



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**"ESTUDIO Y DISEÑO A ESCALA DEL CONTROL DE
TRACCIÓN DE UN MOTOR ELÉCTRICO PARA EL
TRANSPORTE PÚBLICO DENTRO DEL CAMPUS GUSTAVO
GALINDO V. DE LA ESPOL"**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD, ESPECIALIZACIÓN EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Presentado por

PAÚL ANDRÉS MANTILLA SOLÓRZANO

ANDREI BORIS SOLTYSIK MOLINA

Guayaquil - Ecuador

2005

AGRADECIMIENTO

ING. GUSTAVO BERMUDEZ

Director de Tesis, ING. MARTÍN

LÓPEZ, por su ayuda y

colaboración para la realización de

este proyecto.

DEDICATORIA

A DIOS,

NUESTROS PADRES,

NUESTROS HERMANOS,

Y A TODOS QUIENES

COLABORARON DE UNA U

OTRA FORMA EN LA

REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.

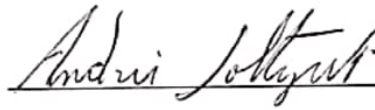
DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Paúl Andrés Mantilla Solórzano



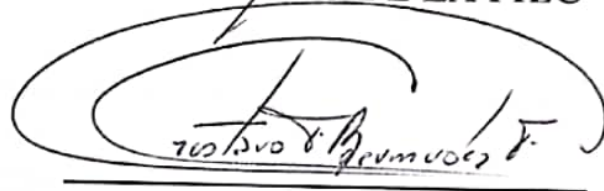
Andrei Boris Soltysik Molina

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL
BIBLIOTECA
INV. No. _____

TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Miguel Yapur
SUBDECANO DE LA FIEC



Ing. Gustavo Bermúdez
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Alberto Manzur
VOCAL PRINCIPAL



Ing. Holger Cevallos
VOCAL PRINCIPAL

RESUMEN

Este trabajo comprende el estudio y diseño de un sistema de control de tracción de un bus eléctrico para la ESPOL Campus Prosperina y un modelo a escala del mismo. Este estudio se lo realizo usando un sistema de alimentación monofasico de alto voltaje, esto no es común para un sistema de este tipo, se lo hizo para aprovechar la alimentación que hay dentro del campus de la ESPOL. El estudio y el diseño realizado determinará las ventajas y desventajas de usar una alimentación de este tipo. Para el diseño del sistema de control del bus se usará un PLC el cual controlará un inversor que será el que controle la velocidad del motor variando la frecuencia.

Además del diseño del sistema de control se tuvo que añadir el estudio y el diseño de componentes importantes para el funcionamiento de un bus eléctrico, estos son, el pantógrafo que es por donde pasa la energía eléctrica de las líneas hacia el bus, y las catenarias, que son donde van colocadas las líneas de transmisión. El modelo a escala construido permite observar en forma real lo dicho anteriormente y es una visión de

lo que podría ser en un futuro el funcionamiento de un bus eléctrico dentro del campus.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE ABREVIATURA.....	XXI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XXIV
INTRODUCCIÓN.....	XXV

CAPÍTULO I

VARIADORES DE VELOCIDAD.....	1
1.1 Inversores.....	1
1.1.1 Principio del Inversor Monofásico.....	2
1.1.2 Inversor Monofásico de Medio Puente.....	5
1.1.3 Inversor Monofásico de Puente Completo.....	11
1.2 Salida PWM.....	20
1.2.1 Conmutación Unipolar.....	21
1.3 Inversor Trifásico.....	24
1.3.1 PWM para Inversores Trifásicos.....	26
1.4 Variadores para Motores Asíncronos.....	29

1.4.1 El Motor Trifásico.....	29
1.4.2 Variación de la Tensión de Alimentación.....	34
1.4.3 Recuperación de Potencia del Secundario.....	36
1.4.4 Variación de Frecuencia y Tensión de Alimentación....	38
1.5 Los Onduladores Autónomos.....	39
1.5.1 Realización de Onduladores Trifásicos.....	40

CAPÍTULO II

BUS ELÉCTRICO Y SU SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

2.1 Diseño Eléctrico del Bus.....	41
2.1.1 Selección del Motor Eléctrico.....	41
2.1.1.1 Cálculos para la Selección.....	42
2.1.1.1.1 Cálculo del Esfuerzo de Tracción y Potencia del Motor Eléctrico.....	43
2.1.1.1.2 Resistencias al Movimiento.....	45
2.1.1.1.3 Potencia de los Motores.....	49
2.1.1.2 Cálculo Teórico.....	57
2.1.1.2.1 Tracción Máxima.....	58
2.1.1.2.2 Resistencias.....	58

2.1.1.2.3	Tracción Total.....	59
2.1.1.2.4	Potencia del Motor Jaula de Ardilla....	59
2.1.1.2.5	Velocidad.....	60
2.1.1.2.6	Par Motor.....	61
2.1.1.3	Datos Técnicos del Motor.....	62
2.1.2	Diseño y Control del Circuito Electrónico.....	63
2.1.2.1	Componentes Principales.....	63
2.1.2.2	Componentes de Medición.....	66
2.1.2.3	Componentes Adicionales.....	70
2.1.2.4	Diagrama de Bloques.....	71
2.1.2.4.1	Diagrama del Regulador Marcha.....	71
2.1.2.4.2	Diagrama de Conexión de Regulación..	74
2.1.2.5	Diagrama Esquemático.....	75
2.1.2.5.1	Diagrama del Control de Tracción.....	75
2.1.2.5.2	Disposición de Componentes del Equipo Eléctrico.....	76
2.1.2.5.3	Sistema de Información y Control.....	77
2.1.3	Controlador Lógico Programable (PLC).....	78

2.1.3.1 Principales Diagramas de Flujo del Control	
del PLC.....	78
2.1.3.2 Entradas y Salidas del PLC.....	85
2.1.3.2.1 Entradas.....	85
2.1.3.2.2 Salidas.....	93
2.1.3.2.3 Diagrama de Entradas/Salidas al PLC...	101
2.1.3.3 Programa del PLC.....	102
2.2 Diseño del Pantógrafo.....	103
2.2.1 Principales Características del Pantógrafo.....	103
2.2.1.1 Propiedades del Colector.....	108
2.2.1.2 Fuerzas de Contacto entre el Pantógrafo y la	
Línea de Tensión.....	109
2.2.1.3 Fuerza de Contacto Aerodinámicas.....	111
2.2.1.4 Fuerza de Contacto Dinámica.....	113
2.2.2 Parámetros para el Diseño del Pantógrafo.....	114
2.2.3 El Pantógrafo DSA-350S.....	115
2.2.4 Materiales para la Fabricación del Colector y la	
Línea de Contacto.....	118
2.2.5 Requerimientos del Pantógrafo.....	123

2.2.6 Sistema de Ascenso y Descenso del Pantógrafo.....	126
2.3 Sistema de Alimentación.....	130
2.3.1 Red AC Monofásica de 60 HZ.....	130
2.3.2 Subestación.....	136
2.3.3 Las Catenarias.....	141
2.3.3.1 Elementos de la Catenarias.....	143
2.3.3.2 Tipo de Catenarias y Características.....	147

CAPÍTULO III

MODELO ESCALA.....	155
3.1 Diseño del Modelo a Escala.....	155
3.1.1 Construcción de la Pista.....	156
3.1.2 Construcción de las Catenarias y de las Líneas de Transmisión.....	157
3.1.3 Construcción del Bus (Modelo a Escala).....	160
3.1.3.1 Carrocería del Bus.....	160
3.1.3.2 Chasis del Bus.....	163
3.1.4 Sistema Eléctrico del Bus.....	166
3.1.4.1 Especificaciones del Motor.....	166

3.1.4.2	Construcción y Diseño del Pantógrafo.....	168
3.1.4.3	Especificaciones del Inversor (Inverter).....	173
3.1.4.3.1	Entradas/Salidas del Inversor.....	176
3.1.4.3.2	Selección de Valores de Frecuencia del Inversor.....	178
3.1.4.4	Especificaciones del PLC.....	180
3.1.4.5	Elementos Adicionales.....	183
3.1.4.5.1	Variador de Velocidad para un Motor DC.....	183
3.1.4.5.2	Banco de Relés.....	185
3.1.4.5.3	Baterías.....	186
3.1.5	Diagramas y Esquemas para el Control del Motor AC....	188
3.1.5.1	Diagrama de Conexión de Regulación.....	188
3.1.5.2	Diagrama de Bloques del Regulador Marcha.....	188
3.1.6	Diagrama de Conexiones del Sistema de Control.....	189
3.1.7	Prueba Realizada.....	190
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		191

BIBLIOGRAFÍA.....	195
ANEXOS.....	197
ANEXO A.....	198
ANEXO B.....	199
ANEXO C.....	200
ANEXO D.....	201

ÍNDICE DE FIGURAS

PAG

CAPITULO I

VARIADORES DE VELOCIDAD

1.1 Circuito básico.....	2
1.2 Salidas de ondas.....	4
1.3 Inversor monofásico de medio puente.....	6
1.4 Forma de onda de salida para una carga resistiva.....	7
1.5 Forma de onda de salida para una carga R-L.....	10
1.6 Inversor monofásico de puente completo.....	12
1.7 Forma de onda del voltaje de salida.....	12
1.8 Forma de onda para una carga R-L.....	14
1.9 Forma de onda del voltaje de salida con ángulo de control.....	19
1.10 Inversor monofásico y sus tipos de salidas.....	22
1.11 Tipo de modulación (PWM) y señales de salidas.....	23
1.12 Señales de salida de un inversor trifásico.....	25
1.13 Voltajes de línea a neutro en una conexión estrella y corriente de la fase a para una carga R-L.....	26

1.14 Señales de referencia y de salida en una operación PWM con carga R-L.....	28
1.15 Circuito equivalente de un motor polifásico.....	32
1.16 Regulador de velocidad de un motor trifásico.....	35
1.17 Recuperación de potencia del secundario.....	37
1.18 Ondulador trifásico.....	40

CAPITULO II

DISEÑO DE CONTROL PARA EL BUS ELECTRICO

2.1 Resistencia en rampa.....	47
2.2 Pantógrafo utilizado en los buses de Quito.....	105
2.3 Pantógrafo DSA-350S.....	106
2.4 Vista frontal del pantógrafo.....	107
2.5 Resistencia aerodinámica y pérdida de potencia.....	111
2.6 Componentes de la fuerza de contacto.....	112
2.7 Fuerza de contacto vs velocidad.....	116
2.8 Pantógrafo DSA-350S.....	117
2.9 Rangos de desgaste vs corriente.....	121
2.10 Rangos de desgaste vs velocidad.....	121

2.11 Rangos de desgaste vs fuerzas de contacto.....	122
2.12 Rangos de desgaste vs numero de trenes por día.....	123
2.13 fuerza de contacto vs velocidad.....	125
2.14 Gancho que sostiene el pantógrafo.....	129
2.15 Mecanismo del pantógrafo.....	130
2.16 Alternativas de conexiones monofásicas de 60Hz de un red	
Trifásica.....	133
2.17 Diseño básico del sistema de alimentación.....	134
2.18 Subestación de producción autónomo.....	137
2.19 Subestación de conversión centralizada.....	138
2.20 Diferentes sistemas de alimentación en una subestación.....	140
2.21 Elementos de la catenaria.....	143
2.22 Colocación de catenaria en curva.....	146
2.23 Catenaria ligera.....	147
2.24 Catenaria simple.....	148
2.25 Catenaria compuesta.....	149
2.26 Suspensión en Y.....	150
2.27 Catenaria de malla.....	151
2.28 Catenaria de sustentadores alternos.....	151

2.29 Catenaria con sustentador dividido.....	151
2.30 Aislantes.....	153

CAPITULO III

CONSTRUCCION DEL MODELO A ESCALA

3.1 Dimensiones de la pista y su forma, sección de la recta y sección de la curva.....	157
3.2 Arcos para sostener las líneas de tensión.....	159
3.3 Varilla de bronce y forma de sus uniones.....	159
3.4 Vista superior de la carrocería del bus.....	161
3.5 Vista lateral derecha de la carrocería del bus.....	161
3.6 Vista lateral izquierda de la carrocería del bus.....	162
3.7 Vista frontal y trasera de la carrocería del bus.....	162
3.8 Vista aérea del chasis del bus.....	163
3.9 Vista lateral derecha del chasis del bus.....	164
3.10 Vista lateral izquierda del chasis del bus.....	164
3.11 Vista de las guías del bus.....	165
3.12 Vista del motor con el reductor usado en el bus.....	167
3.13 Vista frontal y de la caja de conexiones del motor.....	168

3.14 Vista superior del pantógrafo con sus respectivos elementos.....	170
3.15 Vista lateral izquierda del pantógrafo.....	171
3.16 Vista lateral derecha del pantógrafo.....	171
3.17 Vista frontal y posterior del pantógrafo.....	172
3.18 Posición del pantógrafo en el bus.....	172
3.19 Grafico del circuito de control del inversor.....	173
3.20 Grafico del esquema de transistores del inversor.....	174
3.21 Diagrama de bloques del inversor.....	175
3.22 Diagrama e conexiones de salida y entrada al inversor.....	175
3.23 Foto del inversor usado en el bus.....	178
3.24 Diagrama de entrada y salida al PLC.....	180
3.25 Foto del PLC usado en el bus.....	182
3.26 Esquema del circuito variador de velocidad para el pantógrafo...	184
3.27 Foto del variador de velocidad terminado.....	184
3.28 Esquemas y fotos del banco de reles para el control del pantógrafo.....	186
3.29 Baterías usadas en el bus.....	187
3.30 Diagrama de conexión de regulación.....	188

3.31 Diagrama de bloques del regulador marcha.....	188
3.32 Diagrama de conexiones del sistema de control.....	189

INDICE DE ABREVIATURA

- DC: Corriente directa
- AC: Corriente alterna
- T: Periodo
- Ton: Periodo de encendido
- d: Ciclo de trabajo
- ω : Velocidad angular
- Vdc: Voltaje directo
- E: Voltaje
- Vo: Voltaje inicial
- R: Resistencia
- P: Potencia
- Io: Corriente inicial
- θ : Angulo de atraso de la onda
- t: Tiempo
- α : Ancho de pulso
- p: Número de polos
- g: Deslizamiento
- N: Velocidad del rotor

- N_s : Velocidad de la onda de la fmm del estator
- P_{gir} : Potencia de campo giratorio
- m_1 : Número de fases
- r_2' : Resistencia reflejada al primario
- $I_2'^2$: Corriente del rotor reflejada en el estator
- T_{des} : Torque desarrollado
- f : Frecuencia
- μ : coeficiente de adherencia
- Q_1 : peso total del automotor
- T_a : Esfuerzo de tracción máximo
- r_a : Resistencia del aire
- r_r : Resistencia de Rodamiento
- v : velocidad en km/h
- b : coeficiente
- r_p : Resistencia en Rampa
- r_{ac} : Resistencia de Aceleración
- G : Peso total del automotor.
- r_T : Suma de las resistencias al movimiento

- η_t : rendimiento de la transmisión
- P_m : Potencia del motor
- V_c = Velocidad media en Km/H
- C = Coeficiente que depende de las rampas y de las curvas
- A = Energía convertida en calor
- I_m : corriente constante
- I_c : corriente de regimen continuo
- P_c = Potencia continua en kW.
- U = Tensión.
- η = Rendimiento del motor.
- R = Radio de la rueda motriz.
- n_1 = Número de revoluciones del piñón montado sobre el eje del motor.
- r_1 = Radio del piñón montado sobre el eje del motor.
- n_2 = Número de revoluciones de la rueda dentada sobre el eje del motor.
- r_2 = Radio de la rueda dentada sobre el eje del motor
- M : Par motor
- HP: Caballos de fuerza

INDICE DE TABLAS

	PAG
TABLA I. Conmutación de un inversor monofásico básico...	3
TABLA II. Conmutación de un inversor de puente completo..	13
TABLA III. Conmutación de un inversor monofásico de puente completo con el cruce por cero.....	18
TABLA IV. Conmutación unipolar.....	21
TABLA V. Conmutación por alta y baja frecuencia.....	23
TABLA VI. Conmutación de salida trifásica.....	27
TABLA VII. Coeficiente de adherencia.....	44
TABLA VIII. Motor jaula de ardilla.....	62
TABLA IX. Fuerza de contacto.....	114
TABLA X. Características del pantógrafo DSA-350S.....	118
TABLA XI. Características del inversor Mitsubishi Electric Freqrol-A200.....	176
TABLA XII. Resultados.....	190

INTRODUCCIÓN

Los diferentes tipos de transporte representan hoy en día uno de los aspectos más importantes en una sociedad. Hoy sería impensable que, en el mundo moderno donde se vive, no se cuente con sistemas eficientes de transporte eléctrico, ferroviario, automotor, marítimo y aéreo debido a que de ellos depende el pleno desenvolvimiento de la vida económica, política y social de un país.

El bus eléctrico representa una solución al gran problema de la contaminación y el tráfico en grandes ciudades, este sistema de transporte se lo usa bastante en los países desarrollados especialmente en Europa y Norteamérica donde se ha comprobado su eficiencia, así mismo se puede ver el trolebús en la ciudad de Quito.

Diseñar y construir un trolebús para el campus de la ESPOL puede ser el primer paso para el desarrollo de un sistema de transporte eléctrico para la ciudad de Guayaquil lo cual requeriría de un estudio mucho más profundo y pruebas previas con modelos a escala.

Esta tesis se enfoca mas a diseñar el sistema de tracción de un bus eléctrico. Usando las líneas de tensión existentes en el campus prosperina de la ESPOL, al final se concluirá si es conveniente este sistema comparándolo con el sistema de tracción usado en el trole de la ciudad de Quito.

CAPITULO I

VARIADORES DE VELOCIDAD

1.1 INVERSORES

Los inversores son circuitos estáticos que convierten un voltaje de entrada DC en un voltaje simétrico de salida AC, con una magnitud y frecuencia deseada. Los inversores se los clasifica en dos grupos:

Monofásicos {
* Medio-Puente
* Puente-Completo

Trifásico {
* Puente-Completo

Los inversores tienen una amplia gama de utilizaciones, sobre todo en las aplicaciones industriales como en el control de velocidad de los motores AC síncronos y de inducción, calefacción por inducción, alimentaciones ininterrumpibles de potencia (UPS), entre otros.

1.1.1 PRINCIPIO DEL INVERSOR MONOFÁSICO

El circuito básico para generar un voltaje alterno monofásico de una fuente de alimentación DC se muestra en la *figura 1.1*. De la *figura 1.1* se observa que los conmutadores S1 y S2 conectan y desconectan la fuente DC a la carga alternadamente, dando como resultado una forma de onda de voltaje AC cuadrada en la salida (1).

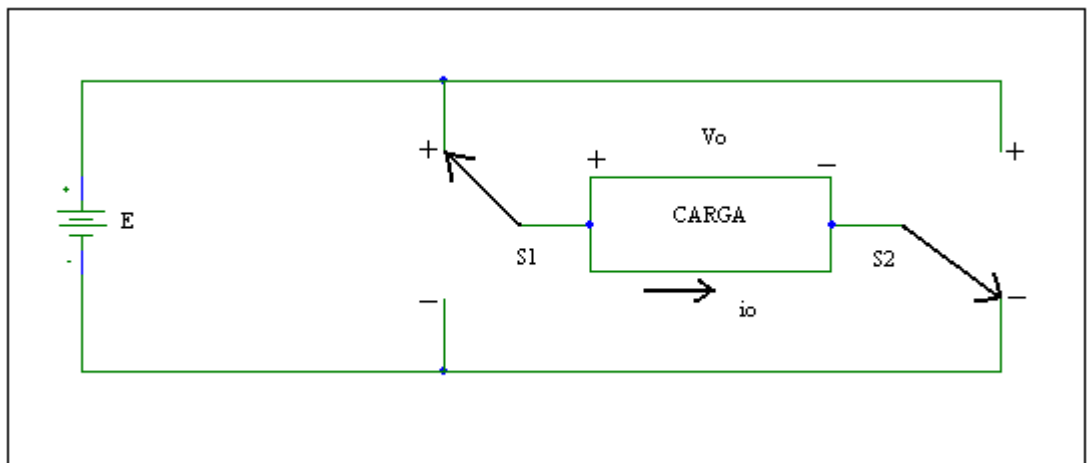


FIG. 1.1 Circuito Básico

La *Tabla 1.1* muestra la combinación de los 4 estados de los dos conmutadores (1).

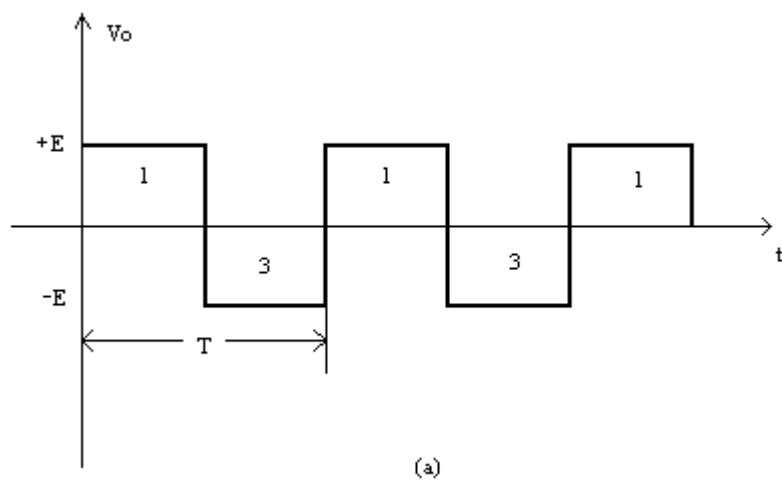
TABLA I: Conmutación de un Inversor Monofásico Básico

ESTADO	S1	S2	V _o
1	+	-	+E
2	-	-	0

3	-	+	-E
4	+	+	0

Cuando los estados 1 y 3 se repiten alternadamente se genera un voltaje de onda cuadrada en la salida, mostrado en la *figura 1.2 (a)*.

Si los estados 2 y 4 se combinan con los estados 1 y 3 se genera una onda cuasi-cuadrada como el de la *figura 1.2 (b) (1)*.



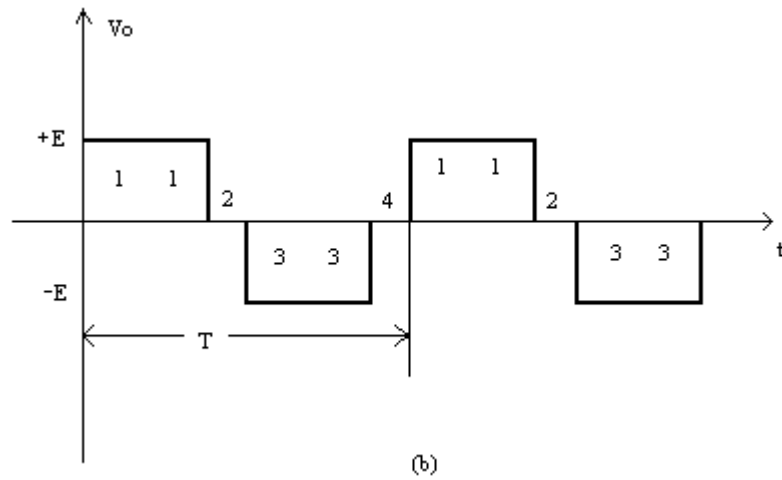


FIG. 1.2

(a) Salida de Onda Cuadrada

(b) Salida de Onda Cuasi-Cuadrada

La frecuencia del voltaje alterno se la determina por la rapidez en el cambio de estado (conmutador). Si el periodo es T (segundos), entonces la frecuencia es (1):

$$f = 1/T \quad (\text{Hz}) \quad (1.1)$$

Dos métodos son utilizados para que la onda de salida se acerque a la onda sinusoidal:

1. Un circuito filtro en la salida del inversor.
2. La Modulación del Ancho de Pulso (PWM) (1).

1.1.2 INVERSOR MONOFÁSICO DE MEDIO PUENTE

El voltaje DC de entrada puede ser una batería o la salida de un rectificador. Un capacitor es colocado entre el voltaje DC de entrada y el inversor; el capacitor asegura que cualquier cambio en el estado de los conmutadores del inversor no cambia significativamente el voltaje DC de entrada (2).

El inversor monofásico de medio puente se lo utiliza en aplicaciones de baja potencia. La *figura 1.3* muestra el inversor monofásico de medio puente. El circuito inversor está formado por dos transistores Q1 y Q2, dos capacitores que dividen el voltaje DC de la fuente, dos diodos de paso libre que controlan el flujo de corriente en la carga y una fuente DC (2).

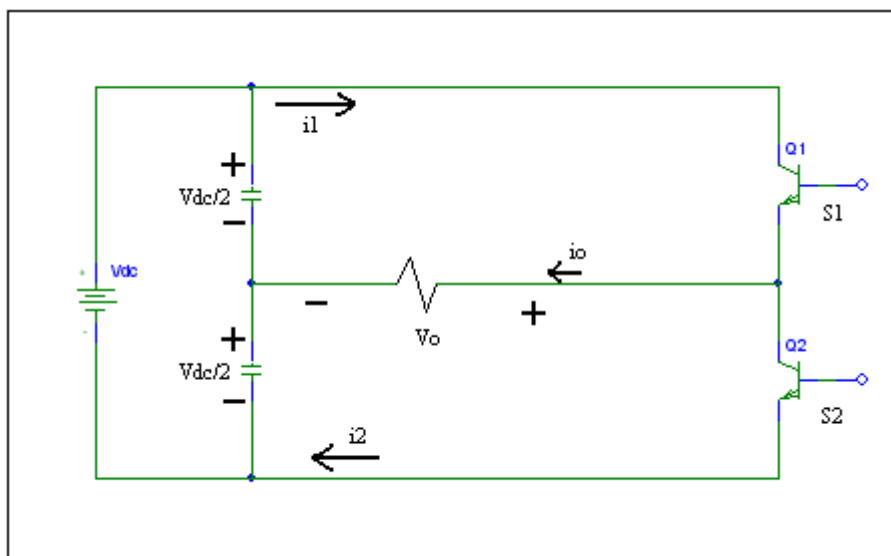


FIG. 1.3 Inversor Monofásico de Medio Puente

Cada capacitor tiene el mismo valor y su voltaje es de $V_{dc}/2$. Cuando S1 está cerrado, el voltaje en la carga es $V_{dc}/2$. Cuando S2 se cierra el voltaje en la carga es de $-V_{dc}/2$. Controlando el periodo T se controla la frecuencia del voltaje de salida del inversor, esto se logra controlando el disparo de los transistores Q1 y Q2 (2).

El circuito de disparo de los transistores debe estar diseñado de tal manera que no conduzcan Q1 y Q2 simultáneamente para evitar que estos cortocircuiten la fuente de entrada DC. Las respectivas formas de onda de salida para una carga resistiva se muestran en la *figura 1.4* (2).

