

Para el cálculo de la potencia, aplicamos la ecuación (2.2), de la siguiente manera:

$$Pot = \frac{F * V}{3,600}$$

$$Pot = \frac{40,659.996 * 20}{3,600}$$

$$Pot = 225.888[kW]$$

Como se puede observar la potencia requerida por el vehículo para vencer un plano inclinado es mayor que la que requiere para operar en el plano horizontal. El valor de potencia calculado para superar la pendiente máxima del recorrido, deberá ser el valor de potencia del equipo de tracción (motor). Para efectos del diseño que es el objeto de este trabajo de investigación se considerará el valor de 230[kW] como la potencia del vehículo.

Por otra parte y como simple referencia, la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 205:99 establece como requerimiento mínimo para los motores diesel de autobuses, que la relación Potencia/Peso sea de al menos 8.9484 [kW/Tm]. Aplicando esta relación para el caso de los trolebuses, con una masa bruta de 27[Tm], se tendría que la potencia del motor, de acuerdo a la citada Norma debería ser de 241.60[kW]. Se aprecia que este valor de potencia que indica la Norma INEN es mayor que el calculado anteriormente (230[kW]), la explicación es debido a que la Norma INEN considera un sobredimensionamiento de los motores diesel a fin de cumplir, a la altura de la ciudad de Quito, los niveles de opacidad de los gases de escape de los autobuses fijados en las correspondientes normas ambientales.

2.2 POTENCIA OPERACIONAL

Se define como "Potencia Operacional" al valor de potencia eléctrica requerida para que la Extensión Norte del Sistema Trolebús funcione adecuadamente de acuerdo a los requerimientos operacionales descritos en el Capítulo 1. Para determinar el valor de esta potencia se analizará, en primer lugar, la ubicación de los vehículos a lo largo del recorrido de la ruta de la Extensión Norte; y, su demanda de potencia para lo cual se considerará las características de la Primera Etapa del Sistema Trolebús.

2.2.1 UBICACIÓN DE VEHÍCULOS EN EL RECORRIDO DE LA EXTENSIÓN NORTE DEL SISTEMA TROLEBÚS

Como se determinó en el numeral 1.6 del Capítulo 1, y para efectos del diseño eléctrico objeto de este trabajo de investigación, se considerará la peor condición operacional planificada, es decir la operación prevista para el año 2013, en la que se prevé una demanda de pasajeros de 3,925 pasajeros por hora dirección, por lo que la operación del sistema sería con 25 trolebuses por hora, con un intervalo de despacho (período) de 2.4 minutos, con una flota total de 28 trolebuses.

Para efectos de simular la ubicación de los trolebuses a lo largo de la ruta de la Extensión Norte del Sistema Trolebús, se considera la velocidad operacional promedio estimada por la UPGT de 16 [km/h] a lo largo del recorrido de la ruta de 6,400[m].

El tiempo de recorrido por sentido sería:

$$t = \frac{d}{v} \quad (2.3)$$

$$t = \left(\frac{6.4[km]}{16[km/h]} \right) * \left(\frac{60[min]}{1[h]} \right) = 24[min]$$

Si el período de despacho es de 2.4 minutos, se tiene entonces, en cada sentido, 10 trolebuses, que estarán separados entre sí, en promedio, 640[m]; de acuerdo a este plan operacional, se dispondrá de 20 trolebuses en la ruta y 8 en los terminales, 4 en el terminal Ofelia y 4 en el terminal La Y. Los vehículos que se encuentran en los terminales, pueden estar en acción de embarque y desembarque de pasajeros o simplemente ser reservas operacionales. La Figura 2.3 esquematiza la distribución de trolebuses a lo largo de la ruta.

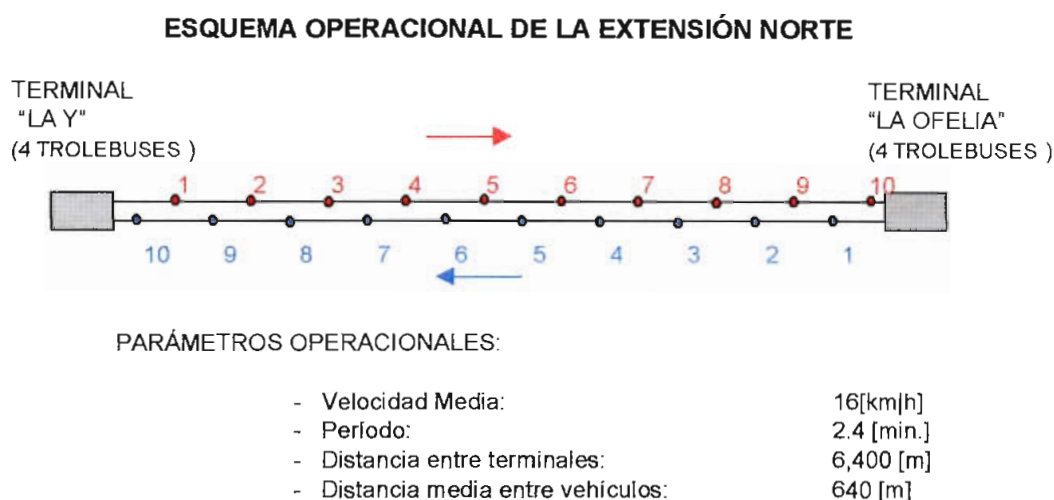


Figura 2.3 Esquema de la distribución de trolebuses a lo largo de la ruta de la Extensión Norte

2.2.2 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA REQUERIDA POR EL SISTEMA

Como se indicó en el numeral anterior, de acuerdo a la planificación operacional, se dispondría, en la condición más exigente desde el punto de vista de requerimientos de potencia, 20 trolebuses operando en la Extensión Norte del Sistema Trolebús y 4 trolebuses en embarque y desembarque en cada terminal.

Se define “potencia instalada” como aquella que considera el número total de trolebuses operando en la Extensión Norte del Sistema Trolebús, con el valor

nominal de la potencia de cada vehículo, que como se determinó en el numeral 2.1.5, es de 230[kW]. La potencia instalada sería entonces:

$$P_{inst.} = P_{trole} * N \quad (2.4)$$

donde:

$P_{inst.}$: Potencia instalada
 P_{trole} : Potencia nominal de un trolebús
 N : Número de trolebuses

$$P_{inst.} = 230[kW] * 28$$

$$P_{inst.} = 6,440[kW]$$

No obstante, en la operación normal del Sistema Trolebús, la potencia requerida para el sistema no es la potencia que se ha definido como instalada, pues la potencia nominal de los trolebuses es la necesaria para arrancar el vehículo en condiciones de plena carga y en pendientes de 14.7%, lógicamente en la operación normal del sistema, nunca se tiene esta condición para todos los vehículos que se encuentran operando, por ello, es necesario determinar un factor que permita conocer con certeza, a partir de la potencia instalada, la potencia que efectivamente requiere el sistema.

Para determinar este factor, se considerará las características de operación y mediciones realizadas en la Primera Etapa del Sistema Trolebús, para ello, utilizando el sistema de telealarma y teledada instalado en las ocho subestaciones de la troncal central del trolebús, se realizó un registro de mediciones del voltaje y corriente para de esta forma determinar la potencia entregada por las subestaciones de tracción para un tramo del recorrido. El tramo escogido para realizar las mediciones es el comprendido entre San Blas y El Ejido, considerando que este tramo es de características topográficas similares al de la Extensión Norte del sistema; las mediciones se realizaron entre las 12h00 y 14h00 del día miércoles 25 de abril del 2001.

El período de muestreo utilizado para las mediciones fue de un minuto, durante dos horas típicas de operación del sistema, las mediciones se realizaron en dos subestaciones adyacentes, en los correspondientes feederes que alimentan a un determinado tramo. El resultado de la potencia determinada en función de los datos medidos se observa en la Figura 2.4. En el Anexo 2.1. se indica la tabla de las mediciones obtenidas.

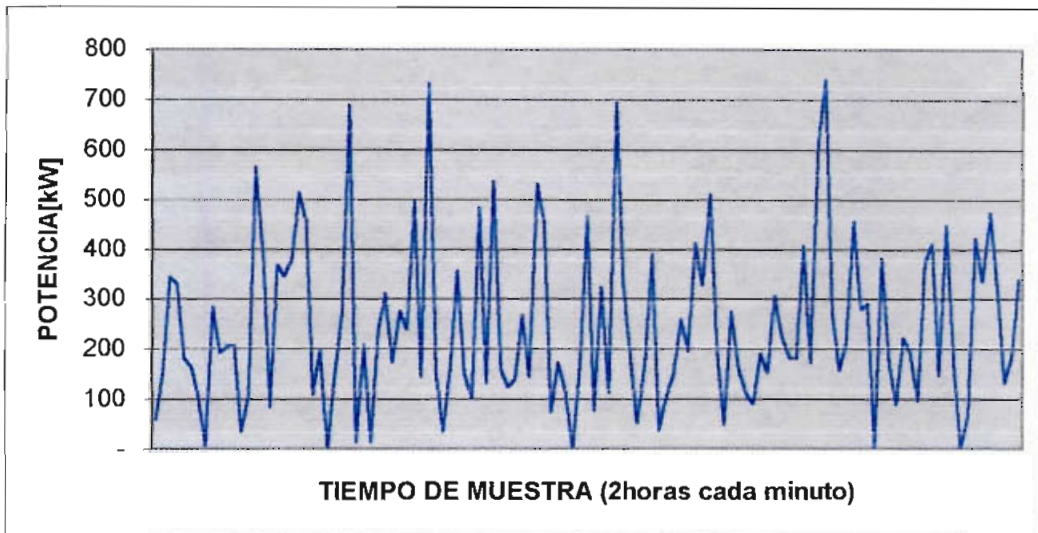


Figura 2.4 Potencia en el tramo San Blas - Ejido

El valor de potencia medio es de 247.07[kW], teniéndose valores máximos de hasta 740[kW] y mínimos de cero.

Por otra parte, según la tabla de despachos del día 25 de abril, entre las 12h00 y las 14h00, se tiene un período de despacho de trolebuses de 2 minutos; la distancia entre las subestaciones de tracción de San Blas y El Ejido es de 1,350[m]; y, la velocidad media de los trolebuses en este tramo es 16 [km/h], por lo que para determinar el número de trolebuses que en promedio se encuentran en este tramo se tiene:

Aplicando la ecuación (2.3), se determina el tiempo requerido para cubrir la distancia entre subestaciones a la velocidad media indicada.

$$t = \frac{d}{v}$$

$$t = \left(\frac{1.35[km]}{16[km/h]} \right) * \left(\frac{60[min.]}{1[h]} \right)$$

$$t = 5.0625[min.]$$

Luego, como el período de despacho es de 2 minutos, se tiene que el número de trolebuses que en promedio se encuentran en el tramo es:

$$N = \frac{5.0625[min]}{2[min]} = 2.53125$$

La “potencia instalada” en este tramo es entonces, aplicando la ecuación (2.4):

$$P_{inst.} = P_{trole} * N$$

$$P_{inst.} = 230[kW] * 2.53125$$

$$P_{inst.} = 582.18[kW]$$

Si se compara el valor de la potencia media medida en el tramo, 247.07[kW], con el valor de la potencia instalada, 582.18[kW], se observa que la potencia media representa el 42% de la potencia instalada, lo cual, como se indico anteriormente es debido a que en operación normal del sistema, no todos los trolebuses están requiriendo la potencia nominal en cada instante de tiempo, sino únicamente al arrancar el vehículo en condiciones de plena carga y en pendientes de 14.7%.

Como referencia, el contratista encargado de diseñar la Extensión Sur del Proyecto Trolebús, para los cálculos correspondientes a la potencia de las subestaciones, utilizó un factor de 0.6, es decir, asumió a base de su experiencia que la potencia media requerida por el sistema es el 60% de la potencia instalada.

Par el diseño de la Extensión Norte del Sistema Trolebús, se utilizará como relación entre la potencia media requerida por el sistema y la potencia instalada el factor de 0.5, valor que al ser superior al calculado mediante mediciones, de 0.42, da un adecuado margen de seguridad. Hay que notar que este valor es menor que el que utilizó el contratista de la Extensión Sur en sus diseños, 0.6, pero que de acuerdo a las mediciones realizadas es suficiente para garantizar un diseño confiable.

Utilizando el valor de 0.5 como factor, se tiene entonces que para la Extensión Norte del Sistema Trolebús, considerando el valor de la potencia instalada determinado anteriormente de 6,440[kW], la potencia media requerida por el sistema será de 3,220[kW]. Estos valores, tanto de la potencia instalada, como de la potencia media requerida, serán de gran ayuda para determinar el número de subestaciones de tracción, su potencia y ubicación.

2.2.3 DISPONIBILIDAD DE SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA LA EXTENSIÓN NORTE DEL SISTEMA TROLEBÚS.

El Municipio, consciente de la información necesaria para el diseño eléctrico de la Extensión Norte del Sistema Trolebús, en septiembre de 1998, a través de la Unidad Ejecutora del Proyecto trolebús II Etapa, solicitó a la Empresa Eléctrica Quito S.A. el pronunciamiento sobre las alternativas de alimentación eléctrica a las subestaciones de tracción que se requerirán en la Extensión Norte. De acuerdo al esquema hasta esa fecha utilizado, se preveía la instalación de 4 subestaciones de tracción de 2,000 [kVA] alimentadas mediante primarios subterráneos expresos desde las subestaciones de distribución de la Empresa Eléctrica Quito.

La Empresa Eléctrica Quito, en atención a lo solicitado por el Municipio, indica que las subestaciones de tracción a instalarse para la Extensión Norte del Sistema Trolebús deberán alimentarse mediante circuitos expresos en forma

radial desde las subestaciones de la Empresa Eléctrica Quito, que se encuentran cercanas al recorrido de la Extensión del Trolebús y que tienen capacidad suficiente para los requerimientos del proyecto.

Las Subestaciones de Distribución de las que se alimentaría eléctricamente a la Extensión Norte del Sistema Trolebús, según ha informado la Empresa Eléctrica Quito, son:

a) SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN N° 17

| | | |
|-------------------------|---|----------------------------------|
| Nivel de voltaje | : | 46/6.3 [kV] |
| Pcc en barra de 6.3[kV] | : | 97.6[MVA] (L-T); 90.1[MVA] (L-L) |
| Ubicación | : | Barrio La Florida |
| Dirección | : | Gonzalo Gallo y Gonzalo Benítez |

b) SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN N° 19

| | | |
|------------------------|---|------------------------------------|
| Nivel de voltaje | : | 138/23 [kV] |
| Pcc en barra de 23[kV] | : | 154.8[MVA] (L-T); 142.4[MVA] (L-L) |
| Ubicación | : | Barrio Loma Hermosa |
| Dirección | : | Buenaventura Aguilera y Legarda |

donde: *Nivel de voltaje (A/B)*: voltaje de alimentación a la subestación, en alta tensión, versus el voltaje de salida de la subestación en baja tensión

Pcc: Potencia de corto circuito entre: línea y tierra (L-T); y, entre línea y línea (L-L), en las barras de bajo voltaje de cada subestación (6.3 o 23 [kV])

La ubicación y características de las subestaciones de distribución de las que la Empresa Eléctrica Quito puede alimentar a la Extensión Norte del Sistema Trolebús son de gran importancia y ayuda para la ubicación de las subestaciones de tracción, sus características; y, el dimensionamiento de la Línea de Media Tensión, como se observará más adelante.

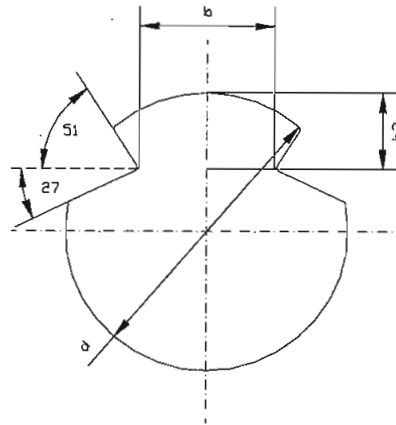
2.2.4 DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LAS SUBESTACIONES DE TRACCIÓN.

Para la determinación de la potencia y ubicación de las subestaciones de tracción, se debe considerar como condición del diseño, el garantizar la redundancia de la alimentación eléctrica del mayor número de vehículos trolebuses que se encuentren operando en el sistema, en condiciones de falla, lo cual garantiza mayor confiabilidad del sistema.

Otra condición importante para esta etapa del diseño es el garantizar que la energía eléctrica que recibe el trolebús a través de la Línea Aérea de Contacto sea la adecuada para el correcto funcionamiento del vehículo, es decir, considerando vehículos de las mismas características que los que actualmente cuenta el Municipio, el voltaje mínimo de alimentación al trolebús deberá ser de 525[V], pues este es el valor mínimo con el cual se garantiza el funcionamiento del equipo eléctrico de tracción del trolebús, como se indica en las especificaciones de los trolebuses, "Tensión de entrada: CC 750V (+20%, -30%)".

La limitación de voltaje mínimo a suministrar al trolebús tiene que ver con las características de la Línea Aérea de Contacto, específicamente la caída de tensión en el hilo y su capacidad de conducción de corriente. Para efectos de mantener homogeneidad con el resto de la instalación del Sistema Trolebús, se considerará el utilizar un Hilo de Contacto para la Línea Aérea de Contacto de las mismas características del utilizado en el resto del sistema, es decir, hilo de contacto de 150 [mm²] de sección, con las características que se indican en la Figura 2.5. ^[2.3]:

[2.3] Tesis de Grado de la E.P.N. "Estudio Técnico de las subestaciones de tracción del Sistema Trolebús del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito"; Marco Valencia Delgado; pág. 140; Octubre de 1998; Quito Ecuador



- Geometría:

| | | |
|----|---|------------------|
| b | : | 6.92 +/- 0.2[mm] |
| b2 | : | 4.00 +/- 0.2[mm] |
| d | : | 14.50[mm] |
 - Radio de curvatura mín. : 30[mm]
 - Resistencia máx. a 20°C ($R_{HC/km}$) : 0.122[Ω/km]
 - Capacidad mecánica : 5,480[kg]
 - Capacidad de corriente en Régimen permanente* : 705[A]
- * Valor calculado al utilizar una densidad de corriente de 4.71 [A/mm²]

Figura 2.5 Características del Hilo de Contacto

Considerando los requerimientos indicados para determinar la potencia de las subestaciones de tracción y su ubicación, el diseño deberá garantizar que ante la salida de servicio de una de las subestaciones de tracción, ya sea por avería de la subestación de tracción, desconexión por mantenimiento, corte del suministro de energía o avería en la subestación de distribución de la Empresa Eléctrica Quito o en la Línea de Media Tensión, la carga que alimenta ésta subestación de tracción sea absorbida por las subestaciones de tracción adyacentes, a fin de que la operación del sistema no se vea afectada, esto además deberá prever las caídas de tensión en el Hilo de Contacto y su capacidad de circulación de corriente.

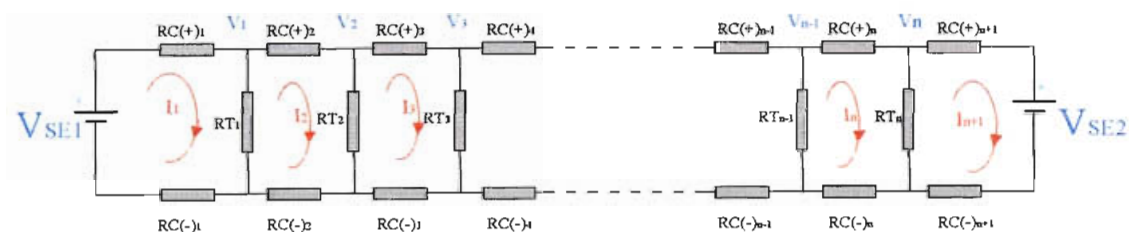
Desde el punto de vista de potencia, se podría instalar una sola subestación cuya potencia de rectificación sea igual a la potencia instalada determinada en el numeral 2.2.2 de este capítulo, es decir, de una potencia de 6,440 [kW]. Lógicamente, al ser una única subestación, no tendría redundancia en el sistema,

por lo que la confiabilidad del Sistema sería baja; por esta razón, la alternativa de una sola subestación de tracción, no es técnicamente aceptada.

Será necesario entonces, analizar alternativas con dos, tres o más subestaciones de tracción, que garanticen la operación normal del Sistema aún cuando se produzca la salida de operación de una de ellas.

Para encontrar el voltaje de alimentación en corriente continua que está siendo recibido por cada trolebús a lo largo del recorrido de la Extensión Norte del Sistema, se realiza el siguiente modelo eléctrico de alimentación a los vehículos, en el que se considera un tramo del recorrido alimentado en cada uno de sus extremos por una subestación de tracción.

El modelo eléctrico que se presenta en la Figura 2.6 considera la resistencia del Hilo de Contacto que está en función de la longitud de hilo; y, al vehículo trolebús como una carga resistiva, por tratarse de corriente continua.



Donde:

| | | |
|-----------|---|--|
| V_{SEi} | : | Voltaje de la Subestación (i) |
| RT_i | : | Carga que representa el i-ésimo trolebús |
| $RC(+)_i$ | : | Resistencia i-ésima del hilo de contacto (+) |
| $RC(-)_i$ | : | Resistencia i-ésima del hilo de contacto (-) |
| I_i | : | Corriente en la i-ésima malla del circuito |
| n | : | Número de trolebuses en el tramo |
| V_i | : | Voltaje de alimentación al i-ésimo trolebús |

Figura 2.6 Modelo eléctrico de la operación del Sistema en un tramo

Para simplificar el circuito se considera el valor de la resistencia del hilo de contacto, concentrada en el conductor positivo, lógicamente el valor de esta resistencia concentrada en el hilo positivo será igual a la suma de la resistencia del hilo positivo más la del hilo negativo, de la siguiente forma:

$$RC_i = RC(+)_i + RC(-)_i$$

Siendo:

$$RC(+)_i = RC(-)_i = R_{HC/km} * L \quad (2.5)$$

Entonces:

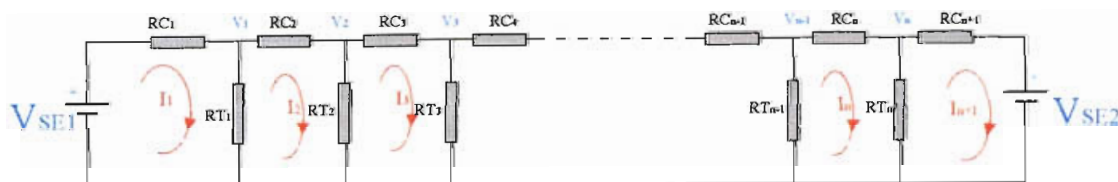
$$RC_i = 2 * RC(+)_i = 2 * RC(-)_i = 2 * R_{HC/km} * L \quad (2.6)$$

Donde:

$R_{HC/km}$: Resistencia del hilo de contacto por cada kilómetro de longitud
[Ω/km]

L : Longitud de hilo de contacto en [km]

El circuito simplificado quedaría como se indica en la Figura 2.7.



Donde:

- V_{SEi} : Voltaje de la Subestación (i)
- RT_i : Carga que representa el i-ésimo trólebus
- RC_i : Resistencia i-ésima del hilo de contacto (+) y (-)
 $RC_i = RC(+)_i + RC(-)_i$
- I_i : Corriente en la i-ésima malla del circuito
- n : Número de trólebus en el tramo
- V_i : Voltaje de alimentación al i-ésimo trólebus

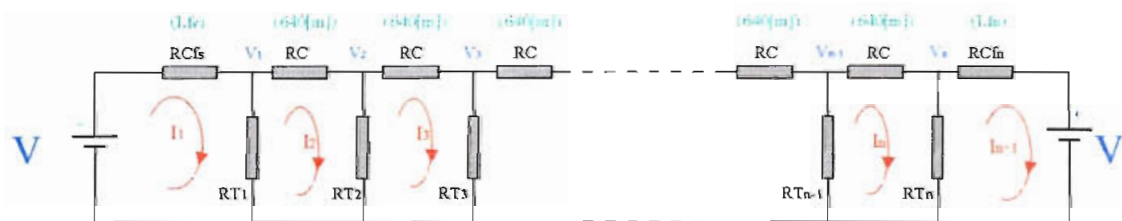
Figura 2.7. Circuito simplificado, considerando la resistencia del hilo (+) y (-) concentrada en el hilo (+)

Para efectos del diseño, se asumirá que la ubicación de trolebuses en un determinado tramo es uniforme, es decir, existe igual distancia entre trolebuses, por lo que, RC_i no cambia para cualquier i , esto facilita la resolución del circuito, pues se tendrá que la resistencia del hilo de contacto entre trolebuses no cambia, por lo que: $RC_i = RC$. Por otra parte, la resistencia del hilo de contacto a las salidas de las subestaciones de tracción o llegada a los terminales se les representará como RC_{fn} y RC_{fs} , según corresponda a la subestación ubicada al norte o al sur, respectivamente, como se observa en la Figura 2.8.

Por otra parte, se asumirá que la carga de los trolebuses es igual para todos, y de valor equivalente al de una resistencia que disipa una potencia igual a la potencia media de un trolebús, que como ya se dijo, será igual al 50% de su potencia nominal, es decir, 115[kW].

También se considerará, como en efecto sucede, que el voltaje de salida de las subestaciones de tracción, en corriente continua, es igual para las dos subestaciones que alimentan el tramo de análisis, se tendrá entonces que $V_{SE1} = V_{SE2} = V$.

Con todas estas consideraciones, el circuito que modela la ubicación de los trolebuses quedaría de la como se observa en la Figura 2.8.



Donde:

| | | |
|-------------------------|---|--|
| $V = V_{SE1} = V_{SE2}$ | : | Voltaje de las subestaciones 1 y 2 |
| RT_i | : | Carga que representa el i -ésimo trolebús |
| $RC = RC_i$ | : | Resistencia i -ésima del hilo de contacto (+) y (-) para una distancia de 640[m], $RC_i = RC(+)_i + RC(-)_i = 0.15616[\Omega]$ |
| L_f | : | Longitud entre la subestación ubicada al sur y el primer trolebús hacia el norte |

| | | |
|---------|---|--|
| L_f^n | : | Longitud entre la subestación ubicada al norte y el primer trolebús hacia el sur |
| RCf_s | : | Resistencia del hilo de contacto debida a $I_n f$ |
| RCf_n | : | Resistencia del hilo de contacto debida a $I_n f$ |
| I_i | : | Corriente de la i -ésima malla del circuito |
| n | : | Número de trolebuses en el tramo |
| V_i | : | Voltaje de alimentación al i -ésimo trolebús |

Figura 2.8. Circuito eléctrico simplificado

La solución de este circuito eléctrico esta dada, aplicando las leyes de Kirchoff para mallas, de la siguiente manera:

$$[R]_{(n+1) \times (n+1)} [I]_{(n+1) \times 1} = [V]_{(n+1) \times 1} \quad (2.7)$$

Aplicando los datos del circuito tenemos:

$$\begin{bmatrix} (RCf_s+RT_1) & -RT_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -RT_1 & (RT_1+RT_2+RC) & -RT_2 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RC) & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & -RT_3 & \dots & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & -RT_{n-1} & (RT_{n-1}+RT_n+RC) & -RT_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & -RT_n & (RT_n+RCf_n) & -V \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ -V \end{bmatrix}$$

donde:

- V : Voltaje nominal de corriente continua del sistema (750[V])
 RC : Resistencia del hilo de contacto, tanto (+) como (-), para la distancia media entre trolebuses (640[m]). Aplicando la ecuación (2.6), se tiene

$$\begin{aligned} RC &= 2 * R_{HC/km} * L \\ RC &= 2 * 0.122[\Omega/km] * 0.64[km] \\ RC &= 0.15616[\Omega] \end{aligned}$$

RCf_s : Resistencia del hilo de contacto, tanto (+) como (-), para la distancia entre la subestación ubicada al sur y el primer trolebús hacia el norte. Aplicando la ecuación (2.6.), se tiene:

$$RCf_s = 2 * R_{HC/km} * Lf_s$$

$$RCf_s = 2 * 0.122[\Omega/km] * Lf_s[km]$$

RCf_n : Resistencia del hilo de contacto, tanto (+) como (-), para la distancia entre la subestación ubicada al norte y el primer trolebús hacia el sur. Aplicando la ecuación (2.6.), se tiene:

$$RCf_n = 2 * R_{HC/km} * Lf_n$$

$$RCf_n = 2 * 0.122[\Omega/km] * Lf_n[km]$$

RT_i : Resistencia debido a la carga media de un trolebús. La carga media de un trolebús es la que considera su potencia media, que como ya se indicó es el 50% de su potencia nominal, se tiene entonces:

$$P = 0.5 * 230[kW]$$

$$P = 115[kW]$$

Considerando el voltaje nominal de 750[V], RT_i , como condición inicial, será:

$$RT_i = \frac{V^2}{P}$$

$$RT_i = \frac{(750[V])^2}{115[kW]}$$

$$RT_i = 4.891[\Omega]$$

Los valores que interesa conocer para verificar la correcta ubicación de las subestaciones de tracción son: el voltaje en cada uno de los trolebuses y la corriente máxima que circula por el hilo de contacto, es decir: I_1 ; e, I_{n+1}

El voltaje en cada trolebús se calcula de la siguiente manera:

$$V_i = (I_i - I_{i+1}) * RT_i$$

Mientras que la corriente que circula por cada trolebús se calcula de la siguiente forma:

$$I_i = (I_i - I_{i+1})$$

Como la carga de un trolebús es una carga de potencia constante y no de resistencia constante, se debe calcular el valor de RT_i para que la potencia del vehículo se mantenga constante en el valor de potencia media del vehículo, es decir, 115[kW]. El valor de RT_i será entonces:

$$RT_i = \frac{(V_i)^2}{P}$$

$$RT_i = \frac{(V_i)^2}{115[kW]}$$

En consecuencia, para determinar el valor de voltaje en cada trolebús hay que resolver el circuito y encontrar cada una de las corrientes de malla; mientras que, para conocer si la corriente máxima que circula por el hilo de contacto es menor que la permitida por la especificación de este hilo, se debe calcular I_1 ; y, I_{n+1} .

Pero como se ha dicho, se trata de un sistema en el que la potencia de la carga, en este caso de los trolebuses, se mantiene constante, lo que hace que en una primera iteración se modele el circuito partiendo de condiciones iniciales en las

que se asume que el voltaje en cada trolebús es el voltaje nominal (750[V]), por lo que la condición inicial para RT_i , es:

$$RT_i = \frac{V^2}{P}$$

$$RT_i = \frac{(750[V])^2}{115[kW]}$$

$$RT_i = 4.891[\Omega]$$

A partir de la segunda iteración, el valor de RT_i será:

$$RT_i = \frac{(V_i)^2}{P}$$

$$RT_i = \frac{(V_i)^2}{115[kW]}$$

En conclusión, la solución del circuito se la debe realizar por métodos iterativos, hasta conseguir convergencia de los valores de voltajes en cada trolebús (V_i).

Para determinar la ubicación de las subestaciones de tracción, se debe considerar que:

- a) El Sistema Trolebús, de acuerdo a lo planificado desde el punto de vista de transporte, no se ampliará más hacia el norte del futuro Terminal Ofelia.
- b) En el actual Terminal La Y existe una subestación de tracción que deberá absorber parte de la carga de la ampliación hacia el norte del sistema.

Sobre la base de la condición (a) no sería necesario mantener carga instalada, sin ser utilizada, en la subestación de tracción a ubicarse en el futuro terminal Ofelia, en previsión a futuras extensiones del sistema.

La condición (b) hace que la potencia de la actual subestación de tracción del terminal La Y, de 1,450[kW], sea compartida hacia el sur y norte de dicha subestación. Considerando que la operación entre los terminales El Recreo y La Y tendrá el doble de carga que entre los terminales La Y y el futuro terminal Ofelia, el aporte en potencia de la subestación La Y para la extensión norte será de la tercera parte de su potencia, es decir, 483[kW].

De esta forma, se realizará el análisis eléctrico considerando: 2, 3 y 4 subestaciones de tracción a lo largo del recorrido de la Extensión Norte del sistema, por lo que la distancia entre cada una de ellas será de: 1/2, 1/3 y 1/4 del recorrido, medidos a partir de la actual subestación La Y, respectivamente.

En condición de falla, la subestación que vuelve más crítico al sistema es la del extremo norte, pues en este caso, la subsiguiente subestación hacia el sur, deberá tomar la carga del último tramo norte que es el más cargado, pues a más de los trolebuses que se encuentran en el recorrido se tiene los trolebuses que están en el terminal en acción de embarque y desembarque.

La carga para los trolebuses que se encuentran en embarque y desembarque en el terminal Ofelia, se determina calculando el valor de fuerza y potencia requerida para esta operación, utilizando para ello las ecuaciones (2.1.) y (2.2), respectivamente. Las condiciones operacionales en el interior de los terminales son: pendiente $p = 0\%$; y, velocidad $V = 10 [km/h]$; los demás factores de estas ecuaciones se mantienen, es decir, $f=0.008$; $C_w=0.5$; $m=27,000[kg]$; y, $A=8.75[m^2]$. Se tendrá entonces, para la Fuerza:

$$F = m * g * \text{sen} \alpha + f * m * g * \text{cos} \alpha + \frac{46.39 * C_w * A * V^2}{1,000}$$

$$F = (0.008 * 27,000 * 9.8) + \left(\frac{46.39 * 0.5 * 8.75 * 10^2}{1,000} \right)$$

$$F = 2,137.096[N]$$

mientras que, para la Potencia se tiene:

$$P = \frac{F * V}{3,600}$$

$$P = 5,936[kW]$$

Al valor de potencia determinado, 5,936[kW], se debe sumar la potencia que por servicios auxiliares requiere el vehículo (ventilación, aire comprimido, iluminación), que de acuerdo a las características de los trolebuses que se encuentran operando actualmente, es de 11[kW]; la potencia total requerida por cada trolebús, en los terminales, será entonces de 16,936[kW]. Para el diseño, se considera una potencia de 25[kW] para cada trolebús en andén, por lo que los cuatro trolebuses, que de acuerdo al plan operacional, están en el terminal, representan una carga de 100[kW]; y, representan, como condición inicial, una resistencia equivalente de:

$$RTt = \frac{(750[V])^2}{100[kW]}$$

$$RTt = 5.625[\Omega]$$

A continuación se realiza el análisis para cada una de las alternativas descritas, es decir: 2, 3; y, 4 subestaciones de tracción a lo largo del recorrido de la Extensión Norte, considerando la condición de diseño expuesta como premisa, es decir que el sistema funcione aun cuando existan fallas en subestaciones no consecutivas.

2.2.4.1. Alternativa de dos subestaciones de tracción

La alternativa de dos subestaciones de tracción se esquematiza en la Figura 2.9a. A continuación se analizará el comportamiento del sistema ante la condición de falla de la subestación de tracción N° 2.

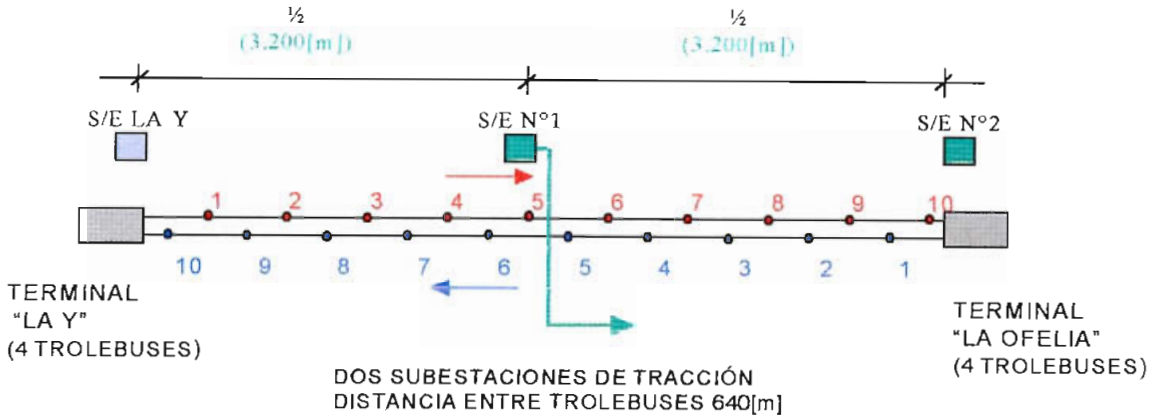


Figura 2.9a. Ubicación de Trolebuses y DOS Subestaciones de Tracción.

2.2.4.1.1 Condición de falla de la subestación de tracción N° 2, sentido de circulación sur – norte, con los trolebuses del terminal Ofelia

Considerando que S/E N°2 presenta una falla y la ubicación de trolebuses descrita en el numeral 2.1.2., se tiene que el número de trolebuses hacia el norte de la S/E N°1 es de 5 para cada sentido, por lo que, considerando además los trolebuses que se encuentran en el terminal Ofelia, el circuito eléctrico equivalente para esta alternativa es el que se indica en la Figura 2.9b.

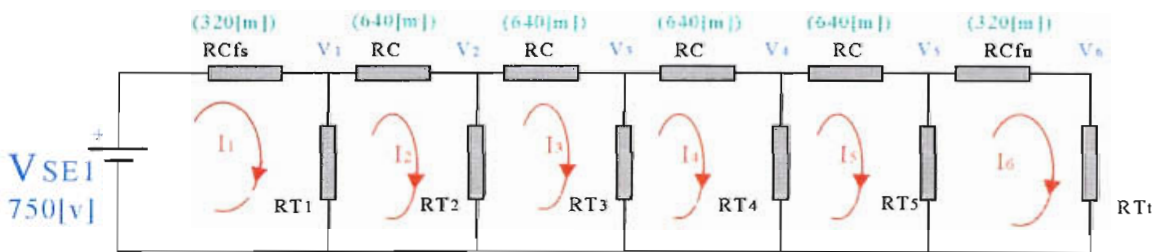


Figura 2.9b. Circuito equivalente para DOS subestaciones de tracción

Aplicando la ecuación (2.7), el circuito equivalente se describe mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} (RCf_s+RT_1) & -RT_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -RT_1 & (RT_1+RT_2+RC) & -RT_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RC) & -RT_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -RT_3 & (RT_3+RT_4+RC) & -RT_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -RT_4 & (RT_4+RT_5+RC) & -RT_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -RT_5 & (RT_5+RT_t+RCf_n) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} RC &= 0.156[\Omega] \\ RCf_s &= 0.078[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[m] \\ RCf_n &= 0.078[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[m] \\ V_{SE1} &= 750[V] \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales para la resolución del circuito son:

$$\begin{aligned} RT_1 = RT_2 = RT_3 = RT_4 = RT_5 &= 4.89[\Omega] \\ RT_t &= 5.625[\Omega] \end{aligned}$$

Los resultados de la solución del sistema, se presentan en la Tabla 2.2.

| Nº ITERACIÓN | RESISTENCIAS [Ω] | | CORRIENTES [A] | | VOLTAJES [V] | |
|--------------|------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | RT ₁ | 4.891 | I ₁ | 668.075 | V ₁ | 697.837 |
| | RT ₂ | 4.891 | I ₂ | 525.407 | V ₂ | 615.789 |
| | RT ₃ | 4.891 | I ₃ | 399.512 | V ₃ | 553.401 |
| | RT ₄ | 4.891 | I ₄ | 286.372 | V ₄ | 508.682 |
| | RT ₅ | 4.891 | I ₅ | 182.375 | V ₅ | 480.202 |
| | RT _t | 5.625 | I ₆ | 84.200 | V ₆ | 473.627 |

Tabla 2.2. Resultados de la solución del circuito de la Figura 2.9b

Luego de realizar, tan solo, la primera iteración, se concluye que esta alternativa NO cumple las condiciones de diseño, pues a partir de V₄, se tiene valores menores que 525[V], valor mínimo con el que se garantiza el funcionamiento de los trolebuses.

2.2.4.2. Alternativa de tres subestaciones de tracción

La ubicación de subestaciones y de trolebuses de esta alternativa se esquematiza en la Figura 2.10a.

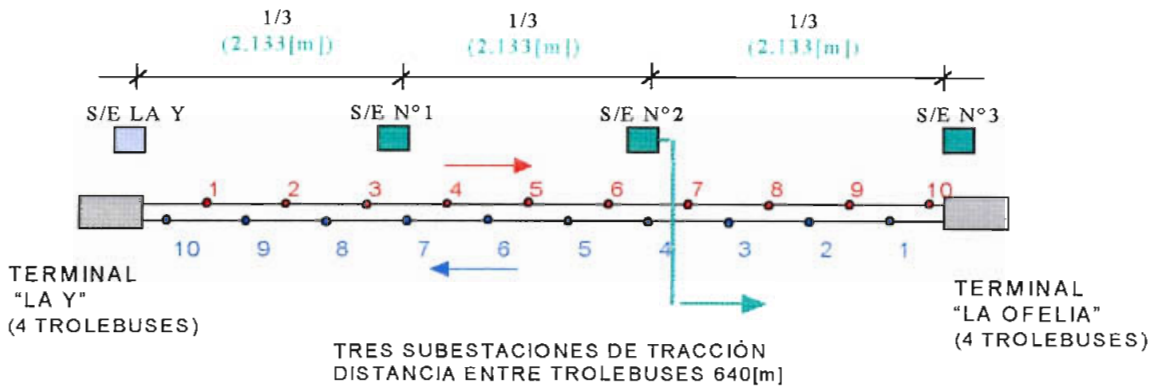


Figura 2.10a. Ubicación de Trolebuses y TRES Subestaciones de Tracción.

La condición más crítica de falla se da cuando la S/E N°3 sale de servicio, en esta condición, considerando la ubicación de trolebuses descrita en el numeral 2.1.2., se tiene que el número de trolebuses hacia el norte de la S/E N°2 es de 3 para el sentido sur – norte y, de 4 para el sentido norte – sur, por lo que a continuación se analiza esta última condición que es la más desfavorable.

2.2.4.2.1. Condición de falla de la subestación de tracción N° 3, sentido de circulación sur – norte, con los trolebuses del terminal Ofelia

En la Figura 2.10b. se indica el circuito eléctrico equivalente de esta alternativa.

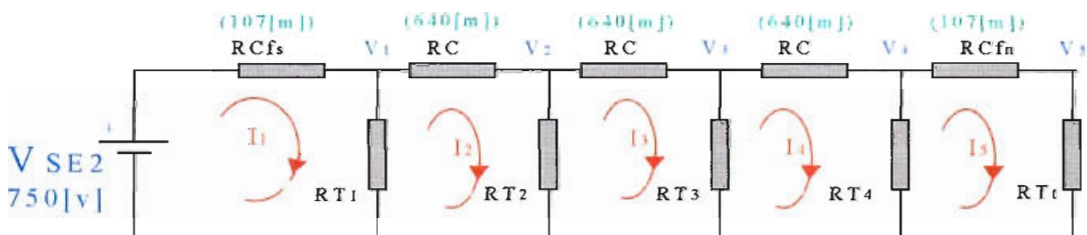


Figura 2.10b. Circuito equivalente para TRES subestaciones de tracción

Aplicando la ecuación (2.7.) el circuito equivalente se describe mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} (RCf_s+RT_1) & -RT_1 & 0 & 0 & 0 \\ -RT_1 & (RT_1+RT_2+RC) & -RT_2 & 0 & 0 \\ 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RC) & -RT_3 & 0 \\ 0 & 0 & -RT_3 & (RT_3+RT_4+RC) & -RT_4 \\ 0 & 0 & 0 & -RT_4 & (RT_4+RT_t+RCf_n) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} RC &= 0.156[\Omega] \\ RCf_s &= 0.0261[\Omega], \text{ correspondiente a } 107[m] \\ RCf_n &= 0.0261[\Omega], \text{ correspondiente a } 107[m] \\ V_{SE1} &= 750[V] \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales para la resolución del circuito son:

$$\begin{aligned} RT_1 = RT_2 = RT_3 = RT_4 &= 4.89[\Omega] \\ RT_t &= 5.625[\Omega] \end{aligned}$$

Los resultados de la solución del sistema, se indican en la Tabla 2.3.

| Nº ITERACIÓN | RESISTENCIAS [Ω] | | CORRIENTES [A] | | VOLTAJES [V] | |
|--------------|------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | RT ₁ | 4.891 | I ₁ | 626.678 | V ₁ | 733.639 |
| | RT ₂ | 4.891 | I ₂ | 476.689 | V ₂ | 659.199 |
| | RT ₃ | 4.891 | I ₃ | 341.920 | V ₃ | 605.805 |
| | RT ₄ | 4.891 | I ₄ | 218.066 | V ₄ | 571.751 |
| | RT _t | 5.625 | I ₅ | 101.175 | V ₅ | 569.110 |
| 2 | RT ₁ | 4.680 | I ₁ | 819.125 | V ₁ | 728.614 |
| | RT ₂ | 3.777 | I ₂ | 663.446 | V ₂ | 625.011 |
| | RT ₃ | 3.191 | I ₃ | 498.040 | V ₃ | 647.237 |
| | RT ₄ | 2.843 | I ₄ | 326.562 | V ₄ | 496.241 |
| | RT _t | 3.239 | I ₅ | 151.989 | V ₅ | 492.273 |

Tabla 2.3. Resultados de la solución del circuito de la Figura 2.10b

Luego de la segunda iteración, se concluye que esta alternativa tampoco cumple las condiciones de diseño, pues a partir de V_4 , se tiene valores menores que 525[V]. Por otra parte el valor de I_1 de 819.125[A] es superior al máximo admisible para el Hilo de Contacto, 705[A].

2.2.4.3. Alternativa de cuatro subestaciones de tracción

Puesto que en las dos alternativas anteriores no cumplen los requerimientos del diseño, en términos de caídas de tensión en el hilo de contacto y densidad de corriente a través de éste, a continuación se analizará la alternativa de ubicar cuatro subestaciones de tracción a lo largo del recorrido de la Extensión Norte del Sistema Trolébus. La ubicación de trolebuses y subestaciones de esta alternativa se esquematiza en la Figura 2.11a.