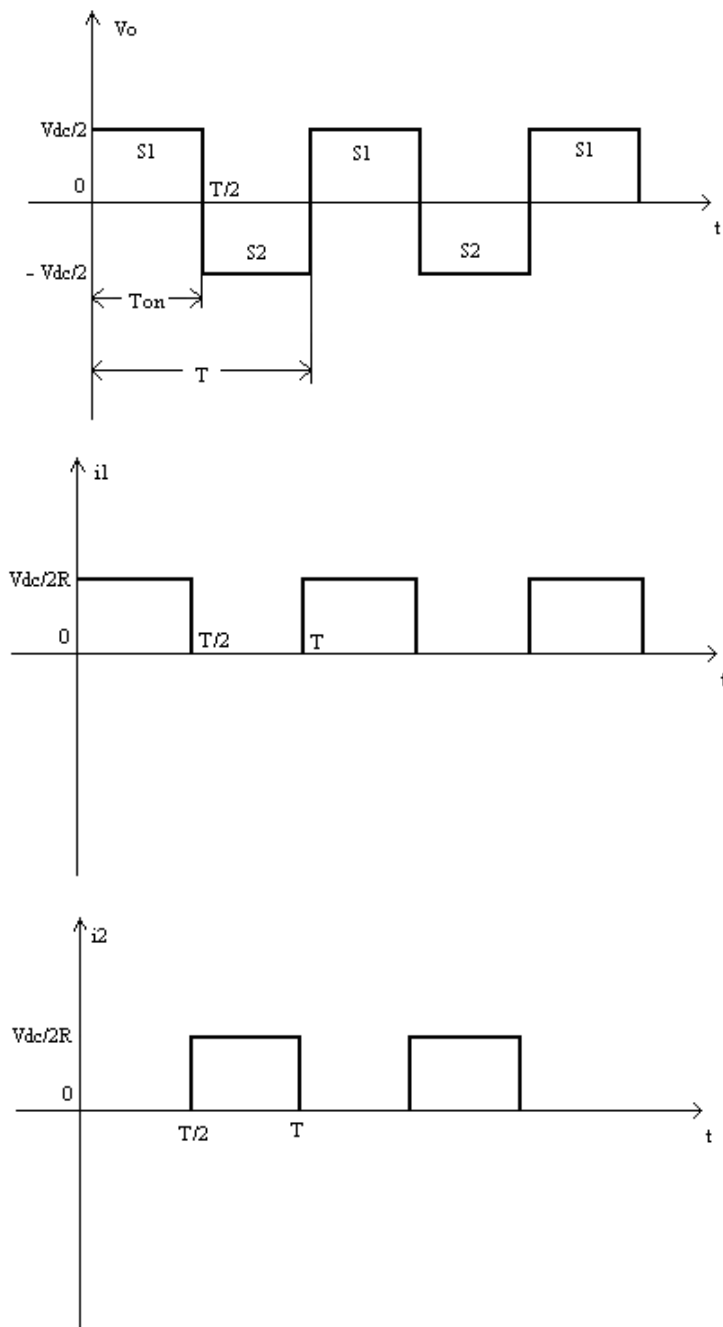


FIG 1.4

Forma de Onda de Salida para una Carga Resistiva

Si cada conmutador, $S1$ y $S2$, son cerrados en intervalos T_{ON} ,

entonces el voltaje instantáneo de salida expresada en una serie de

Fourier es:

$$V_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_{dc}}{n\pi} \sin(n\omega t)$$

$$V_o = 0 \text{ para } n = 2, 4, \dots$$

(1.2)

Donde $\omega = 2\pi \times f$ [rad/s]

V_o para carga resistiva también se lo puede expresar como (1):

$$V_o = E \times \frac{T_{on}}{T/2} = 2E \times \frac{T_{on}}{T} = 2E \times d$$

(1.3)

Donde $E = V_{dc}/2$ (1)

$$d = \frac{T_{on}}{T} \quad (\text{duty cycle})$$

Para $n = 1$ la ecuación (1.2) proporciona el valor rms de la componente fundamental:

$$V = \frac{2V_{dc}}{\sqrt{2}\pi} = 0.45V_{dc}$$

(1.4)

También (1):

$$V_o(rms) = \sqrt{2d} \times E \quad (1.5)$$

La forma de onda de la corriente de salida depende de la carga. Para una carga resistiva se puede observar en la *figura 1.4* y su ecuación es (1):

$$I_o = V_o / R \quad (1.6)$$

El promedio de potencia absorbida por una carga resistiva es (1):

$$P = \frac{V_o(rms)}{R} = 2d \frac{E^2}{R} \quad (1.7)$$

Si la carga es inductiva, la corriente de salida no cambia de dirección en el mismo instante en que el voltaje de la carga cambia de polaridad, es entonces cuando el diodo de paso libre provee un paso a la corriente de carga para que siga fluyendo en la misma dirección hasta que esta llegue a cero. Las formas de onda para una carga RL se muestran en la *figura 1.5*. Si S1 es desactivado en $T = T/2$ la corriente de carga fluiría a través de D2, la carga RL y la mitad inferior de la fuente DC, hasta que esta llegue a cero (*figura*

1.3) durante un tiempo t_1 . Cuando S2 se desactiva en T , la corriente de carga fluye a través de D1, la carga RL y la mitad superior de la fuente DC (1).

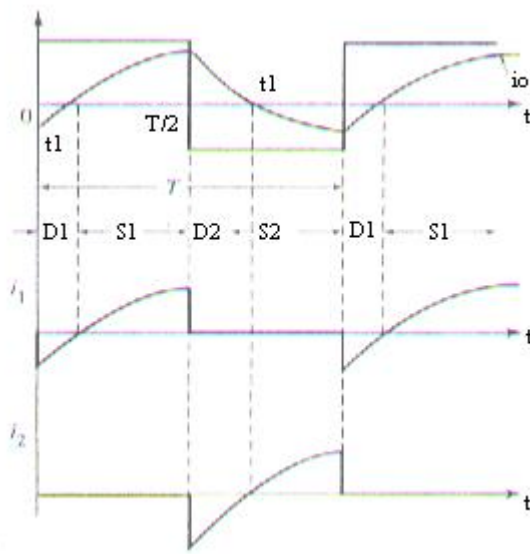


FIG. 1.5 (1)
Forma de Onda de Salida para una Carga RL

Para una carga RL, la corriente instantánea de la carga i_o se la puede expresar como:

$$i_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_{dc}}{n\pi\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \times \sin(n\omega t - \theta_n) \quad (1.8)$$

Donde $\theta_n = \tan\left(\frac{n\omega L}{R}\right)$

La potencia de salida debida a la corriente de la componente fundamental e la potencia útil, y la potencia debida a las corrientes armónicas se la disipa en forma de calor, lo cual aumenta la temperatura de la carga.

1.1.3 INVERSOR MONOFÁSICO DE PUENTE COMPLETO

Un inversor monofásico de puente completo se lo construye combinando dos inversores de medio puente. La *figura 1.6* muestra el circuito del inversor monofásico de puente completo. Este circuito está constituido por cuatro conmutadores (transistores, tiristores), cuatro diodos de paso libre y una fuente DC.

Cuando S1 y S2 están cerrados la salida de voltaje en la carga será de +Vdc. Si S3 y S4 se cierran la salida de voltaje en la carga será de -Vdc. Esto se muestra en la tabla 1.2. Cerrar y abrir periódicamente ya sea S1 y

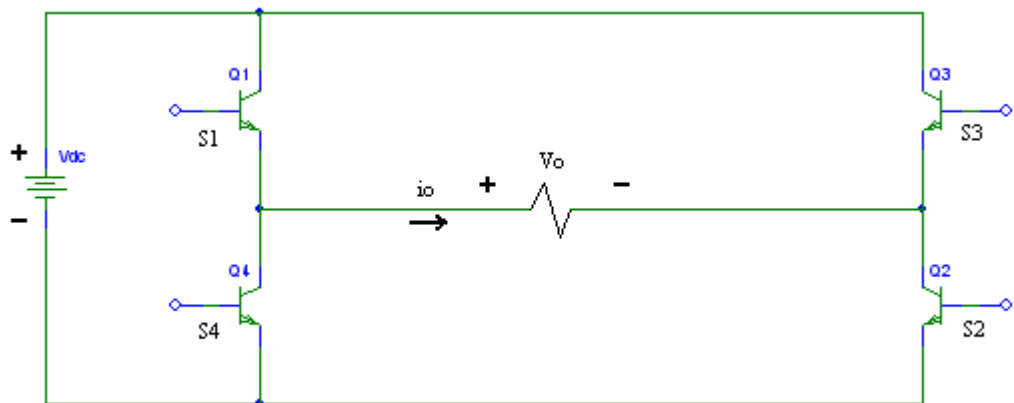


FIG. 1.6
Inversor Monofásico de Puente Completo

S2 ó S3 y S4 producirá un voltaje de onda cuadrada en la salida, como se ve en la *figura 1.7 (2)*.

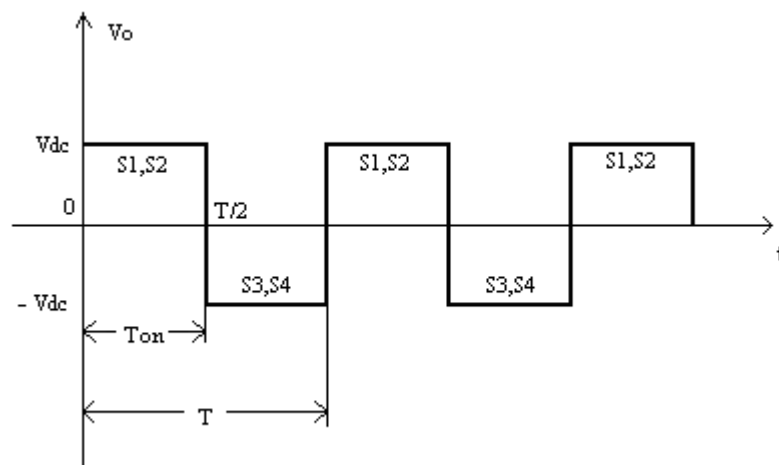


FIG. 1.7
Forma de Onda del Voltaje de Salida

TABLA II: Conmutación Inversor Monofásico de Puente Completo

ESTADO	S1	S2	S3	S4	Vo
1	On	On	Off	Off	+Vdc
2	Off	Off	On	On	-Vdc

3	On	On	Off	Off	+Vdc
4	Off	Off	On	On	-Vdc

La forma de onda de la corriente i_o depende de los componentes de la carga. Cuando es una carga resistiva la forma de onda de la corriente i_o concuerda con la forma de onda del voltaje de salida (*figura 1.7*), la magnitud depende de la resistencia y del voltaje. Para una carga inductiva, la forma de onda se parecerá más a una onda sinusoidal que la de voltaje, esto es debido a las propiedades del inductor. La *figura 1.8* muestra las formas de onda para una carga RL (2).

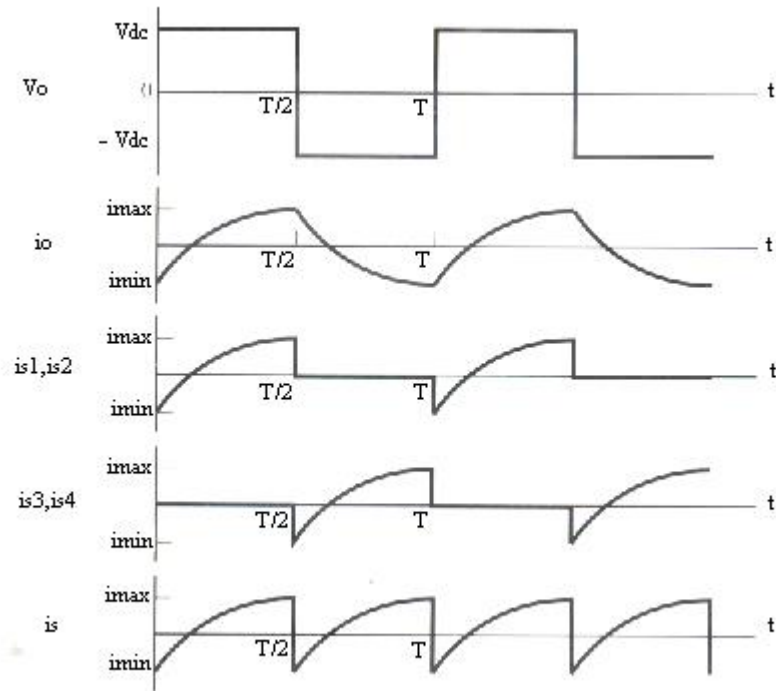


FIG. 1.8 (2)
Forma de Onda para una Carga RL

Para una carga RL y una salida de voltaje de onda cuadrada S1 y S2 se cierran a $t = 0$. Entonces el voltaje en la carga es de $+V_{dc}$, y la corriente comienza a incrementarse en la carga y en S1 y S2 (*figura 1.8*). Se expresa la corriente que pasa por la carga como la suma de una respuesta forzada más una respuesta natural:

$$i_o(t) = i_f(t) + i_n(t) = \frac{V_{dc}}{R} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (1.9)$$

Donde A es una constante, evaluada por las condiciones iniciales y

$$\tau = \frac{L}{R}$$

A $t = T/2$, S1-S2 se abren y S3-S4 se cierran. El voltaje en la carga RL es $-V_{dc}$ y la corriente se la expresa:

$$i_o(t) = -\frac{V_{dc}}{R} + Be^{-\frac{(t-\frac{T}{2})}{\tau}}, \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T \quad (1.10)$$

Donde B es una constante evaluada por las condiciones iniciales.

En condiciones estables la corriente de salida i_o es periódica y simétrica en cero, como se puede observar en la *figura 1.8*. Entonces la condición inicial para la *ecuación 1.9* es $i_{\min}$, mientras que para la *ecuación 1.10* la condición inicial es $i_{\max}$.

Evaluando la *ecuación 1.9* a $t = 0$:

$$i_o(0) = \frac{V_{dc}}{R} + Ae^0 = i_{\min}$$

$$\Rightarrow A = i_{\min} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (1.11)$$

Evaluando la *ecuación 1.10* a $t = T/2$:

$$i_o(T/2) = -\frac{V_{dc}}{R} + Be^0 = i_{\max}$$

$$\Rightarrow B = i_{\max} + \frac{V_{dc}}{R}$$

(1.12)

En estado estable las ecuaciones de la corriente i_o son:

$$i_o(t) = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{R} + (i_{\min} - \frac{V_{dc}}{R})e^{-\frac{t}{\tau}}, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -\frac{V_{dc}}{R} + (i_{\max} + \frac{V_{dc}}{R})e^{-\frac{(t-\frac{T}{2})}{\tau}}, & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases}$$

(1.13)

Evaluando para $i_{\max}$ la primera parte de la *ecuación 1.13* a $t = T/2$:

$$i(T/2) = i_{\max} = \frac{V_{dc}}{R} + (i_{\min} - \frac{V_{dc}}{R})e^{-\frac{T}{2\tau}}$$

(1.14)

Por simetría, $i_{\min} = -i_{\max}$

Resolviendo para $i_{\max}$ la *ecuación 1.14*:

$$i_{\max} = -i_{\min} = \frac{V_{dc}}{R} \left[\frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \right]$$

(1.15)

La ecuación de la corriente rms es:

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left[\frac{V_{dc}}{R} + (i_{min} - \frac{V_{dc}}{R}) e^{-\frac{t}{\tau}} \right]^2 dt} \quad (1.16)$$

La potencia absorbida por la carga es (2):

$$P_o = i_{rms} \times R \quad (1.17)$$

Si los conmutadores son ideales entonces la potencia entregada por la fuente debe ser la misma que la absorbida por la carga. La potencia entregada por la fuente es (2):

$$P_i = V_{dc} \times I_s \quad (1.18)$$

El voltaje rms de salida es:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{dc}^2 dt} = V_{dc} \quad (1.19)$$

El voltaje instantáneo de salida expresado en una serie de Fourier:

$$V_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (1.20)$$

Para $n = 1$ da el valor rms de la componente fundamental:

$$V_1 = \frac{4V_{dc}}{\sqrt{2\pi}} = 0.9V_{dc} \quad (1.21)$$

En un inversor de puente completo la potencia de salida es cuatro veces mayor y la componente fundamental es dos veces más alta que la de los inversores de medio puente.

Cuando se controla el voltaje de salida utilizando un tercer estado, hay un tiempo α en el cual el voltaje de salida es cero. La secuencia de los conmutadores se puede observar en la *tabla 1.3*, y su forma de onda en la *figura 1.9 (2)*.

TABLA III: Conmutación Inversor Monofásico de Puente Completo con el Cruce por Cero

ESTADO	S1	S2	S3	S4	V _o
1	On	On	Off	Off	+V _{dc}
2	On	Off	On	Off	0
3	Off	Off	On	On	-V _{dc}
4	Off	On	Off	On	0
5	On	On	Off	Off	+V _{dc}

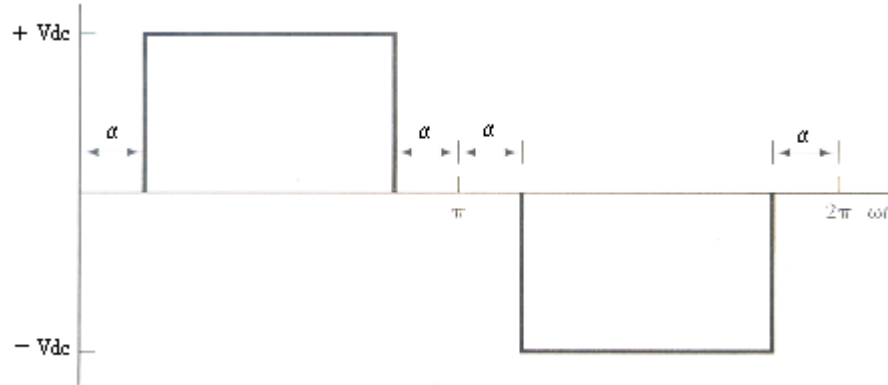


FIG. 1.9
Forma de Onda del Voltaje de Salida con Angulo de Control

El valor rms de la forma de onda de voltaje de la *figura 1.9* es

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} (V_{dc})^2 d(\omega t)} = V_{dc} \sqrt{1 - \frac{2\alpha}{\pi}} \quad (1.22)$$

Expresado en serie de Fourier

$$V_o(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} V_n \sin(n\omega_o t) \quad (1.23)$$

Entonces por la simetría de la mitad de onda, las amplitudes son

$$V_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{dc} \times \sin(n\omega_o t) d(\omega_o t) = \left(\frac{4V_{dc}}{n\pi}\right) \cos(n\alpha) \quad (1.24)$$

Donde α es el ángulo de voltaje cero. Se ve que la amplitud de salida de cada frecuencia está en función de α .

1.2 SALIDA PWM

En la modulación por ancho de pulso (PWM), la amplitud del voltaje de salida puede ser controlado por las ondas moduladas. La reducción en las características de los filtros para los armónicos y el control de la amplitud del voltaje de salida son dos ventajas del PWM. La desventaja es que para generar el PWM se necesita de circuitos electrónicos más complejos e incrementa las pérdidas debido al incremento de la conmutación (2).

El control de los interruptores (tiristores) para un PWM sinusoidal requiere:

- 1) Una señal de referencia, algunas veces llamada señal de modulación o de control, la cual en este caso es una onda sinusoidal.

- 2) Una señal portadora, la cual en este caso es una onda triangular que controla la frecuencia con que se abren y cierran los interruptores (tiristores) (2).

1.2.1 CONMUTACIÓN UNIPOLAR

En este tipo de conmutación la salida cambia de alto a cero, como se muestra a continuación:

TABLA IV: Conmutación Unipolar

CONDICION	CONMUTADOR	ESTADO
$V_{\text{seno}} > V_{\text{triangular}}$	S_1	ON
$-V_{\text{seno}} < V_{\text{triangular}}$	S_2	ON
$-V_{\text{seno}} > V_{\text{triangular}}$	S_3	ON
$V_{\text{seno}} < V_{\text{triangular}}$	S_4	ON

Note que el par de interruptores (S_1, S_4) y (S_2, S_3) son complementarios; cuando un interruptor está cerrado, el otro está abierto. Los voltajes v_a y v_b de la *figura 1.10a* alternan entre $+V_{dc}$ y cero. El voltaje de salida es $v_o = v_{ab} = v_a - v_b$ como se muestra en la *figura 1.10b* (2).

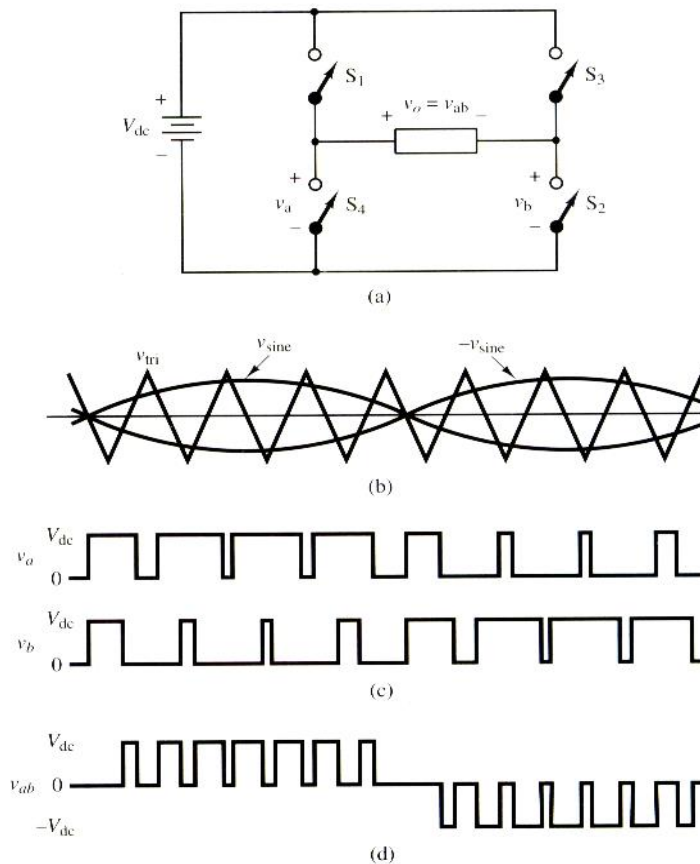


Fig. 1.10 (2)

(a) Inversor Monofásico de Puente Completo para PWM Unipolar

(b) Señal de Referencia y Portadora

(c) v_a y v_b

(d) Voltaje de Salida

Otra configuración tiene sólo un par de interruptores operando en la frecuencia de la portadora, mientras el otro par opera en la frecuencia de la referencia, teniendo entonces dos interruptores de alta frecuencia y dos de baja frecuencia, como se muestra a continuación (2):

TABLA V: Conmutación por Alta y Baja Frecuencia

CONDICION	CONMUTADOR	ESTADO	FRECUENCIA
$V_{\text{seno}} > V_{\text{triangular}}$	S_1	ON	Alta Frecuencia
$V_{\text{seno}} < V_{\text{triangular}}$	S_4	ON	Alta Frecuencia
$V_{\text{seno}} > 0$	S_2	ON	Baja Frecuencia
$V_{\text{seno}} < 0$	S_3	ON	Baja Frecuencia

Donde la onda sinusoidal y triangular se muestran en la *figura 1.11a*. Alternativamente, S_2 , S_3 pueden ser las de alta frecuencia y S_1 , S_4 las de baja frecuencia (2).

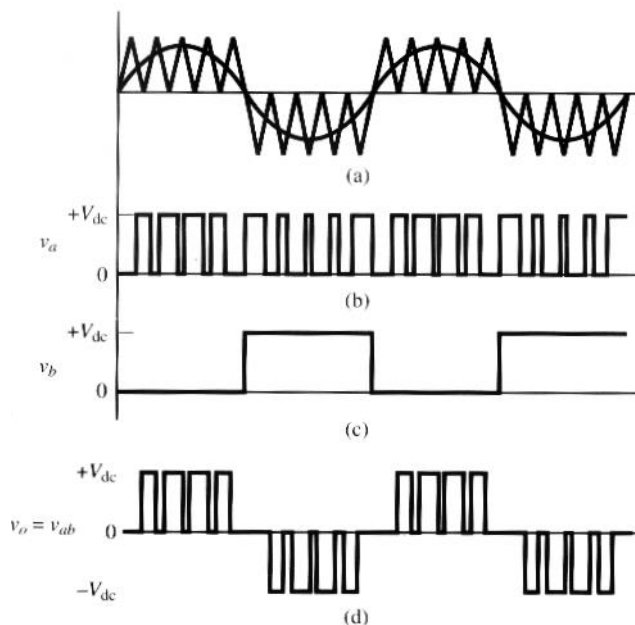


Fig. 1.11 (2)
PWM Unipolar con interruptores de alta y baja frecuencia
(a) Señal de Control y Referencia
(b) v_a
(c) v_b
(d) Salida $v_a - v_b$

1.3 INVERSOR TRIFÁSICO

La *figura 1.12a* muestra un circuito que produce una salida trifásica a partir de una entrada DC. La *figura 1.12b* muestra la secuencia de la apertura y cierre de los interruptores.

Cada interruptor tiene un radio de trabajo del 50% (no permite el tiempo de blanqueo), y el cierre-apertura tiene un tiempo de $T/6$, o un intervalo de ángulo de 60° . Note que los interruptores S_1 y S_4 abren y cierran en oposición, lo mismo con los interruptores (S_2, S_5) y (S_3, S_6). Con esta configuración los voltajes instantáneos v_{A0} , v_{B0} , y v_{C0} son $+V_{dc}$ ó cero. Los voltajes de salida de línea a línea v_{AB} , v_{BC} , y v_{CA} son $+V_{dc}$, 0, ó $-V_{dc}$. La secuencia de apertura-cierre de la *figura 1.12b* produce la salida de voltaje de la *figura 1.12c*.

La carga trifásica conectada en la salida, puede estar conectada ya sea en estrella o triángulo (2).

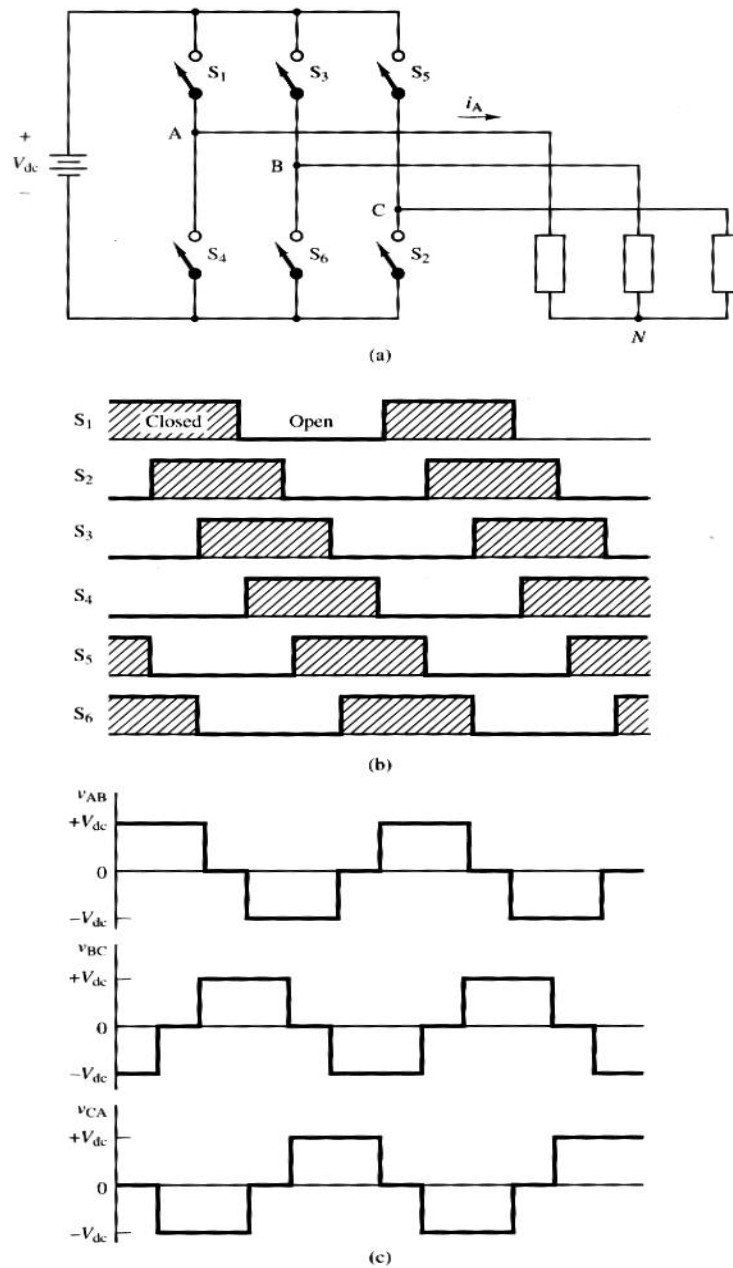


Fig. 1.12 (2)

(a) Inversor Trifásico

(b) Secuencia apertura-cierre

(c) Voltajes de Salida de Línea a Línea

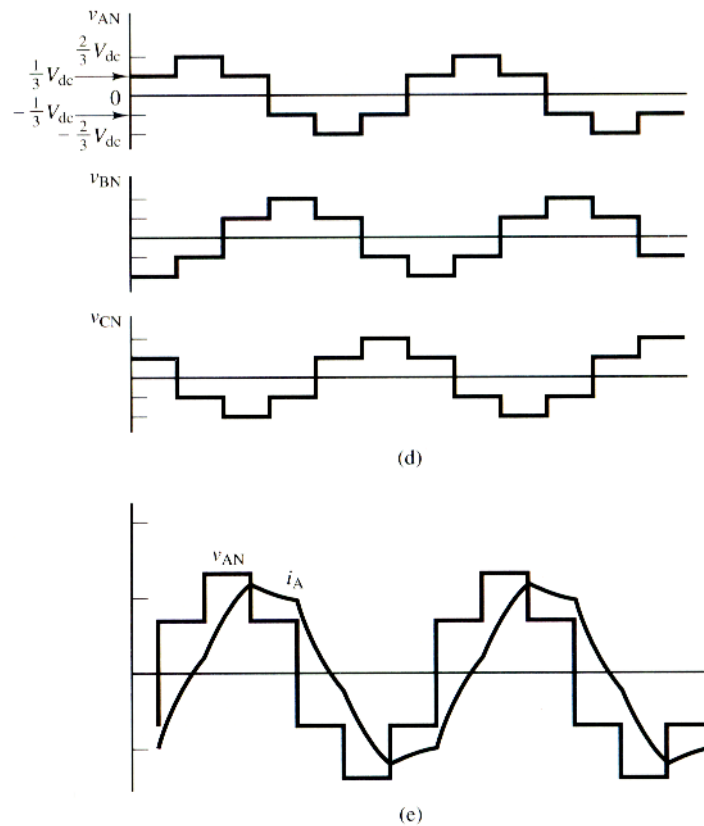


Fig. 1.13 (2)

(a) Voltajes de Línea a Neutro para una Conexión en Estrella
(b) Corriente en la fase A para una Carga R-L

1.3.1 PWM PARA INVERSORES TRIFÁSICOS

La modulación por ancho de pulso puede ser usada para los inversores trifásicos así como los monofásicos.

Como en el caso del inversor de 6 pasos, *figura 1.12a*, los interruptores son controlados en pares (S_1 , S_4), (S_2 , S_5), y (S_3 , S_6). Cuando un par de interruptores son cerrados, los otros están

abiertos. Cada par de interruptores requiere una onda sinusoidal de referencia por separado. Las tres ondas de referencia están separadas 120° para producir una salida trifásica balanceada. El control de los interruptores se lo muestra a continuación (2):

TABLA VI: Conmutación de Salida Trifásica

CONDICION	CONMUTADOR	ESTADO
$V_A > V_{\text{triangular}}$	S_1	ON
$V_C > V_{\text{triangular}}$	S_2	ON
$V_B > V_{\text{triangular}}$	S_3	ON
$V_A < V_{\text{triangular}}$	S_4	ON
$V_C < V_{\text{triangular}}$	S_5	ON
$V_B < V_{\text{triangular}}$	S_6	ON

La *figura 1.14* muestra los voltajes de salida para la modulación de ancho de pulso de un inversor trifásico (2).

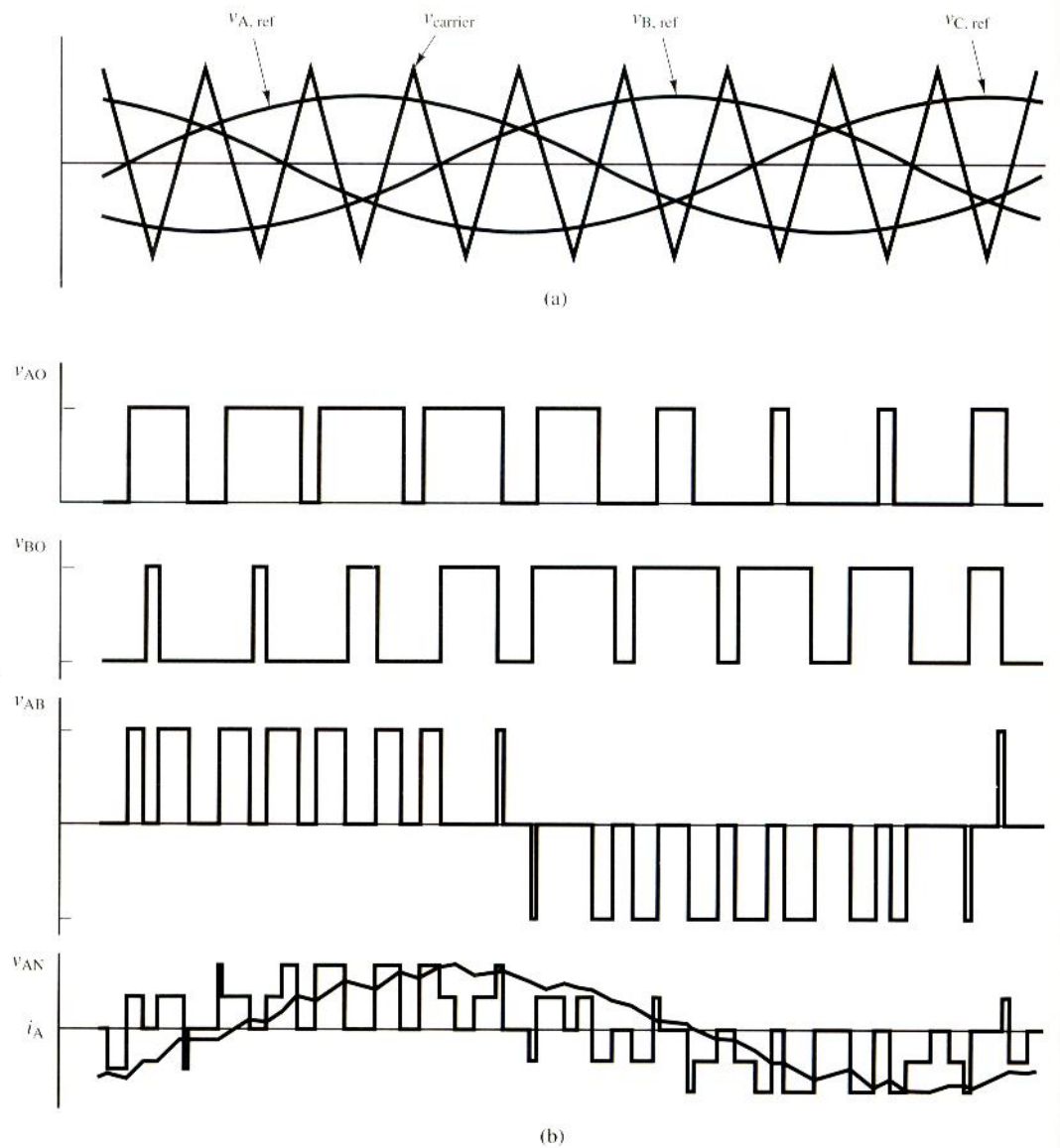


Fig. 1.14 (2)

(a) Señal Portadora y de Referencia para una Operación PWM

(b) Formas de Onda de Salida para una Carga R-L

1.4 VARIADORES PARA MOTORES ASINCRONICOS

El motivo de reemplazar los variadores de velocidad de motores de corriente continua, cuyas prestaciones son excelentes, por variadores de motores asincrónicos, es la diferencia de precio entre los dos tipos de máquina (3).

El motor asíncrono de inducción, en efecto, es claramente menos costoso que el motor de colector de la misma potencia y su mantenimiento mas reducido. Estas ventajas se hacen todavía mas patentes si el motor tiene el rotor en jaula de ardilla (3).

1.4.1 EL MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO

El motor asíncrono trifásico esta formado de un estator en el que hay una bobina trifásica con $2p$ polos unida a la fuente que suministra las tensiones de frecuencia f (3).

Las corrientes estáticas crean un flujo giratorio a la velocidad asíncrono N_s (3):

$$N_s = \frac{f}{p} \quad (1.25)$$

Este flujo barre las bobinas rotóricas e induce en ellas unas f.e.m y en consecuencia, por estar el rotor en corto circuito induce unas corrientes. La acción del flujo sobre estas corrientes que el mismo ha inducido, crea el par (3).

El par hace girar el rotor en el mismo sentido que el flujo giratorio. La velocidad N no puede nunca alcanzar la velocidad sincronía, ya que, si las bobinas del rotor girarán a la misma velocidad que el flujo giratorio, serian atravesadas por un flujo constante, no habría, pues, ni f.e.m inducida ni corriente inducida ni par (3).

El valor de la velocidad N es (3):

$$N = N_s (1 - g) \quad (1.26)$$

La relación

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (1.27)$$

recibe el nombre de deslizamiento (3).

La velocidad relativa entre el flujo y el arrollamiento del rotor, lo que determina la magnitud y frecuencia de la fem inducida en el rotor, la magnitud de la fem inducida en el arrollamiento del rotor a la velocidad N es (4):

$$E_{2s}' = \frac{N_s - N}{N_s} E_2' \quad (1.28)$$

Y la frecuencia de esta fem es:

$$f_R = gf \quad (1.29)$$

El deslizamiento da la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor como una fracción de la velocidad síncrona N_s . En reposo, $N = 0$ y $g = 1$; a la velocidad síncrona $N = N_s$ y $g = 0$. A la velocidad síncrona la velocidad relativa entre el flujo giratorio y el rotor es igual a cero y no se induce fem en el rotor. Por lo tanto, no hay corriente en el rotor y no se ejerce fuerza tangencial en el rotor a la velocidad síncrona. Un motor de inducción no está capacitado para alcanzar la velocidad síncrona; girará con un deslizamiento

suficiente que bastará para inducir la corriente necesaria para producir la fuerza tangencial y el par motor requerido por la carga (4).

El circuito equivalente de un motor polifásico de inducción se lo muestra en la *figura 1.15* (4).

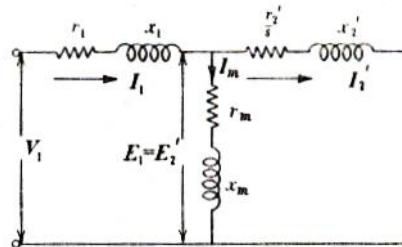


Fig. 1.15
Circuito Equivalente de un Motor Polifásico

Usando la relación básica de la mecánica (4):

$$T = \frac{7.04}{N} P_{\text{watts}} \text{ lb-pie} \quad (1.30)$$

Se puede deducir la expresión del par motor desarrollado del motor polifásico de inducción. La potencia activa del rotor es conocida como *potencia del campo giratorio* (4).

$$P_{cgr} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{g} \text{ watts} \quad (1.31)$$

Entonces el par desarrollado es (4):

$$T_{des} = \frac{7.04}{N_s} m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{g} \text{ lb-pie} \quad (1.32)$$

La potencia activa consumida por el motor es $P = \sqrt{3} UI \cos \phi$

Una parte se consume en pérdidas por efecto joule en las bobinas del estator, en pérdidas por histéresis y en corrientes de Foucault en el hierro del estator. Lo que resta P' , que es la mayor parte, atraviesa el entrehierro (3).

$$P' = P - P_{js} - P_{fes} \quad (1.33)$$

La potencia P' es igual al producto del par por la velocidad angular síncrona (3):

$$P' = T_{des} \times 2\pi N_s \quad (1.34)$$

Mientras que la potencia mecánica desarrollada es el producto del par por la velocidad angular real (3):

$$P_{mec} = T_{des} \times 2\pi N \quad (1.35)$$

Para los motores de jaula de ardilla, lo que queda de esta potencia, es decir, gP' , se va en pérdidas en el hierro rotórico y en pérdidas por efecto joule en los conductores del rotor (3):

$$P_{jr} = g \times P' \quad (1.36)$$

1.4.2 VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

El procedimiento más fácil para variar la velocidad del motor asíncrono consiste en alimentar la máquina a frecuencia constante y variar la tensión en sus bornes. Para un mismo par resistente, cuanto menor es la tensión, el deslizamiento es mayor y por tanto la velocidad es menor.

Este método que se utiliza con motores de jaula de ardilla, presenta un gran inconveniente que se desprende directamente de las propiedades del motor asíncrono (3).

- Las pérdidas por efecto joule en el rotor son proporcionales al deslizamiento. Es decir a velocidades bajas la corriente se eleva considerablemente con lo cual las pérdidas aumentan considerablemente (3).

Para regular la velocidad, cuando se utiliza este principio, se coloca entre la red y el motor un par de tiristores en paralelo para cada fase según se muestra en la *figura 1.16* (3).

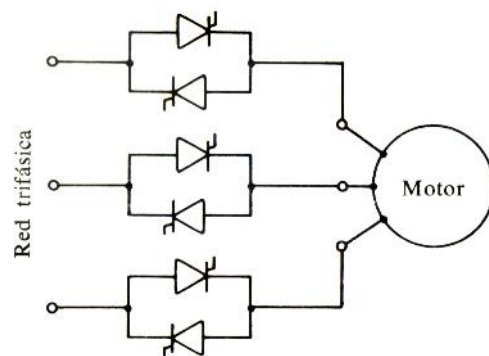


Fig. 1.16
Regulador de Velocidad de un Motor Trifásico

Se varía la velocidad del motor actuando sobre el ángulo de paso de corriente en cada período.

1.4.3 RECUPERACIÓN DE POTENCIA DEL SECUNDARIO

Puede regularse la velocidad del motor asíncrono con anillos, alimentando directamente por la red a tensión y frecuencia constante, actuando sobre la potencia sacada del rotor por los anillos.

Si se desprecian todas las pérdidas, el deslizamiento (g) es, efectivamente, igual al cociente de la potencia de salida del rotor por la potencia suministrada al motor (3).

La dificultad que aparece es que las tensiones entre los anillos tienen un valor y sobre todo una frecuencia variable, pues son proporcionales al deslizamiento. Para utilizar la potencia sacada del rotor es preciso pasarla de forma alterna a continua (3).

Se puede rectificar las tensiones de salida del rotor mediante semiconductores y utilizar la potencia de deslizamiento en una máquina de corriente continua que añade su par al del motor

asíncrono. Estos sistemas son conocidos con los nombres Metacyn, Rimcoy, etc. (3).

Pero para regular la velocidad del motor es posible suprimir cualquier otra maquina rotativa. Para ello (*figura 1.17*) se rectifican las tensiones recogidas entre los anillos y luego se ondula la tensión rectificada con el fin de reinyectar a la red la potencia de deslizamiento (3).

Este montaje requiere:

- Un rectificador.
- Un ondulador no autónomo.

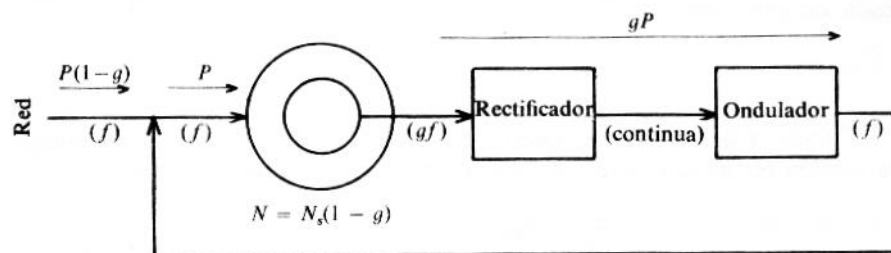


Fig. 1.17 (3)

Recuperación de Potencia del Secundario

1.4.4 VARIACIÓN DE FRECUENCIA Y TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

La variación de velocidad con recuperación de potencia rotórica solo es posible hacerla en un motor de anillos, menos caro y de mantenimiento más reducido que el motor de colector, pero menos interesante desde este punto de vista que el motor de jaula (3).

El rendimiento del motor de jaula solo es bueno si gira a una velocidad muy cercana a la de sincronismo. Para variar su velocidad en buenas condiciones, debe variarse su frecuencia de alimentación.

Será preciso modificar al mismo tiempo el valor de las tensiones de alimentación; este valor ha de ser sensiblemente proporcional a la frecuencia para que, cualquiera que sea esta, el par máximo que pueda desarrollar la maquina sea el mismo y para que con un par dado la corriente absorbida dependa poco de la velocidad.

Se pueden utilizar dos principios (3):

- construcción de las tensiones de alimentación de las tensiones de la red, es la técnica de los cicloconvertidores,
- Paso intermedio por continua y empleo de los onduladores autónomos.

1.5 LOS ONDULADORES AUTONOMOS

- Un ondulador autónomo es un convertidor estático con tiristores que permite la transformación continua-alterna cuando en el lado de alterna sólo hay receptores de energía. El ondulador autónomo fija la frecuencia y la forma de onda de la tensión alterna suministrada a la carga (3).
- Un campo de aplicación es el *ondulador a frecuencia variable y conmutación forzada*. Esto es, alimentados por la red por medio de un montaje rectificador, dan la tensión de frecuencia y valores variables para hacer girar un motor de corriente alterna a velocidad variable (3).

1.5.1 REALIZACIÓN DE ONDULADORES TRIFÁSICOS

Un ondulator trifásico puede realizarse con onduladores monofásicos en puente. Además de las condiciones habituales, los onduladores trifásicos deben garantizar el desfase de 120° entre las tensiones de salida de las tres fases. La *figura 1.18* muestra el diagrama de un ondulator trifásico (3).

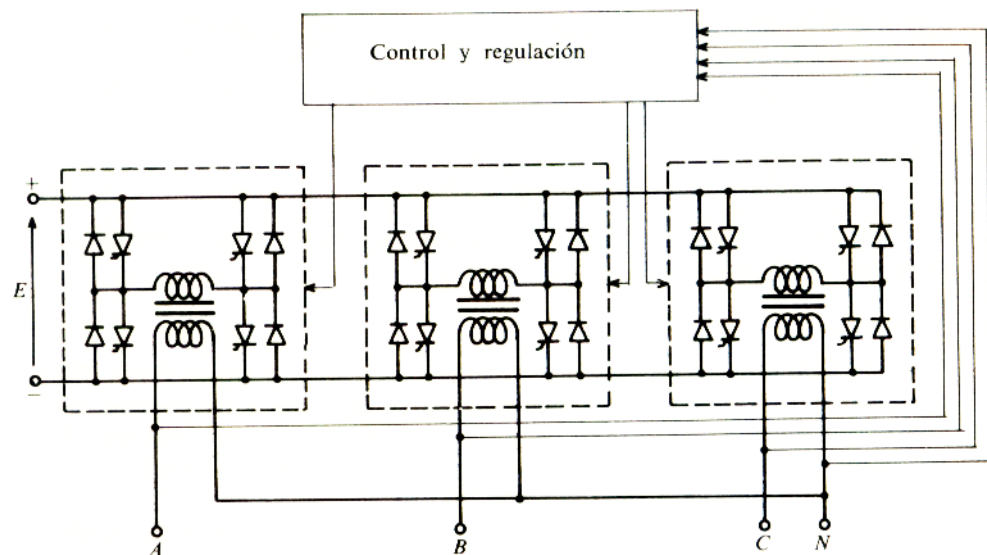


Fig. 1.18 (3)
Ondulador Trifásico

CAPÍTULO II

BUS ELÉCTRICO Y SU SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

2.1 DISEÑO ELÉCTRICO DEL BUS

2.1.1 SELECCIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO

Para cualquier máquina eléctrica rotatoria se deben tomar en consideración los siguientes factores:

- Potencia en la entrada o salida, expresada en HP o Kilowatts.
- Características de la carga por accionar.
- Velocidad nominal en RPM.
- Tamaño de la carcasa.
- Clasificación por velocidad.
- Efecto del ciclo de trabajo.
- Temperatura ambiente.
- Elevación de temperatura en la máquina.

- Voltaje nominal.
- Tipo de carcasa y condiciones ambientales.
- Requerimientos de mantenimiento y accesibilidad.
- Frecuencia del sistema del cual se va a alimentar.
- Número de fases.

2.1.1.1 CÁLCULOS PARA LA SELECCIÓN

En este caso particular, la aplicación del motor eléctrico es el de mover un bus propiedad de la Escuela Superior Politécnica del Litoral cuyas características registradas son: (Ver Anexo A)

Descripción: Bus

Motor: 08G0237787

Tipo: Micro

Color: Blanco

Marca: BOTAR

Modelo: ECN520

Capacidad: 40 personas sentadas

2.1.1.1.1 CÁLCULO DEL ESFUERZO DE TRACCIÓN Y POTENCIA DEL MOTOR ELÉCTRICO

Los automotores eléctricos funcionan por adherencia, esto es que la transmisión del esfuerzo de los motores se efectúa por el rozamiento (adherencia) entre el suelo y las ruedas. Si se designa a μ como el coeficiente de adherencia entre las ruedas y el suelo, y Q_1 la parte del peso total del automotor (peso en servicio) en toneladas que descansa sobre las ruedas motrices, parte llamada peso adherente, entonces el esfuerzo de tracción máximo que pueden desarrollar dichas ruedas es igual a: (5)

$$T_a = \mu \times Q_1 \times 1000 \text{ [kg]} \quad (2.1)$$

Para el coeficiente de adherencia (μ)

TABLA VII: Coeficiente de Adherencia

Tipo de Asfalto	Coeficiente en Suelo Seco	Coeficiente en Suelo Mojado
------------------------	----------------------------------	------------------------------------

Asfalto Rugoso	0.800	0.550
Asfalto Brillante	0.700	0.400
Adoquinado	0.600	0.400
Nieve	0.600	0.300
Hielo	0.055	0.200

Peso adherente (Q_1): Es el peso que apoya la rueda sobre el suelo. Cuanto mayor sea este peso mayor será la adherencia.

Si el esfuerzo de tracción necesario para poner el automotor en marcha fuera superior al de la fórmula, entonces el automotor no podría ser remolcado aunque el motor pudiese desarrollar dicho esfuerzo de tracción, es decir las ruedas patinarían sobre el suelo. En cuanto empiezan a patinar las ruedas sobre el suelo a causa de un esfuerzo de tracción exagerado, existe entre los referidos elementos el rozamiento de movimiento que es inferior al de reposo y por tanto reduce el valor del esfuerzo de tracción admisible. Entonces para poder asegurar el desplazamiento del vehículo se requiere un esfuerzo adherente suficiente del automotor. (5)

2.1.1.1.2 RESISTENCIAS AL MOVIMIENTO

El esfuerzo de tracción T del automotor es necesario para vencer todas las fuerzas que se oponen al movimiento. Parte de estas fuerzas pueden ser calculadas, pero parte se deduce de la experiencia adquirida mediante ensayos y mediciones especiales. Estas suelen estar expresadas en kilogramos por tonelada. (5)

1. *Resistencia de Rodamiento (r_r):* Es la resistencia debida al rodamiento de las ruedas sobre el suelo, así como los demás rozamientos en cojinetes y mecanismos. Para una vía normal, bien cuidada puede admitirse el valor $r_r = 2.5 \text{ kg/t}$; para tranvías y pequeños ferrocarriles esta resistencia varia según las condiciones de la vía entre 4 y 10 kg/t. (5)
2. *Resistencia del Aire (r_a):* Esta es producida por la presión del aire, que a grandes velocidades actúa sobre la superficie delantera del automotor y sobre las superficies longitudinales de este (rozamiento lateral), así como por un

efecto de aspiración en la parte de atrás. Para pequeñas velocidades de hasta unos 40 km/h se puede despreciar esta resistencia, que para mayores velocidades varía proporcionalmente al cuadrado de la velocidad.

Para calcular aproximadamente la resistencia del aire: (5)

$$r_a = b \times \frac{v^2}{100} \text{ [kg/t]}$$

(2.2)

Donde v es la velocidad en km/h y b es un coeficiente que depende de la composición del automotor.

$b = 1/40$ Para trenes rápidos y expresos con coches de carros giratorios

$b = 1/30$ Para trenes de viajeros (300 a 400 t) con coches de dos y tres ejes y para trenes rápidos de mercancías.

$b = 1/20$ Para trenes de mercancías corrientes (800 a 1000 t) con una parte de los vagones cargados y la otra parte descargados.

$b = 1/10$ Para trenes de mercancías compuestos de vagones vacíos (300 a 500 t).

3. *Resistencia en Rampa (r_p)*: Esta se presenta cuando el automotor tiene que elevarse cierta altura subiendo por una rampa, como vemos en la *figura 2.1*. (5)

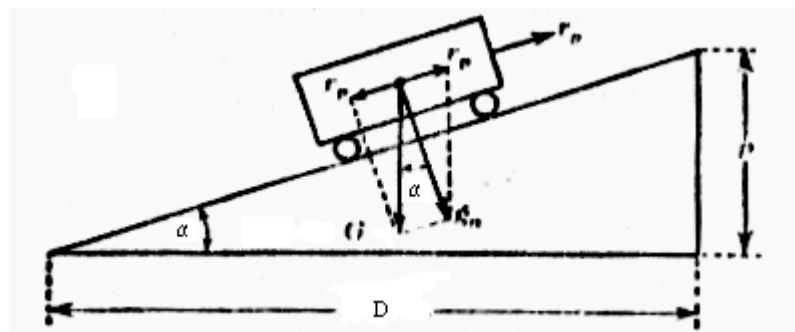


FIG 2.1 (5)
Resistencia en Rampa

4. *Resistencia de Aceleración (r_{ac})*: Para poder dar al automotor parado una cierta velocidad, se le debe comunicar una cierta aceleración. Reduciendo el tiempo de marcha puede

mejorarse el rendimiento económico de la línea, ya que se disminuye el consumo de energía por tonelada y por kilómetro.