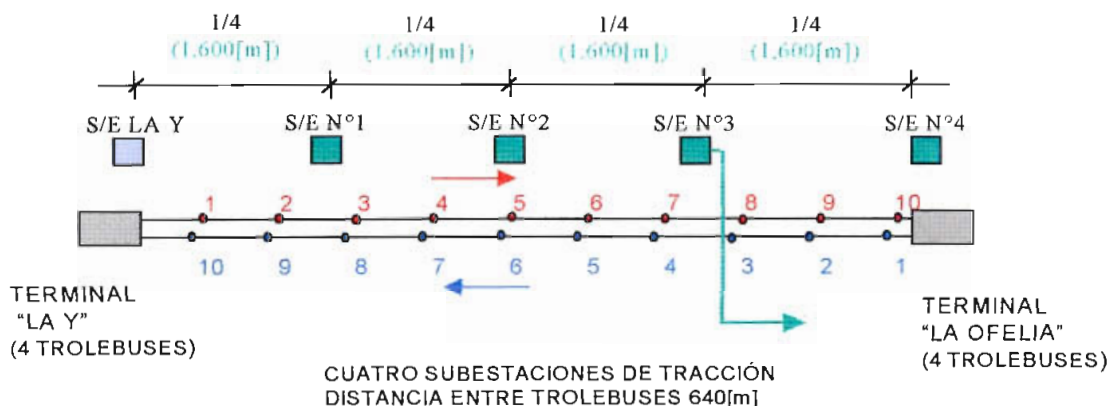


Figura 2.11a. Ubicación de Trolebuses y cuatro Subestaciones de Tracción.

Al igual que las anteriores, en esta alternativa se analizará la condición más crítica de falla, es decir, cuando falle la S/E N°4. En esta condición se tendrían tres trolebuses al norte de la S/E N°3, en sentido norte – sur; y, hasta el mismo número de trolebuses en sentido sur – norte. A continuación se analiza el sentido de circulación sur – norte considerando los trolebuses del terminal Ofelia.

2.2.4.3.1. *Condición de falla de la subestación de tracción N° 4, sentido de circulación sur – norte, con los trolebuses del terminal Ofelia.*

La Figura 2.11b. grafica el circuito eléctrico equivalente de esta alternativa, con tres trolebuses en el tramo y cuatro trolebuses en el terminal Ofelia.

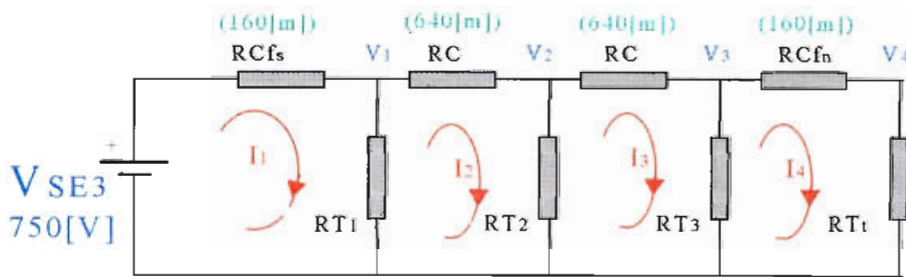


Figura 2.11b. Circuito equivalente para cuatro subestaciones de tracción, en condición de falla de la S/E N°4, sentido norte - sur

El circuito equivalente se describe, aplicando la ecuación (2.7.), mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} (RCf_s+RT_1) & -RT_1 & 0 & 0 \\ -RT_1 & (RT_1+RT_2+RC) & -RT_2 & 0 \\ 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RC) & -RT_3 \\ 0 & 0 & -RT_3 & (RT_3+RT_t+RC) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} RC &= 0.156[\Omega] \\ RCf_s &= 0.03904[\Omega], \text{ correspondiente a } 160[m] \\ RCf_n &= 0.03904[\Omega], \text{ correspondiente a } 160[m] \\ V_{SE1} &= 750[V] \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales para este caso son las siguientes:

$$\begin{aligned} RT_1 &= RT_2 = RT_3 = 4.89[\Omega] \\ RT_t &= 5.625[\Omega] \end{aligned}$$

La solución del sistema, se presenta en la Tabla 2.4.

| N° ITERACION | RESISTENCIAS [Ω] | | CORRIENTES [A] | | VOLTAJES [V] | |
|--------------|---------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | RT ₁ | 4.891 | I ₁ | 527.244 | V ₁ | 729.416 |
| | RT ₂ | 4.891 | I ₂ | 378.119 | V ₂ | 670.369 |
| | RT ₃ | 4.891 | I ₃ | 241.066 | V ₃ | 632.724 |
| | RT _t | 5.625 | I ₄ | 111.709 | V ₄ | 628.363 |
| 2 | RT ₁ | 4.627 | I ₁ | 644.602 | V ₁ | 724.835 |
| | RT ₂ | 3.908 | I ₂ | 487.932 | V ₂ | 648.639 |
| | RT ₃ | 3.481 | I ₃ | 321.946 | V ₃ | 598.364 |
| | RT _t | 3.948 | I ₄ | 150.062 | V ₄ | 592.506 |
| 3 | RT ₁ | 4.569 | I ₁ | 686.483 | V ₁ | 723.200 |
| | RT ₂ | 3.659 | I ₂ | 528.184 | V ₂ | 640.718 |
| | RT ₃ | 3.113 | I ₃ | 353.055 | V ₃ | 585.585 |
| | RT _t | 3.511 | I ₄ | 164.969 | V ₄ | 579.145 |
| 4 | RT ₁ | 4.548 | I ₁ | 703.190 | V ₁ | 722.547 |
| | RT ₂ | 3.570 | I ₂ | 544.318 | V ₂ | 637.547 |
| | RT ₃ | 2.982 | I ₃ | 365.720 | V ₃ | 580.436 |
| | RT _t | 3.354 | I ₄ | 171.062 | V ₄ | 573.758 |
| 5 | RT ₁ | 4.540 | I ₁ | 710.111 | V ₁ | 722.2777 |
| | RT ₂ | 3.534 | I ₂ | 551.012 | V ₂ | 636.231 |
| | RT ₃ | 2.930 | I ₃ | 371.005 | V ₃ | 578.295 |
| | RT _t | 3.292 | I ₄ | 173.609 | V ₄ | 571.517 |
| 6 | RT ₁ | 4.536 | I ₁ | 713.022 | V ₁ | 722.164 |
| | RT ₂ | 3.520 | I ₂ | 553.829 | V ₂ | 635.678 |
| | RT ₃ | 2.908 | I ₃ | 373.234 | V ₃ | 577.393 |
| | RT _t | 3.266 | I ₄ | 174.684 | V ₄ | 570.574 |
| 7 | RT ₁ | 4.535 | I ₁ | 714.254 | V ₁ | 722.116 |
| | RT ₂ | 3.514 | I ₂ | 555.021 | V ₂ | 635.443 |
| | RT ₃ | 2.899 | I ₃ | 374.179 | V ₃ | 577.012 |
| | RT _t | 3.256 | I ₄ | 175.134 | V ₄ | 570.174 |
| 8 | RT ₁ | 4.534 | I ₁ | 714.777 | V ₁ | 722.095 |
| | RT ₂ | 3.511 | I ₂ | 555.527 | V ₂ | 635.344 |
| | RT ₃ | 2.895 | I ₃ | 374.580 | V ₃ | 576.850 |
| | RT _t | 3.251 | I ₄ | 175.333 | V ₄ | 570.005 |

Tabla 2.4. Resultados de la solución del circuito de la Figura 2.11b

Se puede observar que esta alternativa cumple las condiciones de diseño, pues el voltaje mínimo es de 570.005[V], valor mayor que 525[V]; mientras que la corriente máxima es de 714.777[A]; valor que apenas es 1.4% mayor que la admisible en condiciones normales por el hilo de contacto (705[A]). Dado que esta

alternativa cumple ante la condición de falla calculada, a continuación se analiza las demás condiciones de falla.

2.2.4.3.2. Condición de falla de la subestación de tracción N° 4, sentido de circulación norte - sur, sin los trolebuses del terminal Ofelia.

A continuación se analizará, para la condición de falla de la S/E N°4, el otro sentido de circulación, es decir, el sentido sur – norte, con tres trolebuses en el tramo. El circuito que modela esta condición es el de la Figura 2.12. En este modelo no se ha considerado los trolebuses que se encuentran en el terminal de la Ofelia que se consideraron en el otro sentido de circulación; también se considera que existe aislamiento eléctrico en la Línea Aérea de Contacto para aislar los dos sentidos de circulación a la salida del terminal.

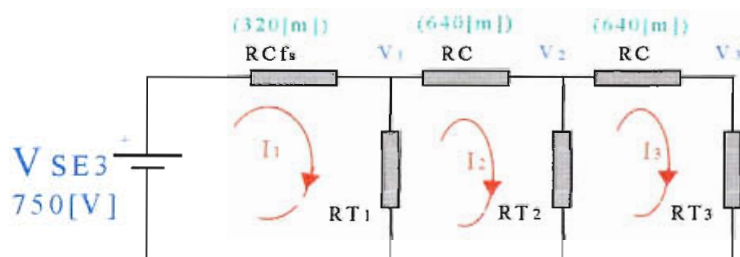


Figura 2.12. Circuito equivalente para cuatro subestaciones de tracción, en condición de falla de S/E N°4, sentido sur - norte

El circuito equivalente se describe mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} (RCf_s+RT_1) & -RT_1 & 0 \\ -RT_1 & (RT_1+RT_2+RC) & -RT_2 \\ 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RC) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} RC &= 0.156[\Omega] \\ RCf_s &= 0.07808[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[\text{m}] \\ V_{SE1} &= 750[\text{V}] \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales para este caso son las siguientes:

$$RT_1 = RT_2 = RT_3 = 4.89[\Omega]$$

La Tabla 2.5. indica los resultados de la solución del sistema.

| N° ITERACIÓN | RESISTENCIAS [Ω] | | CORRIENTES [A] | | VOLTAJES [V] | |
|-----------------|---------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | | |
| 1 | RT ₁ | 4.891 | I ₁ | 418.349 | V ₁ | 717.335 |
| | RT ₂ | 4.891 | I ₂ | 271.693 | V ₂ | 674.908 |
| | RT ₃ | 4.891 | I ₃ | 133.712 | V ₃ | 654.027 |
| 2 | RT ₁ | 4.475 | I ₁ | 495.285 | V ₁ | 711.328 |
| | RT ₂ | 3.961 | I ₂ | 336.312 | V ₂ | 658.810 |
| | RT ₃ | 3.720 | I ₃ | 169.983 | V ₃ | 632.265 |
| 3 | RT ₁ | 4.400 | I ₁ | 514.960 | V ₁ | 709.792 |
| | RT ₂ | 3.774 | I ₂ | 353.639 | V ₂ | 654.568 |
| | RT ₃ | 3.476 | I ₃ | 180.206 | V ₃ | 626.427 |
| 4 | RT ₁ | 4.381 | I ₁ | 520.397 | V ₁ | 709.367 |
| | RT ₂ | 3.726 | I ₂ | 358.475 | V ₂ | 653.388 |
| | RT ₃ | 3.412 | I ₃ | 183.103 | V ₃ | 624.795 |
| 5 | RT ₁ | 4.376 | I ₁ | 521.929 | V ₁ | 709.248 |
| | RT ₂ | 3.712 | I ₂ | 359.841 | V ₂ | 653.055 |
| | RT ₃ | 3.395 | I ₃ | 183.925 | V ₃ | 624.333 |

Tabla 2.5. Resultados de la solución del circuito de la Figura 2.12

Para esta condición también se puede observar que se cumplen las condiciones de diseño, pues el voltaje mínimo es de 624.333[V], valor mayor que 525[V]; mientras que la corriente máxima es de 521.929[A]; menor que la admisible en condiciones normales por el hilo de contacto (705[A]).

De esta forma se ha probado que la S/E N°3 puede tomar la carga de la subestación N°4 en condición de falla de ésta. A continuación se analizará la condición para cuando la subestación de tracción N°2 falle.

2.2.4.3.3. Condición de falla de la subestación de tracción N° 2, para cualquier sentido de circulación.

En esta condición se tendrá cinco trolebuses entre las subestaciones de tracción N°1 y N°3, para cualquiera de los sentidos de circulación (sur – norte o norte – sur) como se observa en la Figura 2.13a.

Por otra parte, el circuito eléctrico que modela esta condición para cualquiera de los sentidos de circulación, se indica en la Figura 2.13b.

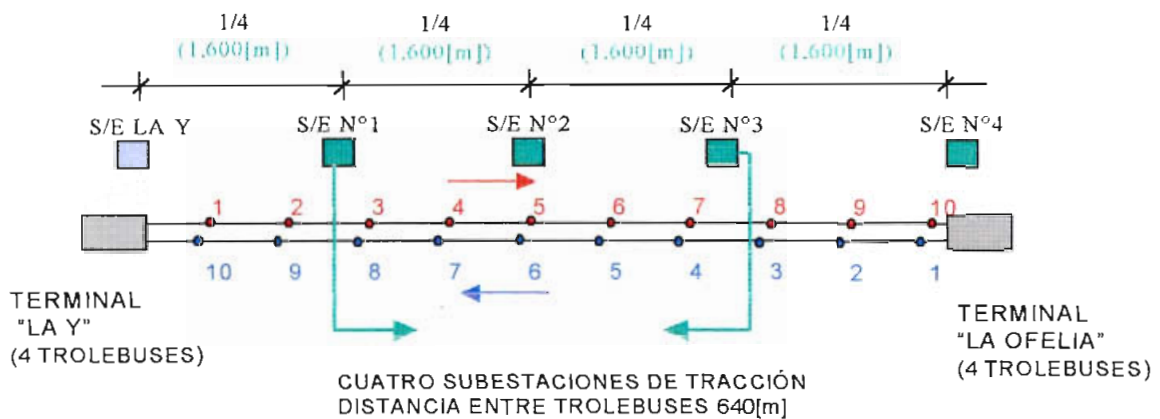


Figura 2.13a. Ubicación de trolebuses y cuatro subestaciones de tracción, en condición de falla de la S/E N°2

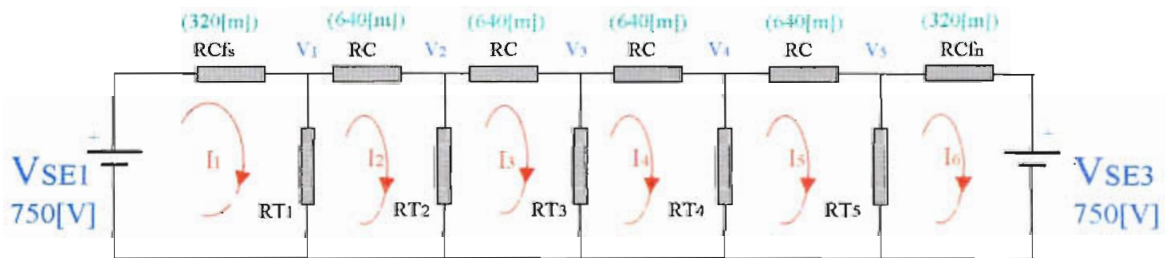


Figura 2.13b. Circuito eléctrico equivalente, para la condición de cuatro subestaciones de tracción, en condición de falla de S/E N°2, en cualquier sentido de circulación

El circuito equivalente se describe mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} (RCf_s+RT_1) & -RT_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -RT_1 & (RT_1+RT_2+RC) & -RT_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RC) & -RT_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -RT_3 & (RT_3+RT_4+RC) & -RT_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -RT_4 & (RT_4+RT_5+RC) & -RT_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -RT_5 & (RT_5+RCf_n) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -750 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} RC &= 0.156[\Omega] \\ RCf_s &= 0.07808[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[m] \\ RCf_n &= 0.07808[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[m] \\ V_{SE1} &= V_{SE3} = 750[V] \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales para este caso son las siguientes:

$$RT_1 = RT_2 = RT_3 = RT_4 = RT_5 = 4.89[\Omega]$$

Los resultados de la solución del sistema se presentan en la Tabla 2.6.

De los resultados se puede concluir que el voltaje mínimo es de 663.926[V], valor mayor que 525[V]; mientras que la corriente máxima es de 416.585[A]; menor que la admisible en condiciones normales por el hilo de contacto (705[A]).

Este mismo resultado se tendrá en cualquiera de los dos sentidos de circulación, por lo que, no existirían problemas por caídas de tensión entre las subestaciones N°1 y N°3, pues el voltaje mínimo sería de 663.926[V]; mientras que la corriente que deberá entregar la subestación N° 3, para cada sentido de circulación hacia el sur de la subestación N° 3, será de 416.585[A].

En esta condición de falla, la subestación de tracción N° 1 deberá entregar hacia el norte, para cada sentido de circulación, 416.585[A]

| Nº ITERACIÓN | RESISTENCIAS [Ω] | | CORRIENTES [A] | | VOLTAJES [V] | |
|--------------|---------------------------|-------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 1 | RT ₁ | 4.891 | I ₁ | 357.875 | V ₁ | 722.057 |
| | RT ₂ | 4.891 | I ₂ | 210.255 | V ₂ | 689.224 |
| | RT ₃ | 4.891 | I ₃ | 69.347 | V ₃ | 678.394 |
| | RT ₄ | 4.891 | I ₄ | -69.347 | V ₄ | 689.224 |
| | RT ₅ | 4.891 | I ₅ | -210.255 | V ₅ | 722.057 |
| | | | | I ₆ | -357.875 | |
| 2 | RT ₁ | 4.534 | I ₁ | 406.238 | V ₁ | 718.281 |
| | RT ₂ | 4.131 | I ₂ | 247.803 | V ₂ | 679.584 |
| | RT ₃ | 4.002 | I ₃ | 83.283 | V ₃ | 666.579 |
| | RT ₄ | 4.131 | I ₄ | -83.283 | V ₄ | 679.584 |
| | RT ₅ | 4.534 | I ₅ | -247.803 | V ₅ | 718.281 |
| | | | | I ₆ | -406.238 | |
| 3 | RT ₁ | 4.486 | I ₁ | 414.723 | V ₁ | 717.618 |
| | RT ₂ | 4.016 | I ₂ | 254.766 | V ₂ | 677.834 |
| | RT ₃ | 3.864 | I ₃ | 85.980 | V ₃ | 664.407 |
| | RT ₄ | 4.016 | I ₄ | -85.980 | V ₄ | 677.834 |
| | RT ₅ | 4.486 | I ₅ | -254.766 | V ₅ | 717.618 |
| | | | | I ₆ | -414.723 | |
| 4 | RT ₁ | 4.478 | I ₁ | 416.292 | V ₁ | 717.496 |
| | RT ₂ | 3.995 | I ₂ | 256.067 | V ₂ | 677.509 |
| | RT ₃ | 3.839 | I ₃ | 86.490 | V ₃ | 664.002 |
| | RT ₄ | 3.995 | I ₄ | -86.490 | V ₄ | 677.509 |
| | RT ₅ | 4.478 | I ₅ | -256.067 | V ₅ | 717.496 |
| | | | | I ₆ | -416.292 | |
| 5 | RT ₁ | 4.477 | I ₁ | 416.585 | V ₁ | 717.473 |
| | RT ₂ | 3.991 | I ₂ | 256.311 | V ₂ | 677.448 |
| | RT ₃ | 3.834 | I ₃ | 86.586 | V ₃ | 663.926 |
| | RT ₄ | 3.991 | I ₄ | -86.586 | V ₄ | 677.448 |
| | RT ₅ | 4.477 | I ₅ | -256.311 | V ₅ | 717.473 |
| | | | | I ₆ | -416.585 | |

Tabla 2.6. Resultados de la solución del circuito de la Figura 2.13b

A continuación se analizará la condición en la que falle la subestación de tracción N° 3, en este caso, el tramo comprendido entre las subestaciones de tracción N° 2 y N°4, con cinco trolebuses en cada sentido, queda alimentado por estas subestaciones, además se deberá considerar en el sentido sur – norte los trolebuses que se encuentran en el terminal Ofelia.

2.2.4.3.4. *Condición de falla de la subestación de tracción N° 3, sentido de circulación sur – norte, con los trolebuses del terminal Ofelia.*

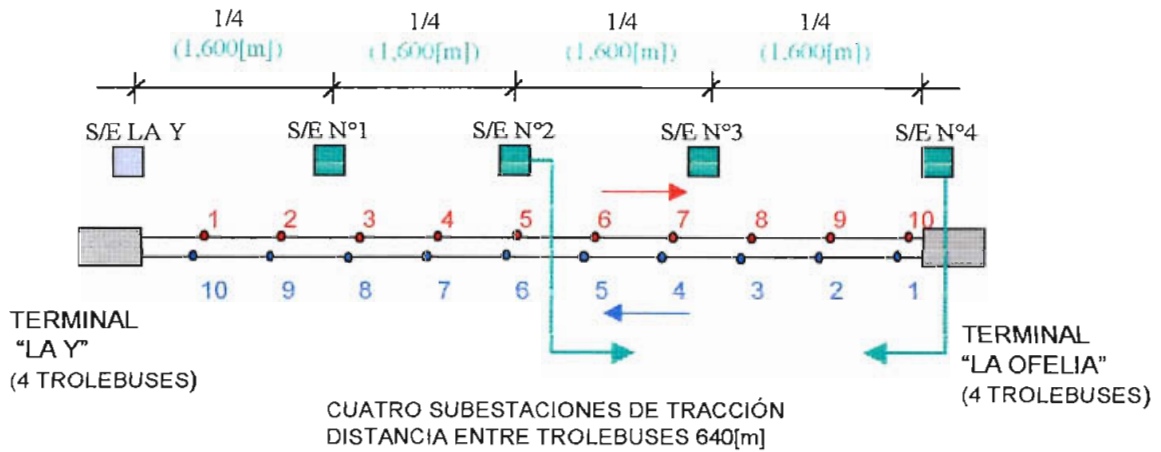


Figura 2.14a. Condición de falla de S/E N°3

La Figura 2.14a. esquematiza esta condición de falla, mientras que el circuito eléctrico que modela esta condición se indica en la Figura 2.14b.

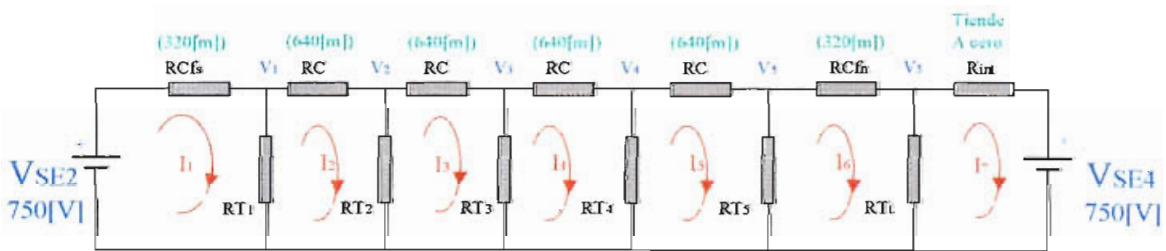


Figura 2.14b. Circuito equivalente para el sentido sur – norte se incluye los trolebuses del terminal Ofelia

El circuito equivalente, según la ecuación (2.7.), se describe mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix}
 (RCf_s+RT_1) & -RT_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -RT_1 & (RT_1+RT_2+RC) & -RT_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RC) & -RT_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -RT_3 & (RT_3+RT_4+RC) & -RT_4 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -RT_4 & (RT_4+RT_5+RC) & -RT_5 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -RT_5 & (RT_5+RT_1+RCf_n) & -RT_1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -RT_t & (RT_t+R_{int}) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (RT_t+R_{int})
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 I_1 \\
 I_2 \\
 I_3 \\
 I_4 \\
 I_5 \\
 I_6 \\
 I_7
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 750 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 -750
 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 RC &= 0.156[\Omega] \\
 RCf_s &= 0.07808[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[m] \\
 RCf_n &= 0.07808[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[m] \\
 V_{SE2} &= V_{SE4} = 750[V] \\
 R_{int} &= \text{Resistencia interna de la S/E, tiende a cero}
 \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales para este caso son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 RT_1 &= RT_2 = RT_3 = RT_4 = RT_5 = 4.89[\Omega] \\
 RT_t &= 5.625[\Omega]
 \end{aligned}$$

La solución del sistema se indica en la Tabla 2.7.

De la solución del circuito se observa que el voltaje mínimo sería de 663.923[V], mientras que la corriente que deberá entregar la subestación de tracción N° 4 sería de 549.915[A], por otra parte, la corriente que entregará la subestación de tracción N° 2 para esta condición de falla será de 416.593[A]. Los resultados cumplen las condiciones de diseño.

| Nº ITERACIÓN | RESISTENCIAS [Ω] | | CORRIENTES [A] | | VOLTAJES [V] | |
|--------------|------------------|-------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1 | RT ₁ | 4.891 | I ₁ | 357.881 | V ₁ | 722.057 |
| | RT ₂ | 4.891 | I ₂ | 210.261 | V ₂ | 689.222 |
| | RT ₃ | 4.891 | I ₃ | 69.353 | V ₃ | 678.392 |
| | RT ₄ | 4.891 | I ₄ | -69.341 | V ₄ | 689.220 |
| | RT ₅ | 4.891 | I ₅ | -210.248 | V ₅ | 722.053 |
| | RT _t | 5.625 | I ₆ | -357.868 | V ₆ | 749.995 |
| | | | I ₇ | -491.200 | | |
| 2 | RT ₁ | 4.534 | I ₁ | 406.245 | V ₁ | 718.280 |
| | RT ₂ | 4.131 | I ₂ | 247.811 | V ₂ | 679.582 |
| | RT ₃ | 4.002 | I ₃ | 83.290 | V ₃ | 666.576 |
| | RT ₄ | 4.131 | I ₄ | -83.276 | V ₄ | 679.580 |
| | RT ₅ | 4.534 | I ₅ | -247.797 | V ₅ | 718.276 |
| | RT _t | 5.625 | I ₆ | -406.232 | V ₆ | 749.995 |
| | | | I ₇ | -539.566 | | |
| 3 | RT ₁ | 4.486 | I ₁ | 414.731 | V ₁ | 717.618 |
| | RT ₂ | 4.016 | I ₂ | 254.774 | V ₂ | 677.832 |
| | RT ₃ | 3.863 | I ₃ | 85.988 | V ₃ | 664.404 |
| | RT ₄ | 4.016 | I ₄ | -85.974 | V ₄ | 677.830 |
| | RT ₅ | 4.486 | I ₅ | -254.760 | V ₅ | 717.613 |
| | RT _t | 5.625 | I ₆ | -414.718 | V ₆ | 749.995 |
| | | | I ₇ | -548.052 | | |
| 4 | RT ₁ | 4.478 | I ₁ | 416.300 | V ₁ | 717.495 |
| | RT ₂ | 3.995 | I ₂ | 256.075 | V ₂ | 677.507 |
| | RT ₃ | 3.839 | I ₃ | 86.498 | V ₃ | 663.999 |
| | RT ₄ | 3.995 | I ₄ | -86.484 | V ₄ | 677.504 |
| | RT ₅ | 4.478 | I ₅ | -256.061 | V ₅ | 717.491 |
| | RT _t | 5.625 | I ₆ | -416.287 | V ₆ | 749.995 |
| | | | I ₇ | -549.621 | | |
| 5 | RT ₁ | 4.477 | I ₁ | 416.593 | V ₁ | 717.472 |
| | RT ₂ | 3.991 | I ₂ | 256.319 | V ₂ | 677.446 |
| | RT ₃ | 3.834 | I ₃ | 86.594 | V ₃ | 663.923 |
| | RT ₄ | 3.991 | I ₄ | -86.579 | V ₄ | 677.443 |
| | RT ₅ | 4.477 | I ₅ | -256.305 | V ₅ | 717.468 |
| | RT _t | 5.625 | I ₆ | -416.580 | V ₆ | 749.995 |
| | | | I ₇ | -549.915 | | |

Tabla 2.7. Resultados de la solución del circuito de la Figura 2.14b

2.2.4.3.5. *Condición de falla de la subestación de tracción N° 3, sentido de circulación norte - sur, sin los trolebuses del terminal Ofelia.*

Se analizará a continuación la condición de falla de la subestación de tracción N° 3, para el sentido de circulación norte – sur, sin considerar los trolebuses que se

encuentran en el terminal Ofelia. El circuito eléctrico que modela esta condición es el que consta en la Figura 2.15.

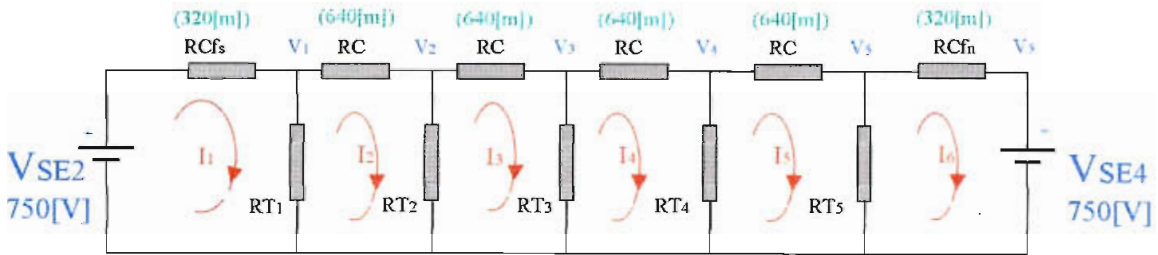


Figura 2.15. . Circuito equivalente para el sentido norte - sur sin incluir los trolebuses del terminal Ofelia

El circuito equivalente se describe mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} (RCf_s+RT_1) & -RT_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -RT_1 & (RT_1+RT_2+RC) & -RT_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RC) & -RT_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -RT_3 & (RT_3+RT_4+RC) & -RT_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -RT_4 & (RT_4+RT_5+RC) & -RT_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -RT_5 & (RT_5+RCf_n) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -750 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} RC &= 0.156[\Omega] \\ RCf_s &= 0.07808[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[\text{m}] \\ RCf_n &= 0.07808[\Omega], \text{ correspondiente a } 320[\text{m}] \\ V_{SE2} &= V_{SE4} = 750[\text{V}] \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales para este caso son las siguientes:

$$RT_1 = RT_2 = RT_3 = RT_4 = RT_5 = 4.89[\Omega]$$

De los resultados de la solución del sistema que se presentan en la Tabla 2.8., se observa que el voltaje mínimo calculado es de 663.923[V], mientras que la corriente que deberán entregar las subestaciones de tracción N° 4 y N° 2 es de 416.585[A]. Estos resultados cumplen las condiciones de diseño.

| Nº ITERACION | RESISTENCIAS [Ω] | | CORRIENTES [A] | | VOLTAJES [V] | |
|--------------|------------------|-------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 1 | RT ₁ | 4.891 | I ₁ | 357.876 | V ₁ | 722.057 |
| | RT ₂ | 4.891 | I ₂ | 210.255 | V ₂ | 689.224 |
| | RT ₃ | 4.891 | I ₃ | 69.347 | V ₃ | 678.394 |
| | RT ₄ | 4.891 | I ₄ | -69.347 | V ₄ | 689.224 |
| | RT ₅ | 4.891 | I ₅ | -210.255 | V ₅ | 722.057 |
| | | | | I ₆ | -357.876 | |
| 2 | RT ₁ | 4.534 | I ₁ | 406.238 | V ₁ | 718.281 |
| | RT ₂ | 4.131 | I ₂ | 247.803 | V ₂ | 679.584 |
| | RT ₃ | 4.002 | I ₃ | 83.283 | V ₃ | 666.579 |
| | RT ₄ | 4.131 | I ₄ | -83.283 | V ₄ | 679.584 |
| | RT ₅ | 4.534 | I ₅ | -247.803 | V ₅ | 718.281 |
| | | | | I ₆ | -406.238 | |
| 3 | RT ₁ | 4.486 | I ₁ | 414.723 | V ₁ | 717.618 |
| | RT ₂ | 4.016 | I ₂ | 254.766 | V ₂ | 677.834 |
| | RT ₃ | 3.864 | I ₃ | 85.980 | V ₃ | 664.407 |
| | RT ₄ | 4.016 | I ₄ | -85.980 | V ₄ | 677.834 |
| | RT ₅ | 4.486 | I ₅ | -254.766 | V ₅ | 717.618 |
| | | | | I ₆ | -414.723 | |
| 4 | RT ₁ | 4.478 | I ₁ | 416.292 | V ₁ | 717.496 |
| | RT ₂ | 3.995 | I ₂ | 256.067 | V ₂ | 677.509 |
| | RT ₃ | 3.839 | I ₃ | 86.490 | V ₃ | 664.002 |
| | RT ₄ | 3.995 | I ₄ | -86.490 | V ₄ | 677.509 |
| | RT ₅ | 4.478 | I ₅ | -256.067 | V ₅ | 717.496 |
| | | | | I ₆ | -416.292 | |
| 5 | RT ₁ | 4.477 | I ₁ | 416.585 | V ₁ | 717.473 |
| | RT ₂ | 3.991 | I ₂ | 256.311 | V ₂ | 677.448 |
| | RT ₃ | 3.834 | I ₃ | 86.586 | V ₃ | 663.926 |
| | RT ₄ | 3.991 | I ₄ | -86.586 | V ₄ | 677.448 |
| | RT ₅ | 4.477 | I ₅ | -256.311 | V ₅ | 717.473 |
| | | | | I ₆ | -416.585 | |

Tabla 2.8. Resultados de la solución del circuito de la Figura 2.15

2.2.4.3.6. *Condición de falla de la subestación de tracción N° 1, para cualquier sentido de circulación.*

Esta condición de falla es similar, desde el punto de vista de ubicación de vehículos, a la falla de la subestación de tracción N°2, descrita en el numeral 2.2.4.3.3., por lo que el circuito eléctrico que modela esta falla sería igual que el analizado en el numeral 2.2.4.3.3. Realizando las concordancias respectivas, para

la condición de falla de la subestación de tracción N° 1, se tendrían los siguientes resultados:

- a) Voltaje mínimo entre las subestaciones La Y y N° 2, 663.926[V].
- b) La corriente que debe entregar la subestación de tracción N° 2, hacia el sur, es de 416.585[A], para cada sentido de circulación.
- c) La corriente que debe entregar la subestación de tracción La Y, hacia el norte, es de 416.585[A], para cada sentido de circulación.

2.2.4.3.7. Condición de falla de la subestación de tracción La Y.

Para analizar esta condición de falla, se considera las siguientes condiciones:

- Al salir de servicio la subestación de tracción La Y, la zona que cubre esta subestación queda alimentada: al sur por la actual subestación de tracción Naciones Unidas; y, al norte por la subestación de tracción N°1 de la Extensión Norte.
- En este tramo está ubicado el terminal de transferencia La Y, que luego de la ampliación de la Extensión Norte, contará con 3 andenes, por lo que el número de trolebuses que operaran en el terminal será de 12.
- La distancia entre la actual subestación de tracción Naciones Unidas y el terminal La Y, es de 1,535[m].
- El período de despacho de trolebuses hacia el sur del terminal La Y, es de 2 minutos.
- La velocidad media de los trolebuses hacia el sur del terminal La Y, es de 16 [km/h]

Sobre la base de estas premisas, aplicando la ecuación (2.3), se determina el tiempo requerido para cubrir la distancia entre la subestación Naciones Unidas y el terminal La Y, a la velocidad media indicada.

$$t = \frac{d}{v}$$

$$t = \left(\frac{1.535[\text{km}]}{16[\text{km} / \text{h}]} \right) * \left(\frac{60[\text{min.}]}{1[\text{h}]} \right) = 5.756[\text{min.}]$$

luego, como el período de despacho es de 2 minutos, se tiene que el número de trolebuses que en promedio se encuentran en el tramo, por cada sentido, es:

$$N = \frac{5.756[\text{min}]}{2[\text{min}]} = 2.878 \approx 3$$

Por otra parte, de los 12 trolebuses que se prevé estarán en el terminal La Y, se puede asumir que el 50% estarán en sentido sur – norte y el otro 50% en el sentido norte – sur, por lo que, para cada sentido se tendrá entonces 6 trolebuses en el terminal La Y. Con la consideración realizada anteriormente de que la potencia que requiere cada trolebús en el interior del terminal es de 25[kW], la carga que representan los 6 trolebuses por cada sentido en el interior del terminal La Y, es de 150[kW].

Así mismo, considerando la ubicación de trolebuses descrita en el numeral 2.1.2. se tiene que entre el terminal La Y y la subestación de tracción N°1 de la ampliación norte del sistema, existirán hasta 3 trolebuses por sentido.

En conclusión, entre las subestaciones de tracción Naciones Unidas y N°1 de la ampliación norte del sistema, existirá, para cada sentido de circulación: 3 trolebuses entre la subestación de tracción Naciones Unidas y el terminal La Y; 6 trolebuses en el interior del terminal La Y; y, 3 trolebuses entre el terminal La Y y la subestación N° 1 de la ampliación norte, como se esquematiza en la Figura 2.16.

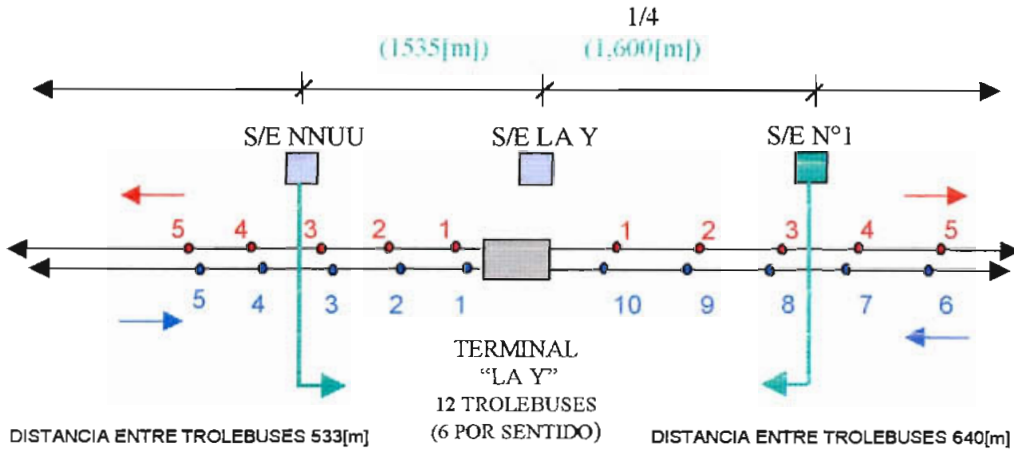


Figura 2.16a. Condición de la S/E La Y

El circuito eléctrico que modela esta condición de falla es el que se indica a continuación en la Figura 2.16b.

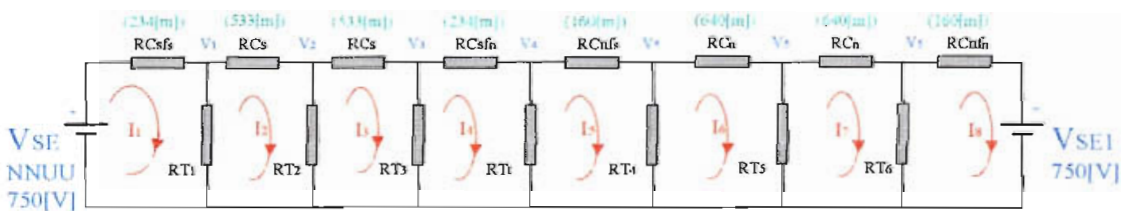


Figura 2.16b. Circuito equivalente para la condición de falla de la S/E La Y, en cualquier sentido de circulación

Aplicando la ecuación (2.7.), la ecuación matricial que describe el circuito equivalente de la Figura 2.16b. es la siguiente:

$$\begin{bmatrix}
 (RCsf_5+RT_1) & -RT_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -RT_1 & (RT_1+RT_2+RCs) & -RT_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -RT_2 & (RT_2+RT_3+RCs) & -RT_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -RT_3 & (RT_2+RT_1+RCsf_4) & -RT_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -RT_1 & (RT_1+RT_4+RCnf_2) & -RT_4 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -RT_4 & (RT_4+RT_5+RCn) & -RT_5 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -RT_5 & (RT_5+RT_6+RCn) & -RT_6 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -RT_6 & (RT_6+RCnf_6) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -750 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 RC_s &= 0.130[\Omega], \text{ correspondiente a } 533[\text{m}] \\
 RC_n &= 0.156[\Omega], \text{ correspondiente a } 640[\text{m}] \\
 RC_{sf_s} &= 0.057[\Omega], \text{ correspondiente a } 234[\text{m}] \\
 RC_{sf_n} &= 0.057[\Omega], \text{ correspondiente a } 234[\text{m}] \\
 RC_{nf_s} &= 0.039[\Omega], \text{ correspondiente a } 160[\text{m}] \\
 RC_{nf_n} &= 0.039[\Omega], \text{ correspondiente a } 160[\text{m}] \\
 V_{NNUU} &= V_{SE1} = 750[\text{V}]
 \end{aligned}$$

Las condiciones iniciales para este caso son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 RT_1 = RT_2 = RT_3 = RT_4 = RT_5 = RT_6 &= 4.89[\Omega] \\
 RT_t &= 3.75[\Omega]
 \end{aligned}$$

La solución del sistema se presenta en la Tabla 2.9.

De la solución del circuito se observa que el voltaje mínimo en el tramo entre las subestaciones Naciones Unidas y la subestación N° 1 de la extensión norte del sistema, se produce en el interior del Terminal La Y, V_4 , y alcanza un valor de 597.148[V].

También de la solución del sistema se puede observar que en esta condición de falla, la corriente que debe entregar la subestación Naciones Unidas, hacia el norte, es de 662.545[A] para cada sentido de circulación, de igual forma, la corriente que debe entregar la subestación N°1 de la extensión norte del sistema, en esta condición de falla, hacia el sur, es de 641.626[A] para cada sentido de circulación.

Para esta condición de falla, con la ubicación de las subestaciones de tracción propuesta, se observa que los resultados cumplen las condiciones de diseño en cuanto a caídas de tensión y capacidad de circulación de corriente a través del hilo de contacto.

| Nº ITERACION | RESISTENCIAS [Ω] | | CORRIENTES [A] | | VOLTAJES [V] | |
|--------------|------------------|-------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1 | R _{T1} | 4.891 | I ₁ | 508.013 | V ₁ | 720.994 |
| | R _{T2} | 4.891 | I ₂ | 360.610 | V ₂ | 674.067 |
| | R _{T3} | 4.891 | I ₃ | 222.800 | V ₃ | 645.074 |
| | R _{T1} | 3.750 | I ₄ | 90.919 | V ₄ | 639.883 |
| | R _{T4} | 4.891 | I ₅ | -79.717 | V ₅ | 642.995 |
| | R _{T5} | 4.891 | I ₆ | -211.174 | V ₆ | 675.972 |
| | R _{T6} | 4.891 | I ₇ | -349.372 | V ₇ | 730.530 |
| | | | I ₈ | -498.725 | | |
| 2 | R _{T1} | 4.520 | I ₁ | 614.576 | V ₁ | 714.910 |
| | R _{T2} | 3.951 | I ₂ | 456.420 | V ₂ | 655.515 |
| | R _{T3} | 3.618 | I ₃ | 290.509 | V ₃ | 617.710 |
| | R _{T1} | 2.730 | I ₄ | 119.798 | V ₄ | 610.870 |
| | R _{T4} | 3.595 | I ₅ | -103.992 | V ₅ | 614.930 |
| | R _{T5} | 3.973 | I ₆ | -275.036 | V ₆ | 657.880 |
| | R _{T6} | 4.641 | I ₇ | -440.608 | V ₇ | 726.685 |
| | | | I ₈ | -597.200 | | |
| 3 | R _{T1} | 4.444 | I ₁ | 647.478 | V ₁ | 713.032 |
| | R _{T2} | 3.737 | I ₂ | 487.042 | V ₂ | 649.652 |
| | R _{T3} | 3.318 | I ₃ | 313.176 | V ₃ | 608.897 |
| | R _{T1} | 2.488 | I ₄ | 129.661 | V ₄ | 601.494 |
| | R _{T4} | 3.288 | I ₅ | -112.121 | V ₅ | 605.871 |
| | R _{T5} | 3.764 | I ₆ | -296.379 | V ₆ | 652.154 |
| | R _{T6} | 4.592 | I ₇ | -469.662 | V ₇ | 725.496 |
| | | | I ₈ | -627.656 | | |
| 4 | R _{T1} | 4.421 | I ₁ | 658.646 | V ₁ | 712.394 |
| | R _{T2} | 3.670 | I ₂ | 497.507 | V ₂ | 647.652 |
| | R _{T3} | 3.224 | I ₃ | 321.034 | V ₃ | 605.875 |
| | R _{T1} | 2.412 | I ₄ | 133.105 | V ₄ | 598.275 |
| | R _{T4} | 3.192 | I ₅ | -114.939 | V ₅ | 602.763 |
| | R _{T5} | 3.698 | I ₆ | -303.775 | V ₆ | 650.200 |
| | R _{T6} | 4.577 | I ₇ | -479.585 | V ₇ | 725.092 |
| | | | I ₈ | -638.009 | | |
| 5 | R _{T1} | 4.413 | I ₁ | 662.545 | V ₁ | 712.171 |
| | R _{T2} | 3.647 | I ₂ | 501.168 | V ₂ | 646.953 |
| | R _{T3} | 3.192 | I ₃ | 323.795 | V ₃ | 604.817 |
| | R _{T1} | 2.386 | I ₄ | 134.318 | V ₄ | 597.148 |
| | R _{T4} | 3.159 | I ₅ | -115.930 | V ₅ | 601.674 |
| | R _{T5} | 3.676 | I ₆ | -360.373 | V ₆ | 649.517 |
| | R _{T6} | 4.572 | I ₇ | -483.056 | V ₇ | 724.951 |
| | | | I ₈ | -641.626 | | |

Tabla 2.9. Resultados de la solución del circuito de la Figura 2.16b

2.2.4.3.8. Condición normal de trabajo, sin fallas

Para una condición normal de operación, es decir, sin presencia de fallas, para cada tramo de 1,600[m], se tiene 5 trolebuses, 3 en el un sentido y 2 en el otro, con una separación entre cada vehículo de 640[m]. Además, como ya se ha dicho, se considera los 4 trolebuses que se encuentran en el interior del terminal la Ofelia en operación de embarque y desembarque.

A continuación en la Tabla 2.10, se presentan los resultados de los cálculos realizados para la condición normal de operación, los mismos que se han obtenido con la misma metodología que se ha venido analizando la operación del sistema.

| SUBESTACION N° | CORRIENTE AL SUR DE LA SUBESTACIÓN [A] | CORRIENTE AL NORTE DE LA SUBESTACIÓN [A] | CORRIENTE TOTAL [A] | VOLTAJE MÍNIMO EN CADA TRAMO [V] |
|----------------|--|--|---------------------|----------------------------------|
| 1 | 391 | 391 | 782 | 728 |
| 2 | 391 | 391 | 782 | 728 |
| 3 | 391 | 391 | 782 | 728 |
| 4 | 525 | 0 | 525 | 728 |

Tabla 2.10. Resultados de corrientes y voltajes mínimos para una condición normal de operación.

2.2.5. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DE LAS SUBESTACIONES DE TRACCIÓN.

El dimensionamiento de potencia de las subestaciones de tracción de la extensión norte del sistema trolebús, se lo realizará de forma tal que se garantice la operación confiable del sistema aún cuando se presenten fallas en las subestaciones que no sean consecutivas, para ello, los valores de corriente que se debe considerar para el cálculo de la potencia, serán aquellos que se determinaron en las diferentes condiciones de falla.

La potencia de cada subestación de tracción está dada por el producto de la máxima corriente que debe suministrar la subestación en condiciones de falla de las otras dos subestaciones aledañas, por el voltaje nominal de las subestaciones de tracción, es decir, 750[V].

$$P = V * I_{\text{máx}} \quad (2.8.)$$

$$P = 750[V] * I_{\text{máx}} [A]$$

2.2.5.1. Potencia de la Subestación de Tracción N°1

La condición crítica para la subestación N° 1 es cuando, simultáneamente se presenten fallas que dejen fuera de funcionamiento a las subestaciones La Y y N°2.

En condición de falla de la subestación La Y, de acuerdo a lo establecido en el numeral 2.2.4.3.7, la subestación de tracción N° 1 deberá entregar para cada sentido de circulación, 642[A], es decir, para los dos sentidos de circulación, la corriente que debe entregar la subestación N°1 es:

$$642[A] * 2 = 1,284[A]$$

En la otra condición, cuando la subestación N° 2 sale de servicio, de acuerdo a lo establecido en el numeral 2.2.4.3.3, la subestación de tracción N° 1 deberá entregar para cada sentido de circulación, 417[A], es decir, para esta condición, la corriente que debe entregar la subestación N°1 es:

$$417[A] * 2 = 834[A]$$

La corriente total que deberá entregar la subestación de tracción N°1 en condición de falla simultánea de la subestación La Y y de la subestación N°2 será:

$$I_1 = 1,284[A] + 834[A]$$

$$I_1 = 2,118[A]$$

Aplicando la ecuación (2.8), la potencia de la subestación N° 1 será:

$$P_1 = 750[V] * 2,118[A]$$

$$P_1 = 1,589[kW]$$

2.2.5.2. Potencia de la Subestación de Tracción N°2

La condición crítica para la subestación N° 2 es cuando, simultáneamente se presenten fallas que dejen fuera de funcionamiento a las subestaciones N°1 y N°3.

En condición de falla de la subestación N°1, de acuerdo a lo establecido en el numeral 2.2.4.3.6, la subestación de tracción N° 2 deberá entregar para cada sentido de circulación, 417[A], es decir, para los dos sentidos de circulación, la corriente que debe entregar la subestación N°2 es:

$$417[A] * 2 = 834[A]$$

Cuando la subestación N° 3 sale de servicio, de acuerdo a lo establecido en el numeral 2.2.4.3.4, la subestación de tracción N° 2 deberá entregar para el sentido de circulación sur - norte, 417[A]. Para el sentido de circulación norte – sur, de acuerdo a lo establecido en el numeral 2.2.4.3.5, la corriente que deberá entregar la subestación N° 2 es también de 417[A]. Por lo tanto, para la condición de falla de la subestación N°3, la corriente que debe entregar la subestación N°2 es:

$$417[A] * 2 = 834[A]$$

La corriente total que deberá entregar la subestación de tracción N°2 en condición de falla simultánea de la subestación N°1 y de la subestación N°3 será:

$$I_2 = 834[A] * 2$$

$$I_2 = 1,668[A]$$

Aplicando la ecuación (2.8), la potencia de la subestación N° 2 será:

$$P_2 = 750[V] * 1,668[A]$$

$$P_2 = 1,251[kW]$$

2.2.5.3. Potencia de la Subestación de Tracción N°3

El caso crítico para el dimensionamiento de la potencia de la subestación de tracción N°3 se presenta cuando salen de servicio, simultáneamente, las subestaciones N°2 y N°4.

En condición de falla de la subestación de tracción N°2, de acuerdo a lo determinado en el numeral 2.2.4.3.3, la corriente que debe suministrar la subestación de tracción N°3, para cualquiera de los sentidos de circulación, es de 417[A], es decir, para esta condición, la corriente que debe entregar la subestación N°1 para los dos sentidos de circulación es:

$$417[A] * 2 = 834[A]$$

Por otra parte, de acuerdo a lo determinado en el numeral 2.2.4.3.1, en condición de falla de la subestación N°4, el valor de corriente que debe entregar la subestación N°3 para el sentido sur – norte, es 715[A]. En esta misma condición de falla, para el sentido norte – sur, de acuerdo a lo determinado en el numeral 2.2.4.3.2, el valor de la corriente que debe entregar la subestación N° 3 es de

522[A]. Para la condición de falla de la subestación N°4, el valor de corriente que debe entregar la subestación N°3 para los dos sentidos de circulación es:

$$715[A] + 522 = 1,237[A]$$

La corriente total que deberá entregar la subestación de tracción N°3, en condición de falla simultánea de las subestaciones de tracción N°4 y N°2, es la siguiente:

$$I_3 = 834[A] + 1,237[A]$$

$$I_3 = 2,071[A]$$

Aplicando la ecuación (2.8.), la potencia de la subestación de tracción N° 3, será:

$$P_3 = 750[V] * 2,071[A]$$

$$P_3 = 1,553[kW]$$

2.2.5.4. Potencia de la Subestación de Tracción N°4

La potencia de la subestación N°4 se dimensiona considerando la condición de falla de la subestación N°3. De acuerdo a lo determinado en el numeral 2.2.4.3.4. el valor de corriente que debe entregar la subestación N° 4 para el sentido de circulación sur – norte, es de 550[A]. Para el sentido de circulación norte – sur, de acuerdo a lo determinado en el numeral 2.2.4.3.5. el valor de corriente que debe suministrar la subestación N° 4 es de 417[A]. La corriente total que debe entregar la subestación N°4 para los dos sentidos de circulación es la siguiente:

$$I_4 = 550[A] + 417[A]$$

$$I_4 = 967[A]$$

Aplicando la ecuación (2.8.), la potencia de la subestación de tracción N° 4, será:

$$P_4 = 750[V] * 967[A]$$

$$P_4 = 725[kW]$$

2.2.5.5. Compendio de las potencias de las Subestación de Tracción requeridas para la Extensión Norte del Sistema Trolebús.

Si se considera la premisa expuesta al inicio del presente subcapítulo (2.2.5.), es decir que el diseño garantice la operación confiable del sistema aún cuando se presenten fallas en subestaciones no consecutivas, se requiere que las subestaciones de tracción tengan las especificaciones de corrientes y potencias que se detallan en la Tabla 2.11.

| SUBESTACIÓN N° | CORRIENTE AL SUR DE LA SUBESTACIÓN [A] | CORRIENTE AL NORTE DE LA SUBESTACIÓN [A] | CORRIENTE TOTAL [A] | POTENCIA [Kw] |
|----------------|--|--|---------------------|---------------|
| 1 | 1,284 | 834 | 2,118 | 1,589 |
| 2 | 834 | 834 | 1,668 | 1,251 |
| 3 | 834 | 1,237 | 2,071 | 1,553 |
| 4 | 967 | 0 | 967 | 725 |

Tabla 2.11. Resumen de corrientes y potencias de las subestaciones de tracción para operación confiable ante fallas en subestaciones no consecutivas.

No obstante y considerando que la condición de que se presenten fallas que dejen fuera de servicio subestaciones no consecutivas, como por ejemplo fallas en las subestaciones **1** y **3** simultáneamente o en las subestaciones **La Y, 2** y **4** simultáneamente, es poco probable, se realizará el diseño para una condición en la cual una subestación cualesquiera pueda tomar la carga de **UNA** de sus subestaciones aledañas en condición de falla de ésta.

Bajo la premisa expuesta y considerando los casos más desfavorables de fallas simultáneas, que son los siguientes:

- Falla de las subestaciones 3 y La Y,
- Falla de las subestaciones 1 y 4
- Falla de las subestaciones 2 y La Y,

se tiene las siguientes especificaciones de corrientes y potencias para las subestaciones ha instalarse, mismas que se indican en la Tabla 2.12

| SUBESTACIÓN N° | CORRIENTE AL SUR DE LA SUBESTACIÓN [A] | CORRIENTE AL NORTE DE LA SUBESTACIÓN [A] | CORRIENTE TOTAL [A] | POTENCIA [Kw] |
|----------------|--|--|---------------------|---------------|
| 1 | 1,284 | 391 | 1,675 | 1,256 |
| 2 | 834 | 391 | 1,225 | 919 |
| 3 | 391 | 1,237 | 1,628 | 1,221 |
| 4 | 967 | 0 | 967 | 725 |

Tabla 2.11. Resumen de corrientes y potencias de las subestaciones de tracción.

Si se utiliza para las subestaciones de tracción 1,2 y 3 una potencia de al menos 1,256[kW], se homogenea la potencia de estas tres subestaciones y además se garantiza que la subestación de tracción N° 3 podría tomar la carga de las subestaciones 2 y 4 ante condiciones de fallas simultáneas de estas subestaciones.

En conclusión y resumen, para la Extensión Norte del Sistema Trolebús, se requieren cuatro subestaciones de tracción, ubicadas a 1,600[m] cada una a partir del terminal La Y. Tres de éstas subestaciones de tracción (1, 2; y, 3) deberán tener una potencia de 1,450 [kW], mientras que la restante, la N° 4, deberá tener una potencia de 840 [kW], esto considerando un factor de seguridad del 15%.

CAPÍTULO 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS SUBESTACIONES DE TRACCIÓN

En el presente capítulo se determinará las características más relevantes de las subestaciones de tracción requeridas para la Extensión Norte del Sistema Trolebús. Se ha tomado como referencia los equipos que se encuentran ya instalados en el resto del Sistema, y en lo posible, se realizará la especificación técnica de equipos similares a los ya existentes a fin de no diversificar las instalaciones.

En primer lugar se realizará una descripción general del funcionamiento de las subestaciones de tracción, luego se analizará las alternativas para el rectificador de la subestaciones de tracción y se seleccionará el más indicado; finalmente, se describirá las especificaciones técnicas del resto de las instalaciones y equipos que conforman las subestaciones de tracción.

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN.

El Sistema Trolebús es un sistema de transporte masivo que utiliza como fuente de energía primaria a la energía eléctrica suministrada por la empresa distribuidora local, para luego de un proceso de acondicionamiento de esta energía y de su distribución a lo largo del recorrido del sistema a través de la Línea Aérea de Contacto, alimentar un equipo de tracción instalado en cada vehículo trolebús, que le permite a éste su movimiento y circulación en la ciudad, como cualquier otro vehículo destinado al propósito del transporte público.

En la Figura 3.1. se esquematiza el principio de funcionamiento del Sistema Trolebús descrito.

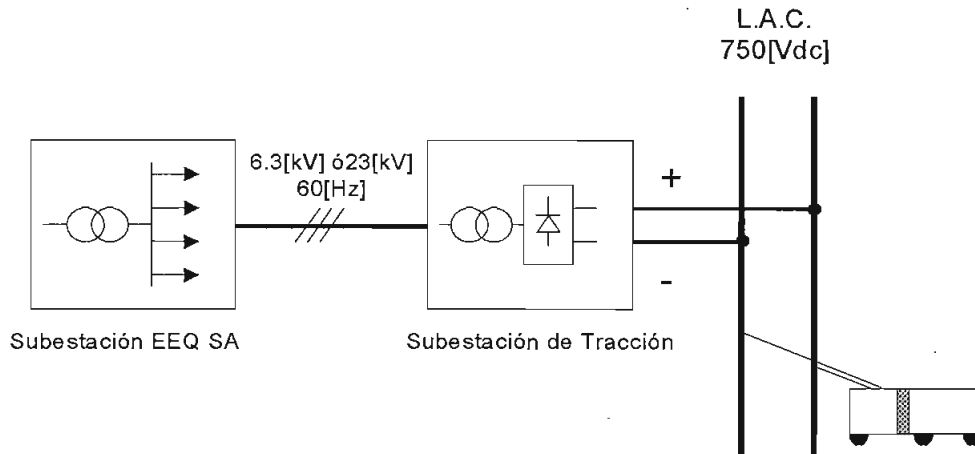


Figura 3.1. Principio de funcionamiento del Sistema Trolebús

Como se observa en el esquema de la Figura 3.1, la subestación de tracción tiene la función de acondicionar la energía eléctrica suministrada por la Empresa Eléctrica Quito S.A. (EEQ), corriente trifásica alterna con voltaje de distribución de (6,300 ó 23,000 [V]), en la corriente requerida para la alimentación de los vehículos trolebuses a través de la Línea Aérea de Contacto, 750[V] de corriente continua.

Básicamente, una subestación de tracción es un convertidor de AC a DC, que alimenta a la Línea Aérea de Contacto, para ello cuenta además con una serie de equipos de corte, protección y medida, que tienen por objetivo, fundamentalmente, las siguientes funciones:

- Corte de la alimentación a un tramo específico de la Línea Aérea de Contacto,
- Aislar completamente la subestación de tracción, para efectos del mantenimiento de ésta,
- Medición de los parámetros eléctricos requeridos para la determinación de la energía consumida y la demanda; y,
- El funcionamiento seguro de la subestación de tracción, a través de protecciones ante sobre cargas y corto circuitos.

Para esto, la subestación de tracción debe contar con un adecuado sistema de control, el mismo que se lo debe realizar por medio de PLC's. Los sistema de control, así como de iluminación de la subestación de tracción, serán alimentados por medio de una red de servicios auxiliares con los correspondientes respaldos energéticos a través de baterías.

La Figura 3.2.^[3.1] muestra un diagrama unifilar simplificado de una subestación de tracción, donde se puede apreciar sus principales componentes agrupados en subsistemas o campos.

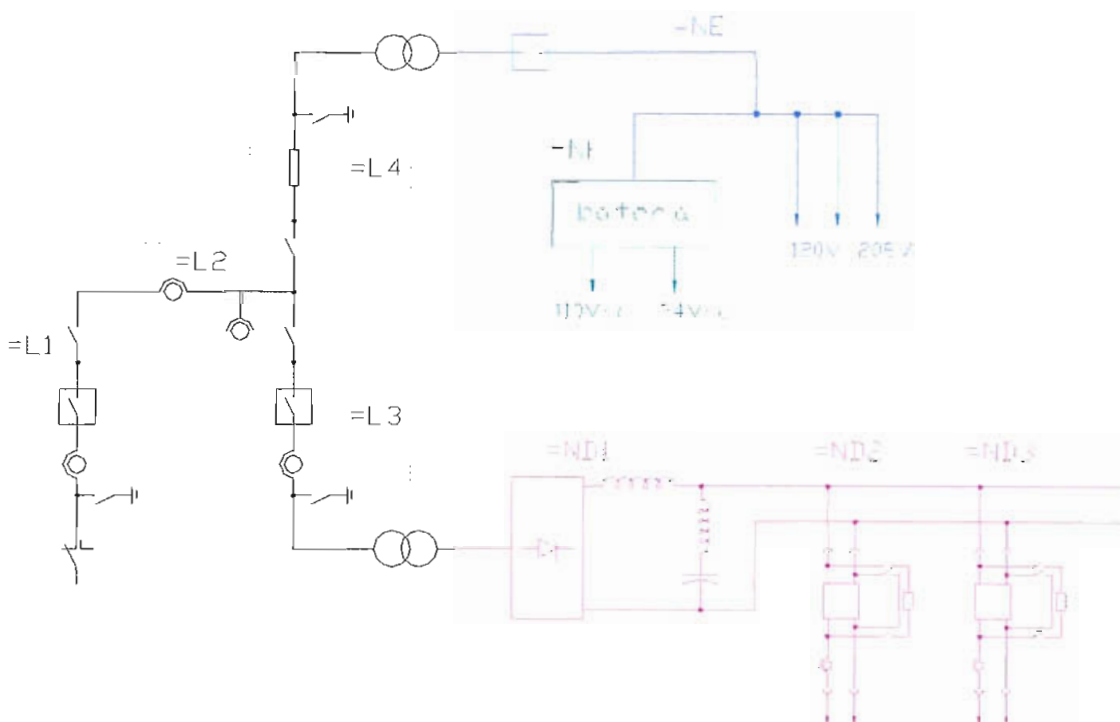


Figura 3.2. Diagrama unifilar simplificado de una Subestación de Tracción

A continuación se describe cada uno de los subsistemas o campos del diagrama de la Figura 3.2.

^[3.1] Tesis de Grado de la E.P.N “Estudio Técnico de las subestaciones de tracción del Sistema Trolebús del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito”; Marco Valencia Delgado; Pág.8; Octubre de 1998; Quito Ecuador

3.1.1 (=L1) CELDA DE ENTRADA DE LÍNEA

El campo (=L1) corresponde a la primera celda y corresponde a la entrada de línea de alimentación, sea ésta de 6 [kV] ó de 23 [kV]; así como, a la protección general de la subestación.

En este subconjunto, dentro de una celda metálica, se dispondrá del siguiente equipamiento:

- Repartidor que permite direccionar el suministro de energía de la EEQ, hacia la subestación de tracción o hacia otro equipo (subestación móvil).
- Lámparas de presencia de tensión
- Seccionador de puesta a tierra
- Seccionador tripolar de barras, en SF₆
- Disyuntor tripolar de corte en hexafloruro de azufre, accionado por motor a 110 Vdc
- Transformadores de corriente para protección

3.1.2 (=L2) CELDA DE MEDIDA

Esta celda cuenta con transformadores de medida, tanto de corriente como de potencial, que alimentan con sus señales a un contador de energía, a un amperímetro y a un voltímetro. La celda de medida estará incorporada a la barra de distribución de donde sale la celda de protección del convertidor AC/DC (grupo transformador y rectificador), y la celda de servicios auxiliares.

3.1.3 (=L3) CELDA DE PROTECCIÓN DEL GRUPO RECTIFICADOR

Esta celda corresponde a la protección del grupo transformador – rectificador del convertidor AC/DC, y estará formada por:

- Seccionador de puesta a tierra
- Seccionador tripolar de barras, en SF₆
- Disyuntor tripolar de corte en hexafloruro, accionado por motor a 110 Vdc
- Lámparas de presencia de tensión
- Transformadores de corriente para protección y medida
- Relé electrónico de sobreintensidad de tiempo inverso y cortocircuito.
- Compartimento de control, con elementos de mando y señalización en su parte frontal y PLC de control en el interior.

De esta celda se saldrá con cable aislado a la alimentación del transformador de potencia y de éste al rectificador.

3.1.4 (=L4) CELDA DE SERVICIOS AUXILIARES EN MEDIA TENSIÓN

Esta celda que estará instalada en una cabina, dispondrá de un interruptor - seccionador ruptofusible, de corte en hexafloruro de azufre, con mando manual, lámparas de presencia de tensión, seccionador de puesta a tierra y fusibles.

De esta celda, mediante cable aislado, se conecta el transformador de servicios auxiliares y de éste al armario de distribución.

3.1.5 (=ND1) GRUPO TRANSFORMADOR – RECTIFICADOR

Este campo corresponderá al formado por el convertidor AC/DC, que incluirá: el transformador, el rectificador, los filtros de armónicos, los equipos de protección y medida. De esta celda de rectificación salen las celdas de salida en corriente continua que alimenta la Línea Aérea de Contacto.

3.1.6 (=ND2/=ND3) CELDAS DE SALIDA DE FEEDER EN CORRIENTE CONTINUA

Cada subestación contará con dos cabinas de salida para alimentación a la línea de contacto, tanto a lado sur como al lado norte (feeders de salida =ND2 / =ND3), con excepción de la subestación a instalarse en la Ofelia que tendrá un solo feeder de salida, por ser una subestación terminal. Las cabinas en su parte de potencia, deberán instalarse sobre carro extraíble y contarán con el siguiente equipamiento:

- Interruptor extrarrápido bipolar de corriente continua, accionado por motor, con disparador de sobrecorriente estático ajustable.
- Analizador de catenaria por diferencia de tensión y cortocircuito.
- Relé de aumento de corriente (di/dt)
- Equipo de medición de voltaje y corriente.

La salida de la celda de feeder se realizará mediante pletinas de cobre al repartidor para alimentar a la línea de contacto desde la subestación móvil o desde la fija.

3.1.7 (=NE/=NK) SERVICIOS AUXILIARES

Los servicios auxiliares corresponden aquellos que para su funcionamiento requieren de baja tensión, 220[V] de corriente alterna, 110[V] de corriente continua; o, 24[V] de corriente continua; específicamente, los circuitos de control mediante PLC's, iluminación y tomas de fuerza.

El campo (=NE) comprende los servicios de 220[V] de corriente alterna, mientras que el campo (=NK) corresponde a los servicios de 110[V] y 24[V] de corriente continua, con el correspondiente cargador y banco de baterías.

3.1.8 CASETA PARA LA INSTALACIÓN DE EQUIPOS

Las subestaciones de tracción deberán ser del tipo compacto, alojadas dentro de una caseta. Estarán divididas en celdas o campos, con los equipos dispuestos dentro de cabinas metálicas independientes. Deberán ser protegidas contra el ingreso vertical y oblicuo de agua, no emitirán ruidos, gases nocivos ni olores que molesten al público. Las ranuras de ventilación estarán protegidas contra el ingreso de cuerpos granulares pequeños.

Las cabinas se agruparán dentro del edificio de acuerdo con su nivel de voltaje: cabinas de media tensión, cabinas de 750 Vdc y cabinas de servicios auxiliares.

A continuación, en el siguiente subcapítulo, se analizará el componente fundamental de las subestaciones de tracción, el convertidor AC/DC.

3.2. CONVERTIDOR AC/DC PARA SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN

El convertidor AC/DC ha utilizarse en las subestaciones de tracción, será un rectificador que permita cambiar la corriente alterna suministrada por el EEQ en la corriente continua necesaria para alimentar a la Línea Aérea de Contacto, es decir, en corriente continua de 750[V], con la intensidad de corriente suficiente para garantizar la operación del sistema, acorde a los valores determinados en el Capítulo 2.

Al ser invariable en el tiempo el valor del voltaje de alimentación a la línea de contacto, no existe la necesidad de variar el voltaje de salida del rectificador, por lo que un rectificador NO controlado será suficiente para esta aplicación.

Por otra parte, considerando el valor del voltaje de alimentación que proporcionará la EEQ, 6,300[V] ó 23,000[V], se hace necesario la utilización de un transformador que permita la reducción del voltaje de suministro a un valor tal que

permita, luego del proceso de rectificación, el valor de voltaje requerido en el lado de corriente continua.

La carga a la que alimentará el rectificador será el equipo de tracción de los vehículos trolebuses, que se compone básicamente de un convertidos DC/AC y un motor trifásico de inducción; esto hace que la carga del rectificador sea no lineal y fuertemente inductiva. Esta condición requiere que se tenga especial cuidado con el contenido armónico de la corriente en el lado de alterna del rectificador. Por lo expuesto, el rectificador a utilizarse será un rectificador de 12 pulsos, con lo que se disminuye la distorsión armónica de la corriente que consume el rectificador (que consume la subestación).

Para configurar el rectificador no controlado de 12 pulsos, se utilizará dos rectificadores de 6 pulsos, cuyos voltajes de alimentación, en el lado de alterna, tengan un desfase de $\omega t = 30^\circ$. Esta condición se logra a través de la adecuada conexión de un transformador que disponga de dos secundarios, el uno en conexión en estrella y el otro en conexión en delta, con un desfase de 30° entre los dos secundarios.

Un transformador con un grupo de conexión Yy0d11, como el que se indica en la Figura 3.3a., garantiza la característica requerida. Las formas de onda en los secundarios del transformador se indican en la Figura 3.3b.

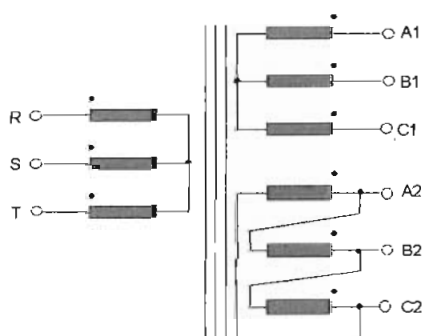


Figura 3.3a.

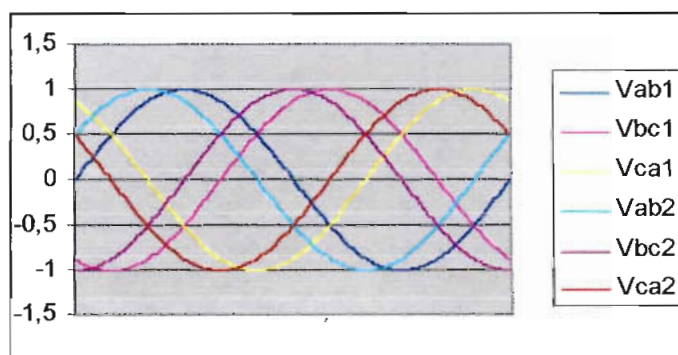


Figura 3.3b.

Figura 3.3a. Grupo transformador con conexión Yy0d11
Figura 3.3b. Formas de onda de voltaje en el secundario

Una condición importante a considerarse es que la magnitud de los voltajes de los dos secundarios deben ser exactamente iguales, pues ambos alimentarán a un rectificador que aportará con parte del voltaje de salida, único, de la subestación. Para cumplir esta condición, el número de espiras de los bobinados de la conexión delta, deberá ser, $\sqrt{3}$ veces el número de espiras de los bobinados de la conexión en estrella.

$$n_{delta} = (\sqrt{3}) * n_{estrella}$$

Los dos rectificadores de 6 pulsos cada uno, pueden conectarse en serie o en paralelo, dando como resultado el rectificador de 12 pulsos requerido. A continuación se analizará cada una de estas conexiones, para luego seleccionar la más indicada para aplicarla en las subestaciones de tracción.

3.2.1. CONEXIÓN EN SERIE DE DOS RECTIFICADORES DE 6 PULSOS

En esta conexión, cuyo circuito se grafica en la Figura 3.4., el voltaje de salida de rectificador de 12 pulsos es la suma de los voltajes de salida de cada uno de los rectificadores de 6 pulsos

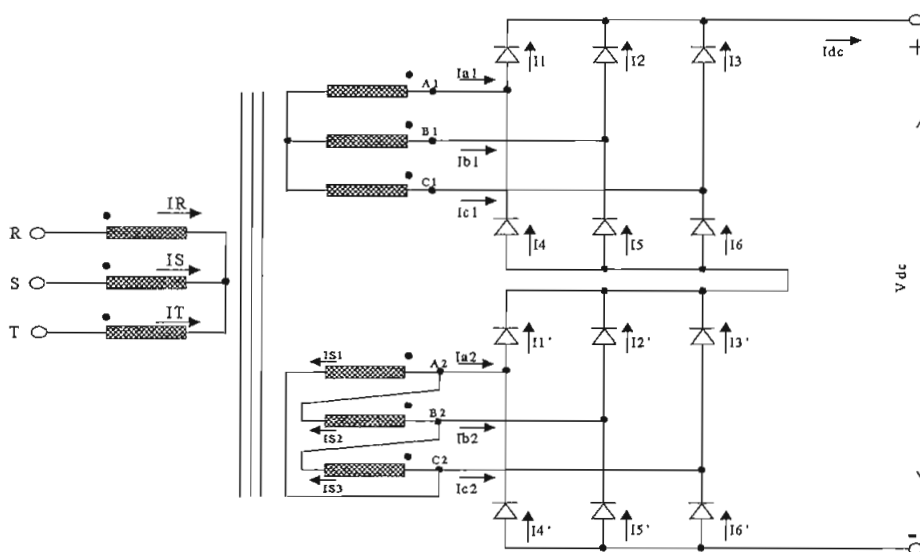


Figura 3.4. Rectificador de 12 pulsos formado por conexión serie de dos rectificadores de 6 pulsos

Para el circuito de la Figura 3.4. se cumplen las siguientes ecuaciones para las corrientes en cada una de las ramas:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{a1} + I_4 & I_1' &= I_{a2} + I_4' \\ I_2 &= I_{b1} + I_5 & I_2' &= I_{b2} + I_5' \\ I_3 &= I_{c1} + I_6 & I_3' &= I_{c2} + I_6' \end{aligned}$$

De estas ecuaciones se tiene entonces que:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= I_1 - I_4 & I_{a2} &= I_1' - I_4' \\ I_{b1} &= I_2 - I_5 & I_{b2} &= I_2' - I_5' \\ I_{c1} &= I_3 - I_6 & I_{c2} &= I_3' - I_6' \end{aligned}$$

La corriente en cada diodo (I_1, I_2, \dots, I_6 ; y I_1', I_2', \dots, I_6') se establece en función de los ángulos de conducción de cada uno de estos, como se observa en la Figura 3.5.

Analizando las corrientes en los nodos, en el interior de la delta del transformador, y la condición de sistema trifásico equilibrado, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} I_{S1} &= I_{S3} + I_{c2} \\ I_{S2} &= I_{S1} + I_{a2} \\ I_{S3} &= I_{S2} + I_{b2} \\ I_{S1} + I_{S2} + I_{S3} &= 0 \\ I_{a2} + I_{b2} + I_{c2} &= 0 \end{aligned}$$

Al resolver este sistema de ecuaciones tenemos los siguientes resultados que se grafican en la Figura 3.5.

$$\begin{aligned} I_{S1} &= \left(\frac{1}{3}\right) * (I_{b2} + 2 * I_{c2}) \\ I_{S2} &= \left(\frac{1}{3}\right) * (I_{c2} + 2 * I_{a2}) \\ I_{S3} &= \left(\frac{1}{3}\right) * (I_{b2} - I_{c2}) \end{aligned}$$

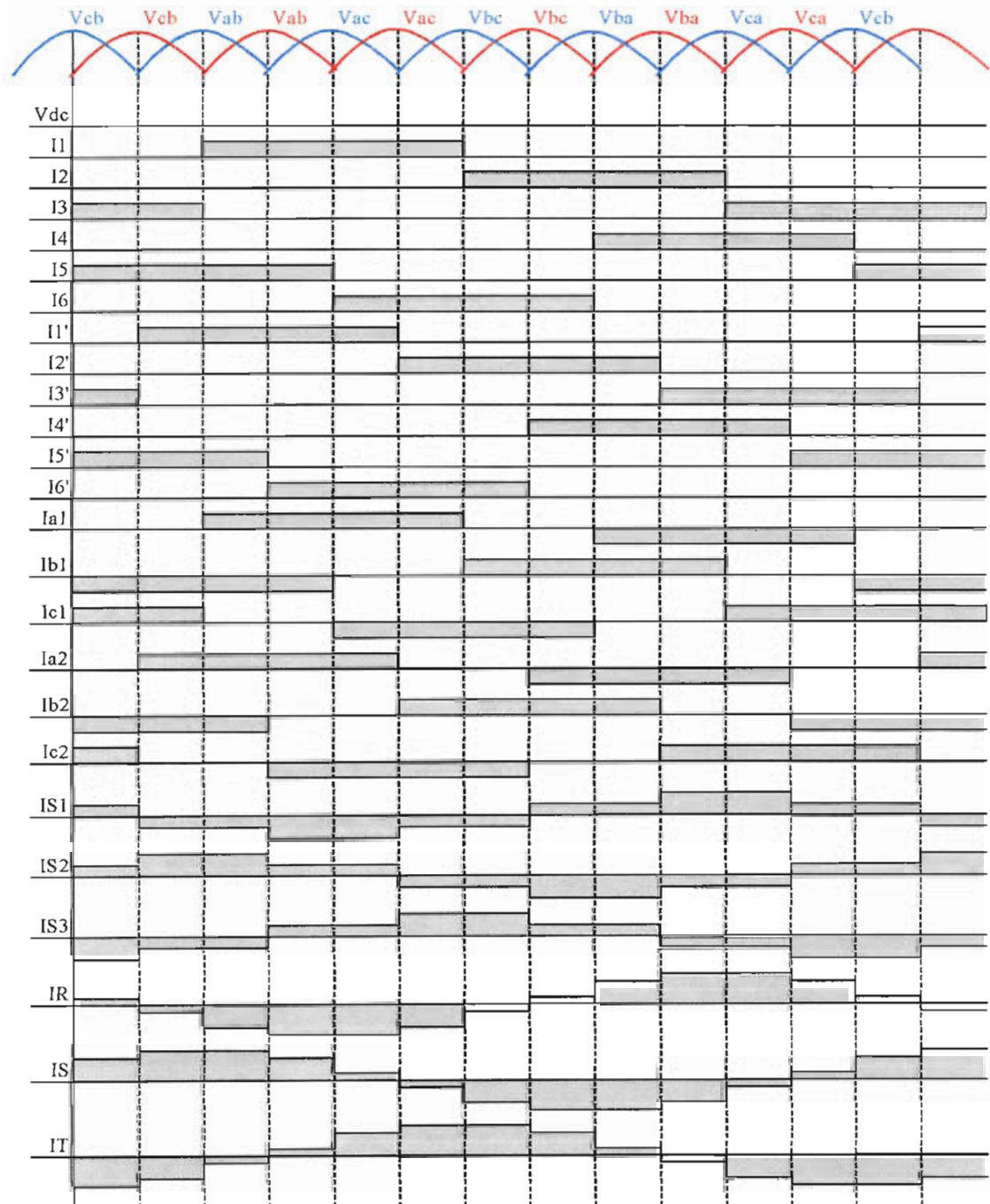


Figura 3.5. Formas de onda de corriente para el rectificador de 12 pulsos formado por conexión serie de dos rectificadores de 6 pulsos.

Como se indicó, para que el voltaje de los secundarios sea igual, debe cumplirse que $n_{\text{delta}} = (\sqrt{3}) * n_{\text{estrella}}$, por lo que las corrientes que se inducen en los bobinados del primario debido a las que circulan en los bobinados del secundario en delta son:

$$IS1_{\text{primario}} = \left(\frac{\sqrt{3}}{n_{\text{estrella}}} \right) * \left[\left(\frac{1}{3} \right) * (Ib2 + 2 * Ic2) \right]$$

$$IS2_{\text{primario}} = \left(\frac{\sqrt{3}}{n_{\text{estrella}}} \right) * \left[\left(\frac{1}{3} \right) * (Ic2 + 2 * Ia2) \right]$$

$$IS3_{\text{primario}} = \left(\frac{\sqrt{3}}{n_{\text{estrella}}} \right) * \left[\left(\frac{1}{3} \right) * (Ib2 - Ic2) \right]$$

Mientras que las que se inducen debido a las que circulan por los bobinados del secundario en estrella, que se grafican en la Figura 3.5., son:

$$Ia1_{\text{primario}} = \left(\frac{1}{n_{\text{estrella}}} \right) * Ia1$$

$$Ib1_{\text{primario}} = \left(\frac{1}{n_{\text{estrella}}} \right) * Ib1$$

$$Ic1_{\text{primario}} = \left(\frac{1}{n_{\text{estrella}}} \right) * Ic1$$

Las corrientes en el primario del transformador serán entonces:

$$IR = IS1_{\text{primario}} - Ia1_{\text{primario}} = \left(\frac{1}{n_{\text{estrella}}} \right) * \left\{ \left[\left(\frac{\sqrt{3}}{3} \right) * (Ib2 + 2 * Ic2) \right] - Ia1 \right\}$$

$$IS = IS2_{\text{primario}} - Ib1_{\text{primario}} = \left(\frac{1}{n_{\text{estrella}}} \right) * \left\{ \left[\left(\frac{\sqrt{3}}{3} \right) * (Ic2 + 2 * Ia2) \right] - Ib1 \right\}$$

$$IT = (-1) * (IR + IS)$$

3.2.1.1. Análisis de voltajes

El voltaje de salida del rectificador de 12 pulsos formado por una conexión serie de dos rectificadores de 6 pulsos, es la suma de los voltajes de salida de cada rectificador de 6 pulsos, como se indica en la Figura 3.6.

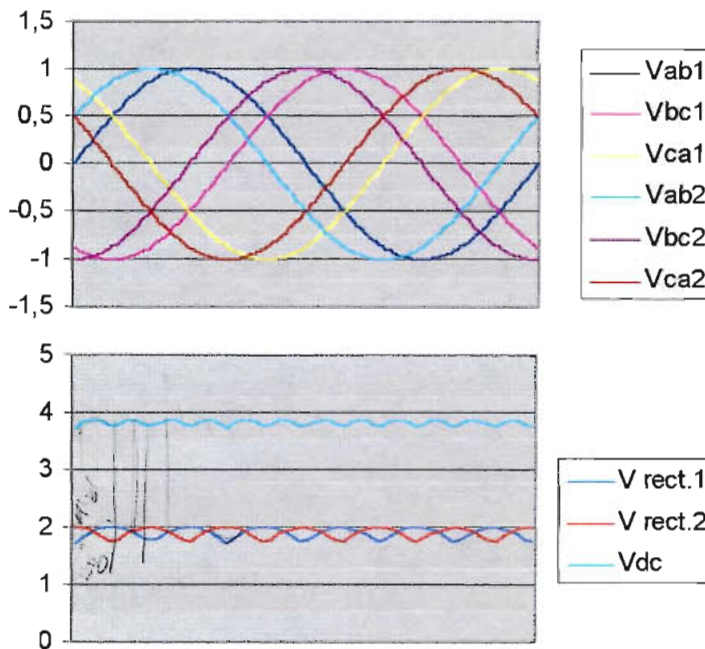


Figura 3.6. Formas de onda del voltaje Vdc para el rectificador de 12 pulsos formado por conexión serie de dos rectificadores de 6 pulsos.

El voltaje medio para un rectificador no controlado de q pulsos, está dado por la siguiente relación^[3.2]

$$V_{dc} = \left(\frac{\sqrt{2} * V_s * q}{\pi} \right) * \text{sen} \left(\frac{\pi}{q} \right) \quad (3.1)$$

Para la configuración que se analiza, conexión en serie de dos rectificadores de 6 pulsos, se tiene:

$$V_{dc} = V_{rect.1} + V_{rect.2} \quad (3.2)$$

Pero, el valor medio de los rectificadores de 6 pulsos es, aplicando la ecuación (3.1):

^[3.2] Mamad Harunur Rashid; "Power Electronics"; Ecuación (2-69); pág. 38; Prentice Hall, Inc; 1988; New Jersey

$$V_{rect.1} = V_{rect.2} = V_S * \left(\frac{6 * \sqrt{2}}{\pi} \right) * \text{sen} \left(\frac{\pi}{6} \right)$$

$$V_{rect.1} = V_{rect.2} = 1.35 * V_S$$

Aplicando la ecuación (3.2) se tiene:

$$V_{dc} = 2.7 * V_S$$

En conclusión, el voltaje de los secundarios del transformador, para la configuración que se está analizando, es:

$$V_S = \frac{V_{dc}}{2.7}$$

Para el voltaje nominal de salida de las subestaciones de tracción, de 750[V], el voltaje de los secundarios del transformador debería ser:

$$V_S = \frac{750[V]}{2.7}$$

$$V_S = 277.7[V]$$

Hasta ahora no se ha considerado el efecto de la reactancia presente a la entrada del rectificador, L_s , que representa el efecto inductivo de la instalación entre la subestación de distribución de la EEQ y la subestación de tracción. El efecto de esta reactancia es generar una disminución del voltaje medio a la salida del rectificador debido al ángulo de traslape entre la conducción y el bloqueo de los diodos que forman el rectificador. La Figura 3.7. esquematiza el origen y consecuencia de la reactancia presente a la entrada del rectificador.

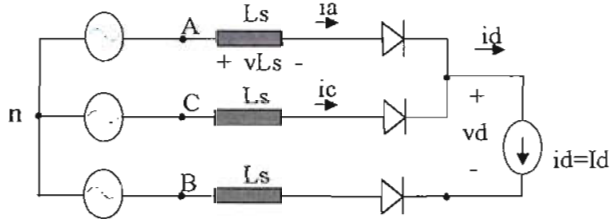


Figura 3.7^a. Reactancia L_s a la entrada del rectificador

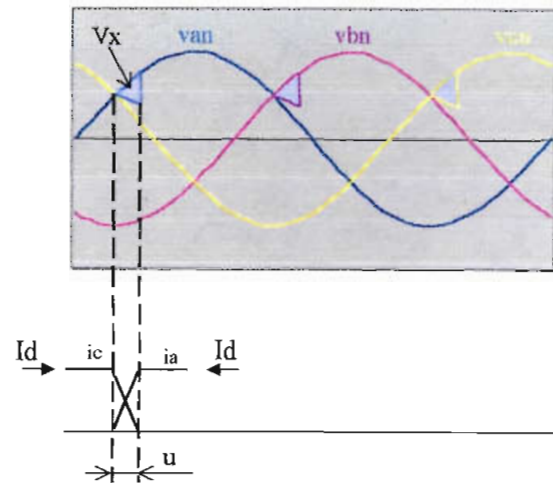


Figura 3.7^b. Disminución del voltaje de salida debido a L_s

El valor del voltaje de corriente continua que disminuye a la salida del convertidor, debido a la presencia de la reactancia de L_s , está dado por la siguiente ecuación^[3.3]:

$$V_x = 6 * f * L_s * Idc \quad (3.3)$$

Para estimar el valor de L_s , se considerará las instalaciones existentes del trolebús, analizando las mediciones realizadas en las subestaciones de tracción San Blas y El Ejido, el día miércoles 25 de abril del 2001, entre las 12h00 y 14h00. En el Anexo 3.1. se presenta la tabla de las mediciones realizadas.

La Figura 3.8. grafica el voltaje V_{dc} y la corriente I_{dc} de salida de cada subestación, el objetivo es conocer la disminución del voltaje de salida para una condición específica de corriente. Para esto, los datos se han ordenado, en función del voltaje de salida V_{dc} , de forma ascendente, como se observa en la Figura 3.8.

[3.3] Mamad Harunur Rashid; "Power Electronics"; Ecuación (2-99); pág. 49; Prentice Hall, Inc; 1988; New Jersey

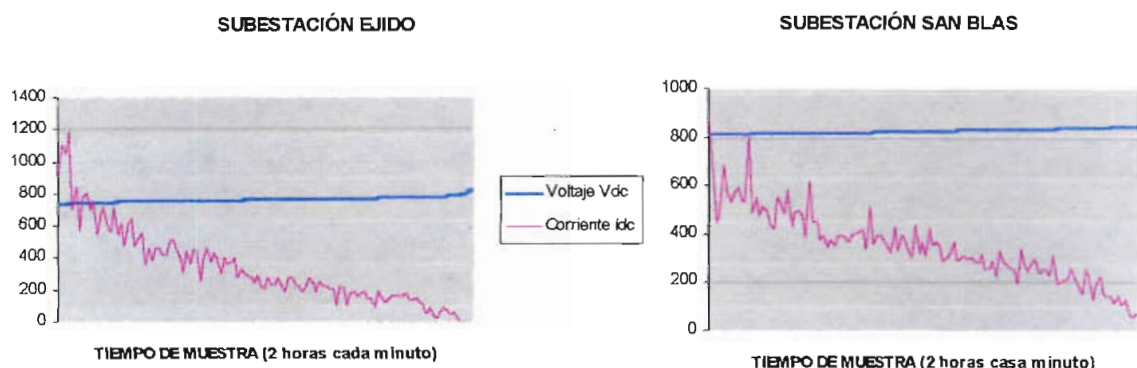


Figura 3.8. Registro de voltajes y corrientes de salida de dos subestaciones de tracción del Sistema Trolebús.

Para la subestación El Ejido, el valor máximo de voltaje de salida es de 819[V] y corresponde a una corriente de 0[A], mientras que el valor mínimo del voltaje de salida es de 737[V], correspondiente a una corriente de 1,109[A]; lo que quiere decir que se tiene una disminución de voltaje de 82[V] con una corriente de carga de 1,109[A].

Por su parte, en la subestación San Blas, el valor máximo de voltaje de salida es de 850[V] correspondiente a una corriente de 72[A], mientras que el valor mínimo del voltaje de salida es de 808[V], correspondiente a una corriente de 863[A]; se tiene entonces una disminución de voltaje de 42[V] con una variación de la corriente de carga de 791[A].

Aplicando la ecuación (3.3) se establece los valores para la inductancia L_s , de la siguiente forma:

Para la Subestación El Ejido:

$$L_s = \frac{82}{6 * 60 * 1,109} = 0,2[mH]$$

Para la Subestación San Blas:

$$L_s = \frac{42}{6 * 60 * 791} = 0,147[mH]$$

Con estos datos correspondientes al sistema trolebús en funcionamiento, se estima, bajo la condición menos favorable, que el valor de L_s para las subestaciones de la Extensión Norte, sea, $L_s=0,2[\text{mH}]$

La máxima corriente que entregarán las subestaciones de la Extensión Norte del Trolebús, según lo calculado en el numeral 2.2.5.5., del capítulo 2, es de $1,675[\text{A}]$, por lo que el voltaje que se pierde debido a la presencia de L_s , aplicando la ecuación (3.3), será:

$$V_x = 6 * 60 * (0.2 * 10^{-3}) * 1,675$$

$$V_x = 120[\text{V}]$$

El voltaje en vacío del rectificador, para compensar esta pérdida, deberá ser:

$$V_{dc_0} = 750[\text{V}] + 120[\text{V}]$$

$$V_{dc_0} = 870[\text{V}]$$

El voltaje con el que deberá aportar cada rectificador de 6 pulsos, será:

$$V_{rect.1_0} = V_{rect.2_0} = \frac{870}{2} = 435[\text{V}]$$

por lo que, aplicando la ecuación (3.1), se determina que el voltaje de entrada en corriente alterna para cada rectificador de 6 pulsos, deberá ser:

$$V_s = \frac{435}{1.35} = 322,22[\text{V}]$$

El voltaje en los secundarios del transformador del rectificador de 12 pulsos, para la configuración de conexión en serie de dos rectificadores de 6 pulsos, deberá ser de $322[\text{V}]$.