Se consigue una aceleración cuando el esfuerzo de tracción del automotor es mayor que la suma de las resistencias antes mencionadas. Entonces se considera como resistencia de aceleración (r_{ac}) al esfuerzo de tracción necesario para acelerar un peso de tren de una tonelada. (5)

El esfuerzo de tracción total que se debe conseguir por adherencia de las ruedas sobre el suelo es: (5)

$$T = G \times r_T \text{ [kg]}$$

(2.3)

Donde

G: Peso total del automotor.

R_T : Suma de las resistencias al movimiento.

Si $T > T_a$ patina.
 Si $T < T_a$ rueda.

2.1.1.1.3 POTENCIA DE LOS MOTORES

Siendo T el esfuerzo de tracción total del automotor, el cual es medido en la circunferencia de las ruedas motrices y v' la velocidad en m/s, la potencia en las llantas es: (5)

$$P = T \times v' \text{ [kg*m/s]} \quad (2.4)$$

Una parte de la potencia administrada por el motor se pierde en la transmisión y en los cojinetes de los ejes, de forma que la potencia del motor debe ser mayor que la potencia en las ruedas motrices. Si η_t es el rendimiento de la transmisión, la potencia del motor es: (5)

$$P_m = \frac{T \times v}{3.6 \times 75 \times \eta_t} \text{ [HP]} \quad (2.5)$$

$$P_m = \frac{T \times v}{3.6 \times 75 \times \eta_t} \times 0.746 = \frac{T \times v}{361.9 \eta_t} \text{ [KW]}$$

(2.6)

Esta potencia varía mucho según la velocidad y el esfuerzo de tracción y no da ninguna indicación de las dimensiones del motor. La característica que permite concretar las dimensiones del motor es su calentamiento por efecto de las pérdidas en los arrollamientos, en el hierro y en los cojinetes. (5)

La potencia unihoraria es aquella para la cual el motor alcanza su máxima temperatura prescrita al cabo de una hora de funcionamiento, y debe ser parado para que no se la rebase. (5)

La potencia continua es aquella que puede soportar el motor durante largo tiempo sin calentarse exageradamente. Se puede obtener el valor medio de la potencia continua del motor mediante la fórmula empírica: (5)

$$P_c = C \times T \times v_c \text{ [HP]}$$

(2.7)

V_c = Velocidad media o comercial expresada en km/h.

C = Coeficiente que depende de las rampas y de las curvas y viene a ser de 0.0115 a 0.0133 para tranvías y de 0.0075 a 0.0115 para ferrocarriles.

- *Esta fórmula determinada empíricamente sólo da una base aproximada para escoger el tipo de motor, cuya determinación final debe realizarse mediante una comprobación exacta, para la cual deben tenerse en cuenta el calentamiento del motor al hallarse conectado y su enfriamiento al ser desconectado.*

Para el calentamiento de un motor resultan factores esenciales la intensidad de la corriente I y el tiempo t durante el cual es aplicada: (5)

$$A = I^2 \times R \times t \text{ [J]}$$

(2.8)

A = Energía convertida en calor.

Esta fórmula se aplica si la intensidad de corriente fuese constante en el tiempo, pero debido a que esto no es así se emplea la fórmula: (5)

$$A = R \int_0^T i^2 dt \text{ [J]}$$

(2.9)

Pero esta cantidad de calor podría haberse conseguido con una corriente constante I_m (corriente eficaz) en el mismo tiempo T :
(5)

$$A = R \times I_m^2 \times T \text{ [J]}$$

(2.10)

Igualando las expresiones 2.9 y 2.10

$$I_m^2 \times T = \int_0^T i^2 dt$$

$$\Rightarrow I_m = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^T i^2 dt} \text{ [A]}$$

(2.11)

o bien

$$I_m = \sqrt{\frac{i_1^2 \cdot t_1 + i_2^2 \cdot t_2 + i_3^2 \cdot t_3 + \dots + i_n^2 \cdot t_n}{T}}$$

$$\Rightarrow I_m = \sqrt{\frac{\sum i_n^2 \cdot t_n}{T}} \text{ [A]}$$

(2.12)

El valor de la corriente eficaz no debe ser mayor que la corriente de régimen continuo (I_c) del motor, el cual es la corriente que puede soportar el motor en forma duradera sin calentarse exageradamente y esta puede ser deducida de la fórmula de la potencia continua (P_c): (5)

$$I_c = \frac{P_c \times 1000}{\eta \times U} \text{ [A]}$$

(2.13)

P_c = Potencia continua en kW.

U = Tensión.

η = Rendimiento del motor.

La determinación de la intensidad de corriente, del esfuerzo de tracción y de la velocidad se efectúa a la vista de las curvas características del motor escogido, las cuales son determinadas mediante pruebas en el laboratorio. (5)

Teniendo en cuenta la relación de transmisión, debe transformarse el par motor en esfuerzo de tracción en las ruedas motrices y el número de revoluciones del motor en velocidad del automotor. (5)

R =Radio de la rueda motriz.

n_1 =Número de revoluciones del piñón montado sobre el eje del motor.

r_1 = Radio del piñón montado sobre el eje del motor.

n_2 =Número de revoluciones de la rueda dentada sobre el eje del motor.

r_2 = Radio de la rueda dentada sobre el eje del motor.

La velocidad del automotor es: (5)

$$v' = \frac{2R \times \pi \times n_2}{60} \text{ [m/s]} \quad (2.14)$$

$$v = \frac{2R \times \pi \times n_2}{60} \times 3.6 \text{ [km/h]} \quad (2.15)$$

Siendo $u = \frac{r_2}{r_1}$ la relación de transmisión: (5)

$$\Rightarrow n_2 = \frac{n_1}{u}$$

$$v = \frac{2R \times \pi \times n_1}{60 \times u} \times 3.6 = 0.377 \times \frac{R \times n_1}{u} \text{ [km/h]} \quad (2.16)$$

El par de giro en la circunferencia de las ruedas motrices es: (5)

$$T \times R = F \cdot r_2 \cdot \eta_t$$

(2.17)

η_t = Rendimiento de la transmisión.

F = Fuerza tangencial aplicada a los dientes.

$$M = F \times r_1$$

$$T \times R = F \times r_2 \frac{r_1 \times \eta_t}{r_1} = M \frac{r_2}{r_1} \eta_t = M \cdot u \cdot \eta_t$$

Entonces el esfuerzo de tracción en las llantas: (5)

$$T = \frac{M \cdot u \cdot \eta_t}{R} \text{ [kg]}$$

(2.18)

2.1.1.2 CÁLCULO TEÓRICO

Para el cálculo se consideraron los siguientes parámetros: El peso total de un bus Chevrolet con carrocería Botar, propiedad de la ESPOL con capacidad de 40 personas sentadas. Adicionalmente

se tomó en consideración un exceso de 15 personas paradas, el peso del pantógrafo, el peso del motor eléctrico, y partes electrónicas. Es decir se sobreestimó algunos parámetros.

Peso total del bus: 14500 [kg]

Peso aproximado por persona: 60 [kg]

Peso aproximado de 40 personas: 2400 [kg]

Peso aproximado de 15 personas: 900 [kg]

Peso del pantógrafo + el motor + adicionales: 2000 [kg]

Peso total (bus sobrecargado): 19800 [kg]

Peso total (bus lleno): 18900 [kg]

Peso adherente: 16500 [kg]

2.1.1.2.1 TRACCIÓN MÁXIMA

Mediante la *ecuación 2.1* y la *tabla 2.1* se obtiene la tracción máxima. Entre las resistencias al movimiento que se consideran para el bus están la resistencia de rodamiento (r_r), resistencia al

aire (r_a) y la resistencia de rampa (r_p). Se tomó en consideración un suelo seco de asfalto rugoso. Para estos parámetros se considera una vía normal, velocidades no mayores a los 60 km/h. Mediante la *ecuación 2.3* se obtiene la tracción total del bus.

$$\mu_o = 0.8 \text{ (suelo seco)}$$

$$T_a = 0.8 * 16500 = 13200 \text{ [kg]}$$

$$\mu_o = 0.55 \text{ (suelo mojado)}$$

$$T_a = 0.55 * 16500 = 9075 \text{ [kg]}$$

2.1.1.2.2 RESISTENCIAS

$$r_r = 2.5 \text{ [kg/t]}$$

$$r_a = (1/20) * (60^2/100) = 1.8 \text{ [kg/t]}$$

$$r_p = 10 \text{ [kg/t]}$$

$$r = r_r + r_a + r_p + r_{\text{adicionales}} = 17 \text{ [kg/t]}$$

2.1.1.2.3 TRACCIÓN TOTAL

$$T = 19.8 * 17 = 336.6 \text{ [kg]}.$$

$T < T_a \Rightarrow$ rueda

2.1.1.2.4 POTENCIA DEL MOTOR JAULA DE ARDILLA

La ecuación 2.6 multiplicada por $\sqrt{3}$ nos da la potencia del motor eléctrico trifásico, donde se toma en consideración dos velocidades, una velocidad comercial y una máxima, con un rendimiento del 85%.

$$P_m = \sqrt{3} * \frac{T * v}{3.6 * 75 * \eta_t}$$

- $T = 336.6$ [kg]

$$\eta_t = 0.85$$

$$v \text{ (normal)} = 40 \text{ [km/h]}$$

$$P_{m1} = 101.6 \text{ [HP]}$$

- $T = 336.6$ [kg]

$$\eta_t = 0.85$$

$$V \text{ (máxima)} = 60 \text{ [km/h]}$$

$$P_{m2} = 152.4 \text{ [HP]}$$

- $P_p = \frac{P_{m1} + P_{m2}}{2} = 127 \text{ [HP]}$ (se escoge el inmediato superior)

2.1.1.2.5 VELOCIDAD

R = Radio de la rueda motriz.

n_1 = Número de revoluciones del piñón montado sobre el eje del motor.

r_1 = Radio del piñón montado sobre el eje del motor.

r_2 = Radio de la rueda dentada sobre el eje del motor

$$R = 0.4 \text{ [m]}$$

$$r_2 = 45 \text{ [cm]}$$

$$r_1 = 12 \text{ [cm]}$$

$$\mu = \frac{r_2}{r_1} = 4.5$$

$$v \text{ (máxima)} = 60 \text{ [km/h]}$$

De la ecuación 2.16 despejamos n_1

$$n_1 = \frac{v \times \mu}{0.377 \times R} = 1790.5 \text{ [rpm]} \text{ (se escoge el inmediato superior)}$$

2.1.1.2.6 PAR MOTOR

Para el par se considera los resultados anteriores.

$$T = 336.6 \text{ [kg]}$$

$$R = 0.4 \text{ [m]}$$

$$\mu = 4.5$$

$$\eta_t = 0.85$$

$$M = \frac{T \times R}{\mu \times \eta_t} = \mathbf{35.2 \text{ mkg}}$$

2.1.1.3 DATOS TÉCNICOS DEL MOTOR

TABLA VIII: Motor Jaula de Ardilla, 440 V, 60 Hz, 3 Fases.

HP	Velocidad Síncrona	Eficiencia	Factor de Potencia	Potencia a Plena	Corriente a Plena	Corrien te de
-----------	-------------------------------	-------------------	-------------------------------	-----------------------------	------------------------------	--------------------------

	[rpm]	Plena Carga	½ Carga	Plena Carga	½ Carga	Carga [Kw]	Carga [A]	Rotor Bloque ado [A]
150	1800	91.0	88.5	0.91	0.79	123.0	177.0	1200

$$KVA = \frac{1.73 \times V \times I}{1000}$$

(2.19)

Continuo

$$KVA = 134.7$$

Arranque

$$KVA = 913.4$$

2.1.2 DISEÑO Y CONTROL DEL CIRCUITO ELECTRONICO

2.1.2.1 COMPONENTES PRINCIPALES

Se presenta los componentes principales para desarrollar la parte de control del bus, la cual estará en una caja apartarayos, la cual protegerá el equipo electrónico contra descargas eléctricas.

- 1 PLC

- 30 entradas: 5 analógicas y 25 digitales
- 32 salidas

- CIRCUITO INVERSOR (INVERTER)

- Entradas:
 - Marcha
 - Freno Gradual
 - Frenado Dinámico
- Salida 3 ϕ
- Potencia de Manejo: 150 HP
- **Producto:** AC-150 EV GEN 2 POWER SYSTEM
- **Compañía:** AC PROPULSION
- **Descripción:**
 - Potencia de Manejo: 150 KW (200HP)
 - Voltaje de entrada: 450 V max

- Corriente: 580 A max

Precio: \$25000.00

- **Producto:** VVVF

Compañía: HITACHI

Descripción:

- Voltaje de entrada: 3300 V
- Corriente: 1200 A

Precio: \$ 30000.00

- **Producto:** ICEPAC

Compañía: APPLIED POWER SYSTEMS, INC.

Descripción:

- Potencia de manejo: 100KW (134 HP),
480VAC

- Voltaje de entrada: 750V

Precio: \$ 25000.00

- MOTOR 3 ϕ

- Jaula de ardilla
- 150 HP
- Alimentación 440V, 3 ϕ
- 1800 rpm

- PANTÓGRAFO

- Monofásico
- Velocidad de diseño: 200 Km/h
- Fuerza de contacto estática: de 50 a 140 N ajustables
- Control: sistema neumático
- Colectores: carbonos con sujetadores de aluminio
- Masa total: 109 Kg
- Material de cuerpo principal: acero inoxidable
- Material de otros elementos: aleación de aluminio

- COMPRESOR
 - 3.5 HP de corriente directa

2.1.2.2 COMPONENTES DE MEDICIÓN

- SENSOR DE PRESIÓN
 - Presión mínima: 6 Bar
 - Presión máxima: 12 Bar
 - **Producto:** BRASS, DA-31-153-8

STAINLESS STEEL, DA-21-153-85

Compañía: MERCOID

Descripción:

- Rango de presión: 0.7-14 Bar
- Alimentación: 120/240 VAC

Precio: \$196.00 (brass); \$240.00 (Stainless Steel)

- **Producto:** Transmisor de presión 626-12-CH-P1-E5-S1

Compañía: DWYER

Descripción:

- Rango de Presión: 0-14 Bar
- Salida: 4-20 ma
- Alimentación: 13-30 VDC

Precio: \$115.00

- SENSOR DE TEMPERATURA

- 1 Salida del Motor Principal
- **Producto:** TRANSMISOR DE SEÑAL

Compañía: VETO: MEDICION Y CONTROL

Descripción:

- Entrada: Termopar, J, K, N, R, S, (RTD)
PT100, Configurables.
- Salida: 4-20 ma
- Alimentación: 18-35 VDC

Precio: \$ 200.00

- **Producto:** SENSOR PT100

Compañía: VETO: MEDICION Y CONTROL

Descripción:

- Rango de Temperatura: -50 a +180 °C

Precio: \$ 150.00

- VOLTÍMETRO Y AMPERÍMETRO

- Salida del Motor Principal
- Motor del Ventilador
- Líneas de Alimentación
- Compresor
- Batería

- **Producto:** HC-FPA/FPV (Transductor de Voltaje)

Compañía: STROUD INSTRUMENTS LTD.

Descripción:

- Entrada: 0-600 V
- Alimentación: 115 / 230 V $\pm$ 20%, 50 - 400Hz
- Salida: 4-20 ma

Precio: \$ 210.00

- **Producto:** AM411 (Transductor de Voltaje)

Compañía: ANALOG MICROELECTRONICS GMBH

Descripción:

- Entrada: 0-35 VDC
- Salida: 0-10 V

Precio: \$ 150.00

- TACÓMETRO

- Salida del Motor Principal
- **Producto:** CMCP-575 SPEED TRANSMITTER

Compañía: SALES TECHNOLOGY INC.

Descripción:

- Alimentación: 24 Vdc
- Entrada: 0-2000 rpm
- Salida: 4-20 ma

Precio: \$ 300.00

- FINALES DE CARRERA

- Pantógrafo Arriba
- Pantógrafo Abajo

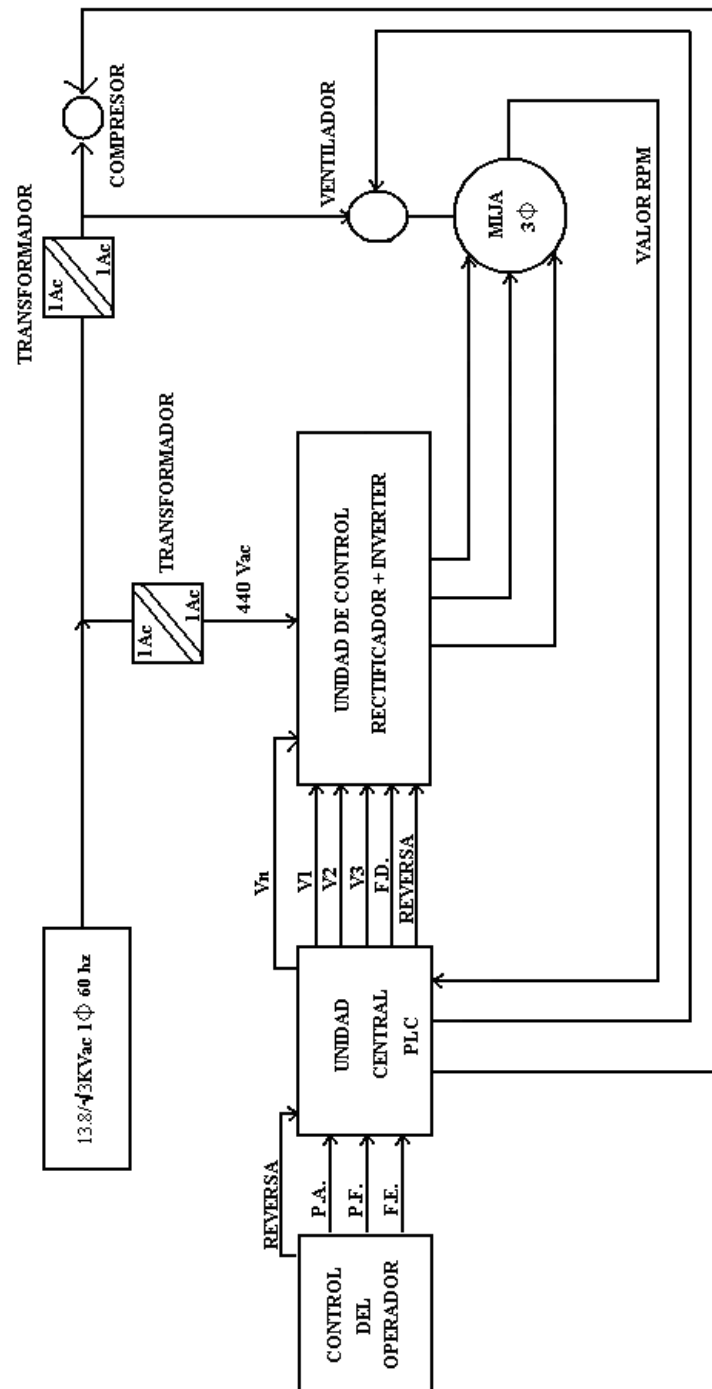
- Puerta Abierta y Cerrada
- Caja Apartarrayo

2.1.2.3 COMPONENTES ADICIONALES

- Transductores
- Batería: 24 voltios
- Palanca de Selección de Velocidad

2.1.2.4 DIAGRAMA DE BLOQUES

2.1.2.4.1 DIAGRAMA DEL REGULADOR DE MARCHA



P.A.: Palanca de aceleración

P.F.: Pedal de freno

F.E.: Freno de emergencia

V1 : Velocidad 1

V2 : Velocidad 2

V3 : Velocidad 3

Vn : Velocidad n

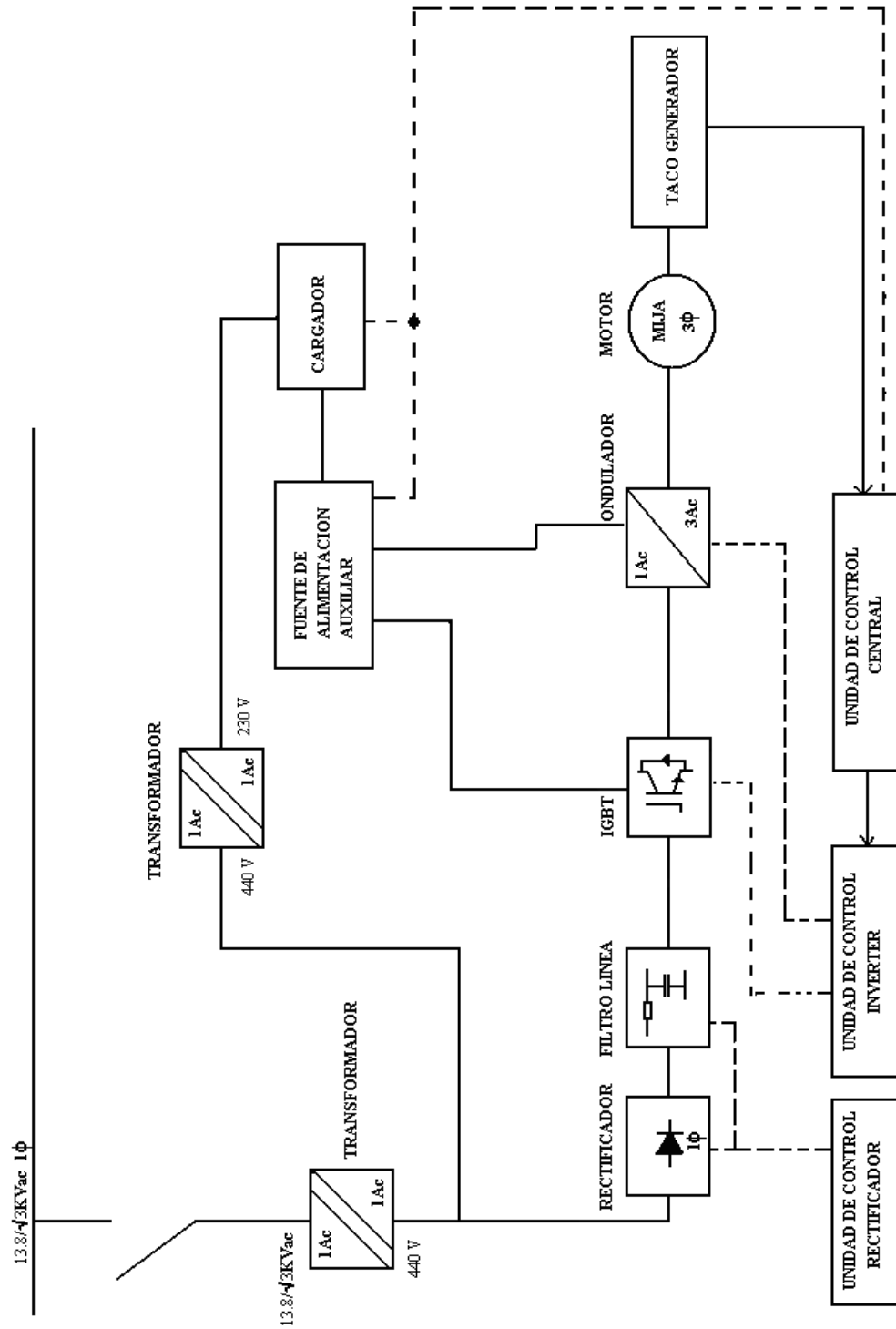
F.D.: Freno dinámico

Los diagramas mostrados son un esquema general del sistema de control de la tracción del motor eléctrico. En el cual el mando central es el PLC. El operador solo tendrá pocas entradas para el movimiento del bus (tracción) dependiendo del número de velocidades que se tenga. La velocidad del motor principal es controlada por un *inversor*.

Todo el sistema es alimentado por 13.8/ $\sqrt{3}$ KV monofásicos el que luego es transformado a 440V AC monofásicos, a partir de este punto el voltaje es rectificado para alimentar el inversor.

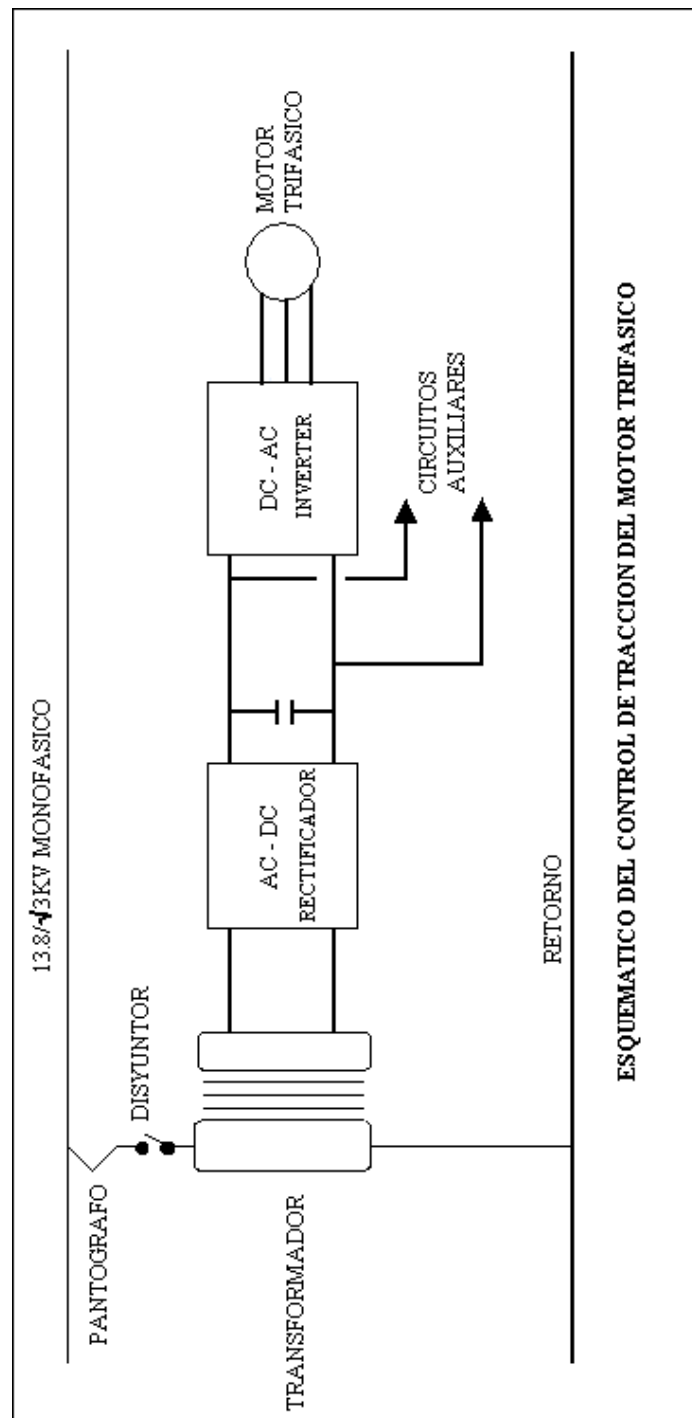
El sistema está realimentado por la señal del tacómetro al PLC para luego pasar a cierta velocidad.