3.2.1.2. Análisis de la corriente

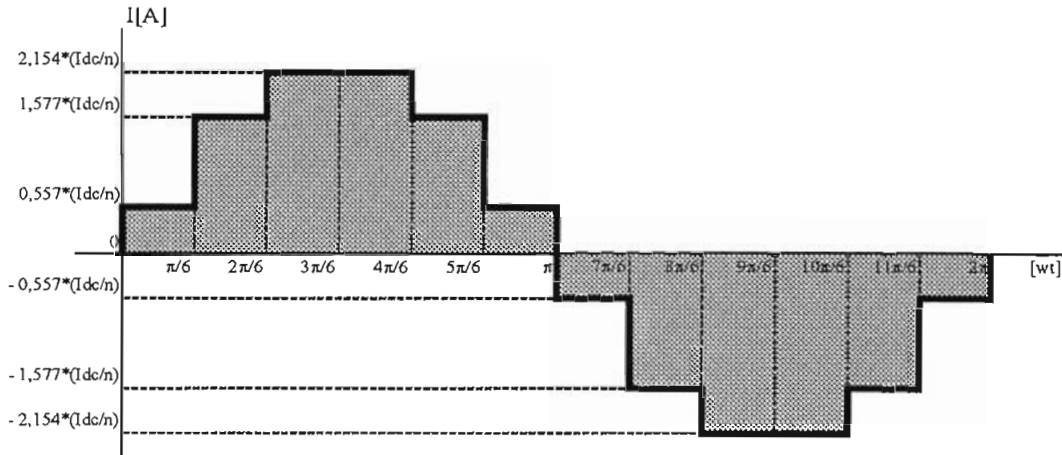


Figura 3.9. Forma de onda de la corriente a la entrada del rectificador de 12 pulsos formado por conexión serie de dos rectificadores de 6 pulsos.

En la Figura 3.9. se grafica la forma de onda de la corriente que genera el rectificador de 12 pulsos, formado por la conexión serie de dos rectificadores de 6 pulsos.

Para efectos del análisis se considerará una relación de transformación n . Los valores a obtenerse estarán en función de la corriente de carga I_{dc} del rectificador.

El valor RMS de la corriente a la entrada del convertidor I_s , en el primario del transformador, será^[3.4]:

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i(t))^2 dt} \quad (3.4)$$

$$I_s = \left(\frac{1}{n}\right) * 1,5769 * I_{dc}$$

[3.4] "Power Electronics"; Ned Mohan; Ecuación (3.15); pág. 31; John Wiley&Sons, Inc; 1989; USA

La descomposición en series de Fourier de la señal de corriente, al ser una función impar con valor medio igual a cero, será de la forma:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k * \text{sen}(k * \omega t)$$

Los coeficientes b_k se obtienen utilizando la siguiente ecuación^[3.5]:

$$b_k = \left(\frac{1}{\pi} \right) \int_0^{2\pi} f(t) * \text{sen}(k * \omega t) d(\omega t) \quad (3.5)$$

y para la forma de onda que se analiza, presentan los siguientes valores:

| | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| k | 1 | 11 | 13 | 23 | 25 | 35 | 37 | 47 | 49 | 59 | 61 |
| b_k | 2.2046 | 0.2004 | 0.1696 | 0.0959 | 0.0882 | 0.0630 | 0.0596 | 0.0469 | 0.0450 | 0.0374 | 0.0361 |

El valor RMS de la corriente a la entrada del convertidor I_s , también puede expresarse de la siguiente manera^[3.6]:

$$I_s = \sqrt{(I_{s1})^2 + \sum_{k=2}^{\infty} (I_{sk})^2}$$

Se define como el valor RMS de la componente de distorsión en la señal de corriente a la siguiente expresión^[3.7]:

$$I_{dis} = \sqrt{(I_s)^2 - (I_{s1})^2} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (I_{sk})^2} \quad (3.6)$$

donde:

^[3.5] “Teoría y Problemas de Circuitos Eléctricos”; Joseph A. Edminister; Ecuación (6); pág. 219; McGraw-Hill; 1965; Akron

^[3.6] “Power Electronics”; Ned Mohan; Ecuación (3.16); pág. 31; John Wiley & Sons, Inc; 1989; USA

^[3.7] “Power Electronics”; Ned Mohan; Ecuación (3.17); pág. 31; John Wiley & Sons, Inc; 1989; USA

$$I_{s1} = \frac{b_1}{\sqrt{2}}$$

Entonces, para la forma de onda que se analiza, se tiene:

$$I_{s1} = \left(\frac{1}{n}\right) * 1.5589 * Idc$$

$$I_{dis} = \left(\frac{1}{n}\right) * 0.23758 * Idc$$

La Distorsión Armónica Total THD, se define como^[3.8]:

$$\%THD = \left(\frac{I_{dis}}{I_{s1}}\right) * 100 \quad (3.7)$$

El THD para la forma de onda que se está analizando, será:

$$\%THD = 15.24\%$$

Más adelante, en el numeral 3.2.4.2. del presente capítulo, se analiza y contrasta los valores de THD obtenidos, con las normas que limitan este parámetro.

3.2.2. CONEXIÓN EN PARALELO DE DOS RECTIFICADORES DE 6 PULSOS

La Figura 3.10. indica el circuito de un rectificador de 12 pulsos formado por la conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos. En esta configuración cada uno de los rectificadores de 6 pulsos conduce mientras su voltaje de entrada sea mayor que el otro, es decir, conducen alternativamente cada 30° pues este es el desfase entre los voltajes de los dos secundarios del transformador.

^[3.8] "Power Electronics"; Ned Mohan; Ecuación .(3.18); pág. 31; John Wiley&Sons, Inc; 1989; USA

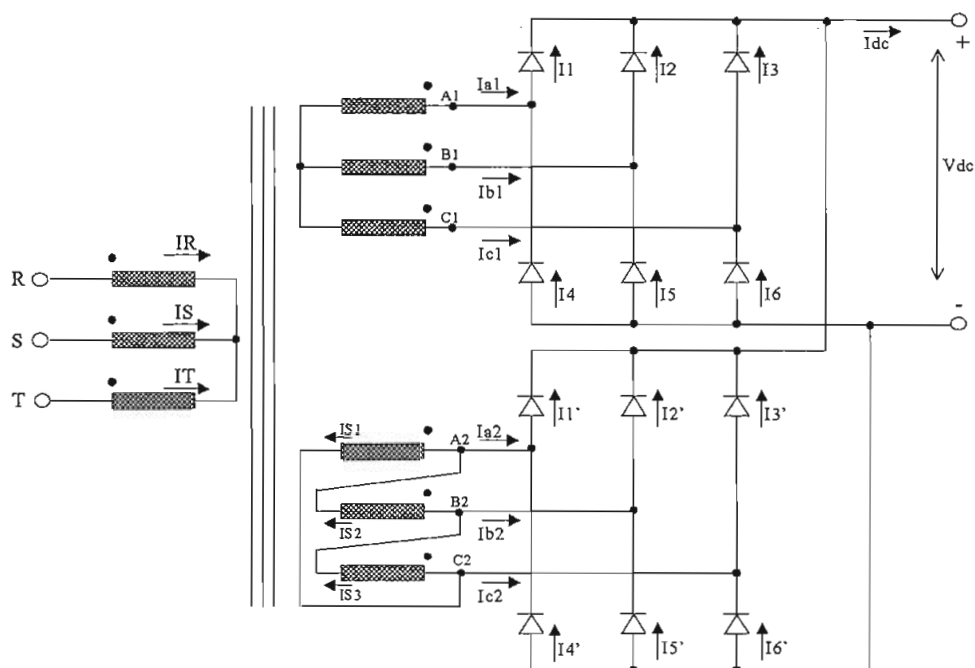


Figura 3.10. Rectificador de 12 pulsos formado por conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos

Al igual que para el circuito de la Figura 3.4. (conexión en serie de dos rectificadores de 6 pulsos), para el circuito de la Figura 3.10. (conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos) se cumplen las mismas ecuaciones para las corrientes que circulan por el circuito, además, para esta configuración también debe cumplirse que: $n_{\text{delta}} = (\sqrt{3}) * n_{\text{estrella}}$ para que los voltajes de los secundarios sean iguales; por lo tanto para el circuito de la Figura 3.10. se cumplen las mismas relaciones que se establecieron para el circuito de la Figura 3.4., que son las siguientes:

Para las corrientes de entrada a cada rectificador de 6 pulsos:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= I_1 - I_4 & I_{a2} &= I_1' - I_4' \\ I_{b1} &= I_2 - I_5 & I_{b2} &= I_2' - I_5' \\ I_{c1} &= I_3 - I_6 & I_{c2} &= I_3' - I_6' \end{aligned}$$

Para las corrientes que circulan por el secundario en delta:

$$IS1 = \left(\frac{1}{3}\right) * (Ib2 + 2 * Ic2)$$

$$IS2 = \left(\frac{1}{3}\right) * (Ic2 + 2 * Ia2)$$

$$IS3 = \left(\frac{1}{3}\right) * (Ib2 - Ic2)$$

Para las corrientes que se inducen en los bobinados del primario del transformador, debido a las corrientes que circulan en el secundario en delta:

$$IS1_{primario} = \left(\frac{\sqrt{3}}{n_{estrella}}\right) * \left[\left(\frac{1}{3}\right) * (Ib2 + 2 * Ic2)\right]$$

$$IS2_{primario} = \left(\frac{\sqrt{3}}{n_{estrella}}\right) * \left[\left(\frac{1}{3}\right) * (Ic2 + 2 * Ia2)\right]$$

$$IS3_{primario} = \left(\frac{\sqrt{3}}{n_{estrella}}\right) * \left[\left(\frac{1}{3}\right) * (Ib2 - Ic2)\right]$$

Para las corrientes que se inducen en los bobinados del primario del transformador, debido a las corrientes que circulan en el secundario en estrella:

$$Ia1_{primario} = \left(\frac{1}{n_{estrella}}\right) * Ia1$$

$$Ib1_{primario} = \left(\frac{1}{n_{estrella}}\right) * Ib1$$

$$Ic1_{primario} = \left(\frac{1}{n_{estrella}}\right) * Ic1$$

Finalmente, para las corrientes que circulan por el primario del transformador:

$$IR = IS1_{primario} - Ia1_{primario} = \left(\frac{1}{n_{estrella}}\right) * \left\{ \left[\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right) * (Ib2 + 2 * Ic2)\right] - Ia1 \right\}$$

$$IS = IS2_{\text{primario}} - Ib1_{\text{Pr imario}} = \left(\frac{1}{n_{\text{estrella}}} \right) * \left\{ \left[\left(\frac{\sqrt{3}}{3} \right) * (Ic2 + 2 * Ia2) \right] - Ib1 \right\}$$

$$IT = (-1) * (IR + IS)$$

Las corrientes que circulan por cada diodo ($I1, I2, \dots, I6$; y $I1', I2', \dots, I6'$) corresponden al ángulo de conducción de cada uno de ellos, mismo que está dado para los intervalos de tiempo en que los voltajes de entrada a cada rectificador de 6 pulsos, es mayor que el de entrada del otro rectificador de 6 pulsos, es decir, 30° , como se observa en la Figura 3.11. que grafica las formas de onda de la corriente en cada rama del circuito de la Figura 3.10.

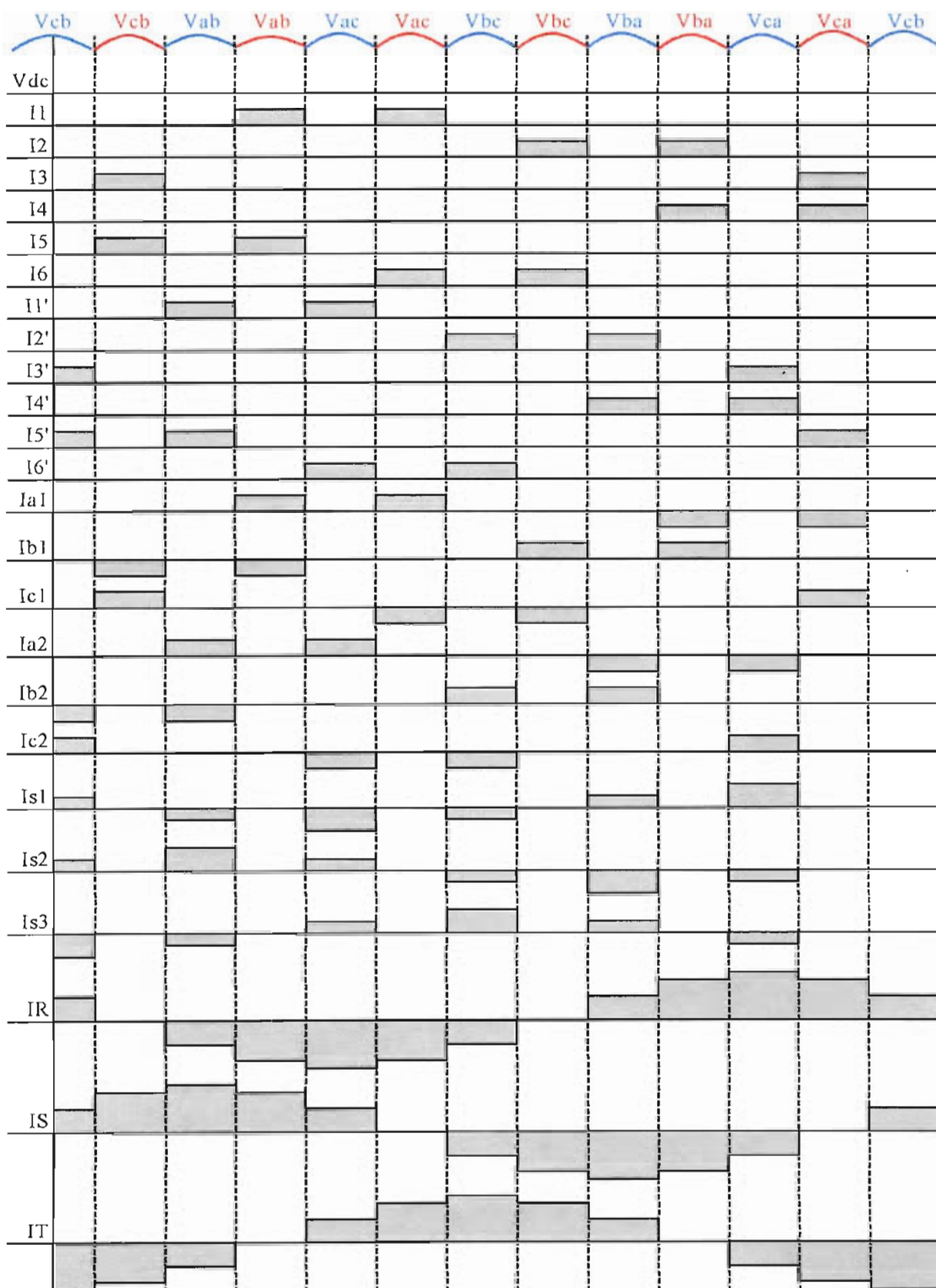


Figura 3.11. Formas de onda de corriente para el rectificador de 12 pulsos formado por conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos.

3.2.2.1. Análisis de voltajes

Para la configuración de rectificador de 12 pulsos formado por la conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos, que se está analizando, el voltaje de salida está formado por el aporte en cada intervalo de 30° por el voltaje de salida de cada rectificador de 6 pulsos, a diferencia de la conexión serie, en ésta el voltaje de salida total no es la suma de los dos voltajes de salida de cada rectificador de 6 pulsos. La Figura 3.12. explica esta situación.

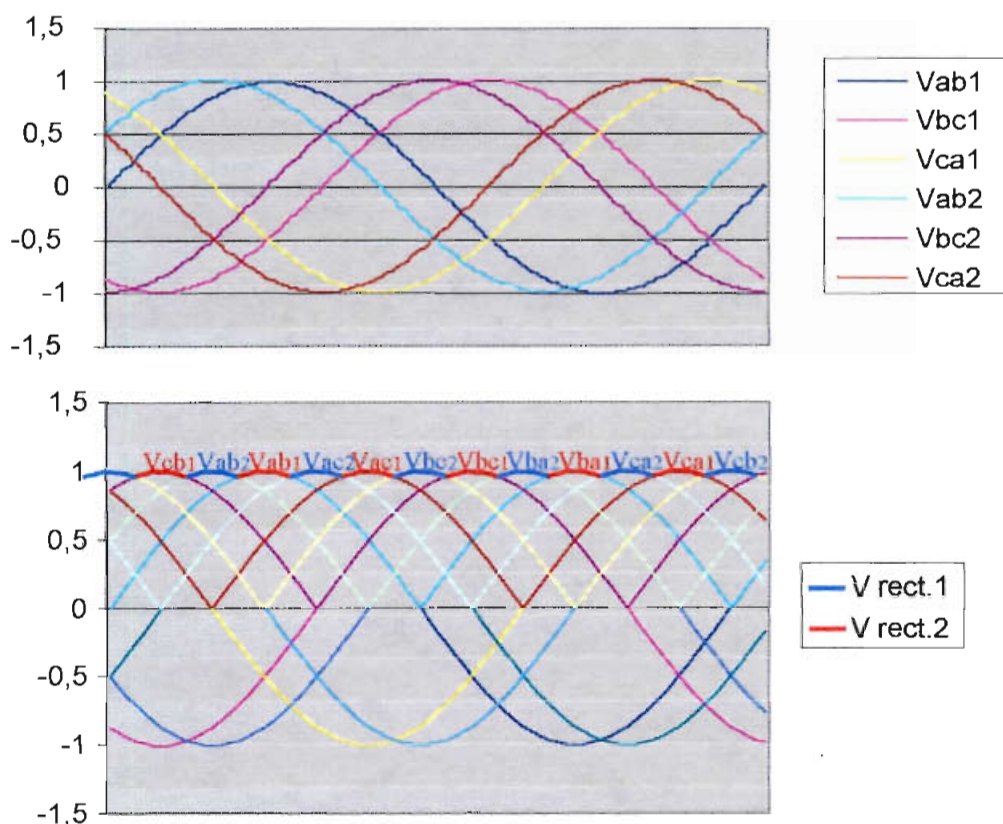


Figura 3.12. Formas de onda del voltaje Vdc para el rectificador de 12 pulsos formado por conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos.

Aplicando la ecuación (3.1), se tiene que el voltaje de salida para el convertidor de 12 pulsos, $q=12$, en conexión en paralelo es:

$$V_{dc} = \left(\frac{\sqrt{2} * V_s * 12}{\pi} \right) * \text{sen} \left(\frac{\pi}{12} \right)$$

$$V_{dc} = 1.3981 * V_s$$

En conclusión, el voltaje de los secundarios del transformador, para la configuración que se está analizando, es:

$$V_s = \frac{V_{dc}}{1.3981}$$

Para el voltaje nominal de salida de las subestaciones de tracción, de 750[V], el voltaje de los secundarios del transformador debería ser:

$$V_s = \frac{750[V]}{1.3981}$$

$$V_s = 536.44[V]$$

Tomando en cuenta la consecuencia de la reactancia L_s , presente a la entrada del rectificador, se tiene que, considerando una reactancia dada por una inductancia $L_s = 0.2[mH]$, igual a la considerada en el análisis del circuit o con conexión serie de la Figura 3.4.; y una corriente máxima de carga $I_{dc} = 1,675[A]$, la disminución del voltaje de salida será, aplicando la ecuación (3.3), la siguiente:

$$V_x = 6 * 60 * (0.2 * 10^{-3}) * 1,675$$

$$V_x = 120[V]$$

El voltaje en vacío del rectificador, para compensar esta pérdida, deberá ser:

$$V_{dc_0} = 750[V] + 120[V]$$

$$V_{dc_0} = 870[V]$$

por lo que, aplicando la ecuación (3.1), se determina que el voltaje de entrada en corriente alterna para cada rectificador, deberá ser:

$$V_s = \frac{870}{1.3981} = 622,27[V]$$

El voltaje en los secundarios del transformador del rectificador de 12 pulsos, para la configuración de conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos, deberá ser de 622[V].

3.2.2.2. Análisis de la corriente

En la Figura 3.13. se grafica la forma de onda de la corriente que genera el rectificador de 12 pulsos, formado por la conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos.

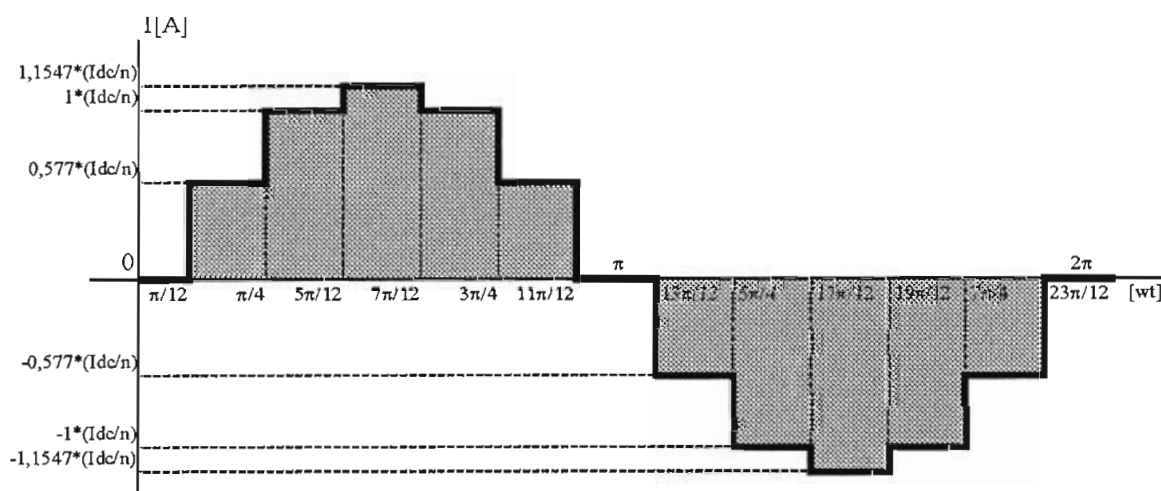


Figura 3.13. Forma de onda de la corriente a la entrada del rectificador de 12 pulsos formado por conexión paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos.

Para efectos del análisis se considerará una relación de transformación n . Los valores a obtenerse estarán en función de la corriente de carga I_{dc} del rectificador.

El valor RMS de la corriente a la entrada del convertidor I_s , en el primario del transformador, aplicando la ecuación (3.4), será:

$$I_s = \left(\frac{1}{n}\right) * 0.8165 * I_{dc}$$

La descomposición en series de Fourier de la señal de corriente, al ser una función impar con valor medio igual a cero, será de la forma:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k * \text{sen}(k * \omega t)$$

Los coeficientes b_k se obtienen, utilizando la ecuación (3.5), y son los siguientes:

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| k | 1 | 11 | 13 | 23 | 25 | 35 | 37 | 47 | 49 | 59 | 61 |
| b_k | 1.141 | -0.104 | -0.088 | 0.050 | 0.046 | -0.033 | -0.031 | 0.024 | 0.023 | -0.019 | -0.019 |

El valor RMS de la componente de distorsión en la señal de corriente, aplicando la ecuación (3.6), será:

$$I_{s1} = \left(\frac{1}{n}\right) * 0.807 * I_{dc}$$

$$I_{dis} = \left(\frac{1}{n}\right) * 0.1236 * I_{dc}$$

La Distorsión Armónica Total THD, calculada según la ecuación (3.7), será:

$$\%THD = 15.31\%$$

Más adelante, en el numeral 3.2.4.2. del presente capítulo, se analiza y contrasta los valores de THD obtenidos, con las normas que limitan este parámetro.

3.2.3. SELECCIÓN DE LA CONEXIÓN A UTILIZARSE EN LAS SUBESTACIONES DE TRACCIÓN

Si bien las dos alternativas analizadas, conexión en serie y conexión en paralelo, cumplen con lo requerido para ser utilizadas en las subestaciones de tracción, en términos de funcionar como un rectificador no controlado de 12 pulsos que permite a su salida disponer del voltaje requerido para el sistema, se debe considerar las diferencias fundamentales de cada conexión, para en función de ello recomendar la más adecuada.

La diferencia principal y determinante entre las dos conexiones analizadas es el tiempo de conducción de los diodos, según se observa en las formas de onda de cada alternativa (Figuras 3.5. y 3.11), como se explica a continuación:

Para la conexión en serie, cada diodo conduce durante un ángulo $\omega t = 120^\circ$ para cada ciclo. Para la conexión en paralelo, cada diodo conduce durante un ángulo $\omega t = 30^\circ$, luego se bloquea para los siguientes 30° , y vuelve a conducir en los subsiguientes 30° ; es decir, conduce durante 60° por cada ciclo, como se observa en la Figura 3.14.

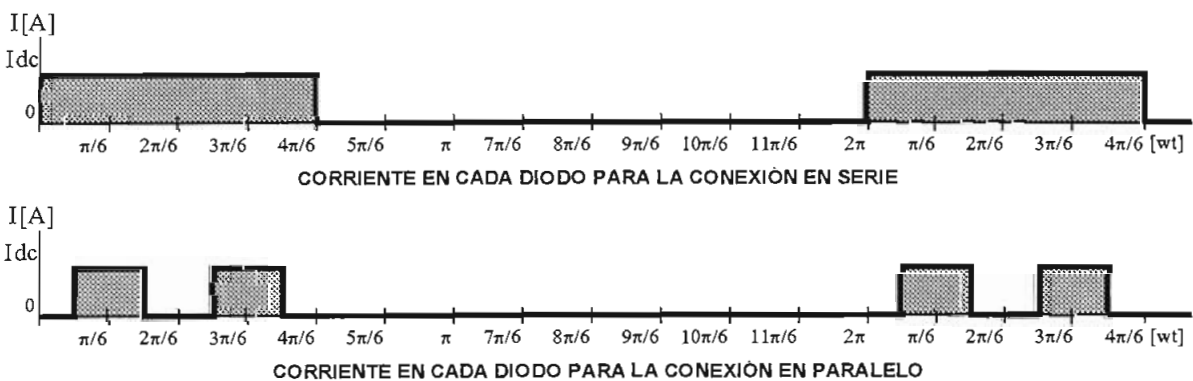


Figura 3.14. Corrientes en los diodos para las conexiones serie y paralelo.

Lo expuesto implica que en la conexión serie, los diodos conducen, en un ciclo, el doble del tiempo que en la conexión en paralelo, por lo que, en la conexión serie por cada módulo rectificador de 6 pulsos circula la corriente de carga del rectificador, mientras que en la conexión en paralelo la corriente de carga es la

suma de las corrientes de cada módulo rectificador de 6 pulsos. Esta situación es por demás conocida al aplicar el criterio general para la conexión de fuentes que se esquematiza en la Figura 3.15.

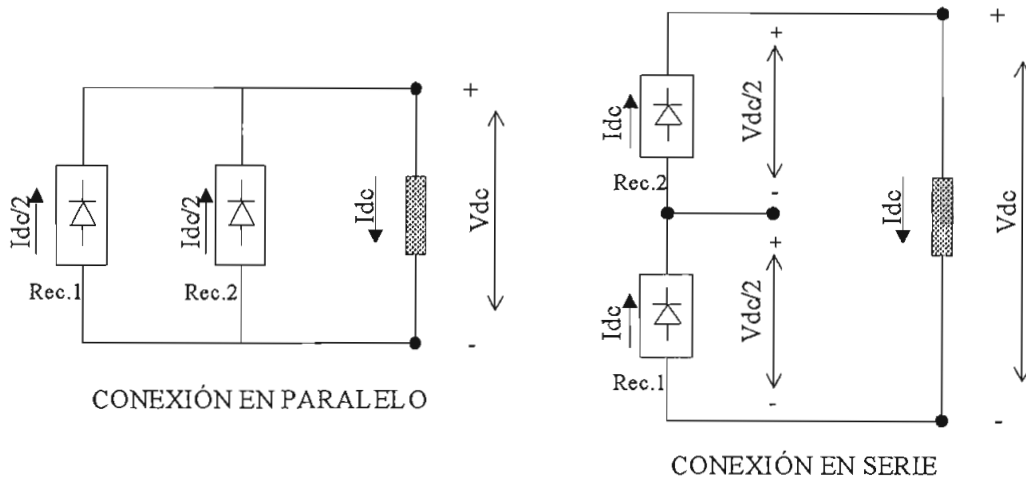


Figura 3.15. Circulación de corrientes en las conexiones serie y paralelo de rectificadores de 6 pulsos para formar un rectificador de 12 pulsos

En las condiciones de máxima carga, el rectificador para las subestaciones de tracción, según lo determinado en el Capítulo 2, numeral 2.2.5.5., requiere de una potencia nominal $P=1,450[kW]$, lo que equivale a una corriente nominal $I_{dc}=1,933[A]$, mientras que su voltaje nominal de salida es $V_{dc}=750[V]$. Los elementos semiconductores, diodos, que conformen el rectificador deberán ser capaces de soportar estas condiciones de carga.

Las condiciones nominales de carga son más exigentes para la corriente que para el voltaje desde el punto de vista de los diodos, pues en el mercado es más fácil encontrar diodos para una tensión inversa de bloqueo superior a $2,000[V]$, que diodos para una circulación de corriente similar a la requerida ($1,933[A]$).

Por lo expuesto en el párrafo anterior, se recomienda que la conexión en paralelo sea utilizada, pues en ésta, como ya se ha dicho, cada rectificador de 6 pulsos aporta con el 50% de la corriente de salida del rectificador de 12 pulsos, haciendo de esta forma que la corriente que circula por los diodos sea menor que en la configuración serie.

3.2.4. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS PARA EL RECTIFICADOR SELECCIONADO

A continuación se analizará el comportamiento armónico del rectificador seleccionado y su influencia tanto en el sistema de distribución de la EEQ, como en la alimentación a la línea aérea de contacto; para ello se analizará la influencia de los armónicos de voltaje en el lado de continua y de los armónicos de corriente en el lado de alterna del rectificador.

3.2.4.1. Armónicos de voltaje a la salida del convertidor

Las componentes de armónicos en el voltaje de salida del rectificador, son de orden^[3.9]:

$$h = k * q$$

$$\text{donde: } k = 1, 2, 3, 4, \dots \\ q = \text{número de pulsos del rectificador}$$

y tienen un valor eficaz dado por:

$$V_h = \left(\frac{\sqrt{2}}{h^2 - 1} \right) * V_{do}$$

Para el rectificador de 12 pulsos, las componentes armónicas del voltaje de salida, más representativas, serán las de orden 12 y 24, con los siguientes valores eficaces:

$$V_{12} = \left(\frac{\sqrt{2}}{12^2 - 1} \right) * 750 = 7.42[V]$$

$$V_{24} = \left(\frac{\sqrt{2}}{24^2 - 1} \right) * 750 = 1.84[V]$$

Las frecuencias de cada componente armónica, son:

^[3.9] Tesis de Grado de la E.P.N “Estudio Técnico de las subestaciones de tracción del Sistema Trolebús del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito”; Marco Valencia Degado; Ecuación (3.7); Pág.65; Octubre de 1998; Quito Ecuador

$$f_{12} = 12 * f_0 = 12 * 60 = 720[\text{Hz}]$$

$$f_{24} = 24 * f_0 = 24 * 60 = 1,440[\text{Hz}]$$

A la salida del rectificador se deberá instalar un filtro para las componentes armónicas de voltaje de orden 12 y 24; así como también una bobina para el aplanamiento de la corriente de salida I_{dc} .

Si se asume un valor para la bobina de aplanamiento de la corriente, así como el valor para los capacitores de los filtros para las componentes armónicas de voltaje de orden 12 y 24, se podrá entonces calcular el valor de las inductancias de los filtros. La Figura 3.16. indica el circuito con los filtros de armónicos y la bobina de aplanamiento de la corriente ha instalarse a la salida del rectificador.

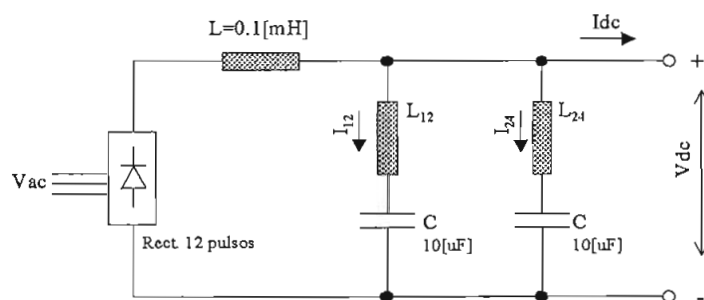


Figura 3.16. Filtros a la salida del rectificador

Para la condición de resonancia a la frecuencia de interés, se tiene:

$$X_L = X_C$$

$$2 * \pi * f_h * L_h = \frac{1}{2 * \pi * f_h * C}$$

$$L_h = \frac{1}{(2 * \pi * f_0)^2 * C}$$

Se asume un valor de capacitor que exista en el mercado y se calcula el valor de las correspondientes inductancias para los filtros. Por ejemplo si $C=10[\mu F]$, las inductancias serán:

$$L_{12} = 4.88[mH]$$

$$L_{24} = 1.22[mH]$$

Para la frecuencia de resonancia la impedancia del filtro es cero ($Z=0$), por lo que la corriente que circula a través del filtro es la que genera el voltaje del armónico h a través de la impedancia de la bobina de aplanamiento, es decir:

$$I_h = \frac{V_h}{XL_h}$$

$$I_h = \frac{V_h}{2 * \pi * f_h * L}$$

Por tanto, por cada rama del filtro circularán las siguientes corrientes:

$$I_{12} = \frac{V_{12}}{2 * \pi * f_{12} * L} = \frac{7.42}{2 * \pi * 720 * 0.0001} = 16.4[A]$$

$$I_{24} = \frac{V_{24}}{2 * \pi * f_{24} * L} = \frac{1.84}{2 * \pi * 1,440 * 0.0001} = 2.04[A]$$

En conclusión, para el tratamiento de los armónicos de voltaje a la salida del rectificador, se tiene:

- A su salida deberá contar con una bobina de aplanamiento para la corriente de $0.1[mH]$, por la que circulará la corriente nominal del rectificador, es decir, $1,933[A]$;
- Una rama de filtro LC para el armónico 12, que tendrá una bobina de $4.88[mH]$, un capacitor de $10[\mu F]$, y una capacidad de circulación de corriente de $16.4[A]$; y,

- Una rama de filtro LC para el armónico 24 , que tendrá una bobina de $1.22[mH]$, un capacitor de $10[\mu F]$, y una capacidad de circulación de corriente de $2.04[A]$.

3.2.4.2. Armónicos de corriente a la entrada del convertidor

El efecto de la distorsión armónica de la corriente que generan los convertidores AC/DC pueden afectar al sistema de distribución de la empresa suministradora y producir los siguientes efectos no deseados:

- Sobre calentamiento y aumento de pérdidas,
- Mayores esfuerzos sobre el aislamiento; y,
- Operación anormal o fallas de equipos,

de ahí la necesidad de analizar el efecto y consecuencias de la distorsión armónica de la corriente que se genera en los rectificadores.

Las normas para sistemas de distribución de la Empresa Eléctrica Quito, no hacen referencia a los armónicos ni de voltaje ni de corriente, por lo que en estas normas no se establecen valores límites. Ante la falta de normativa propia, la Empresa Eléctrica Quito y el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito han utilizado para el tema de los armónicos la norma internacional IEEE Std 519-1992, reconocida como una ANSI (American National Standard).

La citada norma reconoce la responsabilidad que tiene cada usuario de no degradar el voltaje de su suministro ante la demanda de corrientes no lineales y de esta forma no afectar al resto de consumidores. La norma establece límites para la distorsión armónica en el punto de acoplamiento común, que deben ser considerados para las cargas no lineales que se acoplen a éste, como es el caso de las subestaciones de tracción del Sistema Trolebús.

Los límites que fija la norma se indican en la Tabla 3.1. en la que en función de la relación entre la corriente de corto circuito en el punto de acoplamiento común y la máxima corriente de carga se definen los límites para cada componente armónica y para la Distorsión de Demanda Total (TDD).

| Máxima distorsión de corriente como porcentaje de I_s SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN | | | | | | |
|---|----------|---------------|---------------|---------------|----------|-----|
| I_{sc}/I_s | $h < 11$ | $11 < h < 17$ | $17 < h < 23$ | $23 < h < 35$ | $35 < h$ | TDD |
| <20 | 4 | 2 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5 |
| 20 – 50 | 7 | 3.5 | 2.5 | 1 | 0.5 | 8 |
| 50 – 100 | 10 | 4.5 | 4 | 1.5 | 0.7 | 12 |
| 100 – 1.000 | 12 | 5.5 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| >1.000 | 15 | 7 | 5 | 2.5 | 1.4 | 20 |

Tabla 3.1. Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución^[3.10]

Para esto se define:

- I_{sc}/I_s : Relación entre la corriente de corto circuito en el punto de acoplamiento común y la máxima corriente de carga.
- Distorsión de Demanda Total (TDD): valor RMS de la corriente armónica como porcentaje de la corriente de máxima demanda de la carga

$$TDD = \frac{I_h}{I_s} * 100\% = THD(I) * \frac{I_1}{I_s} \quad (3.8)$$

De acuerdo a lo establecido en el numeral 2.2.3. del Capítulo 2. y a la distribución de subestaciones de tracción indicada en el numeral 2.2.5.5. del mismo capítulo, las dos primeras subestaciones de tracción a instalarse, desde el sur hacia el norte, se alimentarán de la subestación N° 17 de la EEQ; mientras que las dos siguientes hacia el norte, se alimentarán de la subestación de distribución N° 19.

[3.10] Tesis de Grado de la E.P.N “Estudio Técnico de las subestaciones de tracción del Sistema Trolebús del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito”; Marco Valencia Delgado; Tabla (3.7); Pág.76; Octubre de 1998; Quito Ecuador

Por otra parte, para el análisis de armónicos se considerará las condiciones normales de operación del sistema, es decir, sin presencia de fallas, por lo que de acuerdo a lo establecido en el numeral 2.2.4.3.8. del Capítulo 2, las corrientes I_{dc} de las tres primeras subestaciones de tracción serán de 782[A], mientras que la corriente I_{dc} de la subestación de tracción N° 4 será de 525[A].

Con estos datos y la información que consta en el numeral 2.2.3, se puede calcular la información que se presenta en la Tabla 3.2.

| SUBESTACIONES EEQ | | | | SUBESTACIONES DE TRACCIÓN | | | | | |
|-------------------|---------|-----------|----------|---------------------------|--------|---------|-------|--------|--------|
| N° | Vp [kV] | Psc [MVA] | Isc [A] | N° | Vs [V] | Idc [A] | n | Is [A] | Isc/Is |
| 17 | 6,3 | 97,6 | 8.944,35 | 1 | 622 | 782 | 10,13 | 63,04 | 141,88 |
| | | | | 2 | 622 | 782 | 10,13 | 63,04 | 141,88 |
| 19 | 23 | 154,8 | 3.885,82 | 3 | 622 | 782 | 36,98 | 17,27 | 225,04 |
| | | | | 4 | 622 | 525 | 36,98 | 11,59 | 335,20 |

Tabla 3.2. Relación Isc/Is para las subestaciones de tracción

Los valores de V_p y P_{sc} son los que la EEQ ha suministrado y constan en el numeral 2.2.3.

El valor de V_s es el que se determinó en el numeral 3.2.2.1. del presente capítulo.

El resto de datos que constan en la Tabla 3.2., se calculan de la siguiente forma:

$$I_{sc} = \frac{P_{sc}}{\sqrt{3} * V_p}$$

$$n = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_s = \left(\frac{1}{n}\right) * 0.816 * I_{dc}$$

Como las relaciones Isc/Is calculadas y que constan en la Tabla 3.2., están entre 100 y 1,000, de acuerdo a los límites definidos en la Tabla 3.1., el máximo valor de TDD deberá ser 15%.

Para la corriente de entrada a un rectificador de 12 pulsos, formado por conexión en paralelo de dos rectificadores de 6 pulsos, que se presenta en el numeral 3.2.2.2. del presente capítulo, se tiene, aplicando la ecuación (3.8), el siguiente valor de TDD:

$$TDD = \frac{I_h}{I_s} * 100\%$$

En el numeral 3.2.2.2. se determinó las expresiones para $I_h=I_{dis}$; e, I_s , aplicando para ello las ecuaciones (3.6) y (3.4) respectivamente, por lo que se tiene:

$$TDD = \frac{\left(\frac{1}{n}\right) * 0.1236 * Idc}{\left(\frac{1}{n}\right) * 0.8165 * Idc} * 100$$

$$TDD = 15.14\%$$

El valor de TDD calculado, es apenas 0.14% superior al valor establecido como límite para este parámetro según la norma IEEE Std 519-1992, como consta en la Tabla 3.1.

La pregunta es: ¿Se debe instalar un filtro de armónicos para corregir este 0.14% de exceso?, la respuesta, desde el punto de vista económico es que no amerita la instalación de los filtros; desde el punto de vista técnico, se ha trabajado con valores teóricos, en la práctica, debido al ángulo de traslape de conducción de los diodos, la forma de onda de la corriente tiende a suavizarse, por lo que su distorsión armónica disminuye y con seguridad estará dentro de los límites de la norma, como ha sucedido con las subestaciones de tracción instaladas en el Sistema Trolebús.

En conclusión, el rectificador seleccionado, no requiere de filtros de armónicos a su entrada para operar en cumplimiento de lo establecido en la norma IEEE Std 519-1992, si bien operará en el límite establecido por ésta.

3.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DE LAS SUBESTACIONES DE TRACCIÓN

A continuación se detallará las especificaciones técnicas de los principales equipos que conforman las subestaciones de tracción, considerando:

Las dos primeras subestaciones de tracción, desde el sur (N°1 y N°2), serán alimentadas desde la subestación de distribución N°17 de la EEQ, a 6.3[kV]; mientras que las dos que se encuentran más al norte (N°3 y N°4), serán alimentadas por la subestación de distribución N°19 de la EEQ, a 23[kV].

Acorde a lo determinado en el numeral 2.2.5.5. del Capítulo 2, la potencia nominal de las subestaciones de tracción Nos. 1, 2 y 3, es de 1,450[kW]; mientras que la potencia nominal de la subestación de tracción N° 4 es de 840[kW].

A continuación en la Tabla 3.3. se presenta el resumen de estos datos para cada subestación de tracción .

| SUBESTACION N° | VOLTAJE DE ALIMENTACION [kV] | POTENCIA NOMINAL [Kw] | CORRIENTE NOMINAL [dc] |
|-------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 1 | 6.3 | 1,450 | 1,933 |
| 2 | 6.3 | 1,450 | 1,933 |
| 3 | 23.0 | 1,450 | 1,933 |
| 4 | 23.0 | 840 | 1,120 |

Tabla 3.3. Parámetros nominales de las subestaciones de tracción

En función de estas características nominales, a continuación se presentan las especificaciones técnicas de los principales equipos de las subestaciones de tracción.

3.3.1. (=L1) CELDA DE ENTRADA DE LÍNEA

Esta celda que como se dijo en el numeral 3.1.1., corresponde a la entrada de la línea de alimentación y a la protección general de la subestación., deberá estar compuesta por los siguientes equipos:

- Seccionador tripolar de barras, con contactos auxiliares conmutados, 3 normalmente abiertos (3NA) y 3 normalmente cerrados (3NC);
- Disyuntor de corte en hexafluoruro de azufre (SF_6), con contactos auxiliares, 2NA + 2NC, el mando deberá ser motorizado a 110 [Vdc], y dispondrá de bobina de apertura por mínima tensión,
- Tres transformadores de corriente para protección, relación de transformación 200/5-5[A]; burden 15[VA], protección 5P10, clase 0.5.
- Seccionador de puesta a tierra, con contacto auxiliar conmutado 2NA + 1NC;
- Lámparas de presencia de tensión
- Conexión mediante barras tripolares de 400[A]
- El control de la celda se realizará mediante un PLC específico, para el control y protección se dispondrá de: un relé de sobreintensidad de tiempo inverso y un pulsador de desbloqueo.

Dependiendo del voltaje de alimentación, las características mínimas de las celdas y de sus equipamientos serán :los que constan en la Tabla 3.4.

| PARAMETRO | Us = 6[kV] | Us=23[kV] |
|-----------------------------------|------------|-----------|
| Frecuencia [Hz] | 60 | 60 |
| Voltaje nominal de operación [kV] | 6.3 | 23.0 |
| Voltaje máximo [kV] | 7.8 | 25.8 |
| Corriente nominal [A] | 400 | 400 |
| Corriente momentánea (1s) [kA] | 16 | 12 |
| BIL a nivel de Quito [kV] | 95 | 150 |

Tabla 3.4. Características mínimas para las celdas, en función del voltaje de alimentación

3.3.2. (=L2) CELDA DE MEDIDA

Esta celda que tiene por objetivo la medición y registro de los parámetros eléctricos de la subestación, acorde a lo indicado en el numeral 3.1.2., deberá estar compuesta por los siguientes equipos:

- Tres transformadores de corriente de relación 200/5-5[A], Burden 15[VA], clase 0.5, protección 5P10, aislamiento para el BIL igual a las celdas (=L1)
- Tres transformadores de tensión, de relación $6,000:\sqrt{3}/110:\sqrt{3}$ ó $23,000:\sqrt{3}/110:\sqrt{3}$, según el caso.
- La celda tendrá conexionado mediante barras tripolares de 400[A]
- En baja tensión, la celda dispondrá de un armario metálico con los siguientes equipos:
 - Un amperímetro y un conmutador amperimétrico de 4 posiciones (OFF, A, B, C)
 - Un voltímetro y un conmutador voltimétrico de 4 posiciones (OFF, AB, BC, CA)
 - Un contador de energía electrónico, clase 0.5, de tres elementos para medición de corriente y voltaje en circuitos de cuatro hilos en un entorno no sinusoidal con voltajes y corrientes distorsionadas, deberá permitir la visualización y registro de energía activa, reactiva, factor de potencia, demandas de cuarto de hora y demanda máxima del período con su respectiva fecha y hora, deberá disponer de intercomunicación con un computador personal.

Al igual que (=L1), dependiendo del voltaje de alimentación, las características mínimas de las celdas y de sus equipamientos serán :los que constan en la Tabla 3.4.

Las celdas de medida se incorporarán a las barras de distribución, de donde saldrán las celdas de protección del grupo transformador – rectificador y la celda de servicios auxiliares.

3.3.3. (=L3) CELDA DE PROTECCIÓN DEL GRUPO RECTIFICADOR

Esta celda que como se dijo en el numeral 3.1.3., corresponde a la protección del grupo transformador – rectificador del convertidor AC/DC, deberá estar compuesta por los siguientes equipos:

- Seccionador tripolar de barras, con contactos auxiliares 3NA + 3NC;
- Disyuntor de corte en hexafloruro de azufre (SF_6), con contactos auxiliares, 2NA + 2NC, el mando deberá ser motorizado a 110 [Vdc], y dispondrá de bobina de apertura por mínima tensión,
- Tres transformadores de corriente para protección, relación de transformación 200/5-5[A], .burden 15[VA], protección 5P10, clase 0.5.
- Seccionador de puesta a tierra, con contacto auxiliar conmutado 2NA + 1NC;
- Lámparas de presencia de tensión
- Cerradura con enclavamiento a la puerta del transformador de potencia, para seguridad.
- Conexionado mediante barras tripolares de 400[A]
- El control de la celda se realizará mediante un PLC específico, para el control y protección se dispondrá de: un relé de sobreintensidad de tiempo inverso y un pulsador de desbloqueo, dispondrá de un amperímetro 0-150[A] con su correspondiente conmutador amperimétrico.

Dependiendo del voltaje de alimentación, las características mínimas de las celdas y de sus equipamientos serán :los que constan en la Tabla 3.4.

De esta celda se saldrá con cable aislado a la alimentación del transformador de potencia y de éste al rectificador.

3.3.4. (=L4) CELDA DE SERVICIOS AUXILIARES EN MEDIA TENSIÓN

Esta celda de protección a los servicios auxiliares en media tensión, estará instalada en una cabina y dispondrá de:

- Interruptor – seccionador ruptofusible con mando manual, con contactos auxiliares 2NA + 2NC y bobina de disparo a 110[Vdc];
- Dispositivo de bloqueo con lámpara de presencia de tensión;
- Seccionador de puesta a tierra;
- 3 fusibles;
- Conexión mediante barras tripolares
- Enclavamiento por cerradura con la celda de transformadores.

Dependiendo del voltaje de alimentación, las características mínimas de las celdas y de sus equipamientos serán :los que constan en la Tabla 3.4.

De esta celda, mediante cable aislado, se conecta el transformador de servicios auxiliares y de éste el armario de distribución.

3.3.5. (=ND1) GRUPO TRANSFORMADOR – RECTIFICADOR

El convertidos AC/DC ha sido analizado en detalle en el numeral 3.2. Para especificar el grupo transformador – rectificador, a continuación en la Tabla 3.5. se indican para cada subestación de tracción, las relaciones de transformación requeridas y las corrientes tanto en el lado de continua como de alterna.

| SUBESTACIONES DE TRACCIÓN | | | | | | |
|---------------------------|---------|--------|-------|-------|---------|--------|
| N° | Vp [kV] | Vs [V] | n | P[kW] | Idc [A] | Ip [A] |
| 1 | 6,3 | 622 | 10,13 | 1.450 | 1.933 | 155,85 |
| 2 | 6,3 | 622 | 10,13 | 1.450 | 1.933 | 155,85 |
| 3 | 23,0 | 622 | 36,98 | 1.450 | 1.933 | 42,69 |
| 4 | 23,0 | 622 | 36,98 | 840 | 1.120 | 24,73 |

Tabla 3.5. Características eléctricas nominales de las subestaciones de tracción

3.3.5.1. Especificaciones técnicas de los transformadores

La potencia aparente de los transformadores está dada por la siguiente relación:

$$S = \sqrt{3} * V_p * I_p$$

mientras que la relación de transformación, como ya se ha dicho, por:

$$n = \frac{V_p}{V_s}$$

Los valores nominales para los transformadores ha utilizarse, constan en la Tabla 3.6.

| TRANSFORMADORES | | | | | |
|-----------------|---------------------|--------------------|-------|--------|-----------|
| N° | V _p [kV] | V _s [V] | n | S[kVA] | S[kVA](*) |
| 1 | 6,3 | 622 | 10,13 | 1.701 | 1.700 |
| 2 | 6,3 | 622 | 10,13 | 1.701 | 1.700 |
| 3 | 23,0 | 622 | 36,98 | 1.701 | 1.700 |
| 4 | 23,0 | 622 | 36,98 | 985 | 1.000 |

(*) Valor redondeado de la potencia aparente

Tabla 3.6. Características eléctricas nominales para los transformadores

Los transformadores de potencia serán diseñados para su aplicación en sistemas de tracción, con sobrecargas según Norma DIN 41756 clase VI. Los transformadores será del tipo sumergido en aceite, con tanque conservador. Todos los elementos serán diseñados para su operación a una altura de 2,850 metros sobre el nivel del mar y a una temperatura ambiental promedio de 30°C. Por la característica no lineal de la carga del transformador (rectificador de 12 pulsos), el efecto de calentamiento debe ser evaluado de acuerdo con lo estipulado en la norma IEEE C57.110-1986, en caso de que la corriente armónica sea superior al 5% de la corriente de diseño.

Las características del transformador serán:

| | |
|-------------------------------|---|
| ▪ Tipo de refrigeración | Circulación natural de aire |
| ▪ Aislamiento | Aceite |
| ▪ Grupo de conexión | Yy0d11 |
| ▪ Voltaje primario (*) | 6300 (23000) [V] $\pm 2*2,5\%$ |
| ▪ Tensión secundario | 622 [V] |
| ▪ Tensión terciario | 622 [V] |
| ▪ Frecuencia | 60 [Hz] |
| ▪ Tensión de cortocircuito | 7% |
| ▪ Calentamiento cobre/líquido | 50/45°C |
| ▪ BIL a nivel de Quito (*) | 95 (150) kV |
| ▪ Capacidad de carga: | 100% In, continua 150% In, 2 horas 300% In, 1 min |

(*) Se indica entre paréntesis el valor para las S/E de 23 kV

Los transformadores estarán equipados con los correspondientes radiadores, tanque conservador, respiradero de silicagel, termómetro indicador de temperatura (con contactos para alarma y disparo), relé buchholz (contactos para alarma y disparo), indicador del nivel de aceite y válvula de drenaje. Dispondrán de un conector para conexión a tierra del tanque, placa de características en español y dispositivos de elevación. El cambiador de taps será para operación sin carga.

3.3.5.2. Especificaciones técnicas de los rectificadores

Los rectificadores a utilizarse, serán los determinados en el numeral 3.2.3 del presente capítulo, es decir rectificadores no controlados de 12 pulsos conformado por conexión en paralelo de dos rectificadores no controlados de 6 pulsos.

Los rectificadores, según lo expuesto en el numeral 3.2.4. no tendrán filtro de armónicos de corrientes a lado de corriente alterna, mientras que al lado de

corriente continua dispondrán de una bobina de aplanamiento de corriente y de los correspondientes filtros para los armónicos de voltaje de orden 12 y 24. La configuración de los filtros, de la bobina de aplanamiento y su diseño, deberán ser los que constan en el numeral 3.2.4.1.

La ejecución del rectificador se realizará según norma DIN 41756, clase VI, es decir:

| | |
|---------------------|-----------------------|
| Potencia nominal: | 1,450 [kW] (*) |
| Tensión nominal: | 750 [Vdc] |
| Capacidad de carga: | 100% I_n , continua |
| | 150% I_n , 2 horas |
| | 300% I_n , 1 min. |

(*) Para la subestación de tracción N° 4, la Potencia Nominal es de 840[kW] mientras que para las 3 restantes es de 1,450[kW]

El rectificador estará alojado dentro de una cabina metálica, de la cual se hará el conexionado a la bobina de aplanamiento de onda y los filtros para los armónicos 12 y 24. Contará con medición de corriente y voltaje de salida.

La refrigeración se realizará de manera natural, mediante ranuras en la puerta frontal y abertura del techo de la celda. El tipo constructivo deberá minimizar los ruidos, depósitos de polvo y el mantenimiento.

Los diodos estarán equipados con piezas disipadoras. A cada diodo le precederá un fusible con percutor para indicación de avería. Los diodos deberán ser claramente identificados y se podrán cambiar fácilmente. Todas las piezas serán accesibles con la puerta frontal abierta.

Deberá existir una amortiguación para los diodos, que servirá como protección del rectificador ante sobrevoltajes externos de la red trifásica y de corriente continua.

La medición de corriente de salida se efectuará tanto para la barra positiva como para la negativa, mediante convertidores que proporcionen el aislamiento

galvánico correspondiente. Se dispondrá de un convertidor de tensión con aislamiento superior a 7.2 kV para la medición del voltaje continuo.

3.3.6. (=ND2/=ND3) CELDAS DE SALIDA DE FEEDER EN CORRIENTE CONTINUA

Como se indicó en el numeral 3.1.6. cada subestación contará con dos cabinas de salida para alimentación a la línea de contacto, tanto a lado sur como al lado norte (feeders de salida =ND2 / =ND3), con excepción de la subestación a instalarse en la Ofelia que tendrá un solo feeder de salida por ser una subestación terminal. Las cabinas cumplirán las siguientes especificaciones técnicas::

- Sistema de armario, con técnica enchufable, tipo de protección IP2s que alberga los equipos que conforman la celda.
- Interruptor extrarrápido bipolar de corriente continua, accionado por motor, con disparador de sobrecorriente estático ajustable. Corriente nominal 1200[A], voltaje nominal 1200[V]. El interruptor estará equipado con: interruptor auxiliar, manivela extraíble, disparador de sobrecorriente ajustable de 2 a 4 [KA], Shunt de 2000[A]/60[mV], amperímetro de 0/2000[A], equipo de medida de tensión.
- Analizador de catenaria por diferencia de tensión y cortocircuito.
- Relé de aumento de corriente (di/dt)
- Equipo de medición de voltaje y corriente.
- El control de estas celdas se lo realizará mediante PLC.

La salida de la celda de feeder se realizará mediante pletinas de cobre al repartidor para alimentar a la línea de contacto desde la subestación móvil o desde la fija. A la salida de las celdas se deberá instalar pararrayos que garanticen la protección del equipo contra sobrevoltajes transitorios provenientes de la línea de contacto.

3.3.7. (=NE/=NK) SERVICIOS AUXILIARES

Para cumplir lo requerido por los servicios auxiliares, descritos en el numeral 3.1.7., se utilizará los siguientes equipos:

3.3.7.1. Transformador de servicios auxiliares

Será un transformador trifásico de 15 [kVA], equipado con visualizador del nivel de aceite y cambiador de taps para operación sin carga. Tendrá las siguientes características:

| | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| ▪ Potencia | 15 kVA |
| ▪ Tipo de refrigeración | Circulación natural de aire |
| ▪ Aislamiento | Aceite |
| ▪ Grupo de conexión | Dyn5 |
| ▪ Voltaje primario (*) | 6300 (23000) [V] $\pm 2*2,5\%$ |
| ▪ Tensión secundario | 208/120 [V] |
| ▪ Frecuencia | 60 [Hz] |
| ▪ Calentamiento cobre/líquido | 50/45°C |
| ▪ BIL a nivel de Quito (*) | 95 (150) kV |

(*) Se indica entre paréntesis el valor para las S/E de 23 kV

3.3.7.2. Celda de servicios auxiliares.

La celda de servicios auxiliares incorporará todos los equipos de protección, control, señalización y medición de los circuitos auxiliares de la subestación, tanto en corriente alterna como en corriente continua.

Desde este tablero se deberá alimentar y proteger a:

- Cargador de baterías

- Circuitos de control a 120 Vac
- Circuitos de control a 110 Vdc
- Circuitos de control a 24 Vdc
- Circuitos auxiliares de iluminación, fuerza y ventilación

La celda estará equipada con:

- Interruptor de baja tensión para la salida del transformador de servicios auxiliares.
- Convertidor 110 Vdc / 24 Vdc
- Relés vigilantes de tensión, para 120 Vac, 110 Vdc y 24 Vdc.
- Controlador Lógico Programable (PLC)
- Magnetotérmicos, fusibles y regletas de conexión.

Empotrados en la puerta de la cabina se encontrarán:

- Voltímetros y amperímetros para los servicios auxiliares de alterna y continua
- Elementos de mando y pulsadores
- Dispositivo electrónico para monitoreo del estado de la subestación y visualización de alarmas. En el se deberán visualizar todos los parámetros eléctricos medidos a través de los PLC's

Las instalaciones eléctricas de los servicios auxiliares (alumbrado, tomacorrientes, etc.) se realizarán con cable de cobre aislado para un voltaje de 600 V, dentro de tuberías interiores adecuadamente sujetas a la estructura del edificio.

3.3.7.3.Celda del cargador y banco de baterías

En celda independiente se alojarán el cargador y banco de baterías para los servicios auxiliares de corriente continua, con los siguientes parámetros:

- Voltaje de alimentación: 208 o 120 V, 60 Hz
- Voltaje de salida: 110 Vdc
- Tipo de elementos: Ni – Cd

La disposición de los elementos deberá permitir un fácil acceso para revisión del nivel del electrolito y mantenimiento.

La puerta frontal de la celda llevará empotrados los elementos de medida y señalización necesarios. Existirá un voltímetro para medida del voltaje de salida y un amperímetro para medida de la corriente del cargador.

3.3.8. CASETAS PARA LA INSTALACIÓN DE EQUIPOS

Las casetas deberán garantizar un adecuado aislamiento térmico y sonoro para disminuir la influencia del medio ambiente sobre los equipos y viceversa. Deberán ser similares, en aspecto exterior, a las casetas ya existentes y sus dimensiones serán las estrictamente necesarias para permitir la libre maniobrabilidad del personal de mantenimiento y operación.

Los equipos irán ubicados sobre una plataforma que defina una galería (para transporte de cables y para las conexiones hacia el exterior) entre ella y el piso. La altura de dicha galería será la necesaria para permitir el acceso cómodo de personal y el manejo de herramienta de mano.

Según el voltaje primario de alimentación a la subestación, las casetas tendrán las siguientes características.

3.3.8.1. Para las subestación de 6.3 [kV]

Todos los equipos estarán alojados dentro de una sola caseta, compuesta por dos secciones:

- a) La primera sección será de libre acceso para el personal de operación y alojará a todas los equipos dispuestos dentro de cabinas metálicas. En ella se deben realizar todas las acciones de maniobra y operación de la subestación.
- b) La segunda sección contendrá aquellos equipos que no se encuentren dentro de una celda: transformadores de potencia y servicios auxiliares y bobinas de aplanamiento y de filtros. Este segundo cuarto deberá tener acceso restringido a través de un enclavamiento con los disyuntores para evitar riesgos al personal operativo. En el techo, sobre el transformador de potencia, se deberá disponer una abertura con tapa herméticamente sellada que permita su colocación y extracción.

La caseta tendrá unas dimensiones aproximadas de 3m x 12.5m.

3.3.8.2. Para las subestación de 23 [kV]

Los equipos estarán alojados dentro de dos casetas:

- a) La primera caseta alojará las cabinas de media tensión en corriente alterna. Será de libre acceso para el personal de operación y mantenimiento. Sus dimensiones aproximadas serán de 3m x 6m.
- b) La segunda caseta estará dividida en dos secciones, en un área total de 3m x 9m, aproximadamente:
 1. La primera sección será de libre acceso para el personal de operación y alojará a todas las cabinas de corriente continua y servicios auxiliares.

2. La segunda sección contendrá aquellos equipos que no se encuentren dentro de una celda: transformadores de potencia y servicios auxiliares y bobinas de aplanamiento y de filtros. Este segundo cuarto deberá tener acceso restringido a través de un enclavamiento con los disyuntores para evitar riesgos al personal operativo. En el techo, sobre el transformador de potencia, se deberá disponer una abertura con tapa herméticamente sellada que permita su colocación y extracción.

3.3.9. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RESTO DE INSTALACIONES

3.3.9.1. Malla de tierra

Para la puesta a tierra de todas las instalaciones se dispondrá de una malla de tierra, que garantice una resistencia de puesta a tierra inferior a 2 ohms. Se realizará con cable de cobre desnudo. Las uniones entre cables se realizarán mediante soldadura tipo cold weld.

Desde la malla de tierra se realizarán subidas con cable desnudo hacia la pletina de tierra general que discurrirá por la galería de cables.

Todas las partes metálicas exteriores al edificio, como vallas de cerramiento, luminarias, etc. serán conectadas directamente a la malla, con el fin de evitar la transferencia de potenciales a lugares próximos a la instalación. Los cables de dicha malla se cubrirán, una vez instalados, con la misma tierra natural de la excavación de zanjas realizada.

3.3.9.2. Red de tierra

Toda la instalación, tanto partes metálicas como armaduras y bastidores, estarán puestas a tierra mediante conductores de cobre. Se formarán dos tipos de circuitos de tierra:

- 1.- Circuitos con conexión directa a la malla.
- 2.- Circuitos con conexión a la malla a través de protección.

Dentro del primer grupo estarán las estructuras propias del edificio. Éste dispondrá en el habitáculo inferior de un anillo completo a lo largo de todo su perímetro con pletina de cobre. A este anillo se conectarán todas las tierras procedentes de todos los circuitos y de este anillo a la malla mediante las conexiones ya mencionadas.

Así mismo, formarán parte de los circuitos del primer grupo, el armario de servicios auxiliares, el armario de baterías, la verja de separación entre zona de celdas y zona de transformadores, así como todos los diversos herrajes.

Correspondientes al segundo grupo tendremos las celdas de corriente alterna que se dispondrán aisladas del suelo mediante una tira aislante en todos sus apoyos. Se conectarán a tierra mediante cable de cobre flexible y a través del transformador y relé de protección.

El mismo sistema se empleará para los transformadores de potencia y servicios auxiliares. Las celdas de corriente continua también se dispondrán aisladas y se conectarán a tierra a través del relé de puesta a masa.

3.3.9.3. Control

El control de la subestación se realizará por medio de controladores lógicos programables (PLC's), que recibirán información permanente de su instalación,

tanto para el procesamiento de alarmas como para la medición de voltajes y corrientes. Contarán para ello con tarjetas de entradas digitales y analógicas, de voltaje continuo. Las órdenes de conexión y desconexión de equipos, dependientes de la lógica implantada, serán enviadas por medio de tarjetas de salidas digitales. Los controladores se comunicarán entre sí dentro de una red "peer to peer", y con el monitor central de la S/E. El interfaz con el programador se deberá poder realizar a través de un ordenador portátil.

3.3.9.4. Cableado

Todo el cableado de las cabinas será instalado y conectado para brindar una operación segura y confiable. Los cables de potencia, para interconexión de equipos y celdas, serán de cobre aislado, adecuadamente dimensionados en calibre y aislamiento. Discurrirán por la parte inferior de la caseta sobre bandejas adecuadas para el efecto.

Los cables de control y de instrumentos serán de conductor de cobre, con aislamiento mínimo de 600 V, especialmente tratado y probado contra hongos y otras plantas parásitas. Se instalará un sistema adecuado de ductos para el cableado entre paneles y entre las partes frontal y posterior, con un acceso fácil para inspección y reemplazo de los cables. El cableado será continuo, sin empalmes. Las conexiones se realizarán en regletas terminales de aislamiento adecuado, no inferior a 600 V, con tornillos de presión. Tanto regletas como cable deberán suministrarse con identificaciones permanentes por medio de inscripciones alfanuméricas correspondientes con los planos y diagramas esquemáticos.

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

En el presente capítulo se realizarán los diseños de las cuatro líneas de media tensión requeridas para la Extensión Norte del Sistema Trolebús, considerando para ello los requerimientos eléctricos de las subestaciones de tracción determinados en el Capítulo 3, las condiciones de suministro eléctrico ofrecidos por la Empresa Eléctrica Quito; y, las normas generales para este tipo de instalaciones.

En primer lugar se determinará el alcance de las instalaciones de las líneas de media tensión, luego sus características eléctricas, para en función de estos parámetros recomendar el tipo de cable de media tensión a utilizarse; finalmente se realizará el diseño del recorrido de las líneas de media tensión y se especificará las canalizaciones requeridas.

4.1 ALCANCE DE LAS INSTALACIONES DE LÍNEA DE MEDIA TENSIÓN

Las Líneas de Media Tensión son aquellas que permiten el abastecimiento de energía eléctrica, desde las subestaciones de distribución de la Empresa Eléctrica Quito, hasta las subestaciones de tracción requeridas para el funcionamiento del Sistema Trolebús.

Conforme a lo indicado en el numeral 2.2.3. del Capítulo 2, la Empresa Eléctrica Quito, ha indicado que las subestaciones de tracción a instalarse para la Extensión Norte del Sistema Trolebús se alimentarán mediante circuitos expresos en forma radial desde las subestaciones de distribución N° 17 y 19, por estar cercanas al Proyecto.

De acuerdo a la ubicación de las subestaciones de distribución de la EEQ y a la determinación de ubicación de las subestaciones de tracción definida en el Capítulo 2, numeral 2.2.5.5., se hace evidente definir que cada subestación de distribución alimente a 2 subestaciones de tracción, como se esquematiza en la Figura 4.1.

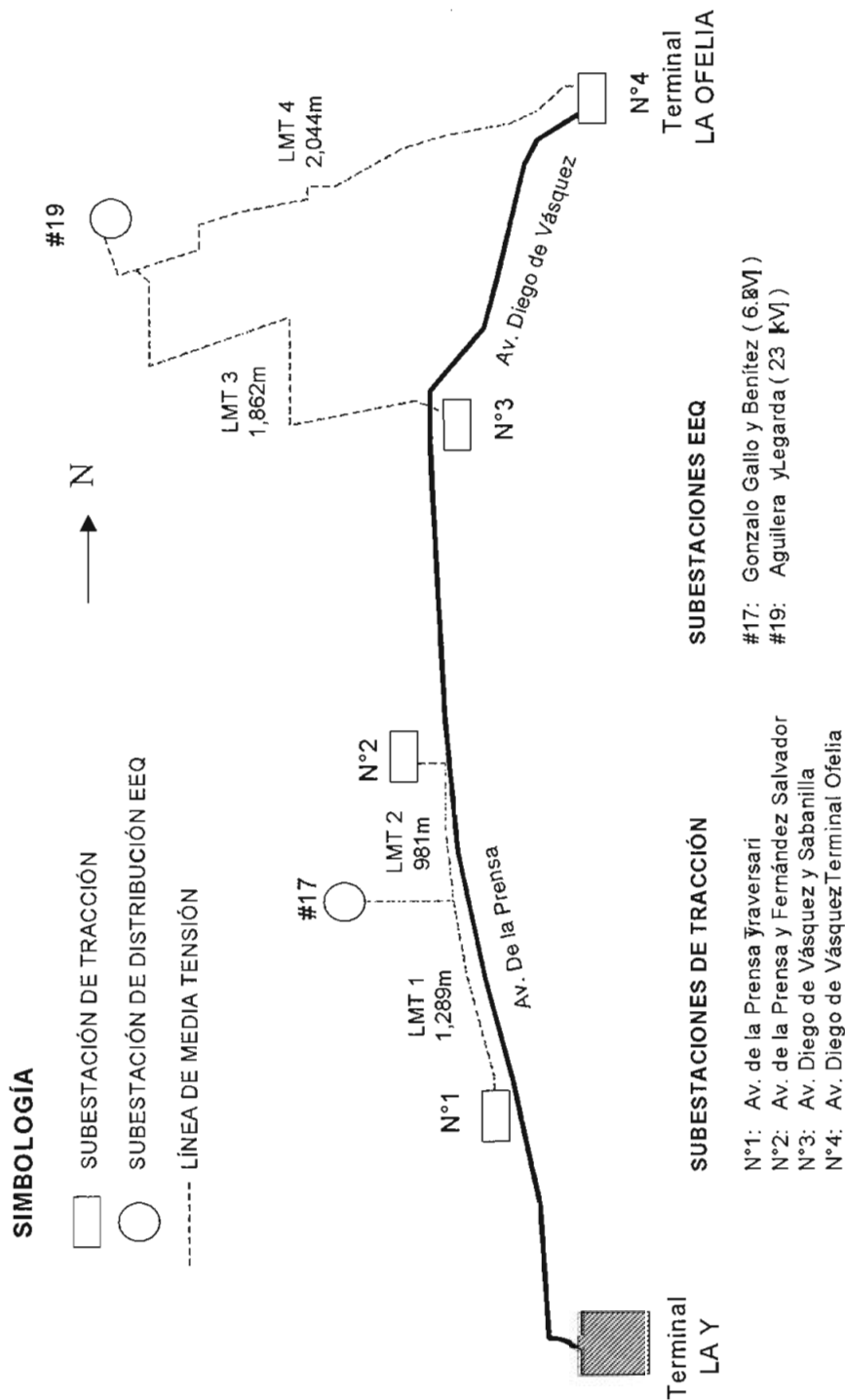


Figura 4.1. Esquema de las Líneas de Media Tensión

El alcance de las instalaciones de línea de media tensión, será de 4 circuitos de acometida en media tensión, que son los siguientes:

- a) Línea de Media Tensión N°1 (LMT1): Desde la subestación de distribución N°17 hasta la subestación de tracción N°1 ubicada en la Av. de la Prensa y Traversari, acera occidental, en el parque de La Concepción; con una longitud de 1,289[m]; a 6,300[V];
- b) Línea de Media Tensión N°2 (LMT2): Desde la subestación de distribución N°17 hasta la subestación de tracción N°2 ubicada en la Av. de la Prensa entre Manuel Herrera y Fernández Salvador, 135[m] al occidente de la Av. de la Prensa; con una longitud de 981[m], a 6,300[V];
- c) Línea de Media Tensión N°3 (LMT3): Desde la subestación de distribución N°19 hasta la subestación de tracción N°3 ubicada en la Av. de la Prensa y Sabanilla, acera oriental; con una longitud de 1,862[m], a 23,000[V]; y,
- d) Línea de Media Tensión N°4 (LMT4): Desde la subestación de distribución N°19 hasta la subestación de tracción N°4 ubicada en el terminal Ofelia, con una longitud de 2,044[m], a 23,000[V];

Por confiabilidad del sistema y para evitar la obstrucción visual que se genera con instalaciones aéreas, las líneas de media tensión serán subterráneas, pues este tipo de instalación garantizan un 100% de limpieza visual del entorno urbanístico; y, disminuyen la probabilidad de falla, pues no se tiene la posibilidad de derribos de las estructuras aéreas y de sobretensiones de origen atmosférico.

4.2 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

Las características eléctricas de cada línea de media tensión, se definen en función del voltaje de alimentación de cada subestación de distribución, su potencia de cortocircuito, así como también de las potencias de las subestaciones de tracción a las que alimentarán.

Según lo indicado en el numeral 2.2.3. del Capítulo 2, las características eléctricas de cada subestación de distribución, son las que se presentan en la Tabla 4.1.

| SUBESTACIÓN N° | NIVEL DE VOLTAJE [kV] | POTENCIAS DE CORTOCIRCUITO EN BARRAS DE BAJA TENSION [MVA] | |
|-------------------|-----------------------------|---|---------------|
| | | LÍNEA – TIERRA | LÍNEA – LÍNEA |
| 17 | 46/6.3 | 97.6 | 90.1 |
| 19 | 138/23 | 154.8 | 142.4 |

Tabla 4.1. Características Eléctricas de cada subestación de distribución.

Por otra parte, según lo determinado en el numeral 3.3.5.1, Tabla 3.6; y, en el numeral 3.3.7.1., del Capítulo 3, la potencia aparente de cada subestación de tracción será la suma entre la potencia aparente del transformador del rectificador y la potencia aparente del transformador de servicios auxiliares (15[KVA]), es decir, la potencia aparente total de cada subestación de tracción será la que se indica en la Tabla 4.2.

| SUBESTACION N° | VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN [V] | (S) TRAFO DEL RECTIFICADOR [KVA] | (S) SERVICIOS AUXILIARES [KVA] | POTENCIA APARENTE TOTAL [KVA] |
|-------------------|-----------------------------------|---|---|--|
| 1 | 6,300 | 1,700 | 15 | 1,715 |
| 2 | 6,300 | 1,700 | 15 | 1,715 |
| 3 | 23,000 | 1,700 | 15 | 1,715 |
| 4 | 23,000 | 1,000 | 15 | 1,015 |

Tabla 4.2. Potencia aparente total de cada subestación de tracción.

Con esta información se determinan las características eléctricas de cada línea de media tensión, como son: voltaje, corriente nominal, corriente máxima de cortocircuito y su longitud; mismas que se indican en la Tabla 4.3.

| LMT N° | VOLTAJE NOMINAL [V] | CORRIENTE NOMINAL [A] | CORRIENTE CORTOCIRCUITO [A] | LONGITUD [m] |
|--------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 | 6,300 | 157.17 | 8,944.35 | 1,289 |
| 2 | 6,300 | 157.17 | 8,944.35 | 981 |
| 3 | 23,000 | 43.05 | 3,885.82 | 1,862 |
| 4 | 23,000 | 25.48 | 3,885.82 | 2,044 |

Tabla 4.3. Características eléctricas de cada línea de media tensión

Las corrientes se calculan en función de las potencias aparentes, S (ya sea la potencia aparente total requerida por la subestación o la potencia aparente de cortocircuito); y de los voltajes de servicio V , aplicando la siguiente fórmula ^[4.1]:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * V}$$

4.3 DETERMINACIÓN DEL CABLE DE MEDIA TENSIÓN REQUERIDO

A continuación se analizarán los requerimientos eléctricos de los cables subterráneos a utilizarse para cada línea de media tensión, en términos de:

- El aislamiento para el voltaje de operación;
- La sección del conductor en función de la corriente de carga que deberán transportar, de las corrientes de cortocircuito y de las caídas de tensión máximas admisibles.

4.3.1. AISLAMIENTO PARA EL CABLE SUBTERRANEO

El aislamiento de los cables a utilizarse, se determina en función del voltaje de operación de la red y el régimen de explotación, para el diseño que se desarrolla, se trata de un sistema con las siguientes características:

- Sistema trifásico,
- Frecuencia de red 60 [Hz]
- Tensión nominal del sistema: para LMT1 y LMT2, 6.3[kV]; para LMT3 y LMT4, 23[kV]

^[4.1] “Teoría y Problemas de Circuitos Eléctricos”; Joseph A. Edminister, Ecuación (13); pág. 203; McGraw Hill; 1965; Akron

Al ser un sistema trifásico, se podría utilizar un cable subterráneo trifásico o en su defecto, tres cables subterráneos monofásicos. Para mantener homogeneidad con las instalaciones existentes del Sistema Trolebús, se utilizará, para las líneas a 6.3[kV], cables tripolares; mientras que para las líneas a 23[kV], cables monopolares.

Por la tensión de servicio, y considerando las recomendaciones de la “Guía orientativa de la elección de los cables para sistemas trifásicos” ^[4.2], se selecciona, para los cables subterráneos de las líneas de media tensión N° 1 y 2, cables para una tensión de 8.7/15[kV]; mientras que para las líneas de media tensión N° 3 y 4, se selecciona los cables para una tensión de 15/25[kV]

Por uniformizar la instalación nueva con las existentes, el aislamiento de los cables a utilizarse deberá ser de polietileno reticulado.

En la Tabla 4.4. se indica, en resumen, las especificaciones de tensión para los cables subterráneos a utilizarse en las líneas de media tensión.

| LMT N° | TENSION NOMINAL [kV] | TIPO |
|--------|----------------------|----------|
| 1 | 8.7/10 | Tripolar |
| 2 | 8.7/10 | Tripolar |
| 3 | 15/25 | Unipolar |
| 4 | 15/25 | Unipolar |

Tabla 4.4. Tensión para los cables de las líneas de media tensión

4.3.2. SECCIÓN DEL CABLE SUBTERRANEO

La sección de los cables subterráneos a utilizarse en cada línea de media tensión, deberá ser la suficiente para permitir:

^[4.2] “Instalaciones Eléctricas Generales”; Enciclopedia CEAC de Electricidad; José Ramírez Vázquez; Tabla 108; pág. 586; Ediciones CEAC, S.A.; Quinta edición; 1973; Barcelona – España.

1. La circulación de la corriente nominal de cada circuito, de forma permanente;
2. La circulación de la corriente de cortocircuito durante el tiempo de apertura del disyuntor de la cabina de salida de la subestación de distribución de la EEQ; y,
3. No superar la caída máxima de tensión permitida por la EEQ, es decir, que la caída de tensión entre las subestaciones de distribución y las subestaciones de tracción, sea menor que 2[%].

4.3.2.1. Sección para la circulación de la corriente nominal.

De acuerdo a las corrientes nominales de circulación de cada línea de media tensión que se indican en la Tabla 4.3., y a lo establecido en las tablas de "Intensidad máxima admisible para servicio permanente"^[4.3] para el tipo de aislamiento seleccionado en instalación de tres cables unipolares de cobre enterrados, se tiene que las secciones mínimas para garantizar la circulación de forma permanente de la corriente nominal de cada línea de media tensión, son las que se indican en la Tabla 4.5.

| CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO | | CARACTERÍSTICAS DEL CABLE | | |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| LMT N° | CORRIENTE NOMINAL [A] | VOLTAJE [kV] | SECCIÓN MÍNIMA [mm ²] | CORRIENTE MÁXIMA ADMISIBLE [A] |
| 1 | 157.17 | 8.7/15 | 50 | 190 |
| 2 | 157.17 | 8.7/15 | 50 | 190 |
| 3 | 43.05 | 15/25 | 35 | 180 |
| 4 | 25.48 | 15/25 | 35 | 180 |

Tabla 4.5. Secciones mínimas admisibles para cada cable a utilizarse

^[4.3] "Instalaciones Eléctricas Generales"; Enciclopedia CEAC de Electricidad; José Ramírez Vázquez; Tabla 128 y Tabla 135, págs. 607 y 611; Ediciones CEAC, S.A.; Quinta edición; 1973; Barcelona- España.

A la información de la Tabla 128, se ha realizado una corrección lineal, para determinar la corriente del cable tripolar de 35mm² de sección enterrado.

4.3.2.2. Sección para la circulación de la corriente de cortocircuito.

Para determinar la sección del conductor requerida para que soporte la circulación de la corriente de cortocircuito, durante el tiempo que tarda en abrir el disyuntor de salida de la subestación de distribución, se considerará las siguientes premisas:

- El proceso de calentamiento que sufre el conductor por efecto de la circulación de corriente, es adiabático.
- La temperatura inicial en el conductor (antes del cortocircuito) se estima en: 70°C
- La temperatura máxima que admite el conductor es de 200°C^[4.4]
- El tiempo de apertura, en caso de cortocircuito, del disyuntor de salida de las subestaciones de distribución es 1.5 segundo, $t=1.5[s]$

La corriente de cortocircuito en el conductor, bajo la premisa de ser un proceso adiabático, está dada por la siguiente expresión^[4.5]:

$$I_{cc} = \sqrt{0.0297 * \log\left(\frac{T_f + 234}{T_o + 234}\right) * \frac{1}{\sqrt{t}} * s}$$

Donde:

| | |
|------------|---|
| I_{cc} : | Corriente de cortocircuito |
| T_f : | Temperatura máxima a la que puede alcanzar el conductor (200°C) |
| T_o : | Temperatura inicial del conductor (70°C) |
| t : | Tiempo de apertura del disyuntor (1.5[s]) |
| s : | Sección del conductor en círculos mil |

Si se aplica los datos que se consideran como premisas, se tiene que la sección en círculos mil, estaría dada por:

^[4.4] “Instalaciones Eléctricas Generales”; Enciclopedia CEAC de Electricidad; José Ramírez Vázquez; pág. 620; Ediciones CEAC, S.A.; Quinta edición; 1973; Barcelona – España.

^[4.5] Fórmula tomada de la “Memoria Técnica” de la Primera Etapa del Proyecto Trolebús, Consorcio AEG Cobra, 1996; Quito - Ecuador

$$s[\text{circ.mils}] = 18.0734 * I_{cc}$$

La sección en milímetros cuadrados, estaría dada por:

$$s[\text{mm}^2] = 9.1578 \times 10^{-3} * I_{cc} \quad (4.1)$$

Aplicando la ecuación (4.1), con los datos para las corrientes de cortocircuito de la Tabla 4.3. se determina las secciones de los conductores para cada una de las líneas de media tensión, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.6.

| LMT N° | CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO [A] | SECCIÓN CALCULADA [mm ²] | SECCIÓN COMERCIAL [mm ²] |
|--------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 8,944.35 | 81.91 | 95 |
| 2 | 8,944.35 | 81.91 | 95 |
| 3 | 3,885.82 | 35.59 | 50 |
| 4 | 3,885.82 | 35.59 | 50 |

Tabla 4.6. Secciones del conductor requeridas para la condición de cortocircuito

Para disponer de un factor de seguridad, se seleccionará la sección que comercialmente sea la inmediata superior a la calculada, como se indica en la tabla 4.6.

4.3.2.3. Caídas de tensión en las líneas de media tensión

La caída de tensión en un cable subterráneo, se calcula utilizando la siguiente ecuación^[4.6]:

$$\Delta V\% = \frac{\sqrt{3} * I * L * (R * \cos \varphi + X * \sin \varphi)}{V} * 100 \quad (4.2)$$

^[4.6] Fórmula tomada del "CATÁLOGO DE CABLES Y ACCESORIOS DE MEDIA TENSIÓN"; Pirelli; pág. 49; abril de 1998, Barcelona España;

| | |
|--------|---|
| Donde: | $\Delta V\%$: Caída de tensión en [%] |
| | I : Corriente nominal |
| | L : Longitud del conductor en [km] |
| | V : Voltaje nominal |
| | R : Resistencia óhmica en [Ω /km] |
| | X : Reactancia inductiva [Ω /km] |

Para el cálculo de las caídas de tensión utilizando la ecuación (4.2), se considera un factor de potencia inductivo de 0.9667 ($\cos\phi = 0.9667$), pues la carga a la que alimenta cada una de las líneas de media tensión, es un rectificador no controlados de 12 pulsos

Para aplicar la ecuación (4.2), se necesita conocer las características intrínsecas del cable subterráneo a utilizarse, como son su resistencia óhmica y su reactancia inductiva por kilómetro, por esta razón es necesario, en primer lugar, seleccionar el cable adecuado para la instalación. A continuación se selecciona de entre los cables disponibles en el mercado, los que cumplan con los requerimientos de aislamiento, tipo y sección ya definidos, para luego verificar si el cable seleccionado cumple con las caídas de tensión máximas admisibles.

a) Selección del cable para las Líneas de Media Tensión 1 y 2.

De acuerdo a los requerimientos de tensión definidos en el numeral 4.3.1. y de sección para soportar la corriente de cortocircuito, que se presentan en la Tabla 4.6. , el cable requerido para las líneas de media tensión N° 1 y 2 deberá ser Tripolar, para una tensión nominal de 8.7/15[kV] y deberá tener una sección de 95[mm²]. Según catálogo Pirelli, el cable que cumple estas condiciones es el que se describe a continuación:

| | |
|--------------------|------------------------|
| TIPO DE CABLE: | VOLTALENE HF |
| SECCIÓN: | 3X95/31mm ² |
| TENSIÓN: | 8.7/15kV |
| CABLE SEGÚN NORMA: | IEC 502 |

Las características tanto dimensionales como eléctricas, se presentan en el Anexo 4.1.

Los valores de la resistencia óhmica y de la reactancia inductiva a 60[Hz], del cable seleccionado, requeridos para el cálculo de las caídas de tensión, son:

$$R = 0.193[\Omega / km]$$

$$XL = 0.127[\Omega / km]$$

b) Selección del cable para las Líneas de Media Tensión 3 y 4.

De acuerdo a los requerimientos de tensión definidos en el numeral 4.3.1. y de sección para soportar la corriente de cortocircuito, que se presentan en la Tabla 4.6. , el cable requerido para las líneas de media tensión N° 3 y 4 deberá ser Monopolar, para una tensión nominal de 15/25[kV] y deberá tener una sección de 50[mm²]. Según catálogo Pirelli, el cable que cumple estas condiciones es el que se describe a continuación:

| | |
|--------------------|------------------------|
| TIPO DE CABLE: | VOLTALENE H |
| SECCIÓN: | 1X50/35mm ² |
| TENSIÓN: | 15/25kV |
| CABLE SEGÚN NORMA: | IEC 60502-2 |

Las características tanto dimensionales como eléctricas, se presentan en el Anexo 4.1.

Los valores de la resistencia óhmica y de la reactancia inductiva a 60[Hz], del cable seleccionado, requeridos para el cálculo de las caídas de tensión, son:

$$R = 0.387[\Omega / km]$$

$$XL = 0.141[\Omega / km]$$

Con la información del voltaje y la corriente nominal de cada línea de media tensión, su longitud y las características intrínsecas de los cables seleccionados,

aplicando la ecuación (4.2), se determina las caídas de tensión en cada una de las líneas de media tensión, cuyos resultados se presentan a continuación en la Tabla 4.7.

| LMT N° | VOLTAJE NOMINAL [V] | CORRIENTE NOMINAL [A] | LONGITUD [m] | CAIDA DE TENSIÓN $\Delta V\%$ |
|--------|---------------------|-----------------------|--------------|-------------------------------|
| 1 | 6,300 | 157.17 | 1,289 | 1.220 |
| 2 | 6,300 | 157.17 | 981 | 0.929 |
| 3 | 23,000 | 43.05 | 1,862 | 0.248 |
| 4 | 23,000 | 25.48 | 2,044 | 0.161 |

Tabla 4.7. Caídas de tensión en cada una de las líneas de media tensión

En conclusión, todas las caídas de tensión son menores que el 2%, razón por la cual, los cables subterráneos seleccionados cumplen con la normativa impuesta por la EEQ y con los requerimientos de la instalación.

4.4 DISEÑO DEL RECORRIDO DE LAS LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

Las líneas de media tensión serán instaladas en ductos de PVC, bajo el nivel de las aceras o calzadas. Para definir el recorrido de las canalizaciones en las que se instalarán las líneas de media tensión, se ha considerado las siguientes condiciones:

- Buscar la menor distancia entre las subestaciones de distribución de la EEQ y las subestaciones de tracción;
- Que la canalización en la que se instale las líneas de media tensión tengan el menor número de cruces a través de la calzada, esto pues la canalización en la calzada es más onerosa que la canalización en acera; y,
- Evitar que la canalización presente ángulos de quiebre bruscos, pues caso contrario se dificulta la instalación de los cables subterráneos.

En función de las condiciones expuestas, a continuación se indica el recorrido que tendrá cada línea de media tensión. Los correspondientes planos de los recorridos se presentan en el Anexo 4.2.

a) Línea de Media Tensión N°1

Desde la subestación de distribución N° 17 de la EEQ, por la acera sur de la calle Gonzalo Gallo hacia el oriente, hasta la Av. de la Prensa, luego, por la acera occidental de la Av. de la Prensa, hacia el sur, hasta la calle Traversari, en el parque de la Concepción, lugar en el que se instalará la Subestación de Tracción N°1.

b) Línea de Media Tensión N°2

Desde la subestación de distribución N° 17 de la EEQ, por la acera sur de la calle Gonzalo Gallo hacia el oriente, hasta la Av. de la Prensa, luego, por la acera occidental de la Av. de la Prensa, hacia el norte, hasta la cuadra entre las calles Manuel Herrera y Fernández Salvador, en la parte posterior del edificio del Banco del Pichincha, lugar en el que se instalará la Subestación de Tracción N°2.

c) Línea de Media Tensión N°3

Desde la subestación de distribución N° 19 de la EEQ, por la acera occidental de la calle Aguirre, hasta la calle Legarda; por la acera sur de ésta hacia el oriente, hasta la calle Huachi; por la acera occidental de la calle Huachi hacia el sur, hasta la calle Figueroa; por la acera sur de ésta, hacia el oriente, hasta la calle Guerrero; por la acera occidental de la calle Guerrero, hacia el sur, hasta la calle Sabanilla; y, por la acera norte de ésta, hacia el oriente, hasta la acera oriental de la Av. Diego de Vásquez, donde se instalará la Subestación de Tracción N°3.

d) Línea de Media Tensión N°4

Desde la subestación de distribución N° 19 de la EEQ, por la acera occidental de la calle Aguirre, hasta la calle Legarda; por la acera sur de ésta hacia el oriente, hasta la calle Machala; por la acera oriental de la calle Machala hacia el norte, hasta la calle Cuicocha; por la acera norte de ésta, hacia el oriente, hasta la calle 25 de Mayo; por la acera oriental de la calle 25 de Mayo, hacia el norte, hasta la calle Ramón Chiriboga; por la acera sur de ésta, hacia el oriente, hasta la acera oriental de la Av. Diego de Vásquez, y por esta acera hacia el norte hasta la terminal La Ofelia del Trolebús, donde se instalará la Subestación de Tracción N°4.

4.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CANALIZACIÓN

Para las canalizaciones en la que se instale las líneas de media tensión, se considera las “Normas Para Sistemas de Distribución” de la Empresa Eléctrica Quito, cuyas especificaciones son las siguientes:

Las canalizaciones para líneas de media tensión, estarán formadas fundamentalmente por 1 tubo de P.V.C. reforzado de 160 [mm] de diámetro. Las canalizaciones estarán recubiertas por un prisma de hormigón para el caso de canalizaciones bajo calzada; ó, de arena para canalizaciones bajo acera.

La tubería estará alojada en zanja de 500 [mm] de ancho y a una profundidad variable no inferior a 650 [mm] de la superficie del prisma a la cota de enrase. Para aceras, la profundidad de la zanja varía entre 80[cm] y 1[m]. Cuando la canalización esté atravesando una calzada, la profundidad variará entre 1.2 y 1.5[m]. En este caso se instalarán dos tubos en la canalización para prever futuros trabajos.

Los prismas irán identificados mediante una capa de ladrillo y cinta señalizadora para el caso de canalizaciones no hormigonadas.

Las canalizaciones unirán pozos de registro de 1 x 1[m]., construidas de hormigón simple con tapa de hierro fundido, donde ocurren cambios en la dirección, donde se alojan empalmes o se realizan actuaciones de mantenimiento y comprobaciones; en todo caso, la separación máxima entre pozos de registro no deberá ser mayor que 60[cm]. En la Figura 4.2. se indica el diseño de las canalizaciones y los pozos de revisión.