2.1.2.4.2 DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE REGULACIÓN

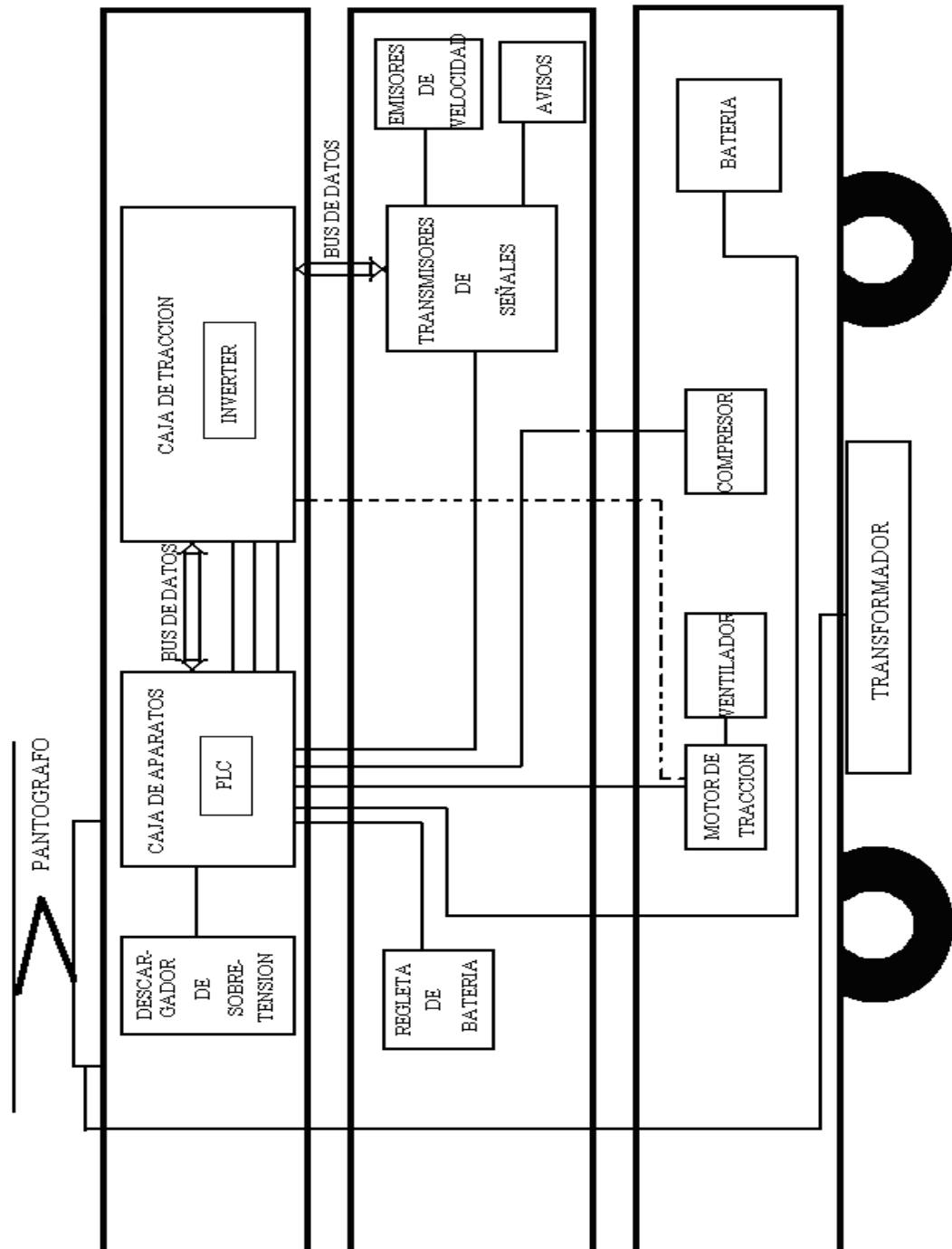


2.1.2.5 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO

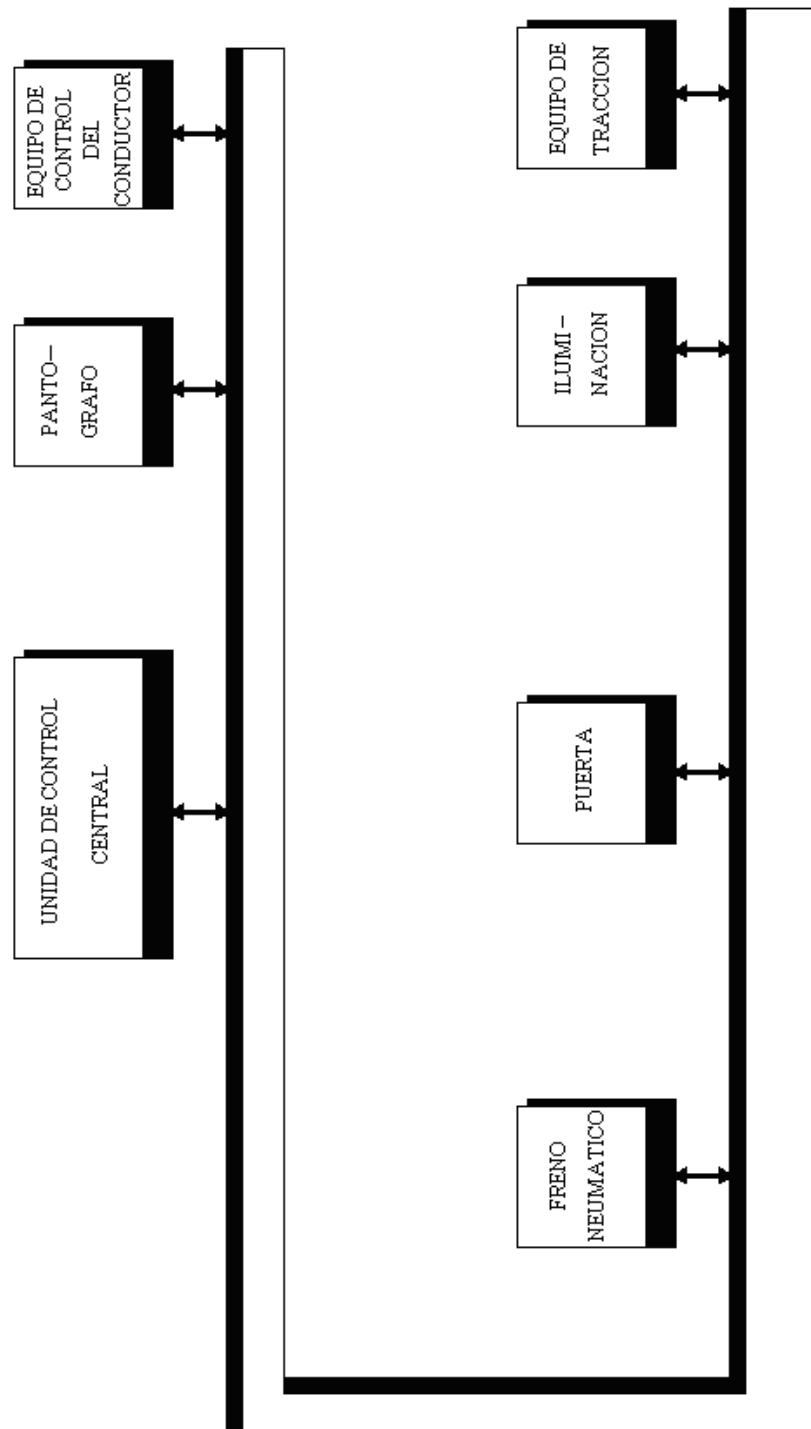
2.1.2.5.1 DIAGRAMA DEL CONTROL DE TRACCIÓN



2.1.2.5.2 DISPOSICIÓN DE COMPONENTES DEL EQUIPO ELÉCTRICO



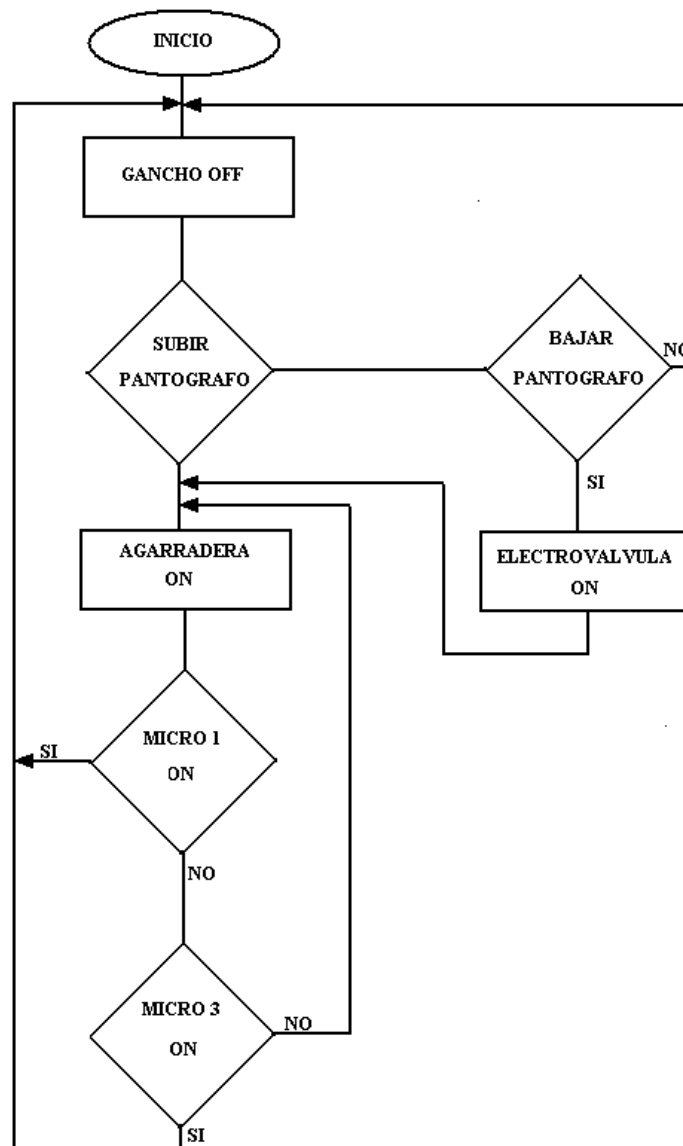
2.1.2.5.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN Y CONTROL



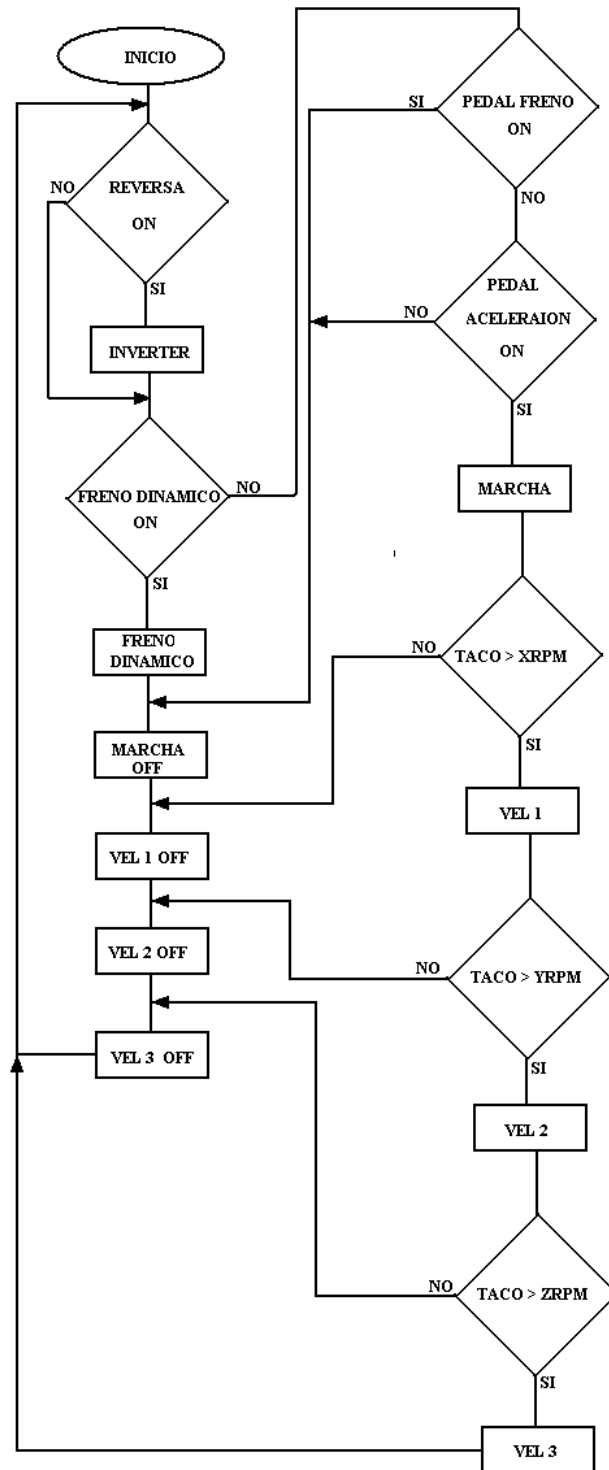
2.1.3 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

2.1.3.1 PRINCIPALES DIAGRAMAS DE FLUJO DEL CONTROL DEL PLC

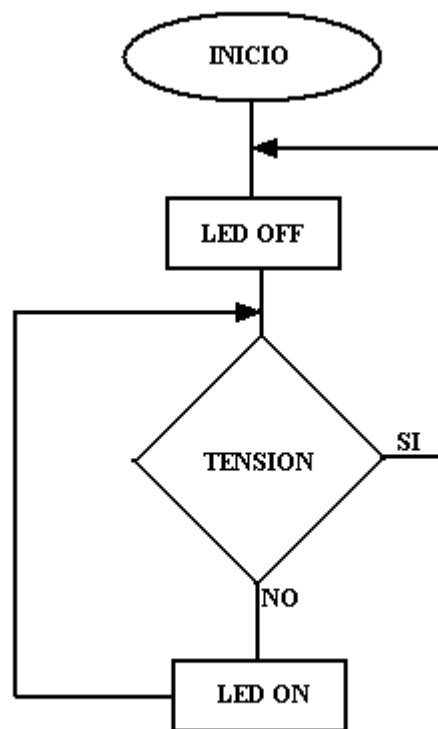
PANTÓGRAFO



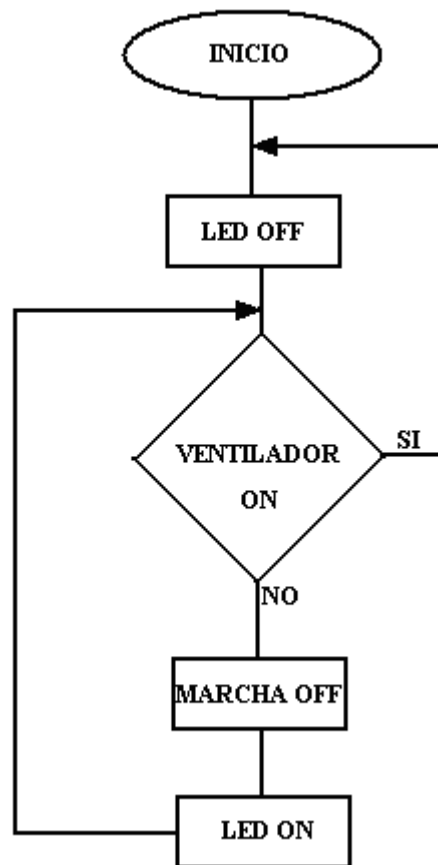
INVERSOR



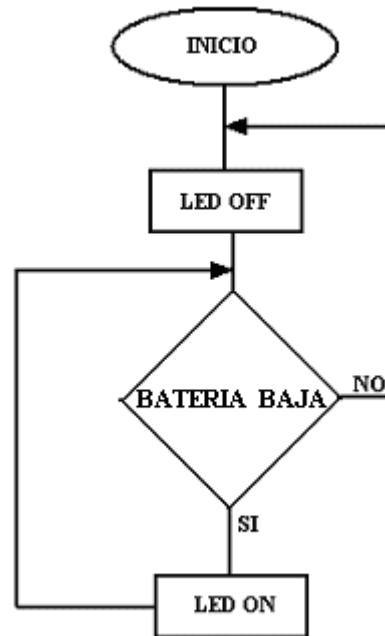
TENSIÓN



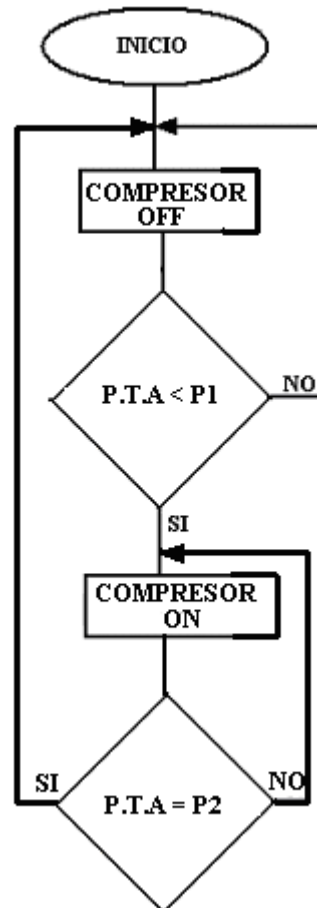
VENTILADOR



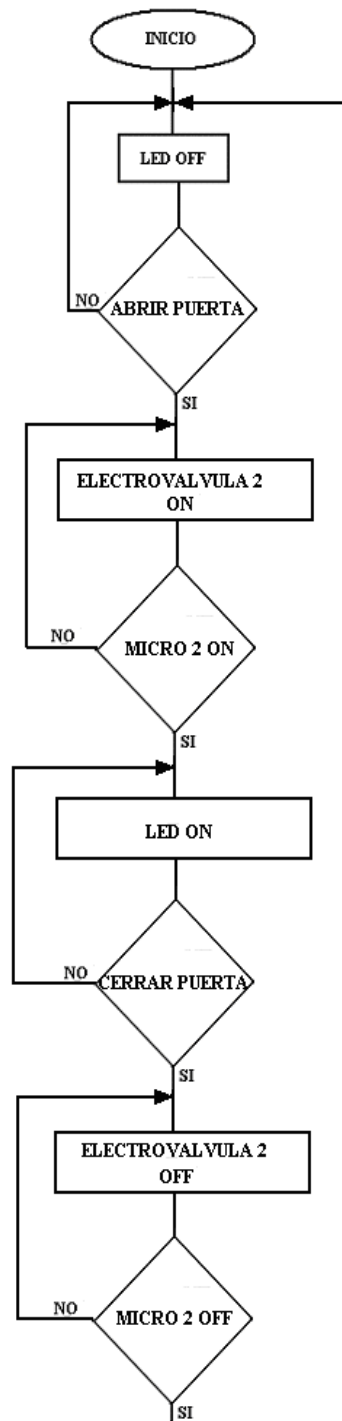
BATERÍA



AIRE TANQUE ALMACENAMIENTO



PUERTA



2.1.3.2 ENTRADAS Y SALIDAS DEL PLC

2.1.3.2.1 ENTRADAS

MARCHA (I1)

Palanca que selecciona el estado marcha.

REVERSA (I2)

Palanca que selecciona el estado reversa.

VELOCIDAD 1(I3)

Palanca que selecciona la velocidad 1.

VELOCIDAD 2 (I4)

Palanca que selecciona la velocidad 2.

VELOCIDAD 3 (I5)

Palanca que selecciona la velocidad 3.

VELOCIDAD 4 (I6)

Palanca que selecciona la velocidad 4.

VELOCIDAD 5 (I7)

Palanca que selecciona la velocidad 5.

VELOCIDAD 6 (I8)

Palanca que selecciona la velocidad 6.

FRENO (I9)

Señal digital. Cuando el operador usa el freno mecánico del bus abre un conmutador en estado cerrado y este a su vez abre los contactos que activa las velocidades.

FRENO EMERGENCIA (I10)

Señal digital en estado abierto. En caso de emergencia el bus se detendrá por medio de una resistencia dinámica.

SUBIR PANTOGRAFO (I11)

Señal digital en estado abierto. Habilita la salida Q31 del PLC que abre la electro-válvula 4 y el gancho que agarra el pantógrafo se abre.

BAJAR PANTOGRAFO (I12)

Señal digital en estado abierto. Habilita la salida Q28 del PLC que abre la electro-válvula 1 y hace funcionar el pistón que se encarga de bajar el pantógrafo.

ABRIR PUERTA (I13)

Señal digital en estado abierto. Habilita la salida Q29 del PLC que abre la electro-válvula 2 para abrir las puertas.

CERRAR PUERTA (I14)

Señal digital en estado abierto. Deshabilita la salida Q29 del PLC para que cierre la electro-válvula 2 y cerrar las puertas.

DIESEL (I15)

Señal digital en estado abierto, que desactiva la energización eléctrica y activa la energización a gasolina (diesel).

LUCES (I16)

Señal digital en estado abierto. Prende las luces en el interior del bus

MICRO 1 (I17)

Señal digital enviada por un final de carrera que se encuentra en estado cerrado, que indica si el pantógrafo está subiendo.

MICRO 2 (I18)

Señal digital enviada por un final de carrera que se encuentra en estado abierto, que indica si la puerta está abierta.

MICRO 3 (I19)

Señal digital, enviada por un final de carrera que se encuentra en estado cerrado, que indica si la caja donde se encuentran circuitos electrónicos está abierta.

MICRO GANCHO (I20)

Señal digital, enviada por un final de carrera que se encuentra en estado abierto. Indica si el gancho que sostiene al pantógrafo se encuentra abierto.

SENSOR DE PRESENCIA (I21)

Señal digital en estado cerrado. Indica cuando una persona se encuentra en la entrada al bus, lo cual hace que las puertas no se cierren hasta que esa persona entre o salga.

AVERÍA DE VENTILADORES (I22)

Señal digital en estado cerrado. Si el fusible del motor del ventilador se abre, activa la salida Q24, esta indica que el ventilador no funciona y por ende el motor no puede realizar su funcionamiento.

AVERÍA DEL COMPRESOR (I23)

Señal digital en estado cerrado. Si el fusible del motor del compresor se abre, activa la salida Q25, esta indica que el compresor no funciona.

AVERÍA DE FUSIBLES PRINCIPALES (I24)

Señal digital en estado cerrado. Si el fusible principal se abre, activa la salida Q26, esta indica la existencia de un problema en la línea principal.

AVERÍA EN EL MOTOR PRINCIPAL (I25)

Señal digital en estado cerrado. Si el fusible del motor principal se abre, activa la salida Q27, esta indica un daño en el motor principal.

BATERÍA (AI1)

Señal analógica enviada mediante un sensor que mide el voltaje en la batería. El rango de medición del sensor seleccionado es de 6V-35V. El sensor envía una señal de corriente de 4 a 20mA

a una entrada analógica del PLC la cual se transforma en bits. En este caso 0V en la batería corresponde a una salida de 4mA en el sensor y 35V en la batería a 20mA en la salida del sensor

TENSIÓN (AI2)

Señal analógica enviada mediante un sensor que mide el voltaje en la salida del secundario del transformador. El rango de medición del sensor seleccionado es de 0V-600V. El sensor envía una señal de corriente de 4 a 20mA a una entrada analógica del PLC la cual se transforma en bits. En este caso 0V corresponde a una salida de 4mA en el sensor y 600V a 20mA en la salida del sensor

PRESIÓN (AI3)

Señal analógica enviada por un sensor, el cual mide la presión en el tanque de aire. El rango de medición del sensor seleccionado es de 0.7BAR-14BAR. El sensor envía una señal de corriente de 4 a 20mA a una entrada analógica del PLC la cual se transforma en bits. En este caso 0.7BAR en el tanque

corresponde a una salida de 4mA en el sensor y 14BAR en el tanque a 20mA en la salida del sensor.

TACÓMETRO (AI4)

Señal analógica enviada por un sensor, el cual mide las revoluciones por minuto del motor. El rango de medición del sensor seleccionado es de 0rpm-2000rpm. El sensor envía una señal de corriente de 4 a 20mA a una entrada analógica del PLC la cual se transforma en bits. En este caso 0rpm corresponde a una salida de 4mA en el sensor y 2000rpm a 20mA en la salida del sensor.

TEMPERATURA (AI5)

Señal analógica enviada por un sensor, el cual mide la temperatura del motor. El rango de medición del sensor seleccionado es de 0°C-150°C. El sensor envía una señal de corriente de 4 a 20mA a una entrada analógica del PLC la cual la transforma en bits. En este caso 0°C en el motor corresponde

a una salida de 4mA en el sensor y 150°C en el motor a 20mA en la salida del sensor.

2.1.3.2.2 SALIDAS

MARCHA (Q1)

Salida que envía una señal al inversor para que arranque el motor.

REVERSA (Q2)

Salida que envía una señal al inversor para que arranque el motor en sentido contrario.

V1 (Q3)

Salida que envía una señal al inversor para que el motor eléctrico gire a una velocidad mínima.

V2 (Q4)

Salida que envía una señal al inversor para que el motor eléctrico gire a una velocidad media baja.

V3 (Q5)

Salida que envía una señal al inversor para que el motor eléctrico gire a una velocidad media alta.

V4 (Q6)

Salida que envía una señal al inversor para que el motor eléctrico gire a una velocidad normal.

V5 (Q7)

Salida que envía una señal al inversor para que el motor eléctrico gire a una velocidad alta.

V6 (Q8)

Salida que envía una señal al inversor para que el motor eléctrico gire a una velocidad máxima.

ENCENDIDO (Q9)

Salida que envía una señal que prende un foco el cual indica que el PLC ya esta prendido

FRENO DINÁMICO (Q10)

Salida que envía una señal para detener el bus en el acto. Sólo se la utiliza en caso de emergencia.

LUCES (Q11)

Salida que envía una señal para encender las luces interiores del bus.

COMPRESOR (Q12)

Salida que enciende el compresor.

VENTILADOR (Q13)

Salida que envía una señal para encender el ventilador del motor principal. Este se debe accionar antes que el motor principal.

BATERÍA (Q14)

Salida que envía una señal para indicar el bajo voltaje en la batería.

BAJA TENSION (Q15)

Salida que envía una señal indicando que existe baja tensión. Es decir cuando la tensión en el secundario del transformador es de 440V.

ALTA TENSION (Q16)

Salida que envía una señal indicando que existe alta tensión. Es decir cuando la tensión en el secundario del transformador es de 500V.

SOBRE -TENSION (Q17)

Salida que envía una señal indicando que existe un sobrevoltaje en el secundario del transformador. Es decir cuando la tensión en el secundario del transformador es de 540V.

BAJA PRESION (Q18)

Salida que envía una señal la cual indica que la presión en el tanque es menor o igual a 6 BAR y habilita la salida Q12 del PLC que prende el compresor.