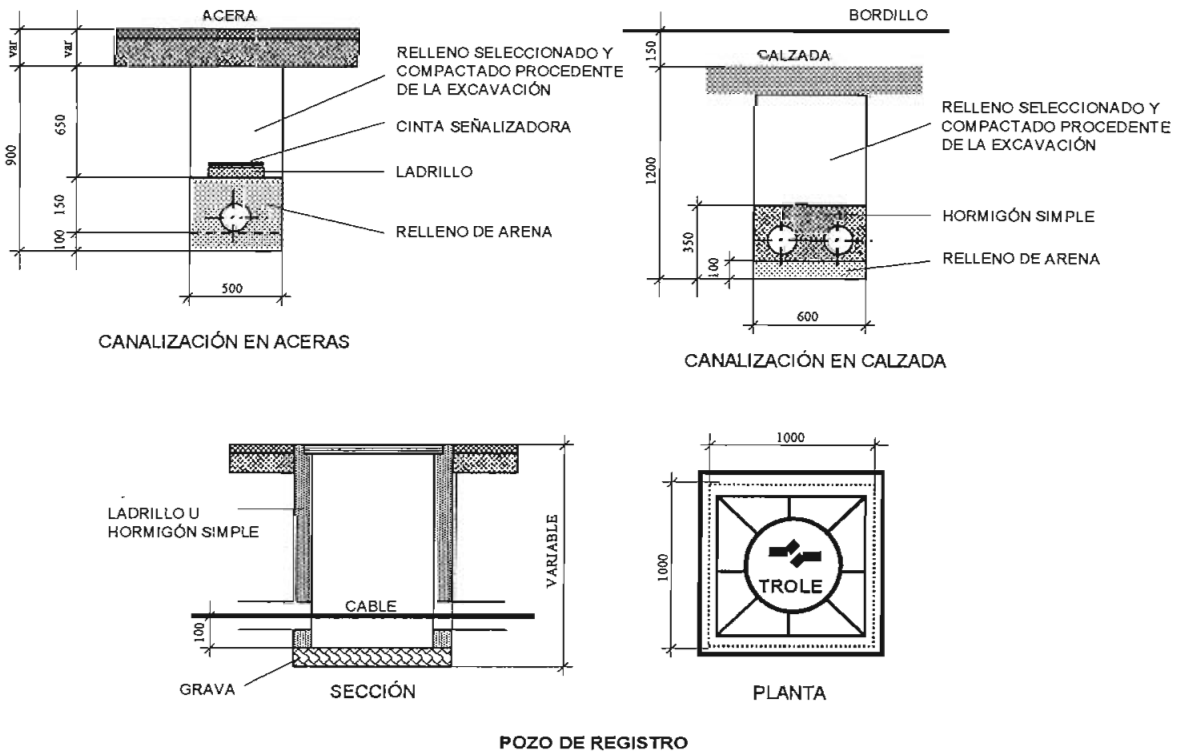


Figura 4.2. Detalles de la canalización tipo

4.6 LISTA DE MATERIALES REQUERIDOS

A continuación, en la Tabla 4.8, se presenta el resumen de los materiales necesarios para la construcción de las 4 líneas de media tensión requeridas en el proyecto.

| ITEM | CANTIDAD | UNIDAD | CONCEPTO |
|------|----------|--------|--|
| 1 | 2,270 | metros | Cable subterráneo VOLTALENE HF 3x95/31mm ² , 8.7/15[kV] |
| 2 | 11,718 | metros | Cable subterráneo VOLTALENE H 1x50/35mm ² , 15/25[kV] |
| 3 | 7 | Ud. | Empalme para cable subterráneo VOLTALENE HF 3x95/31mm ² , 8.7/15[kV] |
| 4 | 6 | Ud. | Empalme para cable subterráneo VOLTALENE H 1x50/35mm ² , 15/25[kV] |
| 5 | 12 | Ud. | Botella terminal para cable subterráneo VOLTALENE HF 3x95/31mm ² , 8.7/15[kV] |
| 6 | 12 | Ud. | Botella terminal para cable subterráneo VOLTALENE H 1x50/35mm ² , 15/25[kV] |
| 7 | 5,086 | metros | Canalización en acera |
| 8 | 680 | metros | Canalización en calzada |
| 9 | 169 | Ud. | Pozo de revisión con tapa |

Tabla 4.8. Lista de materiales

CAPÍTULO 5. DISEÑO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO

En el desarrollo del presente capítulo se determinarán los distintos elementos que formarán parte de la Línea Aérea de Contacto (L.A.C.); para lo cual es necesario definir preliminarmente el concepto de L.A.C. y sus elementos constitutivos..

5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO

La Línea Aérea de Contacto, L.A.C., es el conjunto de elementos que se utilizan en la distribución de la energía eléctrica, desde las subestaciones de tracción, hasta los vehículos trolebuses, a través de un par de hilos de contacto y sus equipos de suspensión.

Los elementos que conforman la L.A.C. son:

- ✓ Hilo de contacto
- ✓ Feeder de alimentación
- ✓ Conjuntos de suspensión
- ✓ Encarriladores
- ✓ Armarios de maniobra
- ✓ Aisladores de sección
- ✓ Cimentaciones
- ✓ Postes de hormigón
- ✓ Postes metálicos

Para facilidad del diseño se ha definido un conjunto de "estructuras típicas" que abarcarán los elementos mínimos necesarios para cada aplicación. Estas estructuras serán utilizadas de acuerdo a los requerimientos geométricos de la trayectoria.

En primer lugar se definirá cada uno de los elementos necesarios para las estructuras típicas, así como también los cálculos respectivos de sus esfuerzos; luego se establecerá las distintas clases de estructuras requeridas, para posteriormente realizar el diseño completo de la L.A.C.

5.2. ELEMENTOS DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO.

5.2.1. HILO DE CONTACTO

Es el par de hilos conductores de cobre electrolítico, de donde toma la alimentación el Trolebús. Este par de conductores formarán un circuito cerrado continuo que solamente se interrumpirá en los aisladores de sección a la salida de cada subestación de tracción para conformar tramos de circuitos independientes.

Las características del hilo de contacto para el diseño de la L.A.C., se presentan en la Tabla 5.1.

| PARAMETRO | VALOR |
|---------------------------|--------------|
| Peso | 1.35 [kg/m] |
| Tensión de tendido a 20°C | 747[kg] |
| Alargamiento a la rotura | 6.5% |
| Carga de rotura | 5,580[kg] |

Tabla 5.1. Especificaciones Técnicas del hilo de contacto

Para la instalación del hilo de contacto en la L.A.C. se debe considerar los parámetros de instalación que se indican a continuación.

5.2.1.1. Vano del hilo de contacto.

Es el tramo de hilo de contacto, que debido al peso del mismo, forma una curva suspendida por sus dos extremos situados a la misma altura. Para facilitar los cálculos se aproxima esta curva a una parábola como se puede observar en la Figura 5.1.

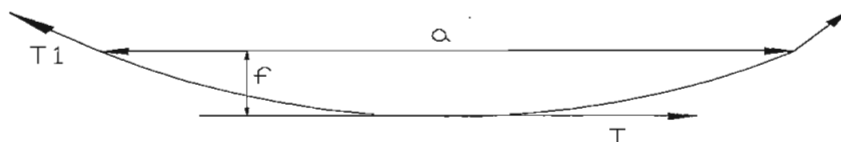


Figura 5.1. Representación del Vano del Hilo de Contacto

De acuerdo a la forma de la curva de la Figura 5.1., se establece la siguiente ecuación:

$$f = \frac{p \cdot a}{8 \cdot T} \quad (5.1)$$

Donde: *f*: flecha del hilo de contacto [m]
p: peso del hilo de contacto [kg/m]
a: longitud máxima del vano [m]
T: tensión del hilo de contacto [Kg]

Se define como flecha a la distancia entre el punto más bajo del vano y los puntos fijos de contacto.

En la Tabla 5.2. se presentan los valores para las flechas de los diferentes vanos, en función de la tensión del hilo de contacto. Cabe indicar que la flecha del vano depende también de la temperatura del ambiente.

Los valores que constan en la Tabla 5.2., se han establecido en base a una ecuación que relaciona los valores de peso y viento específicos, en función de la temperatura ambiental, además de un coeficiente de seguridad.

| Temperatura [°C] | Tensión [kg] | Vanos [m] | | | | |
|------------------|--------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 5 | 1.662 | 0.010 | 0.023 | 0.040 | 0.063 | 0.090 |
| 10 | 1.532 | 0.011 | 0.024 | 0.043 | 0.068 | 0.098 |
| 15 | 1.401 | 0.012 | 0.027 | 0.047 | 0.074 | 0.107 |
| 20 | 1.270 | 0.013 | 0.029 | 0.052 | 0.082 | 0.118 |
| 25 | 1.140 | 0.015 | 0.033 | 0.058 | 0.091 | 0.131 |

Tabla 5.2. Flecha de los diferentes vanos en función de la tensión del Hilo de Contacto

En la instalación del hilo de contacto, se debe tener en cuenta que estos valores no deben ser sobrepasados, ya que se puede producir la rotura del hilo de contacto.

5.2.1.2. Tensado del hilo de contacto

El hilo de contacto se debe instalar de tal manera que en los puntos de suspensión se produzcan cambios de alineación (quiebros), como se esquematiza en la Figura 5.2. Los punto de quiebro provocan una tensión horizontal muy importante sobre los apoyos.

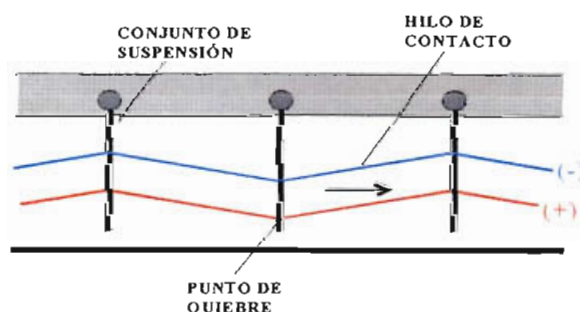


Figura 5.2. Cambios de alineación en el Hilo de Contacto

El poste se ve sometido a un mayor esfuerzo mientras mayor sea el tensado. En un apoyo normalmente descansan los cuatro hibs de contacto, 2 por cada línea, de ahí la importancia de este valor dentro del conjunto de esfuerzos del poste. En la Figura 5.3. se puede observar un esquema de las fuerzas que actúan.

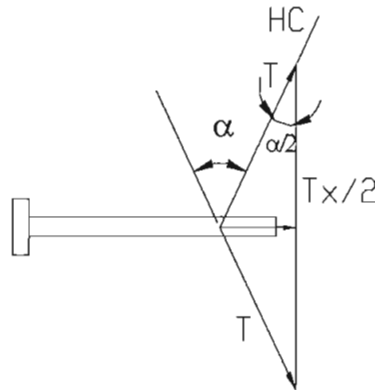


Figura 5.3. Fuerzas que actúan en las suspensiones

Se observa que la tensión del hilo, T , tiene un ángulo de quiebro $\alpha/2$ en la suspensión, el mismo que da lugar a una tensión horizontal $T_x/2$, que se denomina "tensión de atirantado", y que entre otras, debe ser soportada por el poste.

Resolviendo el triángulo que se forma entre el hilo de contacto y la normal al equipo de suspensión (Figura 5.3.), se tiene:

$$\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{T_x}{2T} \quad (5.2)$$

por lo que la tensión horizontal T_x , será:

$$T_x = 2T \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5.3)$$

Debido a que en una suspensión se tienen dos hilos de contacto, la ecuación anterior queda de la siguiente manera para la tensión total de atirantado en el poste.

$$T_{\text{ATIRANTADO}} = 4T_{\text{HC}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5.4)$$

En la Tabla 5.3 se muestra los esfuerzos por atirantado en una suspensión según el ángulo de quiebro. Se pueden observar los esfuerzos para 2 tensiones diferentes del hilo de contacto 1 000 y 1 200 [kg] que son los más comunes.

| Angulo de quiebro [°] | Tensión del Hilo de Contacto | |
|-----------------------|------------------------------|----------|
| | 1000[kg] | 1200[kg] |
| 1 | 34.91 | 41.89 |
| 2 | 69.81 | 83.77 |
| 3 | 104.71 | 125.65 |
| 4 | 139.60 | 167.52 |
| 5 | 174.48 | 209.37 |
| 6 | 209.34 | 251.21 |
| 7 | 244.19 | 293.03 |
| 8 | 279.30 | 334.83 |
| 9 | 313.84 | 376.60 |
| 10 | 348.62 | 418.35 |
| 11 | 383.38 | 460.06 |
| 12 | 418.11 | 501.75 |
| 13 | 452.81 | 543.38 |
| 14 | 487.48 | 584.97 |
| 15 | 522.11 | 626.53 |
| 16 | 556.69 | 668.03 |
| 17 | 591.24 | 709.49 |
| 18 | 625.74 | 750.89 |
| 19 | 660.19 | 792.23 |
| 20 | 694.59 | 833.51 |
| 21 | 728.94 | 874.73 |
| 22 | 763.24 | 915.89 |
| 23 | 797.47 | 956.97 |
| 24 | 831.65 | 997.98 |
| 25 | 865.76 | 1038.91 |

Tabla 5.3. Esfuerzos por Atirantado en una suspensión según el ángulo de quiebro

En la Figura 5.4. se grafica la tensión de atirantado en función de la tensión del hilo de contacto.

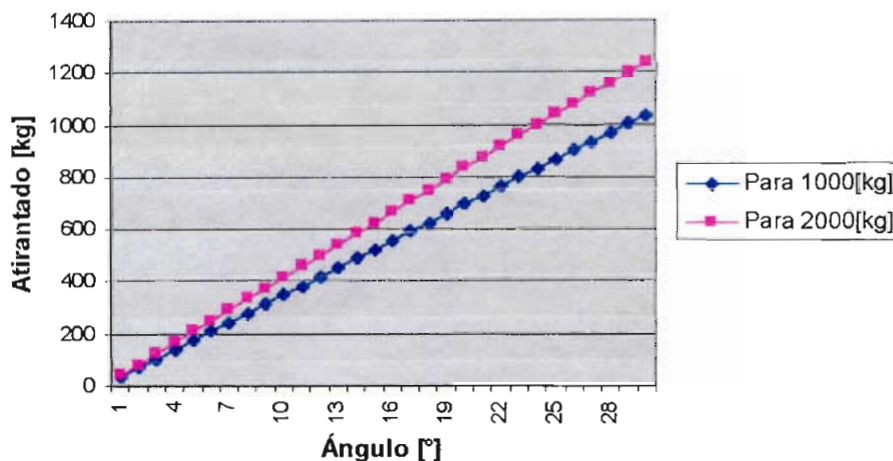


Figura 5.4. Tensión de Atirantado en función de la Tensión del Hilo de Contacto.

5.2.1.3. Esfuerzos producidos por el viento en el hilo de contacto

Para el cálculo de los esfuerzos producidos por el viento, se considera una velocidad del viento de 120[km/h] ^[5.1]

La ecuación en base a la cual se calcula el esfuerzo en el hilo de contacto debido a la acción del viento es:

$$P_{VIENTO} = 2 \cdot C_p \cdot L_{VANO} \cdot \phi_{HC} \cdot (V_{VIENTO})^2 \quad (5.5)$$

Donde: P_{VIENTO} : Esfuerzo debido al viento sobre los hilos de contacto en [Kg]
 C_p : Coeficiente de forma por redondez del hilo (0.00455) ^[5.2]
 L_{VANO} : Longitud del vano

[5.1] Dato obtenido de Estadísticas del Instituto Geográfico Militar

[5.2] Datos en tabla de especificaciones del hilo de contacto

$$\begin{aligned} \phi_{HC} &: \text{Diámetro del hilo de contacto (14.6 mm)} \\ V_{VIENTO} &: \text{Velocidad del viento = 120[km/h]} \end{aligned}$$

De donde se obtiene:

$$P_{VIENTO} = 2 \cdot 0,00455 \cdot 0,0146 \cdot (120)^2 \cdot L_{VANO}$$

$$P_{VIENTO} = 1,913 \cdot L_{VANO}$$

5.2.2. FEEDERS DE ALIMENTACIÓN

Está formado por el par de conductores (positivo y negativo) que une la subestación de tracción con los hilos de contacto a través de los seccionadores. De acuerdo a los datos de corriente calculada en el Capítulo 2, se procede a calcular la sección requerida para los conductores del feeder.

Las características para los conductores a utilizarse como feeders, son las siguientes:

| PARAMETRO | DESCRIPCION |
|------------------------------------|--|
| Tipo | RETENAX FLAM FA |
| Sección | 400mm ² |
| Aislamiento | Polietileno reticulado XLPE. Espesor 2 mm. $\phi = 27.3\text{cm}$ |
| Asiento de armadura | PVC. Espesor nominal: 0.5mm |
| Cubierta exterior | PVC Color negro ϕ nominal = 35.9 cm Espesor nominal 2.1 mm |
| Peso aproximado | 4.21 [kg/m] |
| Resistencia Eléctrica | 0.047[Ω/km] a 20°C |
| Reactancia Inductiva | 0.104[Ω/km] a 60[Hz] |
| Tensión máxima | 1.2 [kV] |
| Temperatura máxima admisible | En régimen permanente 90°C En régimen de c.c 250° C |
| Intensidad de cortocircuito máxima | 56.8kA. Durante 1 seg |
| Intensidad de servicio | Enterrado directamente a 700mm 705 [A] Al aire a 40°C 720 [A] |

Tabla 5.4. Especificaciones del conductor de los Feeders de Alimentación

5.2.3. CONJUNTOS DE SUSPENSIÓN

Son aquellos elementos que varían en función del ángulo de quiebro del hilo de contacto, se encargan de sostener y aislar a los hilos de contacto, tienen como función adicional el de transferir las tensiones mecánicas a los postes y cimentaciones.

En la Figura 5.5. se grafican como ejemplo dos tipos de conjuntos de suspensión, así como también una de las estructuras tipo (Estructura con ménsula simple y tirante)

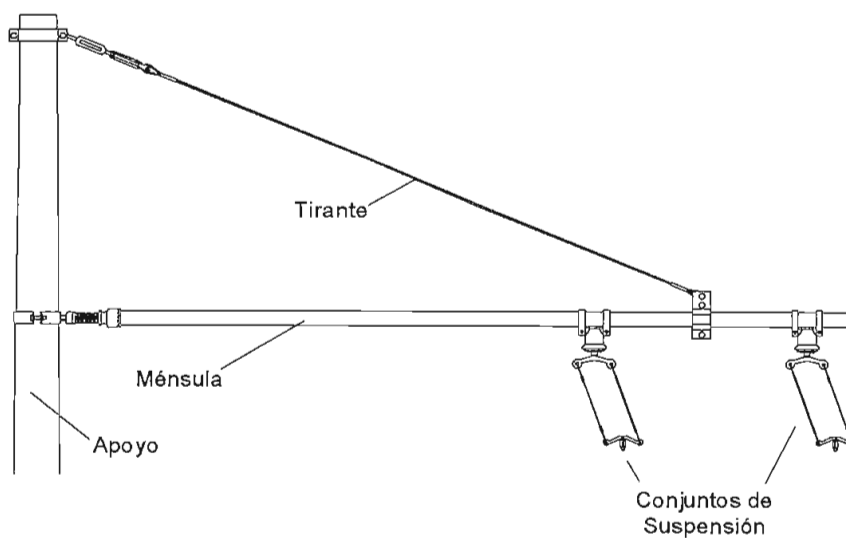


Figura 5.5a. Estructura típica con ménsula simple y tirante

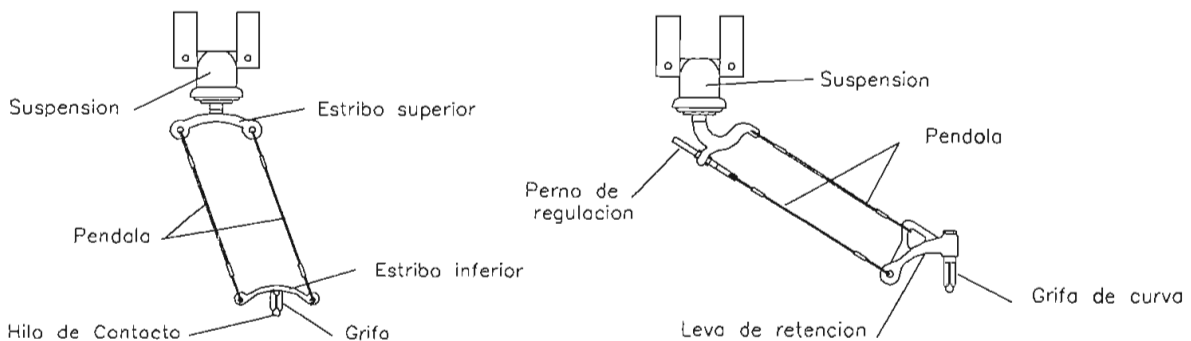


Figura 5.5b. Conjuntos de Suspensión en recta y en curva

A continuación se describe los componentes de los conjuntos de suspensión.

5.2.3.1. Cables transversales

Son utilizados en aquellos casos en los que no es posible utilizar ménsulas para las suspensiones de la L.A.C. En la Tabla 5.5. se describen las características más importantes de los cables transversales:

| PARÁMETRO | ESPECIFICACIÓN |
|-----------------|-----------------------|
| Material | acero galvanizado |
| Sección | 35 [mm ²] |
| Denominación | Cordón |
| Composición | 1x7+0 |
| Diámetro | 7[mm] |
| Superficie | Galvanizada |
| Peso aproximado | 0,275[kg/m] |

Tabla 5.5. Características principales de los cables transversales

5.2.3.2. Ménsula

Es un tubo de sección circular que se ubica en forma perpendicular y se lo fija al poste, aislándolo en el punto de unión. La unión ménsula - poste es articulada, lo cual permite el giro horizontal de la ménsula.

La ménsula se encuentra fabricada con tubo de acero galvanizado con el fin de que las piezas que estén relacionadas a ellas sean idénticas en su ensamblaje.

La longitud de la ménsula depende de la distancia del poste al eje del carril exclusivo del trolebús, siendo su longitud máxima 6 [m]. En la Tabla 5.6 se pueden observar las características más relevantes de las ménsulas.

| PARÁMETRO | ESPECIFICACIÓN |
|--------------------|-------------------------|
| Diámetro | 76.1[mm] |
| Espesor | 5[mm] |
| Área | 1115[mm ²] |
| Momento de Inercia | 70.58[cm ⁴] |
| Módulo resistente | 18.57[cm ³] |
| Radio de giro | 2.51[cm] |
| Peso | 8.92[kg/m] |
| Calidad | ST-52 |

Tabla 5.6. Características principales de las ménsulas

Para aislar el tubo de la ménsula del apoyo al que se sujeta, se intercala un aislador cuyas características se indican en la Tabla 5.7.:

| PARAMETRO | ESPECIFICACIÓN |
|------------------------------|--|
| Tipo | IPC 2 |
| Material | Poliamida 6 negro, tratado contra las radiaciones ultravioletas |
| Longitud del aislante | 100[mm] después del acoplamiento al reductor de ménsula y al casquillo de anclaje. |
| Peso | 610[g] |
| Carga de rotura en tracción | 600[daN] |
| Límite eléctrico bajo lluvia | 7000Vc.c. 25000 Vc.a. |

Tabla 5.7. Características principales del aislador entre la ménsula y el apoyo al que está sujeta

5.2.3.2.1. *Esfuerzo producido por el peso de la ménsula*

Es una función de la longitud de la ménsula y de su peso unitario. Para determinar el esfuerzo devengado en el poste por dicho peso, se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{PESO}} = L_{\text{MENSULA}} \cdot P_{\text{UNITARIO}} \quad (5.6)$$

Donde: E_{PESO} : *esfuerzo que soporta el poste debido al peso de la ménsula*
 P_{UNITARIO} : *peso por metro de la ménsula = 8,92Kg/m*
 L_{MENSULA} : *longitud de la ménsula*

El esfuerzo que soporta el poste debido al peso de la ménsula, será entonces:

$$E_{\text{PESO}} = 8,92 \cdot L_{\text{MENSULA}}$$

5.2.3.3. Péndulo

Se encuentra formado por un aislador sujeto a la ménsula o transversal por bridas de sujeción, el propio péndulo de acero inoxidable de diferente tamaño y longitud, palancas de tiro o estribos de sujeción; y, grifas de sujeción a los hilos de contacto.

En la instalación, el péndulo debe tener una inclinación con respecto a la vertical mínima de 35°; esto permite que la L.A.C. tenga un grado de libertad que compense la variación de la tensión del hilo de contacto producida por efecto de la dilatación del material ante variaciones de la temperatura, pues varía su ángulo de inclinación permitiendo que exista una variación del ángulo de quiebre de la L.A.C.

Es necesario indicar que el péndulo no debe encontrarse en posición vertical ya que esto hace que el hilo de contacto tenga mayor dificultad para desplazarse en zigzag, lo que implica que la flecha del vano aumente de longitud, a esta posición se la conoce como punto duro.

5.2.3.3.1. Tipos de péndulos requeridos

De acuerdo al ángulo de quiebre, existen diferentes tipos de suspensiones, con sus respectivos péndulos, que se detallan en la Tabla 5.8., en la cual además se indica el peso de cada tipo de péndulo, lo cual permite calcular los esfuerzos que éstos producen al poste de apoyo.

| TIPO DE SUSPENSIÓN | α | Peso del péndulo [kg] |
|--------------------|----------|-----------------------|
| RECTA | 0-2,5 | 2.6 |
| CURVA TIPO 0 | 3-5 | 6.8 |
| CURVA TIPO 1 | 5.5-7.5 | 8.5 |
| CURVA TIPO 2 | 8-10 | 10.5 |
| CURVA TIPO 3 | 10.5-14 | 11.5 |
| CURVA TIPO 4 | 14.5-18 | 15.5 |

Tabla 5.8. Tipos de Suspensiones

5.2.4. ANCLAJES

Para aquellas estructuras en las cuales no es posible utilizar un poste de apoyo, por limitación de espacio físico (aceras muy pequeñas por ejemplo), para apoyar los cables transversales se utilizará anclajes a las fachadas de los inmuebles cuyos frentes dan a la ruta del trolebús. Los anclajes a las fachadas pueden ser de varios tipos, como se describe a continuación:

5.2.4.1. Anclaje en muro

Son bloques de hormigón en cuyo interior se funde un riel de ferrocarril con estribos laterales, cuyo extremo final es recogido por un cable de acero galvanizado que sujeta al equipo de suspensión.

La función del anclaje es la de soportar los esfuerzos de la L.A.C. ya sea por que estos no se encuentran en la dirección del poste o porque se produzca un anclaje de los hilos de contacto.

5.2.4.2. Anclaje de placa sandwich

Es una placa exterior metálica sostenida desde la cara interior de la pared por medio de pernos largos. En la cara interior no hay otra placa similar a la exterior, sino cuatro pequeñas placas de madera.

5.2.4.3. Anclaje de placa con varillas inclinadas

Es una placa exterior de hormigón, sostenida por cuatro varillas ancladas en la pared. Para esto se realizará en primer lugar las perforaciones inclinadas de 5cm de diámetro, se colocará las varillas en posición, y se inyectará mortero de cemento con aditivo expansivo, finalmente se soldará los extremos de las varillas con una pequeña malla, y se fundirá la placa de hormigón.

5.2.5. ENCARRILADORES

Los encarriladores son elementos propios de una línea aérea de contacto donde funcionan trolebuses y tienen como función guiar a las pértigas del trolebús en el momento de su acoplamiento a la línea.

5.2.6. ARMARIOS DE MANIOBRA

Son aquellos en los cuales van montados los tres seccionadores de apertura de cuchilla, accionados sin carga, dos de ellos para alimentar a la línea (positiva y negativa) y el tercero que cumple la función de by-pass entre las líneas, en casos de mantenimiento y/o reparación.

5.2.7 AISLADORES DE SECCIÓN

Son elementos que impiden el paso de la corriente eléctrica por los hilos de contacto. Situados cerca de las subestaciones de tracción dividen a la línea en tramos eléctricos. Son ubicados en donde los hilos de contacto tienen un ángulo de quiebro inferior a 2.5° . Esto se debe a que los aisladores de sección no están diseñados para tener esfuerzos laterales, así como también la existencia de barras ovas aislantes situadas en lugar del hilo de contacto que impiden la curvatura de los mismos. Los aisladores de sección están sujetos a la ménsula por péndolas y abrazaderas de igual manera que las suspensiones.

Los aisladores de sección se encuentran compuestos por dos tipos de aislamientos:

- ✓ La barra oval aislante emplazada a lo largo del hilo de contacto de una longitud aproximada de 40[cm]
- ✓ El aislador mecánico, ubicado a los lados de la barra oval, que se encarga de darle firmeza mecánica a la barra oval.

Los aisladores de sección tienen que montarse con una inclinación lo suficientemente adecuada para que no produzcan puntos duros en la línea.

5.2.8. POSTES

Los postes son los elementos de apoyo para los equipos de suspensión de la L.A.C. dependiendo de los esfuerzos requeridos, pueden ser postes de hormigón centrifugado o metálicos. A más de ser el elemento fundamental de apoyo de la L.A.C., se utilizarán como apoyos a las luminarias requeridas para iluminación de la vía pública.

5.2.8.1. Postes de hormigón

Son postes construidos de hormigón armado, lisos, de sección circular hueca, todos los postes tienen una altura de 11.5 [m], de la cual una vez enterrados queda una altura libre de 10 [m] sobre la superficie del macizo.

Todos los postes de hormigón están diseñados para soportar una carga máxima en punta de 500 [kg].

Se utilizará postes de hormigón cuando las suspensiones se encuentren a ambos lados del poste en recta, pues de esta forma se evitará excesivos esfuerzos por la tensión radial de los hilos de contacto al poste.

Para evitar la flexión en punta del poste solo se permite una ménsula en un lado siempre que soporte solamente el esfuerzo de una línea aérea de contacto.

5.2.8.2. Postes metálicos

Son de 2 tipos, de 8 metros y de 10 metros de altura libre, capaces de soportar un esfuerzo en punta de 1000[kg].

Los postes metálicos deberán ser de estructura tipo celosía, con tratamiento anticorrosivo y pintados.

El uso de los postes de 8 metros se basa en la existencia de líneas aéreas de alta tensión pertenecientes a la EEQ en la perpendicular del macizo que no permiten la colocación de postes de 10 metros de altura. Los postes de 8 metros son de iguales características técnicas que los de 10 metros.

5.2.8.3. Esfuerzos producidos por el viento en los postes

Para encontrar los esfuerzos producidos en los postes hay que diferenciar los postes en metálicos y de hormigón

De acuerdo a la dirección del viento los postes metálicos se comportan como una superficie continua o como una superficie con huecos. Según por tanto la dirección del viento el esfuerzo correspondiente tendrá una dirección u otra. El caso que debe tomarse a consideraciones aquel en el que el esfuerzo debido a la acción del viento se suma a los otros esfuerzos existentes. Por lo tanto el esfuerzo a considerar es aquel que el viento hace en la cara del perfil del poste. Para postes de hormigón no hay problema ya que su superficie es regular.

La ecuación general de la superficie a considerar en la presión del aire sobre los postes es :

$$S = A \left(1 + \frac{Ah}{Ac} \right) \quad (5.7)$$

Donde :
A : superficie real de los elementos de la cara que primeramente reciben el viento
Ah : área de los huecos
Ac : área de los contornos

Si el viento da al poste por la cara del perfil la superficie de los huecos es cero pues no existen, entonces la superficie real de contacto con el viento es la superficie del perfil. La ecuación 5.8 permite encontrar el esfuerzo en el poste debido a la acción del viento:

$$P_{\text{VIENTO}} = C_p \cdot S \cdot V_{\text{VIENTO}}^2 \quad (5.8)$$

Donde: P_{VIENTO} : Esfuerzo del viento sobre el poste en [Kg].
 C_p : Coeficiente de forma del poste = 0.007
 S : Superficie real de contacto del viento con el poste en [m²]
 V_{VIENTO} : Velocidad del viento = 120[Km/h]

Obteniéndose la siguiente expresión:

$$P_{\text{VIENTO}} = 0.007 \cdot S \cdot 120^2$$

$$P_{\text{VIENTO}} = 72 \cdot S$$

5.2.8.4. Cimentaciones

Tanto los postes de hormigón armado como los metálicos son fijados al suelo por medio de macizos de hormigón. Las dimensiones de los macizos son las convenientes para que los postes permanezcan estables a pesar de los esfuerzos a que se hayan sometido, con el correspondiente coeficiente de seguridad.

Estas cimentaciones se basan en la idea de que el terreno debe contrarrestar el momento de vuelco del poste, introduciendo por tanto en el cálculo de la estabilidad los empujes del terreno.

El coeficiente de compresión del terreno utilizado es de 8 [kg/cm³] para una inclinación del poste de $tg(\alpha) < 1/200$; esto evita desplazamientos no provechosos en la relación de la línea con el captador de energía. Para la construcción de los

macizos se deberá tomar en cuenta que éstos trabajan de mejor forma cuando la cota paralela a la vía es mayor que la perpendicular.

La resistencia del hormigón ha utilizarse en los macizos es de 140 [kg/cm²], por lo que se tiene las siguientes ecuaciones:

$$M_p = 11139.C_2.b.h^4 + a^2.b.(h+h_p).2200 \left(0,5 - \frac{2}{3} \sqrt{1,1 \cdot \frac{h}{b} \cdot \frac{1}{10.C_2}} \right) + 0,4.P.a \quad (5.9)$$

$$M_v = M + Q \cdot \frac{2}{3} \cdot h \quad (5.10)$$

$$K_s = \frac{M_p}{M_v} \quad (5.11)$$

Donde:

- C_2 : coeficiente de compresión (8 [Kg/cm²])
- a : ancho del bloque en metros
- b : longitud del bloque en metros
- h : altura del macizo en metros
- h_p : altura de la peana en metros
- M : momento en la base en [Kg.m]
- Q : esfuerzo cortante en [Kg]
- P : peso de apoyos y equipos en [kg]
- M_p : momento de fallo en [Kg.m]
- M_v : momento de vuelco en [Kg.m]
- K_s : coeficiente de seguridad

5.3. CÁLCULOS DE MOMENTOS

Con la obtención de los esfuerzos que intervienen en la L.A.C., se calcula el momento que estos esfuerzos producen en la base del poste para determinar el esfuerzo en punta que soporta.

La fórmula ha utilizarse para determinar los momentos es la siguiente:

$$M = C_s \cdot (M_{\text{PESO H.C.}} + M_{\text{VIENTO H.C.}} + M_{\text{VIENTO POSTE}} + M_{\text{ATIRANTADO}}) \quad (5.12)$$

Debido a que existe una gran cantidad de casos, se hará referencia a dos de ellos, considerados como genéricos sin diferenciar entre postes metálicos y de homigón.

Los dos casos a analizar, son los siguientes:

- ✓ Poste con una ménsula a un lado
- ✓ Poste con transversal

5.3.1. MOMENTOS EN ESTRUCTURA CON MÉNSULA DOBLE

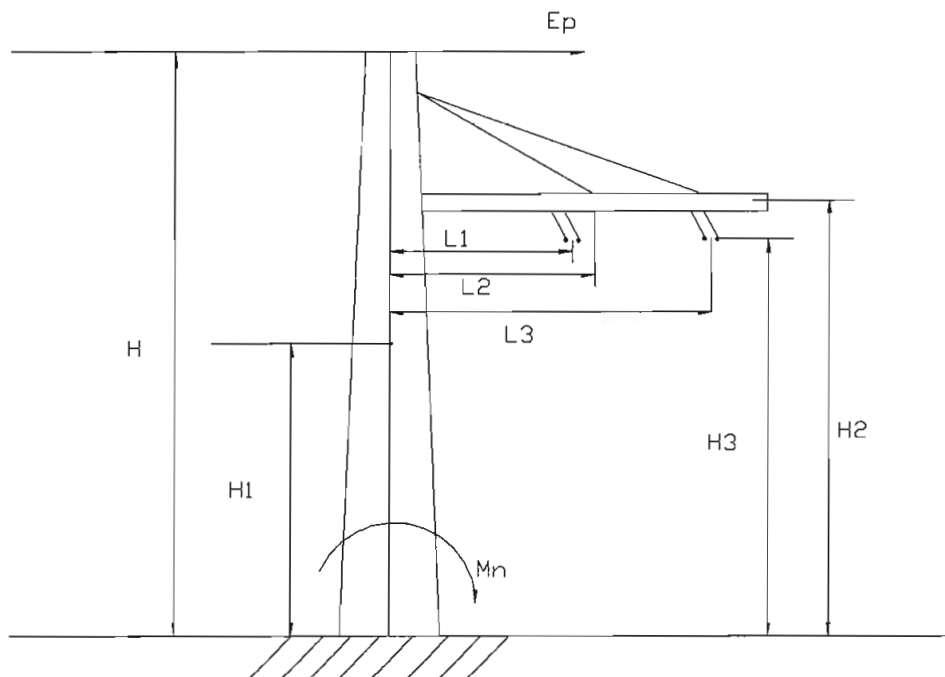


Figura 5.6. Estructura típica de poste con ménsula doble y tirante

A continuación se realizará el cálculo genérico para la estructura que se esquematiza en la Figura 5.6. Para esta estructura existen varias clases de momentos, a saber:

- ✓ Momentos debido a los pesos
- ✓ Momento debido al viento
- ✓ Momento debido al atirantado
- ✓ Momento debido a sismos

5.3.1.1. Momento debido a los pesos

Son aquellos debido al peso de los hilos de contacto y al peso de la ménsula. Aplicando el hecho de que el momento es igual al producto del esfuerzo por la distancia perpendicular desde su punto de aplicación a la dirección de la fuerza. En este caso el punto de aplicación del momento es la base del poste. Entonces las ecuaciones de los momentos debido al peso son las siguientes:

$$M_{\text{PESO MENSULA}} = E_{\text{MENSULA}} \cdot L2 \quad (5.13)$$

$$M_{\text{PESO H.C.}} = E_{\text{H.C.}} \cdot L1 + E_{\text{H.C.}} \cdot L3 \quad (5.14)$$

5.3.1.2. Momentos debido al viento

Los momentos debido al viento están relacionados con el esfuerzo que se produce sobre los hilos de contacto y sobre el poste. En este último se considera el punto de aplicación en la mitad del poste. Para estos momentos se tiene las siguientes ecuaciones :

$$M_{\text{VIENTO H.C.}} = P_{\text{H.C.}} \cdot H3 \quad (5.15)$$

$$M_{\text{VIENTO POSTE}} = P_{\text{POSTE}} \cdot H1 \quad (5.16)$$

5.3.1.3. Momento debido al atirantado

Hace referencia al esfuerzo que tiene que hacer la estructura para soportar el atirantado de los hilos de contacto. Este caso se considera el más desfavorable, ya que las dos líneas tienen la misma dirección de atirantado por lo que ambas se suman. De aquí las ecuaciones de los momentos debido al viento son las siguientes:

$$M_{\text{ATIRANTADO}} = T_{\text{ATIRANTADO}} \cdot H_3 + T_{\text{ATIRANTADO}} \cdot H_3 \quad (5.17)$$

5.3.1.4. Momento debido a sismos

Se trata de un coeficiente de seguridad adicional que se da a la instalación. Para el cálculo de un momento asociado a un sismo, se considera un coeficiente sísmico y la suma de todos los momentos anteriores. La ecuación correspondiente es:

$$M_{\text{SISMICO}} = C_s \cdot (M_{\text{PESO MENSULA}} + M_{\text{PESO H.C.}} + M_{\text{VIENTO H.C.}} + M_{\text{VIENTO POSTE}} + M_{\text{ATIRANTADO}}) \quad (5.18)$$

Donde: $C_s = 0,2$

El momento total en la base del poste es también el momento de vuelco y esta dado por la suma algebraica de todos los momentos anteriores. La ecuación es la siguiente:

$$M_{\text{BASE}} = M_{\text{PESO MENSULA}} + M_{\text{PESO H.C.}} + M_{\text{VIENTO H.C.}} + M_{\text{VIENTO POSTE}} + M_{\text{ATIRANTADO}} + M_{\text{SISMICO}} \quad (5.19)$$

Con el momento en la base del poste se puede encontrar el esfuerzo en punta del poste, el cual es el esfuerzo máximo que el poste soporta en su punta. Su ecuación es la que sigue:

$$E_{PUNTA} = \frac{M_{BASE}}{H} \quad (5.20)$$

5.3.2. MOMENTOS EN ESTRUCTURA CON TRANSVERSALES

Para este tipo de estructura, que se grafica en la Figura 5.7., el cálculo de los momentos es similar al cálculo anterior; en este caso, el esfuerzo debido al peso de la ménsula no existe y el peso del cable del transversal se considera despreciable a efectos de momentos.

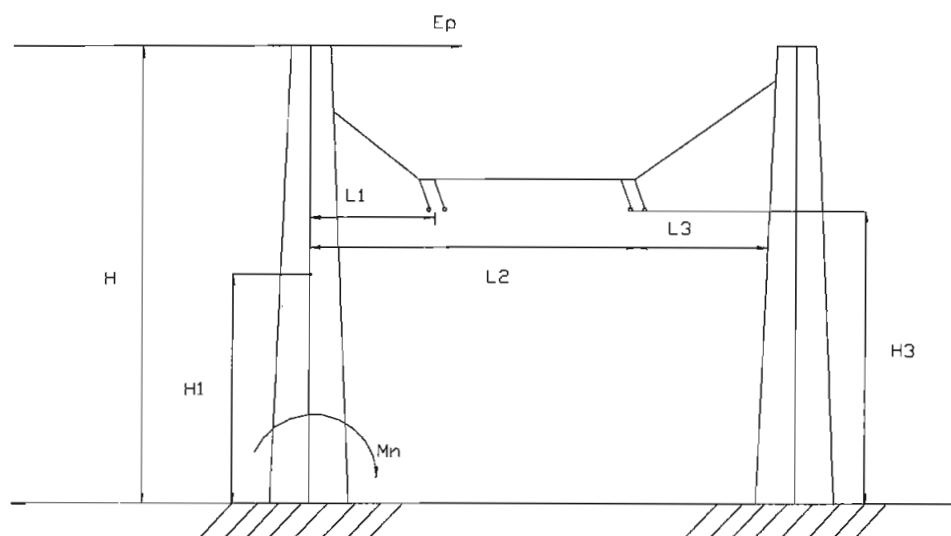


Figura 5.7. Estructura típica de transversal con dos postes

De igual forma que en el caso anterior, para el cálculo de momentos se considera el caso más desfavorable, es decir, el atirantado se encuentra siempre en la misma

dirección y el momento debido al viento está en la dirección que suma el esfuerzo del atirantado.

De esta forma se tiene los siguientes momentos:

$$M_{\text{PESO H.C.}} = E_{\text{H.C.}} \cdot L1 + E_{\text{H.C.}} \cdot L2 \quad (5.21)$$

$$M_{\text{VIENTO H.C.}} = P_{\text{H.C.}} \cdot H3 \quad (5.22)$$

$$M_{\text{VIENTO POSTE}} = P_{\text{POSTE}} \cdot H1 \quad (5.23)$$

$$M_{\text{ATIRANTADO}} = T_{\text{ATIRANTADO}} \cdot H3 + T_{\text{ATIRANTADO}} \cdot H3 \quad (5.24)$$

$$M_{\text{SISMICO}} = C_s \cdot (M_{\text{PESO H.C.}} + M_{\text{VIENTO H.C.}} + M_{\text{VIENTO POSTE}} + M_{\text{ATIRANTADO}}) \quad (5.25)$$

Donde: $C_s = 0,2$

El momento total en los postes, es la suma de todos los momentos anteriores, por lo tanto, su ecuación es la siguiente:

$$M_{\text{BASE}} = M_{\text{PESO H.C.}} + M_{\text{VIENTO H.C.}} + M_{\text{VIENTO POSTE}} + M_{\text{ATIRANTADO}} + M_{\text{SISMICO}} \quad (5.26)$$

Luego se procede a calcular el esfuerzo en punta del poste, de la siguiente forma:

$$E_{\text{PUNTA}} = \frac{M_{\text{BASE}}}{H} \quad (5.27)$$

Este mismo cálculo se debe realizar para el otro poste de la estructura, considerando las hipótesis reflejadas en el primero.

Con la base de estos cálculos genéricos que se han desarrollado, se determina los momentos de cada una de las estructuras requeridas en la L.A.C. de la Extensión Norte del Sistema Trolebús.

5.4. DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURAS TIPO

Para el diseño de la Línea Aérea de Contacto de la Extensión Norte del Sistema Trolebús, se han definido las estructuras tipo que se indican en la Tabla 5.9. El esquema de cada una de estas estructuras se presenta en el Anexo 5.1.

| ESTRUCTURAS TIPO PARA LA LÍNEA AEREA DE CONTACTO | | |
|--|--------|--|
| ITEM | NOMBRE | DESCRIPCIÓN |
| 1 | TM-1 | Estructura con ménsula simple y tirante |
| 2 | TM-2 | Estructura con ménsula larga y tirante |
| 3 | TMC-1 | Estructura con ménsula corta |
| 4 | TMC-2 | Estructura con ménsula larga |
| 5 | TPM | Estructura de péndulo en recta 0-2.5° para ménsula |
| 6 | TPM-0 | Estructura de péndulo en curva tipo 0, 3-5° para ménsula |
| 7 | TPM-1 | Estructura de péndulo en curva tipo 1, 5.5-7.5° para ménsula |
| 8 | TPM-2 | Estructura de péndulo en curva tipo 2, 8-10° para ménsula |
| 9 | TPM-3 | Estructura de péndulo en curva tipo 3, 10.5-14° para ménsula |
| 10 | TPM-4 | Estructura de péndulo en curva tipo 4, 14.4-18° para ménsula |
| 11 | TPT | Estructura de péndulo en recta 0-2.5° para transversal |
| 12 | TPT-0 | Estructura de péndulo en curva tipo 0, 3-5° para transversal |
| 13 | TPT-1 | Estructura de péndulo en curva tipo 1, 5.5-7.5° para transversal |
| 14 | TPT-2 | Estructura de péndulo en curva tipo 2, 8-10° para ménsula |
| 15 | TPT-3 | Estructura de péndulo en curva tipo 3, 10.5-14° para transversal |
| 16 | TPT-4 | Estructura de péndulo en curva tipo 4, 14.4-18° para transversal |
| 17 | TSO | Estructura de suspensión en curva con tubo oval |
| 18 | TT1 | Estructura de transversal para 1 L.A.C. |
| 19 | TT2 | Estructura de transversal para 2 L.A.C. |
| 20 | TCX | Estructura de transversal para 1 L.A.C.- tres ramas |
| 21 | TCY | Estructura de transversal para 1 L.A.C.- cinco ramas |

| ESTRUCTURAS TIPO PARA LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO | | |
|--|--------|---|
| ITEM | NOMBRE | DESCRIPCIÓN |
| 22 | TAP | Estructura de anclaje transversal a poste |
| 23 | TAP-1 | Estructura de anclaje transversal a fachada |
| 24 | TAM | Estructura de aislador de sección en ménsula |
| 25 | TAS | Estructura de aislador de sección en transversal |
| 26 | TSEC | Estructura armario seccionador de L.A.C. con latiguillos y grifas |
| 27 | TH | Poste de hormigón de 8.5[m] |
| 28 | TM | Poste metálico de 8.5[m] |

Tabla 5.10. Estructuras tipo para L.A.C.

5.5. DISEÑO DE LA L.A.C.

Una vez definidas las estructuras tipo y contando con el diseño vial de la ruta de la Extensión Norte del Sistema Trolebús (Anexo 1.1.), se ha procedido a diseñar la Línea Aérea de Contacto, para lo cual, se ha considerado los siguientes parámetros básicos:

- Vano medio: 30[m]
- Tensión del Hilos de contacto: 1000[kg]
- Para curvas de hasta 2.5° de radio, se utilizará las estructuras tipo TPM ó TPT
- Para curvas de 3 - 5° de radio, se utilizará estructuras tipo TPM-0 ó TPT-0
- Para curvas de 5.5 – 7.5° de radio, se utilizará estructuras tipo TPM-1 ó TPT-1
- Para curvas de 8 - 10° de radio, se utilizará estructuras tipo TPM-2 ó TPT-2
- Para curvas de 10.5 - 14° de radio, se utilizará estructuras tipo TPM-3 ó TPT-3
- Para curvas de 14.5 - 18° de radio, se utilizará estructuras tipo TPM-4 ó TPT-4
- Para curvas de radios mayores a 18°, se utilizará estructuras tipo TSO

Dependiendo de la disponibilidad de ubicar postes en el parterre central, se utilizarán estructuras con ménsulas, caso contrario, se utilizarán estructuras con transversales entre postes o en su defecto con anclajes a fachadas.

El diseño de la Línea Aérea de Contacto, bajo las premisas expuestas, se presenta en el Anexo 5.2.

El resumen de las características de cada una de las estructuras utilizadas en el diseño, se presenta en el Anexo 5.3. y contiene, para cada uno de los planos, la siguiente información:

- Identificación del poste,
- Tipo de estructura,
- Tipo de suspensión; y,
- Tipo de transversal.

5.5.1. LISTA DE MATERIALES

De los planos de diseño de la L.A.C. se determina los materiales requeridos para la construcción de la Línea Aérea de Contacto, cuyo resumen se presenta a continuación en la Tabla 5.11.

| ITEM | CANT. | UND. | CONCEPTO |
|------|--------|------|--|
| 1 | 66 | Ud. | TM-1 Estructura con ménsula simple, tirante y poste de hormigón |
| 2 | 106 | Ud. | TM-3 Estructura con ménsula doble, tirante y poste de hormigón |
| 3 | 155 | Ud. | TH Poste de hormigón de 8.5m |
| 4 | 35 | Ud. | TT1 Estructura de transversal para 1 LAC |
| 5 | 66 | Ud. | TT2 Estructura de transversal para 2 LAC |
| 6 | 170 | Ud. | TPM Estructura de péndulo en recta 0-2.5° para ménsula |
| 7 | 90 | Ud. | TPM-0 Estructura de péndulo en curva tipo 0, 3-5° para ménsula |
| 8 | 8 | Ud. | TPM-1 Estructura de péndulo en curva tipo 1, 5.5-7.5° para ménsula |
| 9 | 2 | Ud. | TPM-2 Estructura de péndulo en curva tipo 2, 7.5-8.5° para ménsula |
| 10 | 93 | Ud. | TPT Estructura de péndulo en recta 0-2.5° para transversal |
| 11 | 41 | Ud. | TPT-0 Estructura de péndulo en curva tipo 0, 3-5° para transversal |
| 12 | 2 | Ud. | TPT-1 Estructura de péndulo en curva tipo 1, 5.5-7.5° para transversal |
| 13 | 2.800 | m. | cable de acero galvanizado de 35mm ² |
| 14 | 25.400 | m. | Hilo de Cobre para la Línea Aérea de Contacto |

Tabla 5.11. Lista de materiales requeridos para la LAC

CAPÍTULO 6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS TROLEBUSES

En el desarrollo de este capítulo se definirán las especificaciones técnicas más relevantes de los vehículos trolebuses requeridos para la Extensión Norte del Sistema Trolebús.

Las especificaciones se realizan tomando en cuenta las características de los vehículos trolebuses que el Municipio de Quito adquirió en la Primera Fase de la Segunda Etapa del Sistema Trolebús, considerando los elementos que han causado ciertos problemas técnicos en la operación.

En primer lugar se realizará una descripción funcional de un trolebús, para luego pasar a especificar sus componentes fundamentales.

6.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL TROLEBÚS

En la Figura 6.1., se esquematiza el funcionamiento de un vehículo trolebús como los que dispone el Municipio de Quito, similares a los requeridos para la Extensión Norte del sistema, cuyas especificaciones se desarrollarán más adelante.

Al vehículo Trolebús se puede definir como una unidad de transporte urbano masivo, que utiliza como accionamiento de tracción principal un motor eléctrico. En el caso de los trolebuses que operan en Quito, posee además un sistema de tracción de emergencia a través de un motor diesel.

Los dos sistemas de accionamiento actúan sobre el tercer eje del vehículo, por medio de un diferencial que transmite la fuerza motriz, ya sea del motor eléctrico o del motor diesel. El diferencial, que es un sistema de engranajes mecánicos, es

comandado por un sistema electro-neumático que acopla el eje motriz a cada uno de los sistemas de tracción, como se observa en la Figura 6.1.

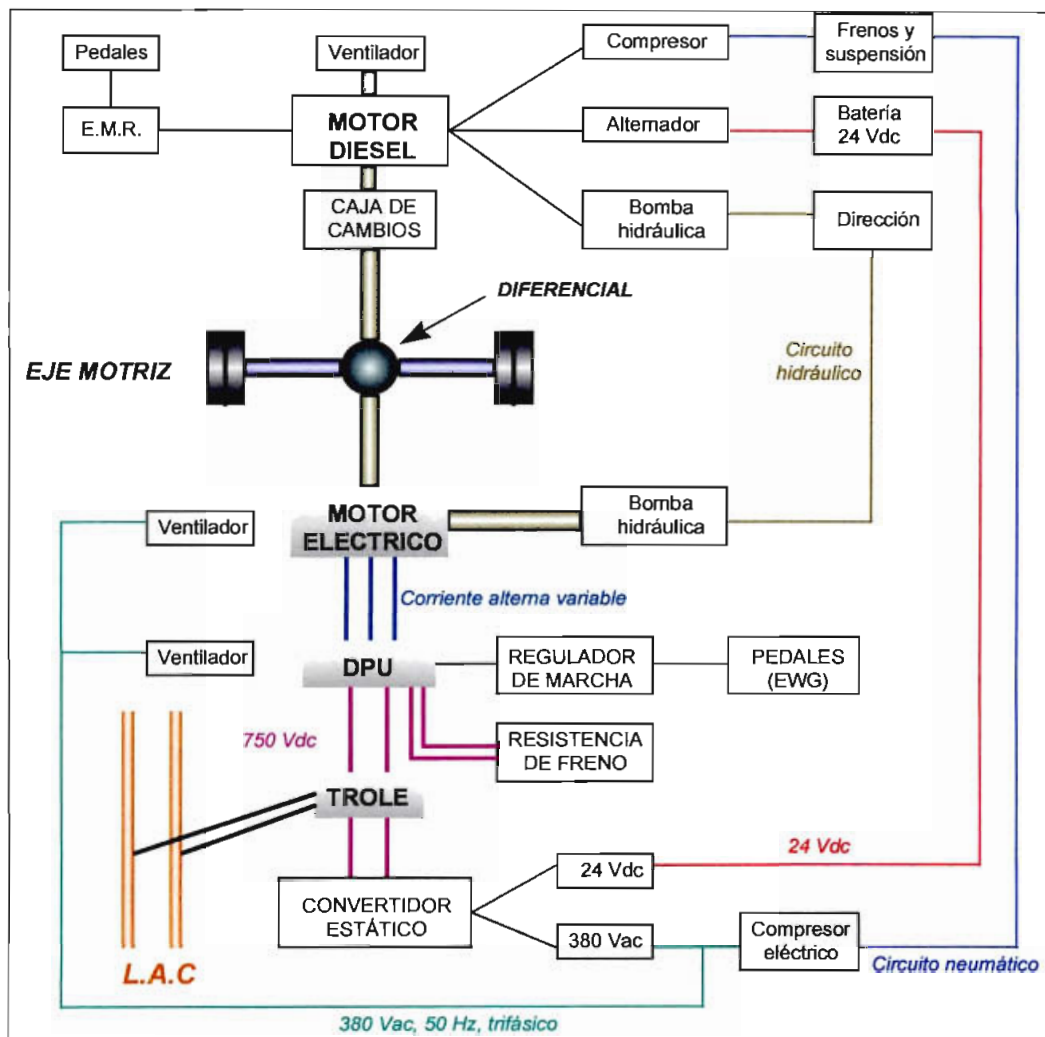


Figura 6.1. Esquema de funcionamiento de un trolebús^[6.1]

6.1.1. SISTEMA DE TRACCIÓN A DIESEL

Cuando el trolebús opera con el motor diesel auxiliar, su funcionamiento es similar a cualquier autobús convencional, es decir, utiliza diesel como fuente de energía primaria y la transforma en energía mecánica mediante un motor de combustión

[6.1] Tomado del "Informe DIR-02-97"; Características del Proyecto Trolebús Segunda Etapa – Extensión Sur"; Unidad Ejecutora del Proyecto Trolebús, septiembre de 1997

interna. El control del par y la velocidad del sistema de tracción diesel es comandado por el conductor a través del pedal de aceleración. El sistema de aceleración del motor diesel es controlado electrónicamente por el EMR (Regulador Automático de Marcha).

Al motor diesel se acopla una caja de cambios automática a través de la cual se transmite la fuerza motriz al diferencial, por medio de un eje de transmisión cardan.

Como en cualquier otro vehículo, al motor diesel se encuentran acoplados mecánicamente los equipos auxiliares necesarios para la operación del vehículo, como son: compresor, alternador, bomba hidráulica y ventilador.

El compresor suministra el aire comprimido necesario para el funcionamiento de frenos, suspensión, mando de puertas y mando del pantógrafo. El alternador se encarga de cargar las baterías del vehículo, que suministran la energía eléctrica para el arrancador del motor diesel, iluminación, etc. La bomba hidráulica se encarga de mantener la presión y el caudal del aceite necesario para el funcionamiento de la dirección asistida. El ventilador, conjuntamente con un radiador, se ocupa de la refrigeración del motor diesel y de la caja de cambios.

6.1.2. SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA

Cuando el trolebús opera con su sistema de tracción eléctrica, la fuente de energía primaria proviene de la Línea Aérea de Contacto (L.A.C.). Esta energía eléctrica es de corriente continua, con un valor nominal de tensión de 750[Vdc].

Durante el servicio de tracción eléctrica, el eje de transmisión cardan del accionamiento a diesel permanece automáticamente desacoplado.

El trolebús toma la corriente de la L.A.C. a través de los tomacorrientes (Pantógrafo o trole). El motor de tracción eléctrica, es un motor trifásico de

inducción tipo jaula de ardilla, con ventilación forzada, que es alimentado por medio de un circuito ondulator, que no es más que un convertidor estático inversor, que transforma la tensión de alimentación continua (750[Vdc]) en una tensión alterna variable, tanto en amplitud como en frecuencia, a fin de controlar la velocidad y el par del motor de tracción.

Los valores deseados de velocidad y de par del motor eléctrico se calculan de acuerdo con los requerimientos del conductor, quien comanda los pedales de aceleración y freno, y también considerando las condiciones dinámicas de la máquina y estado del vehículo, por ejemplo, el nivel de carga, ángulo de la articulación, sentido de marcha, etc. para ello se dispone de un sistema digital microprocesado (regulador de marcha), que se encarga de leer los requerimientos del conductor a través de los pedales digitales de aceleración y freno (EWG), controlando el motor eléctrico de tracción en cada instante.

El motor de tracción, como toda máquina eléctrica es reversible, es decir, si se le proporciona energía eléctrica se produce el efecto motor (el resultado es movimiento del eje del motor); y, si se da movimiento al eje y se excita el campo, se tiene el efecto generador (genera energía eléctrica). Con el motor de tracción utilizado, esto se logra controlando el deslizamiento de la máquina (S). Si $S < 1$, se tiene efecto motor; mientras que si $S > 1$, se tiene efecto generador.

Este principio se utiliza en el trolebús para tener frenado dinámico, es decir, cuando el trolebús por inercia se mueve, el regulador de marcha actúa sobre el convertidor estático inversor a fin de tener deslizamiento mayor que 1 en la máquina, con lo cual se tiene efecto generador.

La energía generada por el motor durante la fase de frenado es devuelta a la L.A.C., bajo ciertas condiciones, obteniéndose de esta forma recuperación de energía. Cuando no hay posibilidad de aprovechar esta energía a través de otros consumidores conectados a la misma red, se realiza el frenado reostático, en la que la energía cinética del vehículo se transforma en calor sobre las resistencias de freno.

Para alimentar a los sistemas auxiliares del trolebús, como son: compresor, ventilación, cargador de baterías y bomba hidráulica se dispone de un circuito eléctrico inversor, que se lo denomina "convertidor estático" o "convertidor de abordó", el mismo que se alimenta con la tensión de la L.A.C., y que suministra a su salida 24[Vdc] para recargar baterías y 380[Vac], trifásicos, 50[Hz], para alimentar los motores eléctricos que accionan al compresor eléctrico, y a los ventiladores tanto del convertidor estático de motor de tracción, como del motor de tracción.

Los sistemas de tracción Diesel y Eléctrico, así como todos los equipos eléctricos y mecánicos que requiere el vehículo, se encuentran montados en un chasis bastidor articulado, sobre el cual también se ha montado una carrocería acorde al transporte de pasajeros, con 46 plazas de asientos y capacidad total de 180 pasajeros.

A continuación se presentan las especificaciones técnicas de los equipos constitutivos de los trolebuses requeridos para la Extensión Norte del Sistema Trolebús.

6.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO DE TRACCIÓN DIESEL Y DEL CHASIS

6.2.1. MOTOR DIESEL.

Deberá alcanzar una potencia efectiva no menor que 230 [kW] a la altura de Quito (2.850 metros sobre el nivel del mar), será: de cuatro tiempos, turbocargado, postenfriado, en línea, horizontal, de fácil acceso y desmontaje, será refrigerado por agua mediante radiador con ventilador automático.

Será económico en cuanto a mantenimiento y consumo de combustible, garantizándose un rendimiento superior a 2.5[km] por cada litro de combustible, con el vehículo a plena carga.

El motor será de inyección directa, controlado electrónicamente, a fin de obtener un rendimiento óptimo del motor. El control electrónico deberá permitir hacer un análisis de funcionamiento y un diagnóstico de averías, por medio de un hardware y software específico. El motor será ecológico y cumplirá la norma EURO II.

6.2.2. CAJA DE CAMBIOS

Será automática, deberá corresponder exactamente a la potencia y par efectivos del motor diesel, poseerá retardador hidráulico, será de fácil acceso y mantenimiento.

El sistema de control de la caja de cambios será electrónico, con sistema de emisión de carga eléctrico, de esta forma se evitarán los problemas de descalibración que se tiene al usar el sistema de varillaje.

El control electrónico deberá permitir hacer un análisis de funcionamiento y un diagnóstico de averías, por medio de un hardware y software específico

El teclado de control será de tres pulsadores (D/N/R) en el tablero de instrumentos.

6.2.3. CHASIS

El chasis deberá constituir una base sólida para el trolebús, y deberá soportar los esfuerzos más exigentes derivados del peso bruto del vehículo (30 Ton. aproximadamente). Además, deberá tener un peso reducido y una elevada

capacidad de carga. El piso del vehículo deberá estar al nivel de las plataformas de las paradas de manera que se permita una subida y bajada cómoda y rápida de los pasajeros.

La infraestructura del chasis será de un bastidor de rejilla de ejecución autoportante, será construido en tubo cuadrado de acero de alta resistencia y bajo peso (R St 42-2) formando una estructura en celosía. Los perfiles correspondientes a largueros y travesaños deberán estar reforzados por perfiles diagonales y almas verticales, soldados entre sí con soldadura de hilo continuo bajo gas protector, según las normas respectivas.

Las medidas de los perfiles serán de al menos: 20x30x1[mm] y/o 80x50x3[mm]

La construcción del chasis se deberá realizar por partes, cada una de ellas se deberá ensamblar inicialmente en su correspondiente matriz. El ensamblado final del conjunto, se deberá realizar con maquinaria de alta precisión, que garantice su perfecta alineación, de tal manera que se forme un conjunto homogéneo con un alto grado de rigidez por sí solo. En caso de accidente, este tipo de construcción deberá permitir sustituir únicamente la parte dañada.

La parte frontal del chasis deberá ser de armazón estructural delantera, con montantes de esquina hasta la altura del antepecho.

El bastidor deberá ser sometido a un baño por inmersión de pintura por cataforesis, que penetrará hasta el último rincón de la estructura, tanto en el interior como en el exterior de los perfiles.

6.2.3.1. Rango de dimensiones:

A continuación en la Tabla 6.1. se presenta los límites mínimos y máximos para las principales longitudes del chasis. Se establece un rango para permitir la participación de diferentes marcas de chasis disponibles en el mercado.

Además se indica los rangos mínimos requeridos para el círculo de viraje de los trolebuses.

| DENOMINACION | MÍNIMO | MAXIMO |
|--|----------------------|----------------------|
| Distancia entre ejes delantero y central | 5.500 mm | 5.800 mm. |
| Distancia entre ejes central y propulsor | 5.900 mm | 6.300 mm. |
| Ancho de vía delante/centro/detrás | 2.080/1.802/1.800 mm | 2.080/1.802/1.800 mm |
| Neumáticos | 275/70 R 22,5 | 275/70 R 22,5 |
| Longitud coche delantero | 9.000 mm | 10.100 mm |
| Longitud del coche trasero | 7.000 mm | 7.500 mm |
| Ancho del autobastidor | 2.400 mm | 2.525 mm |
| Ancho del vehículo carrozado | 2.500 mm | 2.500 mm |
| Voladizo delantero | 2.540 mm | 2.580 mm. |
| Voladizo trasero | 3.000 mm | 3.100 mm. |
| Distancia eje central/punto de articulación | 1.800 mm | 1.850 mm. |
| Distancia del borde más alto del chasis al suelo | 690 mm | 700 mm. |
| Ángulo de rampa delantero | 7° | 9° |
| Ángulo de rampa trasero (sin encapsulación del motor) | 7° | 9° |
| Ángulo de rampa trasero (con encapsulación del motor) | 7° | 9° |
| Diámetro mínimo del círculo de viraje: | | |
| A 90° | 13.000 mm | 14.000 mm. |
| A 180° | 22.000 mm | 22.500 mm. |
| A 270° | 23.500 mm | 24.000 mm. |
| A 360° | 23.800 mm | 24.200 mm. |

Tabla 6.1. Rango de dimensiones del chasis

6.2.4. SUSPENSIÓN

La suspensión delantera deberá ser de aire, con 2 fuelles neumáticos intercambiables, 4 amortiguadores telescópicos, 3 brazos longitudinales y 1 transversal, 1 válvula de nivel de altura, 1 amortiguador de dirección, 1 barra estabilizadora.

La suspensión central y posterior deberá ser de aire, con 4 fuelles neumáticos intercambiables, 2 brazos longitudinales y 2 diagonales en disposición triangular, 4 amortiguadores, 2 válvulas de mando de altura.

Se deberá garantizar que el vehículo mantenga la altura entre el piso y las plataformas de acceso de pasajeros constante en cualquier condición de carga del trolebús.

La superficie inferior de soporte de los fuelles neumáticos, deberán tener una protección exterior contra la adherencia de polvo y piedras en la base del fuelle.

Las válvulas reguladoras de nivel de altura, deberán estar situadas en un lugar protegido de la adherencia del polvo y suciedad, y no tendrán rozamiento con cables ni cañerías.

6.2.5. DIRECCIÓN

La dirección será servoasistida de bolas circulantes. El circuito hidráulico de la servodirección será alimentado por dos bombas hidráulicas, una para el sistema de tracción eléctrico y otra para el sistema de tracción a diesel.

Para el sistema de tracción a diesel, la bomba irá acoplada directamente al motor diesel y será propulsada por engranajes. Para el sistema de tracción eléctrico, la bomba será accionada por un motor eléctrico auxiliar que estará alimentado por el convertidor estático (convertidor de servicios auxiliares de a bordo para el sistema eléctrico de tracción).

El diámetro del volante deberá ser de 550 [mm]

6.2.6. RUEDAS Y NEUMÁTICOS

Cada trolebús contendrá diez ruedas de disco, de tamaño 22,5 x 7,5; con orificios de ventilación, con 10 taladros para su fijación al tambor de freno. Cumplirán con

la Norma DIN 74361 o equivalente de la CEE. Todas las ruedas serán balanceadas.

Los neumáticos serán: 275/70 R 22.5 sin cámara, huella similar a MICHELIN XZU.

6.2.7. EJES

6.2.7.1. Eje delantero

El eje delantero será rígido con extremos en forma de puño, con manguetas alojadas en rodillos de agujas, con rueda sencilla.

6.2.7.2. Eje central

El eje central deberá ser tubular con rueda doble.

6.2.7.3. Eje propulsor posterior

Deberá ser el eje propulsor rígido con planetarios en los extremos y doble ataque en el diferencial (central), con rueda doble. Los casquillos de los brazos tensores, o los brazos tensores, serán estándar y deberán existir en el mercado local.

El conjunto cono – corona del diferencial, será construido en acero especial que resista un torque superior a 2.000 [Nm]. en marcha adelante y un torque superior a 1.240 [Nm]. de freno eléctrico, sin que sufra desperfecto alguno en los dientes de engranaje, ni en las partes de bronce del diferencial, ni en los cojinetes, ni que supere los 90°C de la temperatura del aceite. Se deberá garantizar una vida útil del diferencial no menor a 700.000 [Km] de recorrido.

El cambio entre el sistema de tracción eléctrico y el diesel, se lo deberá realizar mediante un cilindro neumático, con los correspondientes finales de carrera de cambio de grupo. Los finales de carrera deberán ser de tipo inductivo, totalmente resistentes a temperaturas de 120° y al lubricante del diferencial.

Los sensores de velocidad necesarios para la regulación del vehículo y para el tacógrafo, deberán censar la velocidad del cardán del motor eléctrico e irán encapsulados para evitar su destrucción por causa de partículas u otros objetos extraños.

Los ejes deberán tener la capacidad de soportar la carga del vehículo y la carga viva de 180 pasajeros, guardando un coeficiente de seguridad de más del 5%

6.2.8. FRENOS

6.2.8.1. Freno de servicio:

El freno de servicio, estará compuesto de un sistema neumático y de un sistema eléctrico.

El sistema de freno neumático será de doble circuito, tendrá tuberías de metal inoxidable, deberá disponer de ajuste automático de zapatas. El material de los forros de freno no deberán contener amianto.

La superficie de frenado eficaz en cm^2 no será menor a:

- Eje delantero: 2,333
- Eje central: 3,278
- Eje posterior: 3,278

El pedal del freno será accionado directamente por el conductor, para transmitir la señal tanto al sistema neumático cuanto al sistema eléctrico mediante un emisor del valor teórico.

6.2.8.2. Freno de estacionamiento

Se deberá accionar por acumulador de fuerza elástica, sin varillaje y actuará sobre los ejes central y motriz. La válvula de activación estará situada en el panel de instrumentos del conductor. Tendrá un dispositivo desbloqueador del muelle recuperador en caso de emergencia, con actuación electro-neumática.

El interruptor se encontrará al alcance del conductor y la alimentación de aire será a través de depósitos de aire para consumidores auxiliares.

6.2.8.3. Freno de parada

Deberá permitir mantener al vehículo con pasajeros en posición de reposo aún en pendientes del 15,7%. El interruptor se encontrará en el tablero de mandos, su actuación será electro - neumática.

Se activará al accionarse una de las rampas del trolebús incluyendo la rampa abatible. Se desactivará cuando todas las rampas incluyendo la rampa abatible se hayan recogido.

6.2.9. ARTICULACIÓN

Los vagones, delantero y posterior del vehículo estarán unidos entre sí por una articulación compuesta por una corona de giro y dos articulaciones de rótula.

Poseerá un control electrónico antipandeo con sus respectivas prestaciones. El control electrónico deberá permitir hacer un análisis de funcionamiento y un diagnóstico de averías, por medio de un hardware y software específicos.

6.2.10. SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

El circuito neumático será alimentado por dos compresores, uno para el sistema de tracción eléctrico y otro para el sistema de tracción a diesel.

El compresor de aire para el sistema de tracción a diesel, deberá ser refrigerado por agua, estará acoplado al motor mediante engranajes y será de fácil desmontaje y mantenimiento.

El sistema de aire comprimido dispondrá de un secador de aire por donde se evacuará la condensación de agua y una válvula reguladora de presión. Los conductos serán de poliamida $CuZn_2$. Todo el sistema será protegido contra suciedad y corrosión. El primer depósito del circuito tendrá purga automática y los demás purga manual.

El sistema de aire comprimido dará servicio a puertas, circuitos de freno principal, freno de estacionamiento, freno de parada, suspensión neumática, pantógrafo, etc.

Existirán dos acoples para rellenar externamente el sistema de aire comprimido: uno en el vagón delantero y otro en el vagón posterior.

Todos los calderines de aire comprimido, serán construidos según normas DIN, protegidos interior y exteriormente contra la corrosión. El volumen total de aire del sistema neumático para atender todos los requerimientos, deberá ser suficiente para garantizar una operación normal del compresor eléctrico sin llegar a sobrecargar el convertidor estático que lo alimenta.

Las cañerías de aire y conexiones serán instaladas con soportes libres de vibraciones y estarán ubicadas de tal manera que no exista rozamiento con otros componentes del chasis.

Deberá existir una cantidad suficiente de enchufes de control de aire, tanto en el coche delantero, como en el coche trasero.

6.2.11. SISTEMA ELÉCTRICO

La tensión nominal del sistema eléctrico será de 24[V]. Los aparatos del sistema eléctrico (fusibles, relés y aparatos de mando), deberán situarse en un tablero eléctrico mediante regleteros de fácil acceso y desmontaje. Estará ubicado en un o unos cofres totalmente herméticos y estancos, que impidan el ingreso de agua y polvo.

El cableado eléctrico será de sección adecuada a la intensidad de corriente que circulará por ellos. Todo el cableado eléctrico o electrónico será implementado bajo una misma estructura, utilizando bornas, regleteros y serán identificados por números de potencial, que permitan su ubicación tanto en planos, diagramas y su ubicación física real en el vehículo. La identificación de los cables y aparatos se regirá por una única norma para todos los sistemas eléctricos del vehículo.

6.2.11.1. Alternador.

El alternador será de 28[V], 140[Ah], con regulador electrónico incorporado.

6.2.11.2. Baterías.

El sistema eléctrico dispondrá de dos baterías de 12[V], 200[Ah], cada una como mínimo. Las baterías serán exentas o de bajo mantenimiento.

Deberá existir un tomacorriente dotado de un interruptor para cargar las baterías, el cual estará ubicado en la parte frontal del vehículo o en un lugar de fácil acceso.

6.2.11.3. Arrancador del motor diesel

El arrancador, será de una potencia no menor de 6.5[kW]. Dispondrá de un sistema protector que impedirá accionar el motor de arranque cuando esté en funcionamiento el motor diesel o el motor eléctrico.

6.2.11.4. Tomacorrientes

Existirán dos tomacorrientes para luz de trabajo a 24 Vdc, uno en el tablero eléctrico del primer vagón y otro en el tablero lateral del segundo vagón.

6.2.11.5. Faros

Los faros de niebla serán halógenos, tipo YC G 24 V/70 W.

Luz alta y baja con bombilla de 24 V, 55/50 W

Luz de estacionamiento con bombilla de HL 24 V, 4 W.

6.2.12. TANQUE DE COMBUSTIBLE

El tanque de combustible tendrá una capacidad no menor a 220 litros, deberá disponer de un sensor de nivel de combustible que enviará la señal a un indicador de nivel en el tablero principal de instrumentos. Además, el tanque deberá tener

un tapón de desagüe, aeración y una válvula de purga automática. Deberá ser de fácil desmontaje.

Será de chapa de acero, protegido interiormente contra la corrosión. El tapón de llenado será de cierre rápido.

6.2.13. TUBO DE ESCAPE

El tubo de escape estará montado bajo el piso del vehículo, en la parte izquierda, hacia atrás.

6.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CARROCERÍA

La carrocería estará formada por dos compartimentos correspondientes al vehículo principal y remolque, que unidos por una articulación, constituirán la unidad integrada.

Su diseño será de estilo sobrio y moderno, con amplias ventanas, permitiendo una gran fluidez de circulación de pasajeros y optimización de la superficie. Así mismo, su diseño interior garantizará la seguridad, confort y ergonomía de pasajeros y operadores.

6.3.1. DIMENSIONES GENERALES DE LA CARROCERÍA

Las dimensiones generales de la carrocería, se presentan a continuación en la Tabla 6.2. Para aquellos parámetros cuya dimensión no requieren de una única medida, se ha considerado establecer un rango para cada dimensión, para permitir la participación de varios fabricantes.

| DENOMINACION | DESDE | HASTA |
|--|-----------------------|----------|
| Capacidad total de pasajeros: | 180 | |
| Cantidad de pasajeros sentados: | 41 | |
| Lugar para minusválido: | 1 | |
| Tasa real de ocupación de pasajeros: | 6 pas./m ² | |
| Longitud total del vehículo | 17720 mm | 18000 mm |
| Ancho del vehículo | 2500 mm | |
| Altura exterior de la carrocería | 2940 mm | |
| Altura desde el piso del vehículo al interior de la carrocería: | 2175 mm | |
| Pendiente del piso del vehículo: | 0% | |
| Pendiente máxima del piso sobre el motor térmico: | 8% | |
| Altura máxima del vehículo con cofre de tracción y pantógrafo | 3460 mm | |
| Radio máximo de giro a la pared externa de la carrocería a: | | |
| | 360°: 12 m | |
| | 180°: 12 m | |
| Angulo delantero: | 8° | 10° |
| Ángulo de posterior: | 8° | 10° |
| Ángulo mínimo entre vagones (delantero y posterior) | 45° | 48° |
| Altura libre mínima eje propulsor | 0.18 m | |
| Altura libre mínima otras áreas | 0.30 m | |
| Altura parte inferior parachoques delantero | 0.30 m | 0.50 m |
| Altura parte inferior parachoques trasero | 0.50 m | 0.60 m |
| Altura de las rampas respecto al suelo | 0.72 m | |
| Saliente de las rampas | 0.50 m | |
| Altura de la rampa abatible respecto al suelo | 0.30 m | |
| Saliente de la rampa abatible respecto a la carrocería | 0.70 m | 0.80 m |
| Espesor de la rampa abatible | 0.04 m | 0.06 m |
| Altura del piso en zona de puertas con respecto a la calzada | 0.72 m | |
| Ancho mínimo libre entre puertas | 1100 mm | |
| Altura mínima libre de puertas | 1.90 m | |
| Cantidad de asientos para pasajeros | 41 | |
| Distancia entre espaldares de asientos | 665 mm | 720 mm |
| Largo del asiento de los asientos | 570 mm | |
| Altura de los asientos: | 1000 mm | |
| Ancho mínimo de pasillo central entre dos hileras de 4 asientos: | 700 mm | |

Tabla 6.2. Dimensiones generales de la carrocería

6.3.2. ESTRUCTURA

La estructura de la carrocería estará soldada al bastidor y formará un monobloque autoportante, que deberá estar formado por perfiles rectangulares de acero

conformado en frío, de calidad ST-42; construida de acuerdo con las normas respectivas.

La unión de todos los perfiles se efectuará mediante matrices y se soldarán por soldadura eléctrica en atmósfera inerte controlada, con la ayuda de equipos específicos que garanticen una alineación perfecta bajo un riguroso control de calidad.

En caso de accidentes, los componentes afectados de la estructura serán fácilmente desmontables e intercambiables para su rápida y económica reparación.

Los espesores mínimos que se utilizarán en los perfiles rectangulares son:

| | |
|-----------|--------------|
| Piso | 2 [mm] |
| Laterales | 3 y 1,5 [mm] |
| Techo | 1,5 [mm] |

La estructura del techo estará diseñada para soportar los pesos del pantógrafo completo, del cofre de tracción demás conjuntos y elementos eléctricos y electrónicos montados sobre ella.

La estructura junto con la chapa exterior, absorberá con una deformación plástica menor de 0.15[m] el impacto del vehículo (a 20[km/h]) sobre otro parado, en los siguientes puntos:

- Trasera del remolque
- Delantera del vehículo principal
- Entre la articulación y el eje del remolque
- Entre los ejes del vehículo principal

6.3.3. RED DE ASIDEROS

Las columnas y pasamanos de la red de asideros, serán de acero inoxidable de \varnothing 32[mm] exterior. Soportarán un esfuerzo no menor de 4.000[N] en los pasamanos horizontales y de 5.000[N] en los puntos medios de las columnas verticales sin deformación ni desprendimiento.

Los anclajes de las columnas verticales se fijarán a la estructura de la carrocería mediante tornillos de acero M6 con sus correspondientes arandelas de seguridad. Los anclajes de los dos extremos de todas las barras verticales, serán de aluminio. Estos se fijarán a las barras mediante tornillos M6 o remaches de acero, entre el anclaje y la barra existirá un cojín interior de caucho.

Todas las barras verticales tendrán la misma forma y dimensiones, para lograr una rápida intercambiabilidad entre ellas.

Los pasamanos horizontales deberán estar situados a una altura no mayor de 1.80[m], desde el piso del vehículo y a los dos costados longitudinales del pasillo central de los dos vagones del vehículo. En los sitios en los que no se disponga de asientos, se ubicarán tres pasamanos horizontales. En cada una de las barras horizontales, se instalarán cada 0.40[m], agarraderas de cuero de 220[mm] de largo con manopla de plástico de forma triangular y giratoria.

En el sitio designado para personas discapacitadas, deberá existir un cinturón de seguridad que inmovilicen totalmente la silla de ruedas.

Existirá una protección de tubos que impida que los pasajeros obstruyan la visibilidad del conductor al espejo retrovisor derecho. Esta protección de tubos permitirá el acceso rápido del conductor a su puesto de mando.

Las barras perimetrales de protección de la articulación, tendrán una altura mínima de 1390[mm] desde el piso del vehículo.

6.3.4. MAMPARAS

En los lugares inmediatamente contiguos a las puertas, existirán mamparas contravientos de 0.70 a 0.80[m] de altura y a 0.10[m] del suelo. Estas mamparas, se sujetarán a la estructura de la carrocería y a las barras horizontales, de manera que resistan esfuerzos de 2000[N] sin desprenderse ni aflojarse.

6.3.5. ASIENTO Y PUESTO DEL CONDUCTOR

El asiento del conductor será regulable en altura y posición, con amortiguación hidráulica (regulación sin escalonamiento).

El recinto del conductor estará separado del resto de pasajeros mediante una puerta de piso a techo, la puerta será acristalada en su parte superior. El ancho de la puerta será de 430[mm]. En el lado interior de la puerta, en su parte metálica existirá un bolsillo portadocumentos tipo A4. Dentro del recinto y con su correspondiente sujeción, estarán ubicadas las pértigas de los troles, dos extintores de polvo químico ABC de 6 kg, el micrófono de comunicación con los pasajeros, un porta chaquetas y parasoles.

6.3.6. ASIENTOS

La cantidad de asientos será de 41 unidades, la estructura del asiento será metálica en tubos de acero curvados en frío, constituirá un solo cuerpo con el asidero superior. El asidero superior, resistirá un esfuerzo de 1000[N] sin roturas ni deformaciones.

Las carcasas serán anatómicas, de inyección de polipropileno a 1000[TM] de presión, de 4[mm] de espesor y 6[mm] en los puntos críticos. Serán antivandalicos, fácilmente lavables antiestáticos. Resistirán temperaturas de hasta

140°C, serán resistentes a sales acuosas, no constituirán terreno de cultivo de microorganismos,

Todas las butacas tendrán un ancho no mayor de 0.45[m] estarán a una altura del suelo entre 0.40[m] y 0.45[m] con el apoyo exterior al piso a 0.20[m] del borde del asiento. El apoyo interior se acoplará a la pared interior del vehículo, que facilite la limpieza.

El asiento resistirá un esfuerzo sin deformación de 3000[N].

6.3.7. PUERTAS

Existirán 3 puertas de doble hoja cada una, acristaladas en un 80%, situadas en el lateral derecho, serán accionadas por cilindros neumáticos, controlados por electroválvulas de funcionamiento silencioso, la bandeja de comando de las puertas, será de fácil acceso.

El mando de las puertas se realizará mediante pulsadores situados en el tablero de mando del conductor. Existirá un pulsador para abrir la primera puerta y otro pulsador para abrir las puertas 2 y 3. Con 1 solo pulsador se cerrarán las 3 puertas y se recogerán todas las rampas que se encontraren abatidas.

La estructura y recubrimiento de las puertas será de aluminio. En los bordes de las puertas existirán molduras de goma de 10 o más cm de ancho. Estas molduras de goma, se fijarán a las puertas mediante 4 o 6 tornillos debidamente distribuidos con sus respectivas arandelas. La sujeción de las molduras a las puertas, resistirá un esfuerzo sin desprenderse de 1000 N.

Existirá un sistema de seguridad que impida la marcha del vehículo cuando las puertas se encuentren abiertas o la rampa corrediza esté accionada.

En el interior del vehículo y junto a cada puerta, se montarán pulsadores protegidos del alcance de los pasajeros, para abrirlas en caso de emergencia. Además.

6.3.8. VENTANAS Y CRISTALES

Serán incoloras, con un 80% mínimo de transparencia. Los parabrisas delantero será laminado, será de dos cuerpos simétricos y se acoplará a la carrocería mediante un marco de goma. El parabrisas posterior y los vidrios de todas las ventanas serán de material templado de 6[mm] de espesor.

Las ventanas laterales (dimensiones entre 1.30 y 1.60[m] de longitud por 0.90[m] de altura) tendrán una parte superior de 0.4[m] fácilmente desplazable en su mitad, que permita la renovación del aire interior del vehículo. El cristal inferior de las ventanas será fijo.

El acoplamiento de las ventanas a la carrocería, se realizará mediante marco de aluminio sin aristas externas de fácil desmontaje.

6.3.9. AISLAMIENTO SONORO Y TÉRMICO

Para aislar el interior del vehículo de ruidos y temperaturas externos, se aplicarán los siguientes materiales:

- Lámina de 6[mm] de espesor en un sandwich especial, con aluminio y fibra de vidrio trenzada como cortafuegos en zonas de alta temperatura.
- Protección de 30[mm] de espuma de poliuretano, densidad 40/45[kg./m³], como aislante térmico de baja temperatura y antivibratorio en techo, laterales, muebles, pases de rueda, etc.

- Lámina pesada de caucho de alta densidad, colocada encima de la estructura, como elemento antisonoro.
- Fibra de vidrio como aislante térmico en zonas de temperatura media.

Estando el vehículo estacionado y con el motor térmico encendido, la carrocería no acusará vibraciones superiores a 50[mm/s].

La carrocería se aislará acústicamente, para garantizar los siguientes niveles sonoros:

Interior:

- 70 dB para vehículo estacionado con todos los equipos auxiliares funcionando.
- 75 dB para vehículo en movimiento a 50 Km./h, sobre asfalto.

Exterior:

- 75 dB para vehículo estacionado con todos los equipos auxiliares funcionando.
- 80 dB para vehículo en movimiento.

6.3.10. CLIMATIZACIÓN

El equipamiento básico de la renovación ambiental que deberá permitir más de 20 renovaciones de aire por hora con 180 pasajeros, estará constituido de los siguientes elementos:

- Tres claraboyas traslúcidas y herméticas de techo,
- Cuatro extractores de techo eléctricos; y,
- Dos ventiladores de techo eléctricos.

Al interior del parabrisas frontal y de la ventana lateral del conductor, existirá un sistema antivaho con una capacidad no menor de 7000[kcal/h], el cual garantizará la transparencia del parabrisas en operación bajo cualquier condición atmosférica.

6.3.11. SISTEMA DE COMUNICACIÓN INTERNA

Para la comunicación pasajero - conductor, se instalarán tres pantallas iluminadas de parada solicitada y un timbre, actuado por 10 pulsadores situados estratégicamente en el habitáculo de pasajeros. La ubicación de estas pantallas será:

- En frontal superior, en el ángulo de visión del conductor
- Una con doble texto en el techo del primer vagón
- En el techo del segundo vagón, una pantalla con doble texto.

Cuando un pasajero acciona un pulsador, deberá sonar una sola vez el timbre y se iluminarán las pantallas. El sistema se reactivará cuando las puertas se cierren.

La comunicación conductor - pasajero se realizará mediante un sistema compuesto por un amplificador con micrófono y 10 parlantes distribuidos en el interior del vehículo.

6.3.12. SISTEMA DE ILUMINACIÓN

6.3.12.1. Sistema de iluminación externa

El sistema de iluminación externa se compondrá de los siguientes elementos:

- Un portarrótulos delantero iluminado con panel electrónico matricial de 1900[mm] de largo por 350[mm] de alto y de 110 x 16 puntos. El rótulo tendrá la capacidad para indicar el número y nombre de la línea y contará con un dispositivo electrónico de cambio automático de información.
- Tres portarrótulos laterales iluminados con panel electrónico matricial de 1030[mm] de largo por 200[mm] de alto y de 64 x 10 puntos, en la parte superior de la carrocería junto a cada puerta. El rótulo tendrá la capacidad para indicar el número y nombre de la línea y contará con un dispositivo electrónico de cambio automático de información.
- Todos los demás faros, focos direccionales, pilotos delanteros, posteriores de stop, etc. según las normas vigentes.

6.3.12.2. Sistema de iluminación interna

La iluminación interior se realizará mediante plafones fluorescentes semiempotrados en el techo, con una saliente máxima de 0.04[m].

En los plafones existirán 2 luminarias de 17[W], 60[cm] de largo, que estarán alimentadas por balastos del tipo comercial en el país: 3 x 17[W], 120[Vac], 60[Hz]. Cada trolebús tendrá un inversor de 24[Vdc] a 120[Vac], 60[Hz], que alimentará a todo el sistema.

El nivel medio de iluminación en la zona de los pasajeros, deberá superar los 140 luxes en el plano de lectura. En la zona delantera se iluminará con tono azulado, para evitar deslumbramiento al conductor.

Las plataformas de subida y bajada se iluminarán con la apertura de puertas, mediante plafones incandescentes situados en la parte superior. El nivel de iluminación de esta zona superará los 80 luxes.

6.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO DE TRACCIÓN ELÉCTRICA

En la Figura 6.2. se indica el diagrama funcional del equipo de tracción eléctrica con los correspondientes flujos de energía y señales.

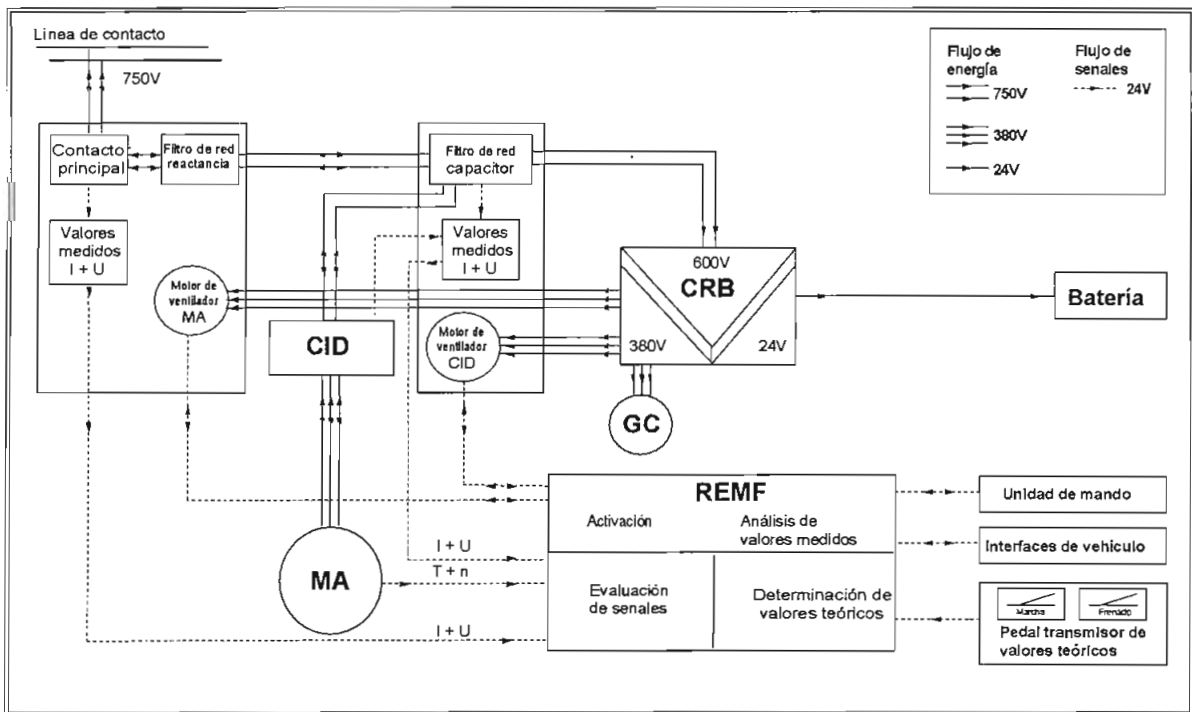
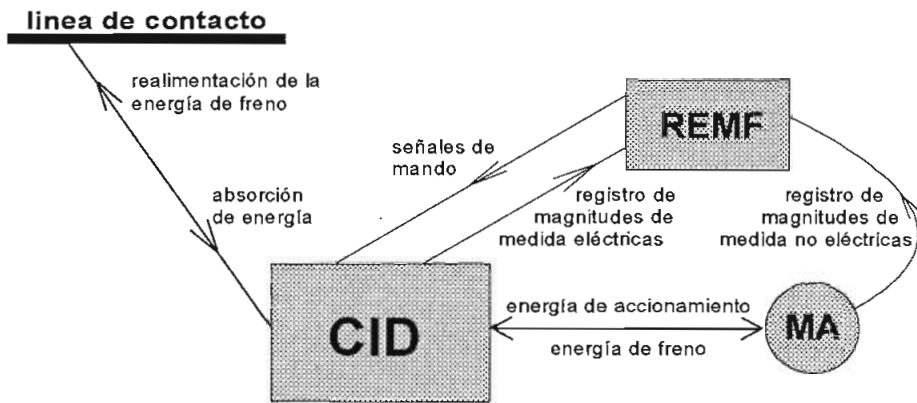


Figura 6.2. Diagrama funcional del equipo de tracción eléctrica^[6.2]

[6.2] Tomado de "Descripción Regulador electrónico de marcha y freno EFB 142 Quito"; Technische Dokumentation N° 4.050647.015; Winand; Pag. 5/59; Kiepe Elektrik, Julio de 1996.

| | | |
|--------|-------|---|
| Donde: | MA | : Motor asíncrono |
| | CRB | : Convertidor de la red de abordo |
| | CID | : Convertidor de impulsos directos |
| | REMF: | Regulador electrónico de marcha y freno |
| | GC | : Grupo compresor |

La energía eléctrica de corriente continua es tomada de la Línea Aérea de Contacto y en el Convertidor de Impulsos Directos (CID) se transforma en corriente alterna variable en amplitud y frecuencia que alimenta a motor asíncrono (MA). Todo este proceso es controlado por el Regulador Electrónico de Marcha y Freno (REMF), al cual ingresa la información de los pedales de aceleración y freno comandados por el conductor del vehículo.