ALTA PRESIÓN (Q19)

Señal que indica que la presión en el tanque es igual a 12 BAR e inmediatamente habilita la salida Q32, la cual abre la electroválvula de escape.

PUERTAS ABIERTAS (Q20)

Salida que envía una señal indicando que las puertas se encuentran abiertas.

CAJA APARATOS (Q21)

Salida que envía una señal indicando que la caja de los circuitos electrónicos esta abierta.

TEMPERATURA (Q22)

Salida que envía una señal para encender un foco. Este indica una temperatura elevada en el motor (100°C)

FOCO DIESEL (Q23)

Salida que envía una señal para encender un foco, el cual indica que se está trabajando con gasolina (diesel).

AVERÍA VENTILADOR (Q24)

Salida que envía una señal para encender un foco, el cual indica que el ventilador no esta funcionando.

AVERÍA COMPRESOR (Q25)

Salida que envía una señal para encender un foco, el cual indica que el compresor no esta funcionando.

AVERIA FUSIBLE PRINCIPAL (Q26)

Salida que envía una señal para encender un foco, el cual indica que el fusible principal está abierto.

AVERÍA MOTOR (Q27)

Salida que envía una señal para encender un foco, el cual indica que el motor principal no esta funcionando.

ELECTRO-VÁLVULA 1 (Q28)

Salida que envía una señal que activa la electro-válvula 1, la cual es la que se encarga de bajar el pantógrafo.

ELECTRO-VÁLVULA 2 (Q29)

Salida que envía una señal que activa la electro-válvula 2, la cual es la que se encarga de abrir y cerrar las puertas del bus.

ELECTRO-VÁLVULA 3 (Q30)

Salida que envía una señal que activa la electro-válvula 3, la cual permite la entrada de gasolina cuando se esta operando con el motor de combustión interna.

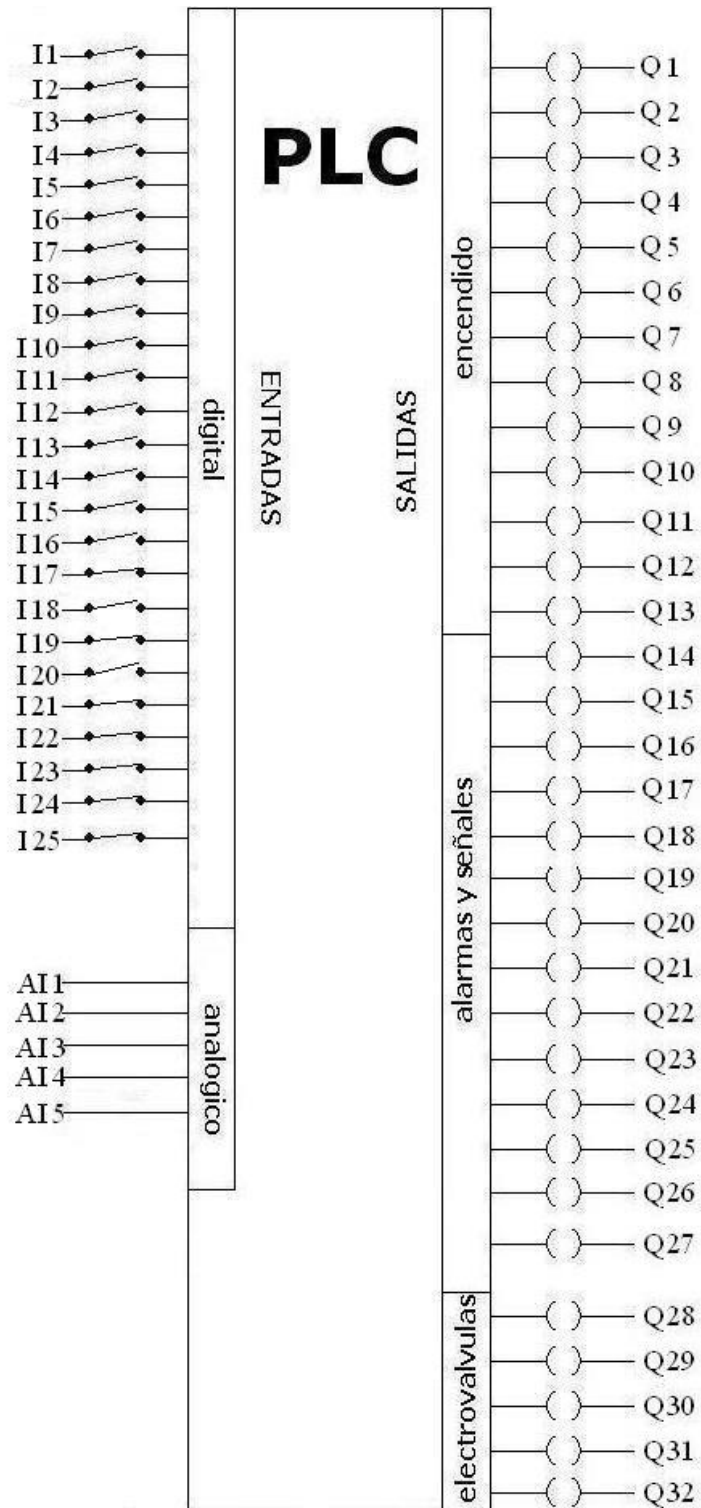
ELECTRO-VÁLVULA 4 (Q31)

Salida que envía una señal que activa la electro-válvula 4 permitiendo abrir el gancho que sostiene al pantógrafo.

ELECTRO-ESCAPE (Q32)

Salida que envía una señal que activa una electroválvula en el tanque de aire cuando la presión es superior a 12BAR.

2.1.3.2.3 DIAGRAMA DE ENTRADAS/SALIDAS AL PLC



2.1.3.3 PROGRAMA DEL PLC

(Ver Anexo B)

2.2 DISEÑO DEL PANTÓGRAFO

2.2.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PANTÓGRAFO

El pantógrafo tiene la tarea de transferir el voltaje de las líneas de tensión o también llamadas de alimentación hacia el sistema de tracción del vehículo, esta transferencia de voltaje tiene que ser segura y confiable para cuando la unidad esta estacionaria o en movimiento.

El pantógrafo consiste de una estructura principal, brazos, la cabeza del pantógrafo y el mecanismo para levantar el brazo del pantógrafo. El pantógrafo que se usara para esta tesis esta basado en el diseño del pantógrafo modelo DSA-350S el cual es usado comúnmente en Europa para trenes, a este diseño se le hizo un cambio debido a los requerimientos que se necesita para el bus, este cambio en el diseño es en la cabeza del pantógrafo, el que se usa en Europa tiene dos barras de carbono, o sea, los colectores de aproximadamente 1m de largo cada una y el cable de tensión pasa por encima de estas, en este caso pasa solo una línea debido a que el retorno se lo realiza por las vías del tren, en este diseño lo que se

hizo fue colocar dos colectores separadamente por una distancia de aproximadamente 1m, por ende va a pasar la línea monofásica por un colector y el retorno por el otro colector. Los carbonos van a ir rotando a medida que avanzan por las líneas, esto se hace para que haya menos fricción entre las líneas y los colectores, otra razón por la que se usa este tipo de pantógrafo es por la facilidad que da cuando el bus vaya de reversa ya que por ejemplo el trolebús usado en Quito utiliza otro tipo de pantógrafo, pero este en cambio está limitado para cuando el bus va en reversa, en la figura 2.2 se puede observar el trole con el pantógrafo que utilizan en Quito. El pantógrafo DSA-350S tiene una masa total de 109 Kg. y consiste de un simple brazo diseñado para soportar velocidades de hasta 350 Km /H. La estructura principal tiene una masa de 52.7 Kg que incluye el sistema de levantamiento del pantógrafo y sus amortiguadores (6).

El brazo inferior tiene una masa de 34.6 Kg. Y el brazo superior con la cabeza del pantógrafo tiene una masa de 9.1 Kg, los dos colectores en los cuales están los carbonos con sus sujetadores

tiene una masa de 1 Kg cada uno. Los colectores tienen que seleccionarse para que puedan soportar hasta 25 KV y 1000 A para AC y 3KV y 2400 A para DC. La *figura 2.3* muestra el diseño de la estructura del pantógrafo con sus medidas y características.

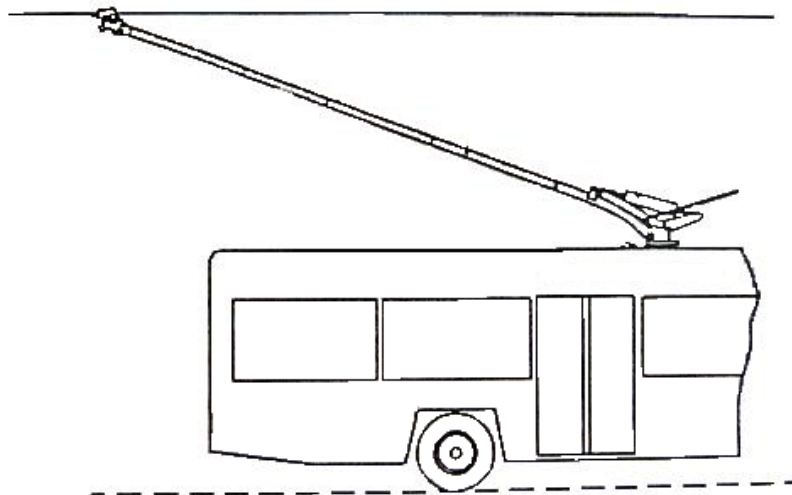


Fig. 2.2 (7)
Pantógrafo utilizado en los buses de Quito

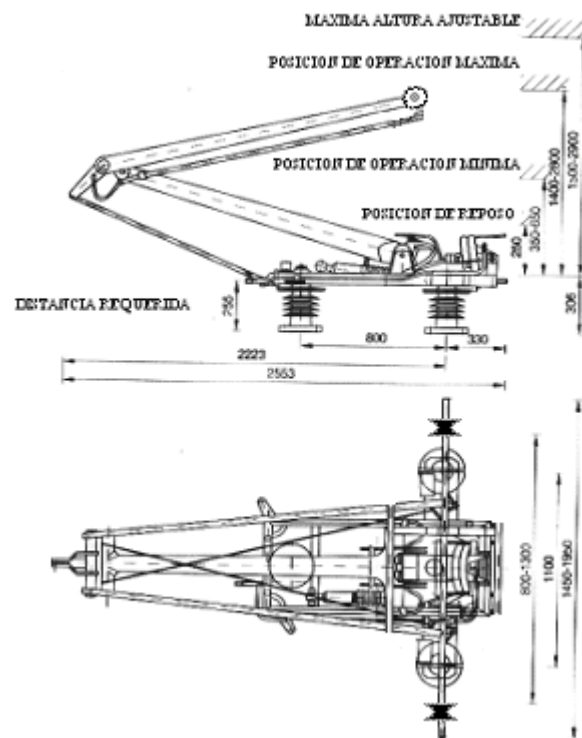


Fig. 2.3 (6)
Pantógrafo DSA-350S

Los requerimientos básicos para la iteración entre el pantógrafo y la línea de contacto se explican en la *figura 2.4*

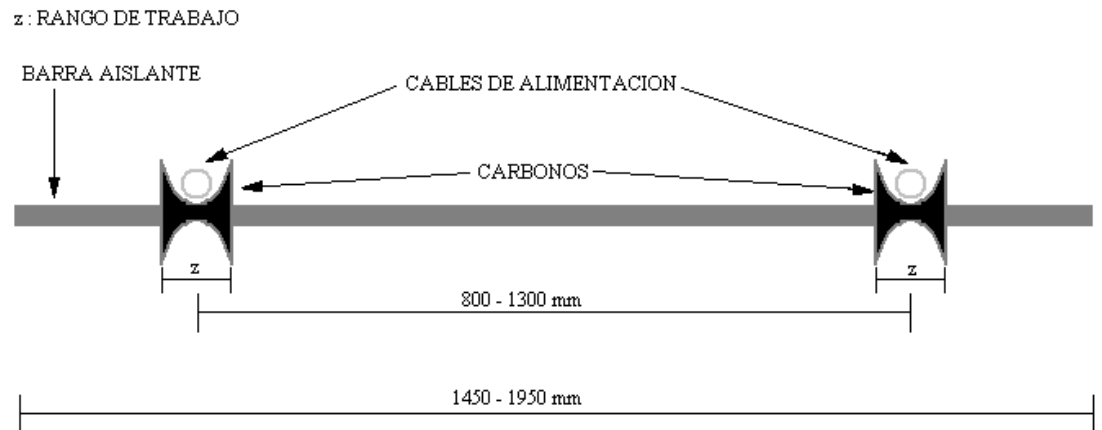


Fig. 2.4
Vista Frontal del Pantógrafo

Como requerimiento básico la cabeza del colector debe siempre mantenerse en la línea de contacto aun en las condiciones más desfavorables principalmente cuando el bus toma las curvas. Para una operación suave del sistema, es solo posible cuando la línea de contacto no se aleja del rango de trabajo de la cabeza del colector durante el trayecto, por eso es esencial que la línea este siempre en contacto con la cabeza del colector cuando el vehículo este en movimiento.

El pantógrafo tiene una posición de trabajo máxima y mínima. El rango entre estas dos posiciones se llama rango de trabajo. La posición máxima y mínima de trabajo es de aproximadamente

2800 mm y 300 mm con relación al borde superior de la estructura principal del pantógrafo.

2.2.1.1 PROPIEDADES DEL COLECTOR

El colector es la parte de la cabeza del pantógrafo y es el que hace el contacto directo con la línea de tensión para la transferencia de potencia (6).

El colector debe tener las siguientes propiedades:

- Baja resistencia eléctrica
- Alto punto de fusión
- Buena conductividad térmica
- Bajo peso muerto
- Alta fuerza compresiva
- Buena elasticidad y
- Bajo coeficiente de fricción en relación con el cable de cobre que hace contacto.

El colector puede estar hecho de carbono o grafito, estos dos materiales proveen una favorable relación con el cable de cobre

con el que hace contacto. En Europa los colectores de los pantógrafos que a mediados del siglo 20 eran de metal han sido reemplazados por carbono. Hoy en día la máxima corriente permitida en un colector de carbono para una fase es de 500 a 700 A. Y para un pantógrafo de dos colectores de carbono el límite máximo de corriente es de 1400 A. Para voltajes de corriente continua la corriente máxima permitida es de 1250 A. Sí el vehículo requiere de una mayor corriente que la permitida entonces se necesitará más de un pantógrafo.

2.2.1.2 FUERZA DE CONTACTO ENTRE EL PANTÓGRAFO Y LA LÍNEA DE TENSIÓN.

La interacción entre el pantógrafo y la línea de tensión son gobernadas por las fuerzas de contacto estáticas, aerodinámicas y dinámicas (6).

La fuerza de contacto estática es la fuerza ejercida sobre el colector por el pantógrafo y la línea de tensión medida cuando la unidad de tracción del vehículo esta estacionaria. Para lograr la mejor condición de trabajo del pantógrafo, este debe trabajar de

tal manera que el pantógrafo siempre ascienda y descienda de la misma forma. En la práctica esto no ocurre siempre debido a que existe fricción al momento de doblarse los brazos del pantógrafo.

Con respecto a los valores de referencia dados por la empresa dedicada a la investigación en el campo eléctrico, energía TSI (TSI energy), las siguientes fuerzas de contacto estáticas son recomendadas (6):

- $F_{k0} = 60$ y 90 N para 15 KV y 25 KV en AC
- $F_{k0} = 100$ y 120 N para 3KV en DC
- $F_{k0} = 70$ y 110 N para 1.5 KV en DC

La *figura 2.5* muestra la resistencia aerodinámica R_{st} (1) y la pérdida de potencia ΔP (2) para un pantógrafo DSA 350S dependiendo de la velocidad del vehículo.

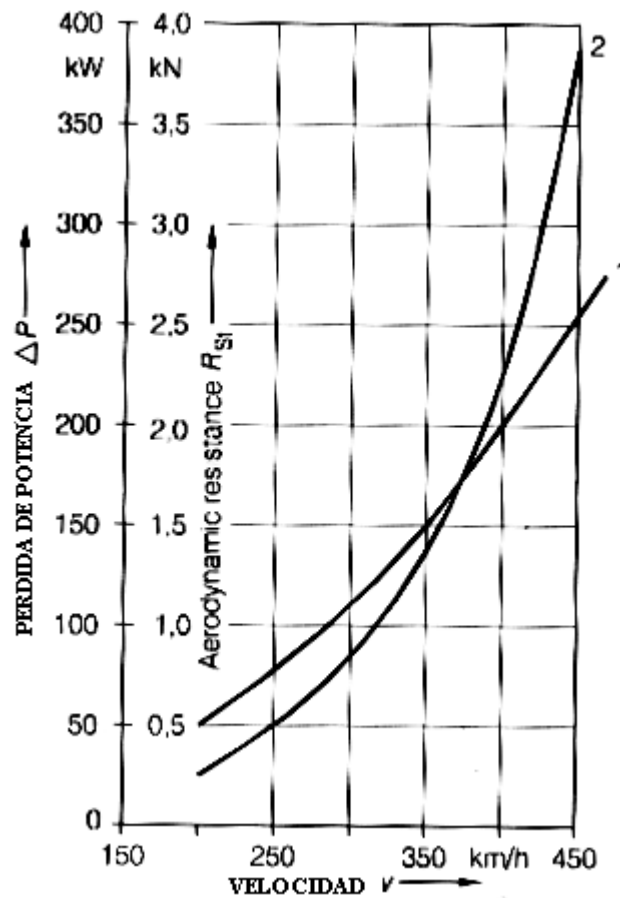


Fig. 2.5 (6)
Resistencia aerodinámica y Pérdida de Potencia

2.2.1.3 FUERZA DE CONTACTO AERODINÁMICAS

Las sumas de las fuerzas de contacto estáticas y los componentes resultantes para cuando el vehículo este en movimiento se lo llama fuerzas de contacto aerodinámicas. Esta fuerza se la mide cuando la cabeza del colector no esta tocando la línea de tensión y se incrementa a medida que se incrementa la velocidad. La

resistencia aerodinámica del pantógrafo tiene que ser distinta a la fuerza de contacto dinámica. El efecto principal de la resistencia aerodinámica ocurre en la cabeza del colector (6).

La *figura 2.6* muestra los componentes de la fuerza de contacto.

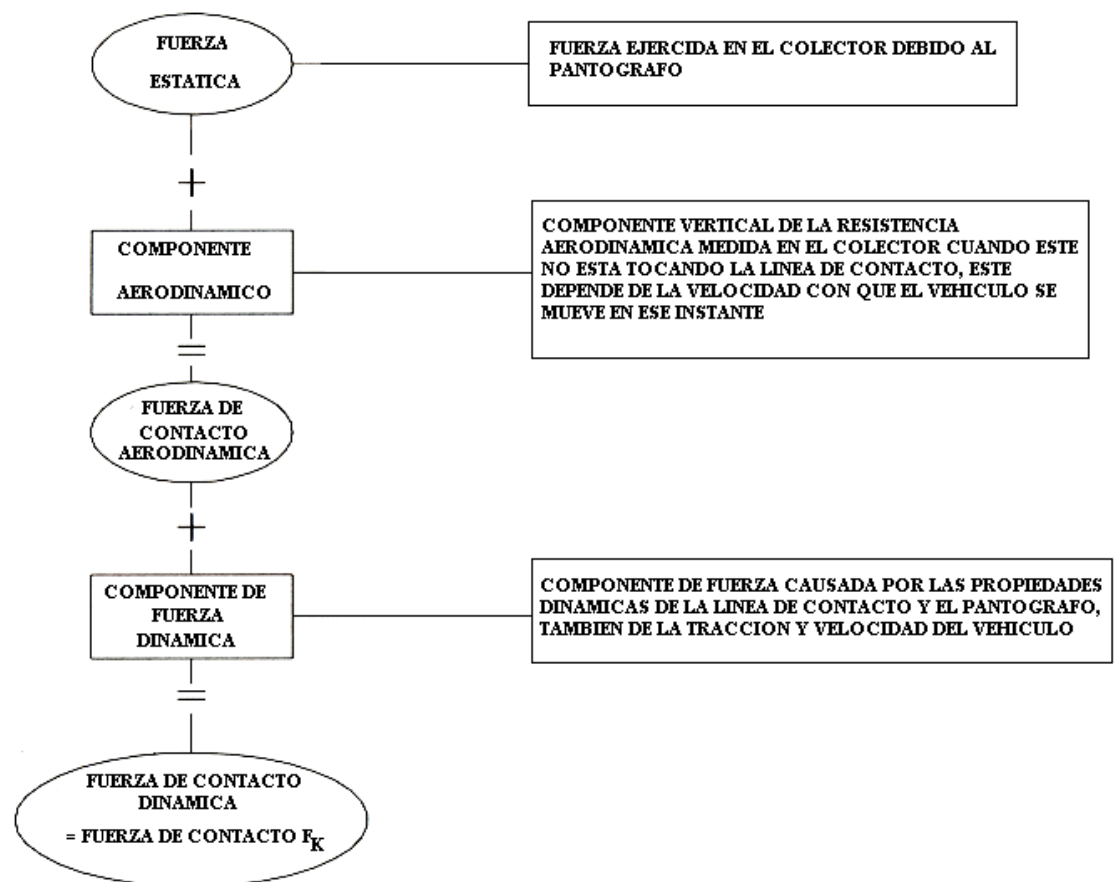


Fig. 2.6 (6)
Componentes de la Fuerza de Contacto

2.2.1.4 FUERZA DE CONTACTO DINÁMICA

La suma de las fuerzas de contacto aerodinámicas y de los componentes dinámicos de la interacción entre la línea de tensión y el pantógrafo se le llama de acuerdo al EN 206-1 como la fuerza de contacto dinámica. Esta fuerza depende de la velocidad, de las propiedades dinámicas de la línea de tensión y el pantógrafo y del espacio. Pero también depende de la forma en que el vehículo vaya haciendo su recorrido (6).

Irregularidades en la línea de tensión como por ejemplo en la sección donde están los aisladores generan picos en la fuerza de contacto dinámica, estos deben ser evitados si es posible.

La calidad del contacto entre la línea de tensión y el pantógrafo puede ser determinado por las fuerzas de contacto dinámicas para evitar picos y también limitar el levantamiento y desgaste de componentes, las fuerzas de contacto deben, acorde al EN 50119, estar en el rango de (6):

TABLA IX: Fuerza de Contacto

Sistema	Velocidad (Km / H)	Fuerza contacto en N	
		Mínimo	Máximo
AC	≤ 200	Positivo	300
AC	> 200	Positivo	350
DC	≤ 200	Positivo	300
DC	> 200	Positivo	400

2.2.2 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DEL PANTÓGRAFO

El diseño y las características del pantógrafo tienen un considerable efecto en la manera de moverse el vehículo. Usar un pantógrafo mal seleccionado o mal diseñado puede traer problemas al momento que haga contacto con la línea de tensión y por ende problemas de potencia en el motor. Para el caso de los trenes de alta velocidad estos necesitan no solo de un buen pantógrafo sino también las líneas de tensión deben ser bien diseñadas para que haya un satisfactorio cambio de energía. En nuestro caso que utilizaremos un bus que tendrá una velocidad máxima de 60Km/h no habrá inconvenientes en el pantógrafo y la línea de tensión.

2.2.3 EL PANTÓGRAFO DSA-350S

En esta parte se hablara de las características de un pantógrafo estándar como es el DSA-350S el cual se lo selecciono para el estudio y su implementación. En este pantógrafo como ya se lo había mencionado anteriormente sus dos colectores están situados en la parte superior de la estructura sostenidos por sus aisladores, su fuerza de contacto es de 70 N bajo condiciones estáticas y se incrementa a medida que aumenta la velocidad, debido a los efectos de la aerodinámica y el desgaste en el punto de contacto (6).

Esto se lo puede observar en la *figura 2.7*, donde se puede ver como la fuerza de contacto del pantógrafo depende de la velocidad a la que se mueve el vehículo, utilizando como línea de contacto un cable Re250. X es el valor y S la desviación estándar.

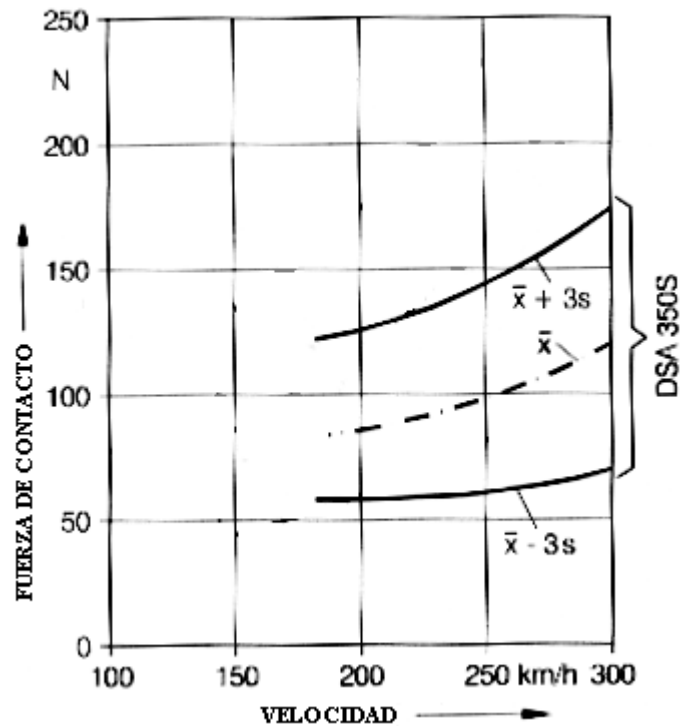


Fig. 2.7 (6)
Fuerza de contacto vs Velocidad

Como se puede observar en el grafico mientras mayor sea la velocidad mayor será la fuerza de contacto especialmente para velocidades mayores a los 200 Km / H mientras que para velocidades menores a esta la fuerza de contacto no varia mayormente lo cual para este caso es perfecto ya que el bus no ira a mas de 60 Km / h (6).

El pantógrafo DSA-350S tiene resortes independientes para cada colector, esto ayuda en el momento en que el colector esta en contacto con el cable de tensión.

La *figura 2.8* muestra un pantógrafo DSA-350S con resortes independientes.