Para el convertidor de impulsos directos del equipo de tracción de los trolebuses se utilizará tecnología trifásica, y, como convertidor de potencia se utilizará un ondulador pulsatorio directo utilizando la técnica de IGBT's, con chopper de freno también con IGBT.

El circuito eléctrico del equipo de tracción, se indica en la Figura 6.3.

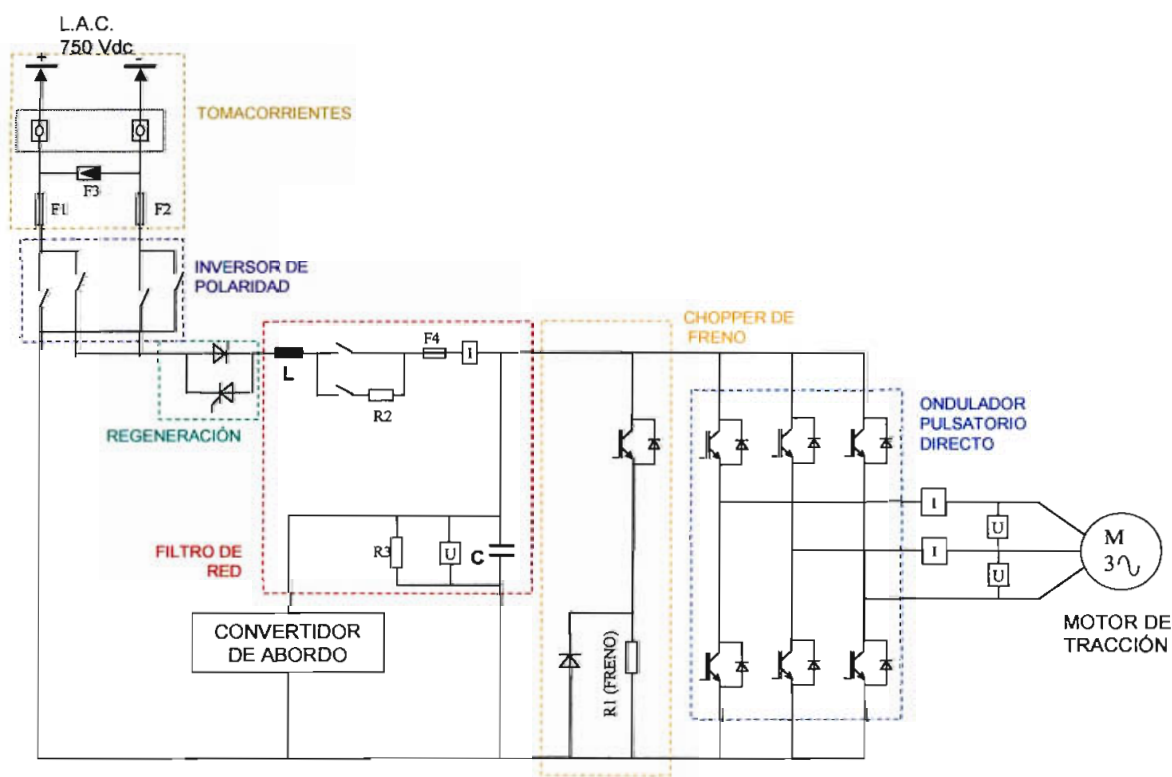


Figura 6.3. Circuito básico del equipo de tracción eléctrica

A continuación se detalla las especificaciones técnicas de cada uno de los componentes del equipo eléctrico de tracción.

6.4.1. MOTOR DE TRACCIÓN

Se deberá utilizar un motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla, accionado por corriente alterna variable, deberá disponer de ventilación forzada y estará enteramente suspendido; además, deberá tener el estator sin carcasa, con devanados trifásicos de doble capa y aislamiento clase H.

Los paquetes de chapa de los devanados deberán ser impregnados al vacío con poliéster insaturado.

La fijación mecánica de las cabezas de bobina y de las conexiones se deberán realizar de forma tal que sean insensibles ante las vibraciones propias de un motor de tracción vehicular, y se deberá lograr una bóveda totalmente estable.

Las conexiones eléctricas de las fases a la caja de bornas se deberán realizar con cable termoestable.

La refrigeración del estator y del rotor se obtendrá mediante un ventilador externo, que proporcione un caudal de aire suficiente para evitar temperaturas sobre 200°C en el motor.

Características:

- Motor de tracción trifásico de inducción tipo jaula de ardilla
- Potencia nominal de 230[kW]
- Ventilación forzada
- Sin carcasa

- Aislamiento tipo H
- Deberá trabajar con alimentación suministrada por un ondulator pulsatorio directo de IGBT's, es decir, voltaje y frecuencia variables.
- Deberá tener capacidad para que el trolebús a plena carga (180 pasajeros) pueda alcanzar una velocidad máxima de 60[Km/h], y arrancar en una pendiente de 14,7%.

Para transmitir la fuerza mecánica del motor de tracción al diferencial del puente posterior del vehículo (eje tractor), se deberá utilizar un eje de transmisión que esté dimensionado para soportar el par y la velocidad máxima que el trolebús requiera. Este eje de transmisión deberá ser de bajo mantenimiento, no permitirá de ninguna manera el escape de grasa de su sistema de lubricación y el conjunto deberá permitir una vida útil no menor de cinco años, sin exceder el valor de 7,6[mm/seg] de vibración pico a una frecuencia de 1xR.P.M., correspondiente a la norma VDI 2056, equivalente a la norma ISO 2372 o a la norma Británica BS 4675 de vibración en rodamientos.

6.4.2. CONVERTIDOR DE IMPULSOS DIRECTOS

El convertidor deberá permitir obtener un sistema trifásico variable en amplitud y frecuencia mediante una modulación del ancho de impulsos a partir de la tensión del condensador de red, utilizando para ello un convertidor estático "inversor", con IGBT's como elementos semiconductores de potencia.

La corriente de motor obtenida a la salida del convertidor mediante el ondulator pulsatorio deberá ser aproximadamente sinusoidal con el mínimo de distorsión armónica, en tanto que la tensión será pulsatoria, sintetizada mediante modulación del ancho de los pulsos, optimizando la eliminación de armónicos.

Únicamente, para cuando la red no sea capaz de absorber la energía generada por el motor asíncrono, durante el proceso de frenado, el convertidor de *impulsos*

directos dispondrá de un chopper de freno con IGBT, que derivará la corriente generada por la máquina asíncrona sobre las resistencias de freno, transformando la energía cinética del trolebús en calor.

El convertidor de impulsos directos ha utilizarse en los trolebuses, deberá permitir un alto rendimiento del equipo de tracción. Se deberá tener un consumo de energía menor que 2.24 [kW.h] por cada kilómetro recorrido

Las características eléctricas del convertidor de impulsos directos son:

- Tensión de entrada: 750[V]+ 20 % - 30 %
- Tensión de salida: trifásica, variable en amplitud y frecuencia
- Potencia de salida: 300 [kVA] constantes, necesarios para arrancar a plena carga el vehículo con 180 pasajeros (30 ton) en una pendiente de 15,7%, activado por un motor de tracción de 230 kW de potencia nominal

Debido a las pérdidas en los semiconductores de potencia, existe sobrecalentamiento que deberá ser absorbido mediante una eficaz refrigeración. Los productos de refrigeración a utilizarse no deberán ser contaminantes para el medio ambiente, de fácil manejo y técnicamente seguros. Además, la técnica de refrigeración deberá cumplir las exigencias especiales para su aplicación en vehículos de tracción, referentes a poco peso, reducido volumen constructivo y elevada robustez.

Estas exigencias pueden cumplirse con una ventilación forzada y aislada de los semiconductores. Este ventilador podrá ir adosado o separado de la caja del convertidor de potencia.

El ondulator deberá estar formado por tres ramas de puente iguales, para conseguir las siguientes características:

- Normalización
- Simplicidad en los trabajos de mantenimiento y/o comprobación
- Intercambiabilidad de los módulos

Se deberá tener en cuenta un dimensionamiento del aislamiento y de las distancias de seguridad para las resistencias del circuito principal de protección, de forma que no sea necesario un mantenimiento significativo y que se cumplan las normas internacionales que rigen la seguridad en medios de transporte eléctrico, es decir, doble aislamiento o aislamiento reforzado, como se observa en la Figura 6.4., de acuerdo con la norma VDE 0106, 0110, 0115, de la siguiente manera:

Primer recorrido:

Circuito principal contra la masa intermedia (aislamiento de funcionamiento) con tensión de prueba de 3000[V]/50[Hz]/1[*min*]. (VDE 0115 con tensión nominal de 750[V])

Segundo recorrido:

Masa intermedia contra la masa del vehículo (aislamiento adicional) con tensión de prueba de 3000[V]/50[Hz]/1[*min*] (VDE 0115 con tensión nominal de 750[V])

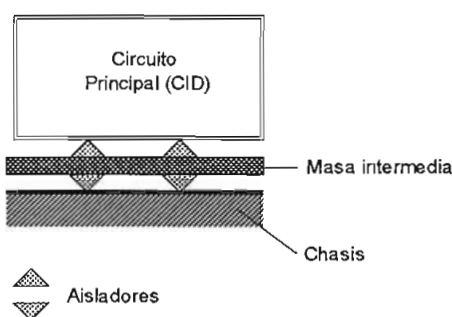


Figura 6.4. Esquema del doble aislamiento

Para poder controlar los niveles de aislamiento entre el circuito principal y el potencial intermedio y entre el potencial intermedio y el chasis del vehículo se deberá disponer de una caja de hembrillas externas, de fácil acceso y un protocolo de prueba de los niveles de aislamiento.

Los módulos de cada fase deberán ser intercambiables entre sí, a fin de reducir el tiempo de reparación del trolebús, en caso de avería.

La estructura mecánica del convertidor de tracción deberá ser compacta y modular a fin de que sea fácil su montaje en el cofre que contenga toda la electrónica de potencia.

6.4.3. REGULADOR ELECTRÓNICO DE MARCHA Y FRENO

El control y la regulación de los parámetros del motor de tracción tales como par y flujo, se lo debe realizar en base a modernos algoritmos de control de máquinas asíncronas (control por orientación del vector de campo por ejemplo).

Todos estos algoritmos se los desarrollará en un sistema microprocesado con interfaces de entradas y salidas tanto análogas como digitales, sistemas de protección y alarmas, además de un sistema de monitoreo constante en tiempo real de parámetros y variables de interés, y la posibilidad de comunicación cuando sea necesario con un computador portátil a través de un protocolo y un software establecido. Al equipo encargado de realizar estas funciones se lo denomina Regulador Electrónico de Marcha y Freno.

El regulador de marcha deberá ser diseñado con la técnica de microprocesadores de 16 bits o superiores y deberá procesar todas las señales relevantes emitidas por el equipo de control, tales como: "valor teórico de par analógico", "valor teórico de marcha", "valor teórico de freno", "orden de marcha", "sentido de marcha", y las demás necesarias para una operación confiable y segura tanto de los usuarios del trolebús como de los componentes del mismo.

Las regulación de la máquina asíncrona que se realiza en el regulador de marcha y freno, se esquematiza en la Figura 6.5.

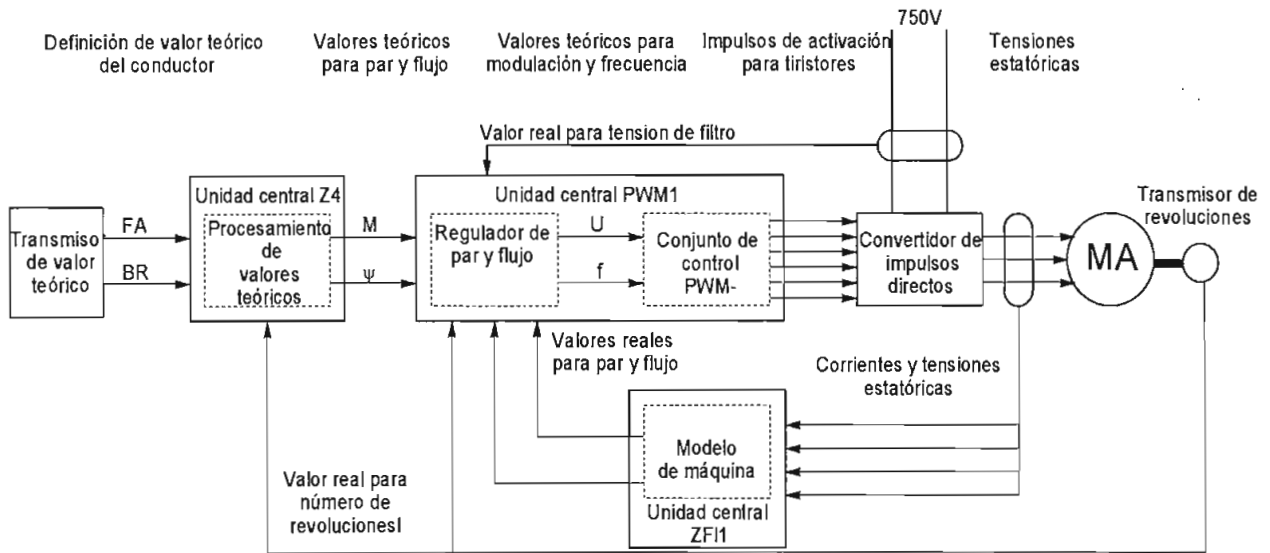


Figura 6.5. Regulación de los parámetros del motor asíncrono^[6.3]

Las funciones más sobresalientes que el regulador de marcha deberá cumplir son:

- Protección contra deslizamiento y patinaje, que posibilite una limitación del esfuerzo de tracción aplicado durante los procesos de marcha, y evite el embalamiento de las ruedas a través de una rápida disminución del valor teórico de par. Análogamente, en los procesos de frenado evite el bloqueo de ruedas.
- Limitación de velocidad, dependiendo del sentido de marcha, es decir, se reduzca el valor teórico una vez alcanzado el nivel deseado de velocidad, y, en los tramos de vía descendente permita un frenado regenerativo hacia la red, cuando sea posible o un frenado reostático, a fin de no superar el valor máximo de velocidad previamente establecido.
- Diagnóstico, registro de averías y parámetros de funcionamiento del vehículo, con su software correspondiente.
- Transmisión de los datos a un PC externo mediante interface serie con software en español. Deberán existir al menos dos puntos de conexión

[6.3] Tomado de "Descripción Regulador electrónico de marcha y freno EFB 142 Quito"; Technische Dokumentation N° 4.050647.015; Winand; Pág. 14/59; Kiepe Elektrik, Julio de 1996.

entre el regulador de marcha y el PC externo, uno ubicado en el propio regulador de marcha y otro en el interior del habitáculo del trolebús a altura del puesto de conducción.

6.4.4. FILTRO DE RED

En cada trolebús se deberá montar un filtro de red L.C. Este filtro servirá para minimizar la presencia de armónicos de tensión procedentes de la LAC, así como de minimizar la influencia sobre la LAC de las pulsaciones de corriente producidas por el accionamiento de la máquina asíncrona. Por lo tanto, el filtro será una red de desacoplamiento entre la alimentación de corriente continua (Subestación) y el ondulador pulsatorio del trolebús.

Esencialmente, el Filtro de Red deberá componerse de:

- Una reactancia de red
- Un condensador de red

El condensador de red deberá ser electrolítico de potencia que, a igualdad de requerimientos de tensión, admita una mayor sobrecarga de corriente, y deberá tener un volumen y peso reducidos.

Para evitar sobreoscilaciones de tensión y corriente al conectar el equipo, se deberá realizar, en primer lugar, una carga del condensador de red a través de un contactor de carga y una resistencia limitadora, una vez completada la carga, la resistencia deberá quedar puenteada por un contactor de red.

Se deberá tener además una “resistencia de descarga” a fin de que pocos instantes después de la desconexión del trolebús (apertura del contactor de red) asegure la descarga del condensador.

Datos de la reactancia de red:

| | |
|--------------|--|
| Ejecución | Núcleo de aire |
| Inductividad | La necesaria para minimizar la presencia de armónicos de la red. |
| Aislamiento | Clase F |

Datos del condensador de red:

| | |
|------------------|---|
| Ejecución : | Condensador electrolítico |
| Capacidad: | La necesaria para minimizar la presencia de armónicos de la red |
| Tensión nominal: | 1000 V |

6.4.5. RESISTENCIA DE FRENO

La resistencia de freno servirá para disipar en forma de calor, la energía eléctrica producida durante el frenado que no es posible devolver a la red.

Con el fin de obtener una protección especial contra la corrosión, el hilo de resistencia deberá ser constituido por acero de alta calidad al Cr-Ni o algún nuevo material de tecnología y características superiores. Dentro de los paquetes resistivos, todas las uniones deberán ser realizadas mediante soldadura garantizada o soldadura fuerte de alto punto de fusión. Debido a las altas temperaturas presentes, no se deberá usar uniones atornilladas.

6.4.6. TOMACORRIENTES

Los tomacorrientes o pantógrafo le permiten al trolebús captar la tensión continua de la línea aérea de contacto, su funcionamiento será electromecánico y neumático.

El pantógrafo dispondrá de dos barras en cuyos extremos irán las cabezas colectoras, las mismas que a través de una pieza de carbón harán contacto con el hilo de contacto de la L.A.C. La presión con que la pieza de carbón hace contacto con la L.A.C. se podrá regular entre 7 y 14[Kg].

El pantógrafo deberá permitir una operación normal entre una altura mínima de 3.9[m] y una máxima de 6.3[m] considerando el piso como nivel de referencia. La separación entre el potencial positivo y el negativo de la L.A.C. como se ha dicho en el Capítulo 5. será de 0.7[m]., siendo el polo positivo el que se encuentre al lado izquierdo del trolebús en el sentido normal de marcha.

El pantógrafo deberá ser completamente automático, con dispositivo de subida y bajada.

Se deberá considerar además que las barras del pantógrafo deberán presentar la mínima inercia posible, para evitar los descarrilamientos a lo largo del recorrido que realice el trolebús, garantizando una velocidad de hasta 60[Km/h].

El pantógrafo deberá disponer de un dispositivo de control que permitirá centrar sus barras luego de un descarrilamiento, es decir, se deberá poder bajar automáticamente las barras del pantógrafo luego de un descarrilamiento.

Para cuando el trolebús opere con el motor auxiliar a diesel, el pantógrafo dispondrá de un sistema de bloqueo de barras, es decir, las barras estarán abatidas y sujetas a la estructura del trolebús.

6.4.7. CONVERTIDOR DE ABORDO

El convertidor de abordó es un convertidor estático que deberá proporcionar la alimentación necesaria para los servicios auxiliares del trolebús cuando éste trabaje eléctricamente, estos servicios serán los siguientes:

- Motor del compresor eléctrico.
- Motores de los ventiladores.
- Motor de accionamiento para la bomba de la servodirección del sistema eléctrico de tracción.
- Recargar baterías de 24 VDC.

La potencia del convertidor de abordo deberá ser al menos un 10 % superior a la potencia de los servicios auxiliares antes mencionados.

El convertidor de abordo se alimentará de la tensión del filtro de red, y proporcionará a su salida los voltajes necesarios para alimentar a los servicios auxiliares antes descritos, es decir, 380[Vac] y 24[Vdc].

El convertidor de abordo estará formado por:

- Un circuito inversor que a partir de la tensión continua del filtro de red obtenga a su salida una tensión trifásica alterna senoidal de 380[V], 60[Hz].
- Un circuito chopper reductor que a partir de la tensión continua del filtro de red permita obtener a la salida el voltaje continuo necesario para recargar las baterías del vehículo (24Vdc)

Para la implementación del convertidor de abordo se deberá utilizar como elementos de potencia transistores del tipo IGBT, considerando siempre las normas que rigen los niveles de aislamiento en vehículos de transporte público con tracción eléctrica, es decir, doble aislamiento o aislamiento reforzado de acuerdo con VDE 0106, 0110, 0115.

El sistema de control del convertidor de abordo deberá ser electrónico, microprocesado, deberá permitir realizar monitoréo y diagnóstico del equipo a través de un computador portátil, este monitoréo y diagnóstico se lo realizará a través del regulador de marcha del vehículo, con el software e interface propios del diagnóstico del regulador de marcha.

6.4.8. COMPRESOR ELÉCTRICO

El compresor eléctrico suministrará aire a presión para alimentar el circuito neumático cuando el trolebús trabaje en servicio eléctrico.

Será un compresor rotativo de paletas o de tornillo, accionado por un motor eléctrico trifásico de inducción tipo jaula de ardilla, de hasta 5.5[HP] y alrededor de 1450[rpm]. El motor eléctrico se alimentará del convertidor de abordó, deberá estar instalado en el vagón posterior del vehículo.

El compresor entregará hasta 10 Bar de presión de aire, la misma que servirá para el normal desempeño del sistema de frenos, suspensión, puertas, mando del pantógrafo y demás sistemas auxiliares. Entregará un caudal mínimo de 652[l/min], el nivel sonoro llegará hasta un máximo de 65[db] y la refrigeración será por medio de aire.

Los elementos como filtro de aceite, de aire, de agua serán de fácil desmontaje. Existirá una válvula automática de purga de agua del aceite, los mecanismos reguladores de presión, admisión, vacío serán de accionamiento automático.

El cofre que contendrá al compresor, deberá permitir la circulación de aire limpio y la fácil accesibilidad al mismo.

6.4.9. BOMBA HIDRÁULICA PARA LA SERVODIRECCIÓN ELÉCTRICA:

Cuando el conductor seleccione el sistema de tracción eléctrico, el motor diesel queda fuera de funcionamiento, así como también la bomba hidráulica acoplada a él, por lo que, en estas condiciones no se cuenta con dirección asistida.

Para el sistema de tracción eléctrico se deberá instalar una bomba hidráulica que alimente al circuito hidráulico de la servodirección del vehículo cuando se seleccione el sistema de tracción eléctrico, esta bomba hidráulica deberá

suministrar el mismo caudal y presión de aceite que la bomba hidráulica acoplada al motor diesel.

La bomba hidráulica para la servodirección eléctrica deberá ser accionada por un motor eléctrico trifásico de inducción tipo jaula de ardilla que será alimentado eléctricamente por el convertidor de abordo.

6.4.10. TRADUCTORES DIGITALES DE RECORRIDO DE LOS PEDALES:

Los traductores digitales de recorrido se deberán encargar de transformar el movimiento lineal de los pedales de marcha y freno del trolebús, en señales eléctricas análogas o digitales que serán datos de entrada para el regulador de marcha.

El accionamiento de estos traductores deberá ser diseñado de tal forma que proporcione una operación confiable, segura, de mantenimiento mínimo y preferentemente mediante un sistema de varillaje.

6.4.11. VIGILADOR DE AISLAMIENTO

Cada unidad deberá disponer de un equipo de vigilancia de los niveles críticos de aislamiento entre la carrocería del vehículo (chasis) y tierra. Este equipo deberá monitorear los niveles de aislamiento en forma continua y dará señales de alarma y de bloqueo de la unidad, de ser el caso.

6.4.12. DETECTOR DE PESO MÁXIMO

Se deberá disponer en cada unidad de sensores de peso en cada eje del vehículo, a fin de indicar al conductor con certeza sobre el límite máximo de carga

admisible del trolebús. Las señales de estos sensores también servirán para determinar la regulación del motor de tracción.

6.4.13. TABLERO DE CONTROL DEL SISTEMA ELÉCTRICO

El trolebús deberá disponer de un tablero de control del sistema eléctrico, que podrá estar ubicado al lado izquierdo del puesto del conductor, al alcance de sus manos y su mirada.

El tablero de control, contará con indicadores luminosos de diodos LED, pulsadores digitales iluminados con LED's para comandar los diferentes equipos del trolebús, y dispondrá además de una alarma acústica de indicación de averías. El tablero de control deberá tener al menos las siguientes funciones:

Indicación de averías en:

- Fusibles
- Sistema de regulación y control (Regulador de marcha)
- Sobre temperaturas por mal funcionamiento de ventiladores
- Convertidor estático
- Compresor eléctrico
- Sobrepeso del vehículo
- Pantógrafo
- Sistemas mecánicos de acoplamientos y engranajes
- cofres con presencia de alta tensión abiertos o mal cerrados

Sistemas de mando de:

- Subir las barras del pantógrafo
- Bajar las barras del pantógrafo
- Pulsador de desconexión de emergencia (pulsador tipo seta).- en esta condición se abaten las barras del pantógrafo.
- Desactivación de la alarma acústica.
- Selección del sentido de marcha: "adelante"
- Selección del sentido de marcha: "atrás"

- Selección del tipo de servicio:
 - Eléctrico
 - Diesel
 - Arranque del motor diesel
 - Fuera de servicio (off)
- Invertir la polaridad de las barras del pantógrafo, es decir, hacer que la barra izquierda sea negativa y la derecha positiva
- Desconexión del freno eléctrico, con lo que el trolebús solo cuenta con el sistema neumático de frenos.

6.4.14. PEQUEÑOS COMPONENTES

Los demás componentes y equipos pequeños propios para el funcionamiento de un trolebús, tales como: relés, contactores, fusibles, magnetotérmicos, etc... deberán ser instalados considerando que el proveedor disponga de un distribuidor en el Ecuador.

6.4.15. ESTRUCTURA DEL CABLEADO:

Para todo el sistema de cableado en los trolebuses se deberá considerar siempre los siguientes parámetros:

- Todos los cables deberán estar perfectamente identificados, se deberá anexar información completa sobre su disposición física en la unidad.
- Las conexiones se deberán realizar en conectores, regleteros y borneras plenamente definidos a fin de que sea fácil ubicar o cambiar cualquier cable, conector o bornera.
- Para el cableado de señales de control se deberá utilizar la técnica de cableado estructurado, manteniendo una misma norma para todas las instalaciones eléctricas del vehículo.(carrocería, chasis y sistema eléctrico de tracción). Para las señales de control se utilizará un bus de datos con su respectivo protocolo de comunicación.

- Cada uno de los conductores deberán ser correctamente identificados en sus extremos y se mantendrá estricta concordancia con los planos de montaje que se suministre.
- Todos los trabajos de cableado deberán realizarse con un alto grado de profesionalidad, a fin de que no se presenten conexiones flojas o averías consecuencia de un mal trabajo de cableado.

6.4.16. MONTAJE DE LOS EQUIPOS

La electrónica de potencia deberá ser montada en cofre(s) totalmente estanco(s) y hermético(s), de fácil acceso para mantenimiento, ubicado en la parte superior del trolebús (en el techo) ya sea en la parte delantera o trasera de la unidad. La electrónica de potencia a considerarse será la siguiente:

- Ondulador pulsatorio directo
- Convertidor estático
- Filtro de red
- Regulador de marcha
- Contactores principales, de carga y de línea
- Ventiladores

Los demás equipos eléctricos serán montados en distintos compartimentos ubicados estratégicamente en la unidad. Los Compartimentos que contengan los equipos eléctricos o electrónicos adicionales a los instalados en el (o los) cofre(s) ubicado(s) en el techo del trolebús , deberán ser especialmente diseñados para que impidan la filtración de polvo y agua a su interior.

En todo caso, estos Compartimentos deberán ser realizados de tal manera que se forme un cofre independiente de la carrocería del vehículo, firmemente adherido a ella. Todos los cofres deberán ser totalmente estancos, herméticos y de fácil acceso para mantenimiento.

Para el montaje de los equipos eléctricos y electrónicos se deberá cumplir siempre las normas que rigen los niveles de aislamiento para vehículos de transporte público con tracción eléctrica, es decir, doble aislamiento o aislamiento reforzado de acuerdo con VDE 0106, 0110, 0115 (descrito en el numeral 6.4.2. del presente capítulo)

Se deberá tener fácil acceso a una caja de hembrillas en donde se pueda realizar las mediciones rutinarias de control de aislamiento de todos los equipos eléctricos del vehículo que se encuentren operando a tensión alta (750V).

Las especificaciones técnicas descritas, podrían ser mejoradas en función de la experiencia de los fabricantes.

CAPÍTULO 7. PRESUPUESTO REFERENCIAL DEL PROYECTO

Para que se pueda realizar un estudio económico y financiero del proyecto de la Extensión Norte del Sistema Trolebús, es importante conocer, entre otros, los componentes de costo del mismo. A pesar de no ser objeto del presente trabajo el análisis económico y financiero del proyecto, se ha creído necesario aportar con la información correspondiente a los costos de los rubros que son parte del sistema eléctrico del mismo, cuyo dimensionamiento y especificación han sido desarrollados en el presente trabajo.

Se ha tomado como referencia de precios, los valores de los contratos que el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito ha suscrito para la ejecución de la troncal central del Sistema y de su extensión hacia el sur, a saber:

- Contrato para la ejecución y puesta en marcha de la Primera Etapa del Proyecto Trolebús, suscrito el 19 de septiembre de 1994, ante el señor Notario Vigésimo Octavo del cantón Quito, entre el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito y el Consorcio AEG – Cobra, por un monto de US \$46'201,092; así como su contrato complementario del 15 de febrero de 1996, por un monto de US \$2'205,471.67
- Contrato para la ejecución y puesta en marcha de la Primera Fase de la Segunda Etapa del Proyecto Trolebús de la ciudad de Quito, suscrito ante el señor Notario Décimo Noveno del cantón Quito, el 25 de septiembre de 1997, entre el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito y el Consorcio Adtranz – Cobra – Mercedes Benz, por un monto de US \$54'998,707.07; así como sus contratos complementarios del 28 de abril y del 17 de septiembre de 1999.

La ejecución de la troncal central del Sistema Trolebús, y de su extensión al sur, han sido financiadas por el Gobierno Español mediante un crédito mixto, 50% en

condiciones comerciales de la OCDE y 50% en condiciones del Fondo de Ayuda al Desarrollo (FAD), lo que en suma es un financiamiento calificado por el Ministerio de Economía y Finanzas de la República del Ecuador como Concesionario y ventajoso para el País, por tener un índice de liberalidad del 35%.

El financiamiento descrito obligó a que el acreedor del crédito, es decir, el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, adquiriera la totalidad de bienes y servicios electromecánicos requeridos en el proyecto, a empresas españolas, quienes dentro de los precios unitarios ofertados incluyeron: la totalidad de sus costos directos, indirectos, estudios de detalle, diseños, transporte, seguros, instalación, pruebas y puesta en marcha de los rubros contratados; sin que en los contratos se desglose los precios unitarios.

El hecho de que el proveedor sea de origen español, hace que los precios por ellos ofertados sean mayores a los del mercado local (cuando existen), pues consideran altos costos administrativos (indirectos), de transporte, de instalación y de puesta en marcha, pues la ejecución del proyecto se dirige desde España como sede y localmente mediante representaciones, encareciendo por estas causas sus precios de venta.

Pese a lo expuesto, los valores contractuales de la ejecución de la troncal central y de la extensión sur del Sistema Trolebús, son una muy buena referencia, pues en la mayoría de los casos no existen proveedores locales de los rubros requeridos, y además, de acuerdo a lo estipulado en el Protocolo Financiero Hispano Ecuatoriano vigente, está previsto que la ejecución de la Extensión Norte del Sistema Trolebús sea financiada también por el Gobierno Español, en condiciones similares a las anteriores etapas, por lo que la composición de costos se estima será equivalente a las etapas ejecutadas.

Para el desarrollo del presupuesto referencial que se presenta en el Anexo 7.1., para el caso de las subestaciones de tracción, la línea de media tensión y la línea aérea de contacto, se ha reducido los precios contractuales en un 20%, pues se

estima que este valor corresponde al componente del costo de los estudios de diseño, objeto del presente trabajo.

Un resumen del presupuesto referencial consta en la Tabla 7.1. Como se observa, el mayor componente del costo, 88%, corresponde a los vehículos trolebuses; mientras que a las subestaciones de tracción les corresponde el 6.2%, a la Línea Aérea de Contacto el 3.4%; y, a la Línea de Media Tensión el 2.4%.

Puesto que los vehículos trolebuses no tienen componente de instalación, pues no es factible fabricarlos localmente, por las limitaciones del financiamiento que obliga la adquisición de bienes y servicios de origen español, el valor a invertirse localmente (US \$619.122,80) es realmente bajo, pues corresponde al 2.5% del costo del proyecto, pese a que se ha considerado una disminución en el costo debido al desarrollo de los diseños en el presente trabajo.

| RUBRO | VALORES ESTIMADOS [US\$] | | |
|---------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------|
| | SUMINISTRO DE EQUIPOS | INSTALACIÓN | TOTAL |
| Vehículos trolebuses | 21'840,000.00 | 0.00 | 21'840,000.00 |
| Subestaciones de tracción | 1'470,400.00 | 66,960.00 | 1'537,360.00 |
| Línea de media tensión | 250,796.00 | 338,412.80 | 589,208.80 |
| Línea aérea de contacto | 619,254.00 | 213,750.00 | 833,004.00 |
| TOTAL | 24'180,450.00 | 619,122.80 | 24'799,572.80 |

Tabla 7.1. Resumen del Presupuesto Referencial

En conclusión, el presupuesto referencial de equipamiento eléctrico y los vehículos trolebuses requeridos para la Extensión Norte del Sistema Trolebús, asciende al valor de US \$24'800,000.00, de los cuales US \$24'180,000.00 corresponden a la adquisición de los vehículos trolebuses y equipos; mientras que US \$619,000.00 corresponden a trabajos de instalación (Gastos Locales).

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- Los estudios de transporte que sirvieron de base para el desarrollo del presente trabajo no están actualizados, pues corresponden al año 1996. En todo caso, cualquier ajuste desde el punto de vista de transporte, a los requerimientos del proyecto no cambia la metodología y forma del trabajo realizado, por lo que, de ser necesario, se puede ajustar el diseño eléctrico de forma fácil siguiendo el procedimiento desarrollado en el presente trabajo.
- Para la determinación de la potencia requerida por el sistema, es importante conocer, con un buen nivel de certeza, las condiciones operacionales del sistema de transporte, pues los requerimientos de potencia eléctrica están directamente relacionados con la frecuencia de despacho de los trolebuses, la flota operacional requerida y la topografía de la ruta.
- De acuerdo a la potencia requerida por el sistema, según lo determinado en el Capítulo 2, una sola subestación de tracción de 3,220[kW] de potencia, podría satisfacer la operación del sistema; no obstante, de acuerdo a lo determinado en el Capítulo 2, esta situación no es factible, pues la resistencia del hilo de contacto hace que las caídas de tensión superen los límites máximos permisibles; por otra parte, por confiabilidad tampoco esta es una buena alternativa.
- La condición de confiabilidad del diseño considera que cualquiera de las subestaciones de tracción pueda tomar la carga de una de las subestaciones aledañas en caso de falla de ésta. Esta condición hace que las subestaciones de tracción N°1, 2, 3 y 4 deban ser de 1256, 914, 1221; y, 725[kW] respectivamente. No obstante, por dar un margen de seguridad del 15% y

tener homogeneidad de las instalaciones se ha decidido utilizar 3 subestaciones de tracción de 1450[kW], y una de 840[kW] en el terminal Ofelia, lo cual hace que la Subestación de tracción N° 3 pueda tomar la carga de las subestaciones de tracción N° 2 y 4 simultáneamente.

- Se considera que el sistema no será ampliado a futuro hacia el norte, por lo que la subestación de tracción N° 4 a instalarse en el Terminal Ofelia es de potencia menor que los tres restantes (840[kW]) y dispone de un solo feeder de salida.
- Para el rectificador ha utilizarse en las subestaciones de tracción, rectificador no controlado de 12 pulsos, según lo analizado en el Capítulo 3, se podría utilizar conexión en serie o en paralelo de 2 rectificadores no controlados de 6 pulsos.
- La conexión en serie de dos rectificadores de 6 pulsos hace que cada uno de ellos funcione de forma independiente sin importar el valor del voltaje de los secundarios del transformador, pues el voltaje de salida es la suma de los voltajes de cada rectificador de 6 pulsos. En cambio en la conexión en paralelo se requiere que los voltajes del secundario del transformador sean exactamente iguales entre sí, pues cada uno de los rectificadores aporta al voltaje de salida cuando su voltaje de entrada es mayor que el del otro rectificador, lo cual se da en un 50%, si y solo si, los voltajes de entrada de cada rectificador son exactamente iguales en magnitud y desfasados 30° entre ellos.

Lo expuesta haría pensar que es mejor la configuración serie de rectificadores de 6 pulsos, pero debido a que en las subestaciones de tracción, desde el punto de vista de los elementos semiconductores (diodos), es más exigente el requerimiento de corriente que de voltaje (1933[A] vs. 750[V]), para las subestaciones de tracción se seleccionó la conexión en paralelo

- Desde el punto de vista estrictamente teórico, la distorsión armónica de la corriente de entrada de las subestaciones de tracción superaría en un 0.14% lo establecido en la norma IEEE Std 519-1992 (15%). No obstante, se estima que en la realidad considerando todas las reactancias de la instalación, como la de los transformadores de las subestaciones de distribución y de tracción; y, la reactancia de las líneas de media tensión, no se llegue a superar el valor máximo establecido en la citada norma (15%), razón por la cual en el diseño planteado no se ha requerido de filtros para la distorsión armónica de la corriente de entrada a las subestaciones.
- Para las líneas de media tensión requeridas, se podría utilizar instalaciones aéreas, lo cual abarataría los costos considerablemente; no obstante, por requerimientos de confiabilidad del sistema y del entorno urbanístico, se ha seleccionado para las líneas de media tensión, instalaciones subterráneas.
- El diseño de las Línea Aérea de Contacto, es un tema más bien mecánico, pues se trata de cálculos de momentos y esfuerzos en estructuras. Desde el punto de vista eléctrico, los cálculos realizados en el Capítulo 2. justifican plenamente la determinación del hilo de contacto seleccionado para la instalación de la L.A.C.
- En la determinación de las especificaciones técnicas de los vehículos trolebuses requeridos, se consideraron características similares a los adquiridos por el Municipio en la Primera Fase de la Segunda Etapa del Proyecto, incluyendo las modificaciones que por experiencia en su operación se ha creído conveniente incluirlas; tales como: Bomba de dirección para la tracción eléctrica; sistema de finales de carrera en el mecanismo de engranajes del diferencial; sistema de inyección del motor diesel; entre otras.
- En el Capítulo 7 se presenta un presupuesto referencial del proyecto desarrollado en el presente trabajo. El costo de la inversión es alto comparado con otras tecnologías que darían solución a los requerimientos de transporte.

Comparando el valor requerido para el proyecto desarrollado US \$24'800,000.00, con el valor que representará al Municipio la adquisición de 42 autobuses articulados convencionales para la troncal 6 de Diciembre US \$7'500.000,00, se puede decir que desde el punto de vista de costos de inversión y de capacidad de transporte, es mucho más económico implantar el proyecto con autobuses convencionales que con trolebuses; sin embargo, en término de protección del medio ambiente, el trolebús es totalmente limpio, pues no presenta gases de escape con tracción eléctrica; además disminuye las vibraciones y el ruido.

- Con la finalización del presente trabajo, se concluye que es factible realizar localmente los diseños eléctricos de un proyecto moderno, de índole social, tan importante, como es el transporte público a través de trolebuses. Esto a más de dar reconocimiento técnico local, permitiría al Municipio un importante ahorro en cuanto a los costos de implantación, que según se ha estimado en el Capítulo 7, sería de alrededor del 20%.

8.2. RECOMENDACIONES

- Toda vez que los estudios de transporte que han servido de base para el desarrollo del presente trabajo han sido realizados en 1996, es recomendable y necesario actualizar el estudio, más aun cuando se ha puesto en marcha la troncal Seis de Diciembre "Ecovía" que haría que la oferta y demanda de transporte varíe respecto del año 1996.
- Se recomienda a la unidad de planificación del Municipio determinar las alternativas de transporte a un horizonte mayor a 10 años, pues esto permitiría conocer que tecnología de transporte sería la adecuada en 20 años. Si se trata de una tecnología eléctrica de mayor alcance, como el tren ligero por ejemplo, se justificaría instalar una subestación de tracción de similares características de las otras tres en el terminal Ofelia.

- Considerando que el Municipio dispone de una subestación de tracción móvil de emergencia, de 2000[kVA] de potencia, que hasta el momento no ha sido utilizada; así como también un transformador para rectificador de subestación de 2000[kVA] a 6.3[kV] en el lado de alta tensión, se sugiere que el Municipio utilice estos equipos en la Extensión Norte del Proyecto, lo cual permitiría disminuir los costos de inversión.
- Por la razón expuesta en el punto anterior, y considerando que la diferencia de costos entre subestaciones de 2000[kVA] y 1700[kVA] determinadas en el Capítulo 3, no sería considerable, se recomienda al Municipio requerir en la licitación del proyecto subestaciones de 2000[kVA] permitiendo de esta manera mantener homogeneidad entre las instalaciones nuevas y las existentes.
- Una vez implantado el sistema, es recomendable realizar un análisis del funcionamiento del mismo, y verificar que efectivamente las instalaciones cumplan lo establecido en las normas que rigen la contaminación armónica de corriente.
- Finalmente se debe recomendar al Municipio la definición sobre la ejecución o no del proyecto, toda vez que existen los estudios del mismo y con el presente trabajo se cuenta con un gran aporte a su ejecución; además en el Protocolo Hispano Ecuatoriano está considerada la posibilidad de financiar la ejecución del Proyecto con condiciones financieras similares a las dos etapas anteriores, es decir, un crédito concesionario y ventajoso para el País, con un índice de liberalidad del 35%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Do Sousa, Duarte. **“Análisis Crítico del Desempeño Técnico, Operacional y Gerencial del Sistema Trolebús – Informe Preliminar”**. Consejo Nacional de Modernización del Estado – Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Enero 2001.
- [2] U.P.G.T. **“PLAN MAESTRO DE RACIONALIZACIÓN DEL TRANSPORTE PARA LA CIUDAD DE QUITO, PROYECTO TROLEBÚS ETAPA II”**. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Julio 1996.
- [3] U.E.P.T. **“Características del Proyecto Trolebús Segunda Etapa-Extensión Sur”**. Informe DIR-02-97 Unidad Ejecutora del Proyecto Trolebús. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Septiembre 1997.
- [4] Dirección General de Planificación. **“Quito 2020 Plan de Ordenamiento Territorial”**. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Julio 2000.
- [5] Valencia, Marco. **“Estudio Técnico de las subestaciones de tracción del Sistema Trolebús del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito”**. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Octubre 1998.
- [6] AEG – Cobra. **“Sistema de Transporte Mediante Trolebuses-Quito. Proyecto de Instalaciones Fijas. Memoria Técnica”**. Febrero 1996.
- [7] Adtranz. **“PROYECTO DE SUBESTACIONES RECTIFICADORAS DE TRACCIÓN PARA ALIMENTACIÓN DE TROLEBUSES EN LA CIUDAD DE QUITO (ECUADOR) (1ª FASE DE LA 2ª ETAPA)”**. Octubre 1998.

- [8] Adtranz – Mercedes Benz – Cobra. **“PROYECTO TROLEBÚS, SEGUNDA ETAPA, FASE I. LÍNEA DE ALTA TENSIÓN”**. Febrero 1999.
- [9] Adtranz – Mercedes Benz. **“EL TROLEBÚS COMO SOLUCIÓN AL TRANSPORTE MASIVO URBANO”**. Abril 1998.
- [10] Mercedes-Benz AG. **“Manual de tablas Autobuses”**. Mercedes Benz N° de ref. 6460 1700 04. 1990.
- [11] **“Manual del Ingeniero Mecánico”**. Editorial McGraw-Hill. Novena Edición. 1995.
- [12] Winand, Helmut; **“Descripción. Regulador electrónico de marcha y freno EFB 142 Quito”**. Kiepe Elektrik Technische Dokumentation n°. 4.050647.015. Julio 1996.
- [13] Winand, Helmut; **“Descripción. Convertidor de impulsos directos DPU 305 Quito”**. Kiepe Elektrik Technische Dokumentation n°. 4.050647.011. Agosto 1997.
- [14] Mohan, Ned; Underland, Tore; Robbins, William. **“POWER ELECTRONICS: Converters, Applications and Design”**. John Wiley & Sons, Inc. 1989.
- [15] Rashid, M. **“Power Electronics: Circuits, devices and Applications”**. Prentice – Hall International, Inc. 1988.
- [16] Fisher, Marvin. **“POWER ELECTRONICS”**. Pws-Kent Publishing Company. 1991.
- [17] Kimbark, Edward. **“DIRECT CURRENT TRANSMISSION”** Volumen I. Wiley-Interscience. 1971.

- [18] Edminister, Joseph. **“TEORÍA Y PROBLEMAS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS”**. McGraw – Hill. Agosto 1965.
- [19] Ramírez, José. **“INSTALACIONES ELÉCTRICAS GENERALES”** ENCICLOPEDIA CEAC DE ELECTRICIDAD. Ediciones CEAC, S.A. 5ta. edición. Agosto 1982.
- [20] PIRELLI. **“CATÁLOGO DE CABLES Y ACCESORIOS DE MEDIA TENSIÓN”**. Primera edición. Abril 1998.
- [21] Empresa Eléctrica Quito. **“NORMAS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN”**. Partes A y B. Edición 1994.
- [22] **“Contrato para la ejecución y puesta en marcha de la Primera Etapa del Proyecto Trolebús”**. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito - Consorcio AEG – Cobra. Notaría Vigésimo Octava del cantón Quito. 19 de septiembre de 1994.
- [23] **“Contrato para la ejecución y puesta en marcha de la Primera Fase de la Segunda Etapa del Proyecto Trolebús de la ciudad de Quito”**. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito - Consorcio Adtranz – Cobra – Mercedes Benz. Notaría Décimo Novena del cantón Quito. 25 de septiembre de 1997.