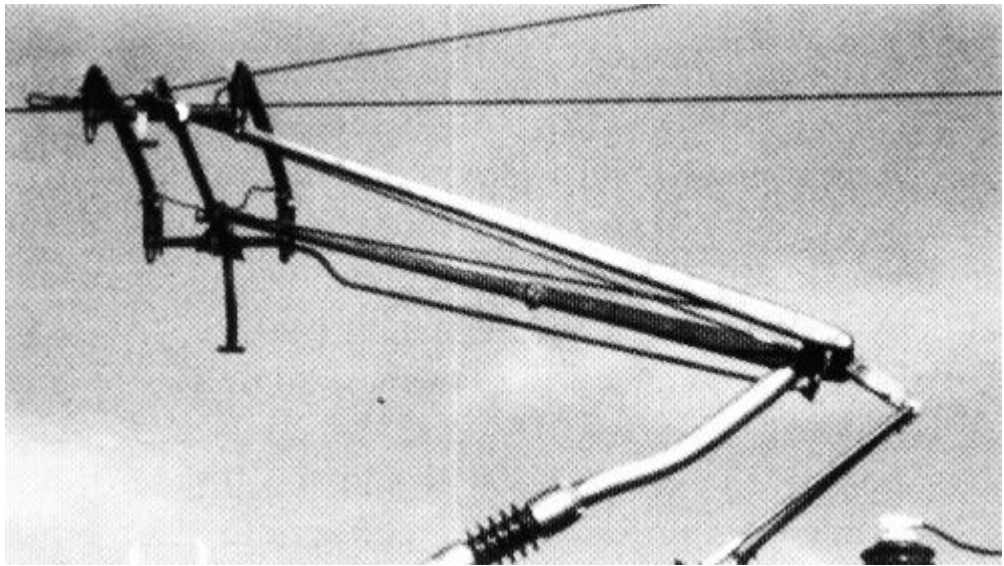


Fig. 2.8 (6)
Pantógrafo DSA-350S

A continuación se menciona otras características del pantógrafo DSA-350S (6):

TABLA X: Características del Pantógrafo DSA-350S

Velocidad operacional máxima	350 Km / H
Material	acero inoxidable / aluminio
Peso (sin aisladores)	106 Kg
longitud del colector	1950 mm
Fuerza de contacto	ajustable entre 70 y 120 N
Tipo del drive	drive neumático
Presión de entrada	5 bar.
Tiempo de actuación mínima	>10 seg.

2.2.4 MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DEL COLECTOR Y LA LÍNEA DE CONTACTO

El tiempo de vida de la línea de contacto y del colector depende esencialmente de (6):

- La fuerza de contacto ejercida por el pantógrafo en el cable
- Los materiales de los cuales están hechos el cable y el colector
- El número y las dimensiones del colector
- La corriente que fluye por el punto de contacto
- La velocidad de tracción del vehículo
- Factores ambientales

Los últimos tres factores no se los puede controlar directamente al momento de diseñar el sistema de transmisión de energía. Esto debe considerarse al momento de seleccionar y calcular las dimensiones de los materiales (6).

Cobre puro y aleación de cobre es el principal material para las líneas de contacto. Según los estándares internacionales publicados por el IEC y EN 50149 los siguientes materiales están permitidos para usarlos como cable de contacto: E-Cu, CuAg, CuSn, CuSd y CuMg (6).

También se pueden utilizar múltiples componentes como CuCrZr y CuCrZrMg dependiendo de medio ambiente y del material de la alineación, el cobre forma entre el 5 y 20 μm de la gruesa capa de CuO y CuO₂, el tiene generalmente inclusiones de grafito del material del colector. Esta capa es dura y tiene buena conductividad eléctrica, esto provee condiciones ideales para el contacto eléctrico (6).

Se han hecho varios intentos usando aluminio como material para el cable de contacto pero este forma una capa dura de óxido que no es conductiva eléctricamente y hace que la transmisión de energía sea mala y forme arcos. Por esta razón, el aluminio no es considerable para usarlo como material del cable de contacto.

De los materiales mencionados anteriormente, las aleaciones de CuAg y CuMg son particularmente consideradas para líneas de contacto especialmente en altas velocidades y aplicaciones de gran potencia. La aleación de CuCd ya no es permitida debido a la contaminación que produce al medio ambiente. CuSn no tiene ventajas sobre la aleación de CuMg. El desgaste de estos materiales ha sido estudiado durante años.

A continuación se muestran diferentes gráficos de pruebas realizadas sobre algunos materiales.

La *figura 2.9* muestra el desgaste de un cable CuMg 0.5 a una velocidad de 150 Km / h (6).

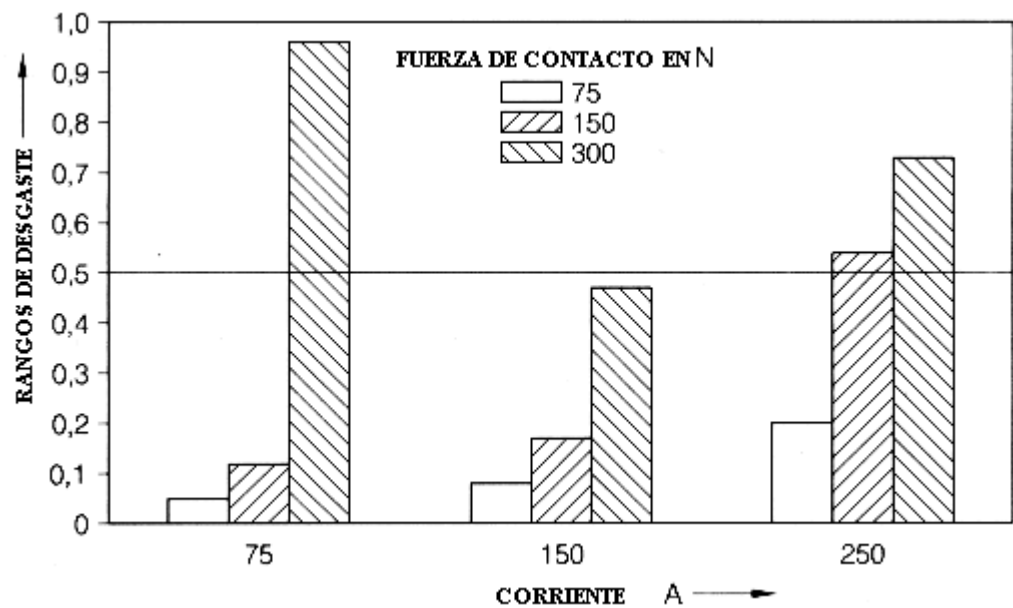


Fig. 2.9 (6)
Rangos de Desgaste vs Corriente

La *figura 2.10* muestra el desgaste de un cable CuMg 0.5 en relación con la velocidad y una fuerza de contacto de 250 N y una corriente de 300 A.

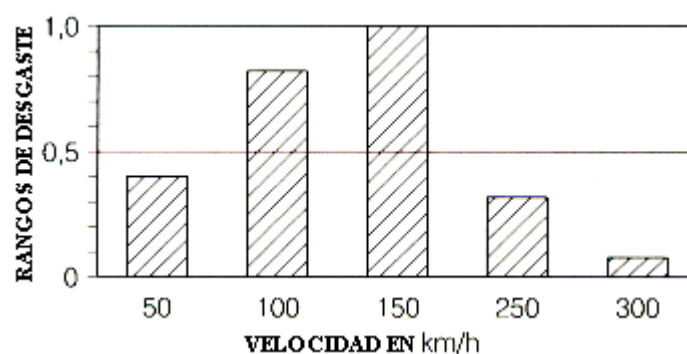


Fig. 2.10 (6)
Rangos de Desgaste vs Velocidad

La *figura 2.11* muestra un cuadro comparativo del desgaste de los cables CuAg 0.1 y CuMg 0.5 a una velocidad de 150 Km / H y una corriente de 300 A (6).

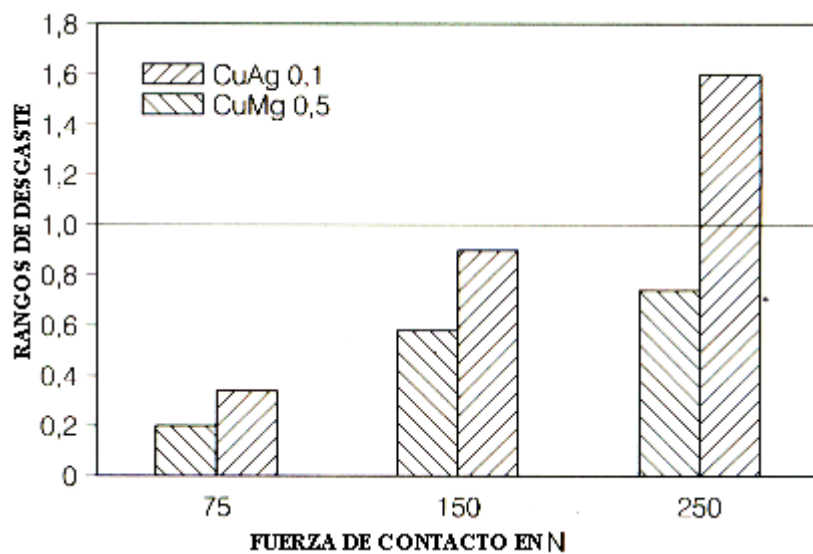


Fig. 2.11 (6)
Rangos de Desgaste vs Fuerza de Contacto

La *figura 2.12* muestra el desgaste de una línea de contacto de cobre, a) con un pantógrafo de dos colectores de carbono, b) dos pantógrafos con un colector de carbono cada uno, c) un pantógrafo con dos colectores de aluminio, d) un pantógrafo con dos colectores de metal (6).

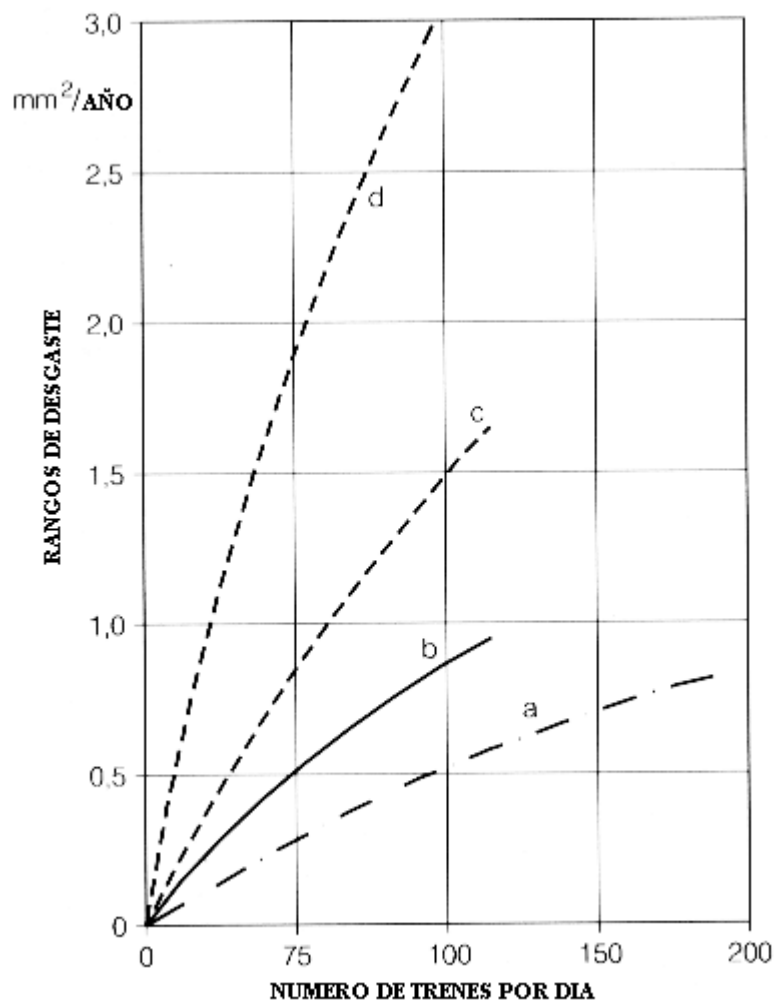


Fig. 2.12 (6)
Rangos de Desgaste vs Número de Trenes por Día

2.2.5 REQUERIMIENTOS DEL PANTOGRAFO

La experiencia a través de los años en el estudio de la transmisión de energía entre el pantógrafo y la línea de contacto muestra que no es posible diseñar un pantógrafo para optimizar la iteración con una específica línea de contacto, debido a que esta no tiene

características de diseño uniforme ya que sus masas y fuerzas de tensión varían de acuerdo a condiciones de operación. Estudios realizados han demostrado que un pantógrafo bien diseñado funcionara siempre con diferentes líneas de contacto. A continuación nombraremos los requerimientos básicos para el diseño del pantógrafo:

- La fuerza de contacto debe ser igual para cuando el vehículo vaya tanto hacia delante como hacia atrás, solo variara cuando se aumente la velocidad. La fuerza de contacto también debe ser al mismo tiempo alta para prevenir los arcos pero también baja para mantenerse en la línea de tensión.
- Para mantener una satisfactoria calidad de corriente la fuerza de contacto estática ejercida por el pantógrafo así como la fuerza de contacto aerodinámica tienen que mantenerse en el rango de diseño.

- La fuerza de contacto estática nominal debe mantenerse en los siguientes rangos:
 - entre 60 y 90 N para voltajes AC
 - entre 100 y 120 N para voltajes DC de 3KV
 - entre 70 y 110 N para voltajes DC de 1.5 KV

La *figura 2.13* muestra la fuerza de contacto F_m para sistemas de corriente alterna y continua dependiendo de la velocidad

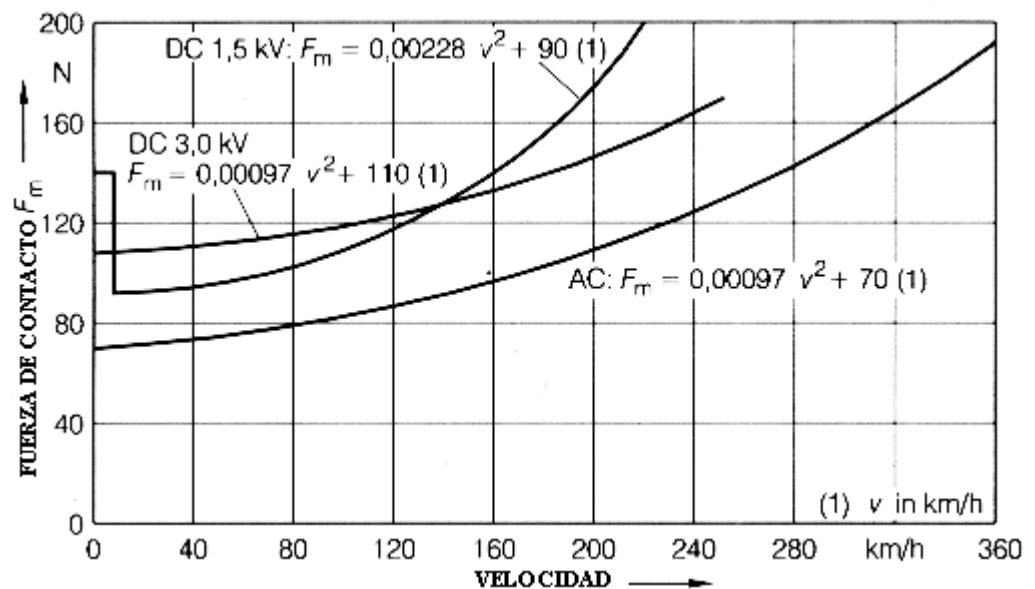


Fig. 2.13 (6)
Fuerza de Contacto vs Velocidad

- La masa de los colectores debe ser lo mas liviana posible para obtener óptimas características dinámicas.
- La masa aparente debe estar cerca de los valores que están en el rango entre 4 y 30 Ns / m.
- El pantógrafo debe estar equipado con un dispositivo de fallas el cual en caso de una falla en el sistema de suministro eléctrico bajaría el pantógrafo.

2.2.6 SISTEMA DE ASCENSO Y DESCENSO DEL PANTÓGRAFO

El funcionamiento con el cual el pantógrafo asciende para hacer el contacto con las líneas de alimentación y su descenso se lo controla mediante un sistema neumático. Consiste de un compresor que funciona a 24V y manda presión hasta 10 Bar, este es alimentado por medio de una batería, debido a que inicialmente no hay corriente en el sistema eléctrico del bus. Se necesita también un tanque de almacenamiento de aire, donde se almacenará el aire comprimido, en este caso se puede usar los mismos tanques con

los que cuenta un bus normal. El aire comprimido se encargará de hacer funcionar los diferentes pistones necesarios en el bus. Para el pantógrafo se necesitan dos y otro pistón para las puertas (7).

También son necesarias electroválvulas, una válvula de presión y una válvula de caudal. El ascenso del pantógrafo se lo realiza por medio de un sistema de resortes, inicialmente el primer brazo del pantógrafo está agarrado por medio de un gancho, cuando el operador manda la señal de subir el pantógrafo lo que hace es mandar a abrir una electroválvula la cual permite el paso del aire comprimido para abrir el gancho, no se requiere mas de 1Bar de presión para esta acción. Una vez que el gancho se abre el pantógrafo sube inmediatamente debido al resorte que se encuentran en la base, estos resortes tienen que ser diseñados para que el pantógrafo ascienda a una velocidad normal, ni muy rápido, ni muy despacio.

Una vez que el pantógrafo toca las líneas de alimentación el operador tiene que verificar que hay voltaje para poner en

funcionamiento el bus, así mismo se activa un sensor que indica que el pantógrafo esta arriba y se desactiva la electroválvula para el gancho, por lo que este vuelve a su estado original. Para que haya un acoplamiento más seguro entre el pantógrafo y las líneas al momento del ascenso se recomienda que se pongan unos techitos los cuales pueden ser de plástico, pero solo en una pequeñísima sección de las líneas donde el bus subirá el pantógrafo.

Para la parte del descenso del pantógrafo se utiliza otra electroválvula la cual va a permitir el paso del aire comprimido de 9 a 10 Bar de presión, la cual es necesaria para bajar el pantógrafo. Al mismo tiempo que se da la señal de bajar el pantógrafo también se activa la electroválvula para bajar el gancho. Cuando el pantógrafo se encuentra ya en su posición inicial, activa un sensor que manda a cerrar las dos electroválvulas. El pistón encargado de bajar el pantógrafo se encuentra colocado en la parte inferior del brazo principal. Debido a que se necesitan diferentes presiones, 10 Bar para el descenso, 1 Bar para abrir gancho y 2 bares para las

puertas se usan válvulas de presión, y una válvula de caudal que se la usa para el descenso del pantógrafo, para hacer que este baje lentamente.

Se muestran dos gráficos (*figura 2.14 y figura 2.15*). El primero muestra el gancho y la segunda el pistón en la parte inferior del pantógrafo (7).

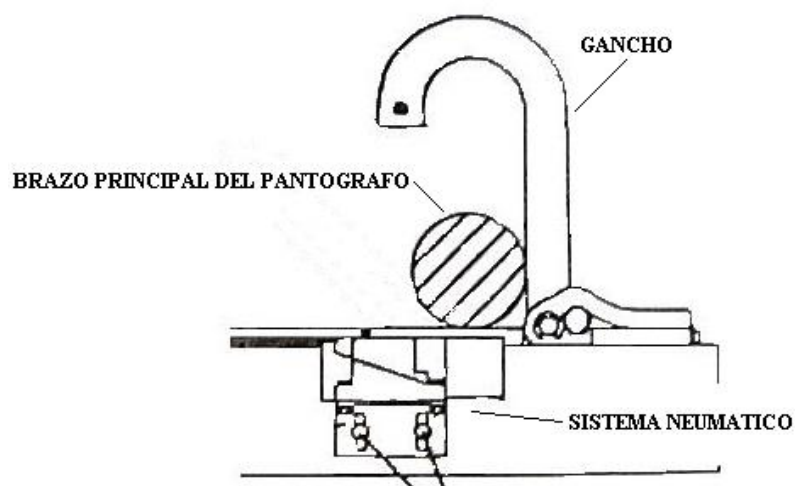


Fig. 2.14 (7)
Gancho que sostiene al Pantógrafo

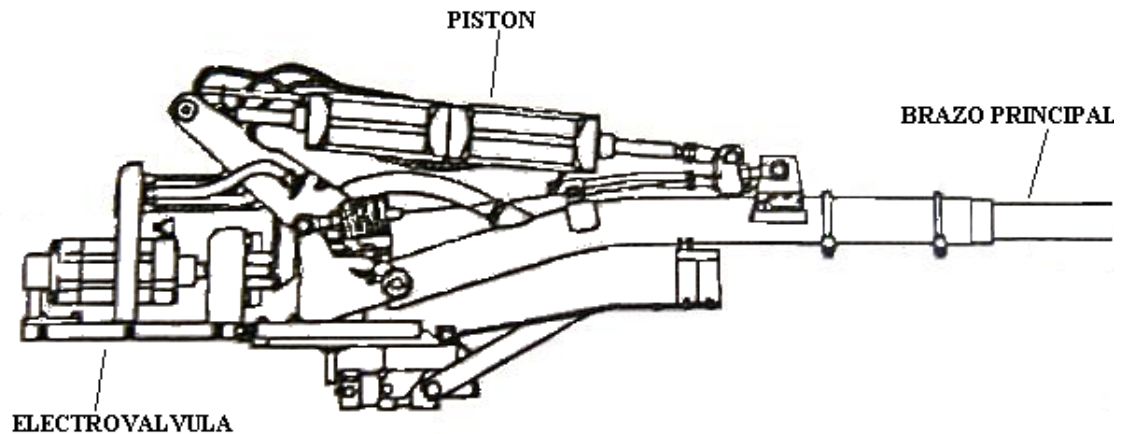


Fig. 2.15 (7)
Mecanismo del Pantógrafo

2.3 SISTEMA DE ALIMENTACION

2.3.1 RED AC MONOFÁSICA DE 60 HZ

La energía eléctrica requerida para la operación de una *red monofásica de 60 Hz* es obtenida de una de las fases de la red trifásica de 60 Hz que se suministra al público en general. Al obtener la fase de la red trifásica, se crea un desbalance en el voltaje y corriente de la red trifásica. El desbalance de corriente tiene un efecto minoritario en los generadores, mientras que el desbalance de voltaje tiene serios efectos en los consumidores.

El *desbalance de voltaje* u_U es inversamente proporcional a la potencia de corto-circuito S_k'' de la red trifásica. Si la potencia S_e

obtenida de una de las fases de la red trifásica es conocida, entonces el desbalance de voltaje en las red trifásica es (6):

$$u_U \approx \frac{S_e}{S_k}$$

(2.20)

Con la potencia de corto-circuito variando entre 700 MVA y 3000 MVA en la red trifásica de 110 kV y potencias de subestaciones arriba de los 40 MVA, grandes valores de desbalances de voltaje son esperados. El desbalance de voltaje crea una reducción en la vida media de los motores asíncronos de 3 fases alimentado por una corriente trifásica. Para minimizar los desfavorables efectos del desbalance de voltaje, límites permisibles de u_U son especificados. De acuerdo al EN 60 034-1, motores de 3 fases sólo pueden ser operados con un suministro de sistema de potencia que no exceda el desbalance de voltaje del 1% continuo o el 1.5% para unos cuantos minutos. Entonces para cumplir con estos requerimientos es necesario limitar o compensar los desbalances.

En la práctica, la potencia monofásica es usualmente conectada de manera que cambie cíclicamente con la red trifásica, como se ve en la *figura 2.16 b)*. Sin embargo este tipo de alimentación lleva a un compromiso en la red monofásica que considera una óptima operación, que es el caso de la conexión de la *figura 2.16 a)*. La separación de fases es necesaria, esto permite la alimentación a las líneas de contacto sólo de un lado. En la separación de fases, los voltajes aplicados tienen una separación de fase de 120° . La diferencia de voltaje en la separación de fase es

$$\sqrt{3} \times 25 \text{ kV} \cong 43.3 \text{ kV. (6)}$$

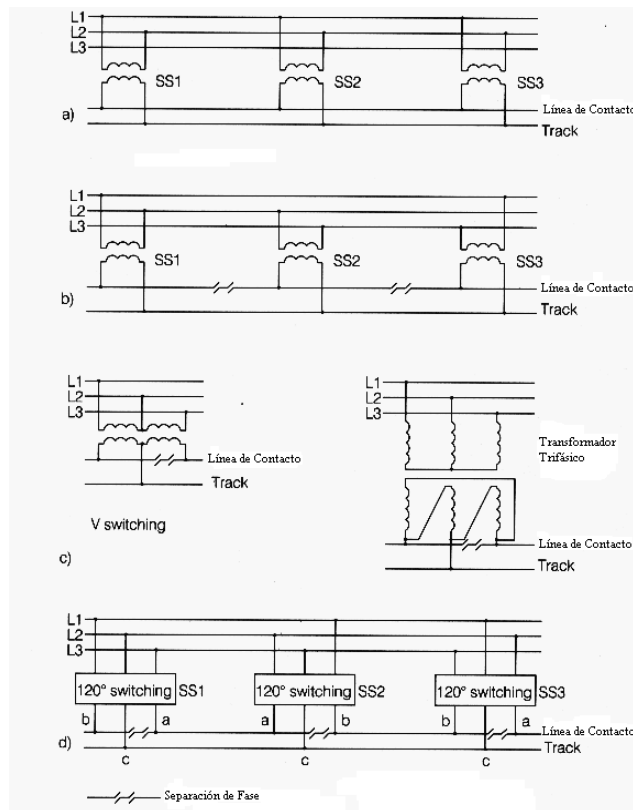


Figura 2.16 (6)

Alternativas de Conexiones Monofásicas de 60 HZ de un Red Trifásica.

- (a) Conexión sin compensación al desbalance.**
- (b) Conexión que cambia cíclicamente, compensación indirecta al desbalance.**
- (c) Conexión de 120° para una directa compensación al desbalance.**
- (d) Conexión que cambia cíclicamente de subestaciones paralelas, con directa compensación de 120° al desbalance.**

Una mayor caída de voltaje resulta en red de línea aérea y crea condiciones desfavorables para las unidades de regeneración eléctrica (6).

En la *figura 2.17* se ve un tipo de alimentación caracterizado por auto-transformadores adicionales y una línea de retorno con un potencial de 25 kV.

Esta línea de retorno es comúnmente designada como alimentación negativa. Por esta razón, un poste de cambio de engranes similar es requerido en red de línea aérea. (6)

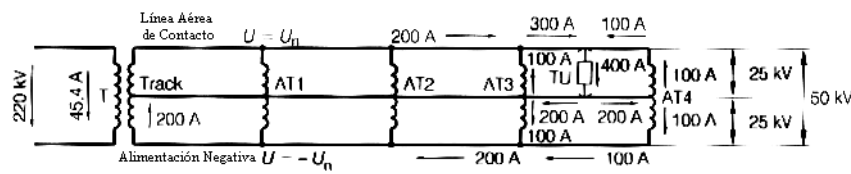


Figura 2.17 (9)

Diseño básico del sistema de alimentación $2 \times U_n$. $U_n = 25$ kV, alimentado de una fuente de 220 kV, T = Transformador de Subestación, AT = Auto-Transformador, TU = Unidad de Tracción, corriente $S_n = 10$ MVA.

La línea es alimentada por un transformador con tap-central. La diferencia de potencial entre la línea aérea de contacto y la alimentación negativa es de hasta 50 kV..

La potencia de transmisión entre la subestación y el auto-transformador que precede a la sección en donde la unidad de

tracción recolecta energía eléctrica de la línea de contacto ocurre como en el poste de línea de 50 kV. La baja corriente involucrada con esta transmisión de potencia da por resultado una caída de voltaje en la red de líneas de contacto. En la sección entre la subestación y el auto-transformador, la corriente que fluye en la línea de retorno es baja debido al desfase de casi 180° en las corrientes altas de la línea aérea de contacto y la alimentación negativa. La interferencia con líneas adyacentes es muy baja (6).

En principio, este tipo de alimentación puede ser usado con un pliegue- n de voltaje nominal, e.g. 3×25 kV. En este caso, la transmisión de potencia de los auto-transformadores será desarrollada por un voltaje de 75 kV. Debe ser notado que esta alimentación principal puede ser usada para todos los sistemas AC monofásicos independiente de sus frecuencias nominales. Los requerimientos en el diseño del aislamiento en el sistema se incrementan con $n \cdot U_n$. Por ejemplo los grandes vacíos de aire necesarios entre las partes con múltiples diferencias de voltajes

nominales, tienen que ser tomadas en cuenta en las instalaciones de líneas aéreas de contacto (6).

2.3.2 SUBESTACIÓN

Las subestaciones son los puntos de paso de la energía entre tramo y tramo para alimentar la línea de contacto; realizan la unión entre la red de alta tensión y la catenaria

En corriente alterna Se distinguen dos casos (6):

1- Con electrificación de corriente monofásica 16 2/3 Hz:

(a) Con alimentación proporcionada por red especial a 16 2/3 Hz se utilizan transformadores que bajan la tensión a 15000 v.

(b) Con alimentación directamente de la red de alta tensión pública se utilizan convertidores de corriente trifásica a 60 Hz a corriente monofásica de 16 2/3 Hz a 15000 v para el caso de trenes de alta velocidad.

2- Con electrificación de corriente monofásica de 60 Hz:

Se tiene como red primaria la red pública trifásica; se utilizan transformadores monofásicos conectados entre dos fases de la red trifásica. Se distinguen dos casos (6):

a) Subestaciones de corriente monofásica a 15000 v y 16 2/3 Hz:

a.1) De producción autónoma, con alimentación por medio de centrales monofásicas:

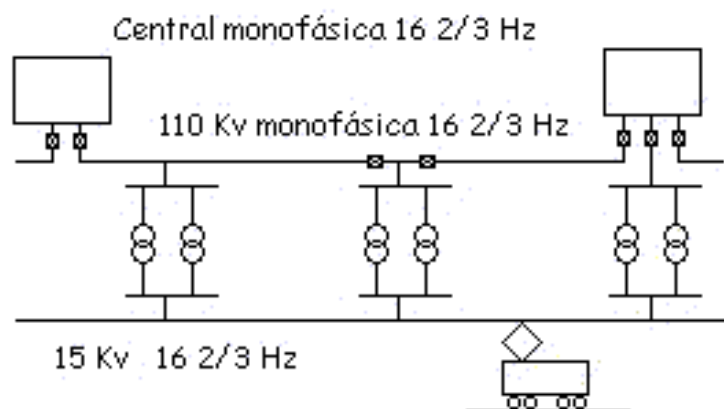


Fig. 2.18 (6)

Subestación de producción autónoma.

a.2) De conversión centralizada, con alimentación desde puestos de conversión (6):

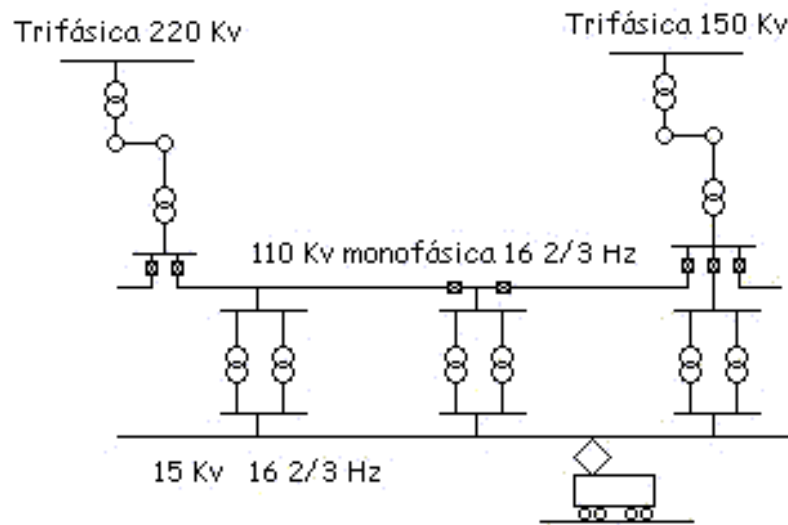


Fig. 2.19 (6)
Subestación de conversión centralizada

En los dos casos expuestos con anterioridad las subestaciones transforman la tensión de la línea de alta tensión de 110 Kv a los 15 Kv de la catenaria.

Este sistema de disposición de subestaciones es frecuente en países tales como Alemania, Suiza, Austria o Noruega con la excepción que estos utilizan la frecuencia a 50Hz.

- a.3) De conversión repartida, que carece de línea de alta tensión para las estaciones y cada subestación está unida directamente a la red pública trifásica de 60 Hz mediante

el puesto de transformación más cercano a ella. Con ello se consigue reducir de manera considerable la longitud de la línea electrificada, y con ello una disminución del coste de la electrificación. Este método de distribución de subestaciones se lleva a cabo en países muy industrializados tales como Suecia.

b) Subestaciones de corriente monofásica a 25000 V y 60 Hz:

Las subestaciones se disponen lo más cerca posible de los centros distribuidores de alta tensión y así conseguir que las líneas de alimentación sean lo más cortas posibles. La disposición es la siguiente:

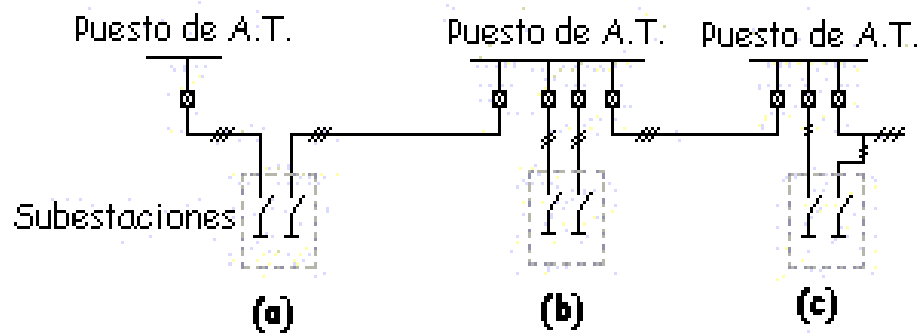


Fig 2.20 (6)

- (a) Subestación con alimentación doble, unida a dos puestos de alimentación mediante una línea trifásica a cada uno.**
- (b) Subestación alimentada desde un solo puesto mediante una línea doble de dos conductores cada una.**
- (c) Subestación alimentada mediante una línea doble y otra trifásica de emergencia.**

Condiciones a cumplir por un sistema de mando centralizado de subestaciones:

- La transmisión de la información debe poder ser asegurada por circuitos telefónicos.
- Imposibilidad de realizar una orden equivocada o falsa señalización.
- Subestaciones independientes. Las órdenes de maniobra han de poder ser diferentes y simultáneas a varias estaciones.
- Rapidez de respuesta.

2.3.3 LAS CATENARIAS

El segundo de los sistemas de alimentación en la línea de contacto son las catenarias, que son las líneas de contacto aéreas de las que el vehículo motor toma la corriente por medio del pantógrafo. Consta de un hilo portador (sustentador) del cual está suspendido, gracias a unos elementos intermedios, el hilo de contacto. Aquí se da unos ejemplos de algunas Secciones del cable de la catenaria correspondientes a diferentes sistemas de electrificación (6):

- Monofásicas de 15 Kv/16 Hz ó 50 Hz/25 kv : sección 100, 150 mm².
- Continua de 3000 v: sección de 300 mm².
- Continua de 1500 v: sección de 400 mm² y mayores.

En las inmediaciones de las subestaciones, lugares donde mayores densidades de corriente se producen, se añade a la catenaria unos conductores o feeders para transportar amperios.

A continuación se nombra dos condicionantes en la instalación de la catenaria:

- Los efectos de los agentes atmosféricos tales como el viento o el propio peso de la catenaria. Estos condicionantes repercuten directamente en el apartado de la separación de los postes de la línea de la catenaria. Puede hacerse necesaria la implantación de sistemas de compensación para mantener constante la tensión mecánica entre los hilos y cables tales como éste:
- El paso a velocidades muy altas del pantógrafo y la necesidad de garantizar una captación de corriente satisfactoria y permanente.

2.3.3.1 ELEMENTOS DE LAS CATENARIAS

En esta parte se explicará cada uno de los elementos usados
(6).

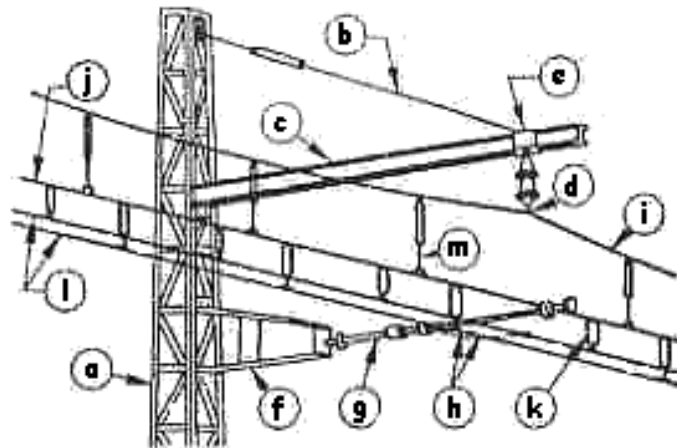


Fig 2.21 (6)

- (a) Poste
- (b) Tirante
- (c) Ménsula
- (d) Cadena de suspensión
- (e) Pieza de fijación
- (f) Ménsula de atirantado
- (g) Estabilizador
- (h) Brazo de atirantado
- (i) Cable portador principal
- (j) Cable portador auxiliar
- (k) Péndola abrazadera
- (l) Hilos de contacto

(m) Péndola deslizante

Las péndolas son los elementos de unión entre todos los cables e hilos que constituyen la catenaria. Los hilos de contacto y los sustentadores quedan suspendidos de forma uniforme y estable por medio de sustentadores metálicos tales como las ménsulas y pórticos. Las ménsulas pueden estar fijadas de manera rígida o bien ser capaces de girar sobre el plano horizontal cuando se regula la tensión mecánica del sustentador. El sustentador y el hilo de contacto se aíslan eléctricamente de la ménsula colocando aisladores en forma independiente para la sustentación y el atirantado del hilo de contacto. También puede aislarse toda la ménsula colocando aisladores en el cuerpo de ella. En el caso que se precise pueden utilizarse ménsulas capaces de sustentar dos, tres y hasta cuatro líneas.

Pórticos: si se unen las partes superiores de los dos postes situados a ambos lados de dos o más vías por medio de una viga o por cables, queda constituido un pórtico en el que pueden sustentarse las líneas de contacto de las vías que abarca. En el

primer caso se denomina pórtico rígido y en el segundo caso flexible.

El pórtico se utiliza para servir a más de dos vías cuando no hay suficiente entrevía para colocar postes y sobre todo para dejar diáfanas las instalaciones de las estaciones.

En los pórticos y ménsulas, para más de una catenaria, con objeto de permitir la compensación mecánica a veces debe equipararse la sustentación con poleas para que faciliten el desplazamiento de los sustentadores, si las suspensiones carecen de posibilidad de desplazamiento.

Los Postes: sustentan las ménsulas, las vigas de los pórticos rígidos y los cables de los pórticos flexibles. También sirven para anclar los extremos de los cables sustentadores y de los hilos de contacto que son finales de línea. Los postes pueden ser de madera, acero u hormigón armado. La fijación al suelo se realiza por medio de hormigón y espárragos roscados que se atornillan a una peana soldada a la base del poste.

Para la instalación de la catenaria hay que tener en cuenta que hay que tratar de mantener los hilos de contacto y el portador auxiliar en la vertical del portador principal, esto se consigue de la siguiente manera:

- * En tramo recto se fija la posición del portador auxiliar mediante un estabilizador en cada poste.
- * En curva hay que incluir, además, unos brazos de atirantado para impedir el desplazamiento transversal de los hilos de contacto. En este caso, pues, la catenaria tendrá la forma de los lados sucesivos de un polígono:

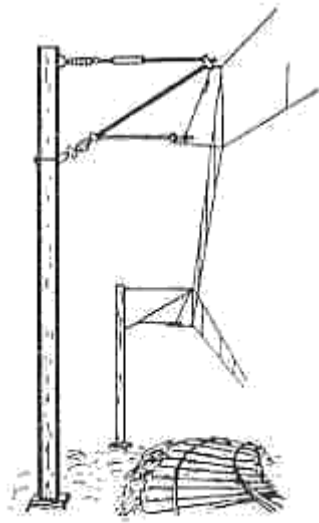


Fig. 2.22 (6)

Colocación de Catenaria en Curva

2.3.3.2 TIPOS DE CATENARIAS Y CARACTERISTICAS

1- Ligera (6):

- Hilo portador: cable de bronce al estaño de 65 mm^2 de sección.
- Hilo de contacto: de cobre con 107 mm^2 de sección.
- Péndolas: hilos redondos de cobre de 7 mm de diámetro situadas cada 4.5 m.

- Uso: en electrificaciones de corriente continua de 1500 v o en vías de servicio con velocidades inferiores a 60 Km/h.

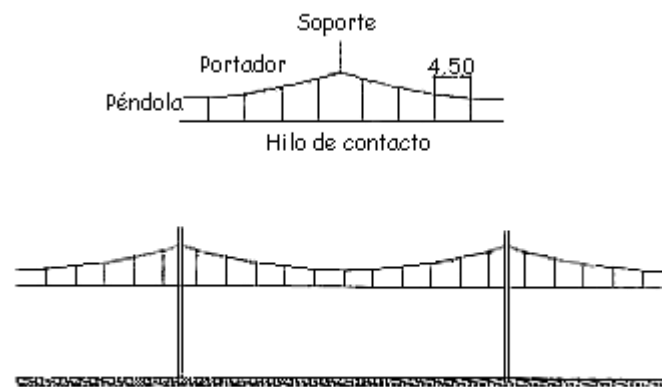


Fig. 2.23 (6)
Catenaria Ligera

2- Simple:

- Hilo portador: cable de bronce al cadmio de 116 mm^2 de sección.
- Hilos de contacto : dos de cobre de 107 mm^2 de sección cada uno.
- Péndolas: hilos redondos de cobre de 7 mm de diámetro situadas cada 2.25 m.

- Uso: en vías de servicio con velocidades inferiores a 80 Km/h.

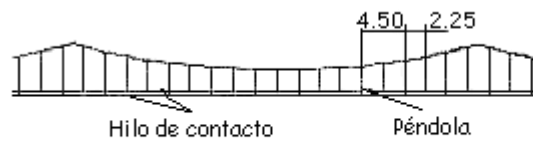


Fig 2.24 (6)
Catenaria Simple

3-Compuesta:

Del cable sustentador se suspende otro cable denominado sustentador secundario, del que se cuelga el hilo de contacto.



Fig. 2.25 (6)
Catenaria Compuesta

4-Reforzada:

Con dos hilos de contacto de mayor sección que en la catenaria compuesta. En las proximidades de los soportes se utilizan péndolas deslizantes y los dos hilos de contacto se unen al hilo portador por medio de abrazaderas.

5- Monofásica:

Para el caso de tener corriente monofásica. Ahora, como la intensidad a captar es inferior que en los casos anteriores, la presión del pantógrafo sobre la catenaria ha de ser también inferior. Su estructura es como la de la línea de contacto ligera anteriormente descrita. Si los vehículos han de ir a velocidades superiores a los 120 Km/h se utiliza la estructura de suspensión en Y, consistente en un cable auxiliar de unos 10 m. de longitud unido en sus extremos al cable portador a uno y otro lado del punto de anclaje y del que penden dos péndolas:



Fig. 2.26 (6)
Suspensión en Y

6- Otros tipos:



Fig. 2.27 (6)
Catenaria de Malla



Fig. 2.28 (6)

Catenaria de Sustentadores Alternos



Fig. 2.29 (6)

Catenaria con Sustentador Subdividido

Al ser la catenaria una instalación de alta tensión, debe cumplir las disposiciones del Reglamento de Alta Tensión del Ministerio de Industria sobre protección de personas e instalaciones. Este reglamento establece que todos los postes e instalaciones de alta tensión deben ponerse a tierra. Si hay circuito de retorno los postes se conectan a los carriles, y si no se conectan entre sí por medio de un cable auxiliar el cual va conectado a tierra a intervalos regulares de distancia. Si los postes son de hormigón son las ménsulas las que se conectan a tierra.

- Como protección de la línea contra sobrecargas se instalan descargadores de antenas o descargadores en los aislantes:

- Como protección contra descargas atmosféricas se colocan pararrayos cada 1200 m., coincidiendo con la conexión a tierra del cable de puesta a tierra de los postes.
- Los aisladores son los encargados de aislar la catenaria del poste. Los materiales de los que están compuestos estos aisladores es la porcelana, pero como este material es muy pesado actualmente se utilizan otros tipos de materiales tales como el vidrio templado o el vidrio-resina, mucho más ligeros y con gran resistencia a tracción y flexión.

A continuación se presentan diferentes tipos de aislantes:

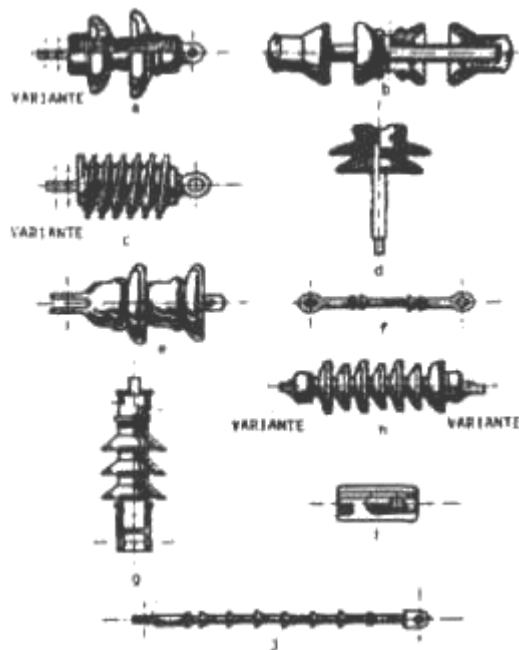


Fig. 2.30 (6)

Aislantes

Los aislantes de sección son los encargados de aislar entre sí diferentes partes de la catenaria. Los aisladores de sección deben mantener la tensión eléctrica en el pantógrafo, garantizando que no se disparen los aparatos de protección.

En las líneas de comunicaciones: hay influencia eléctrica, debida a la tensión de la catenaria, y electromagnética debida a la corriente de tracción. Los efectos de estas acciones son de

gran peligro para las personas e instalaciones y distorsión de las comunicaciones. Su solución es:

1- Situar los circuitos de telecomunicaciones aéreos como mínimo a diez metros de las catenarias.

2- Enterramiento de los cables.

CAPÍTULO III

MODELO ESCALA

3.1 DISEÑO DEL MODELO A ESCALA

Este capítulo explica el diseño y construcción de un modelo a escala (1:10) del proyecto antes expuesto. Se lo divide en:

- 1- La construcción de la pista por donde va ir el bus y los materiales usados.
- 2- La construcción de las líneas de tensión y las catenarias y los materiales usados.
- 3- La construcción del bus: el chasis y la guía para desplazarse por la pista.
- 4- El diseño del sistema eléctrico, que incluye el sistema de control, motor y el pantógrafo.

3.1.1 CONSTRUCCIÓN DE LA PISTA

El diseño de la pista requiere que esta sea de gran tamaño debido a las dimensiones del bus a escala y que sea desarmable. La pista tiene la forma de un ovalo. Las dimensiones de esta pista son: 10m de largo x 3m de ancho, entonces el recorrido total del bus será de aproximadamente 23m.

La pista se construyó utilizando un tubo cuadrado de hierro de 1 pulgada, la parte recta de la pista tiene 7m de cada lado y al final un semicírculo de 3m de diámetro, como la pista tenia que ser desarmable lo que se hizo fue cortar esta en partes de 2m y luego se las unía. Para unir las se utilizó pequeños trozos de platina y con pernos se las colocaba a un lado de cada sección de pista. El total de hierro cuadrado utilizado para la pista es de 23m. En la *figura 3.1* se muestran las medidas exactas de la pista así como las fotos de la pista terminada.

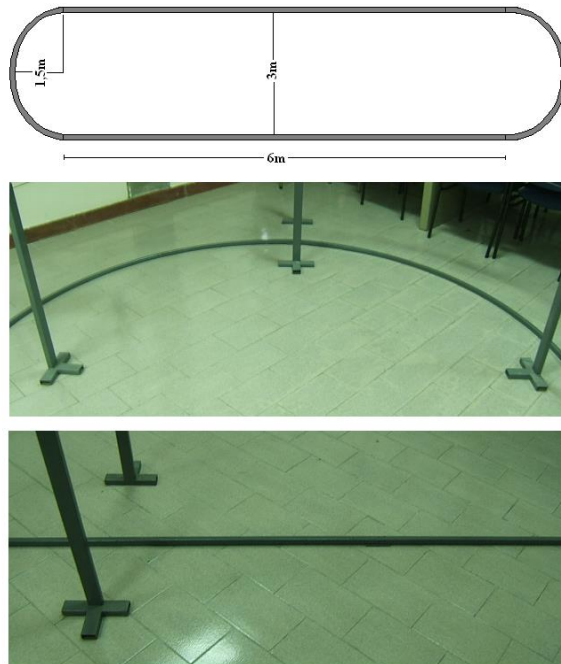


Fig. 3. 1
Dimensiones de la Pista y su Forma, Sección de la Recta y Sección de la Curva

3.1.2 CONSTRUCCIÓN DE LAS CATENARIAS Y DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Las catenarias es el soporte de las líneas por donde pasa la tensión que alimentan al bus. Para el diseño de las catenarias se consideró que estas no iban a ir clavadas o enterradas en el suelo, se tomó en cuenta el peso y las dimensiones de las líneas. Para la construcción de las catenarias se utilizó tubo rectangular de hierro de 1x2 pulgadas y 2 mm de espesor y se

construyó con un pedazo de tubo de 87cm de largo a cada lado para la parte de ida y otro para la parte de retorno, y en la parte superior de los postes un pedazo de tubo perpendicular, luego, en la mitad se colocó dos pequeñas varillas separadas por un aislante la cual sostiene las líneas, *figura 3.2*. En total se usaron 26m de tubo rectangular.

Para la parte de las líneas se utilizaron varillas de bronce de 3/16 de pulgadas, *figura 3.3*. Se compró 54 varillas de 90cm cada una, la colocación y dimensiones de las líneas tenían que ser iguales a la de la pista, en total la longitud de las líneas de tensión que se utilizó fue de 46m. aproximadamente. La línea por donde pasa el voltaje positivo tiene 3cm más de diámetro en el semicírculo que el de la pista, mientras que en la línea de voltaje negativo tiene 3cm menos, para unir las varillas de bronce lo que se hizo fue unir a todas las varillas en un extremo de estas, y en la parte de la curva se soldaron las uniones para que estas no se despeguen, la soldadura se la hizo con soldadura de plata al 15%.

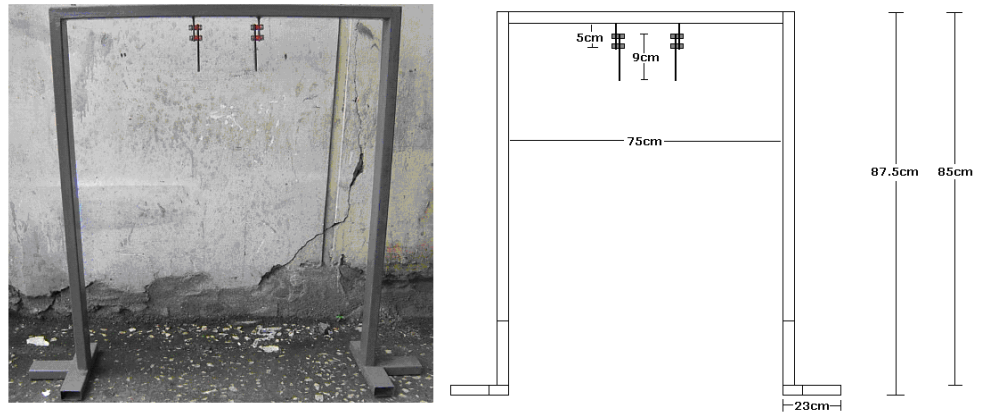


Fig. 3. 2
Arcos que Sostienen las Líneas de Tensión

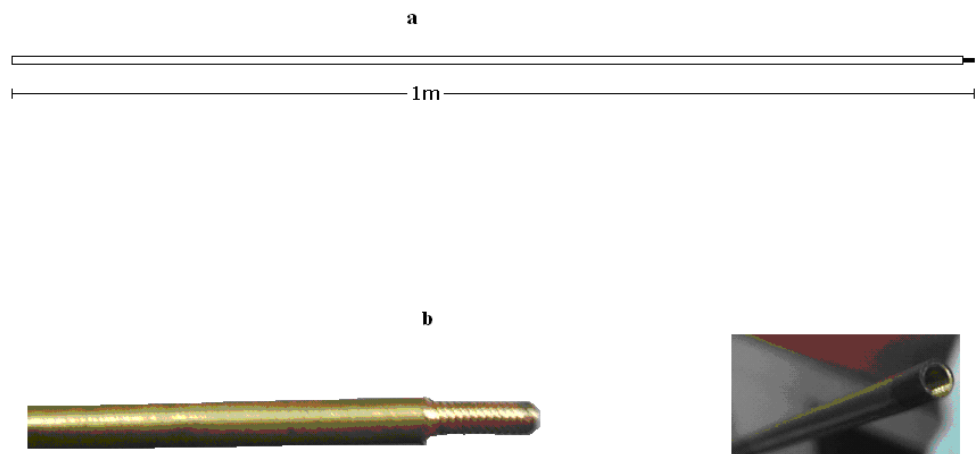


Fig. 3. 3
a. Varilla de Bronce
b. Uniones Macho y Hembra

3.1.3 CONSTRUCCIÓN DEL BUS (MODELO A ESCALA)

El bus está en una escala de 1:10 m con respecto al bus real, el chasis del bus esta hecho de metal y la carrocería de lata, en la parte baja del bus se colocaron dos guías, una en la parte de adelante y otra en la parte de atrás. Estas guías sirven para que el carro vaya por la pista y no se descarrile, están hechas de nylon.

Atrás del bus está colocado el motor y encima del motor está hecha una base donde va el PLC y las dos baterías, cada una de 12V. En el techo del bus esta colocado el pantógrafo el cual es el colector que recoge la tensión de las líneas para hacer funcionar el motor. A continuación se describe con más detalle el diseño del bus.

3.1.3.1 CARROCERÍA DEL BUS

La carrocería del bus esta hecha de lata liviana y se la pinto de blanco, aquí se muestra la carrocería del bus ya terminado con sus respectivas medidas.

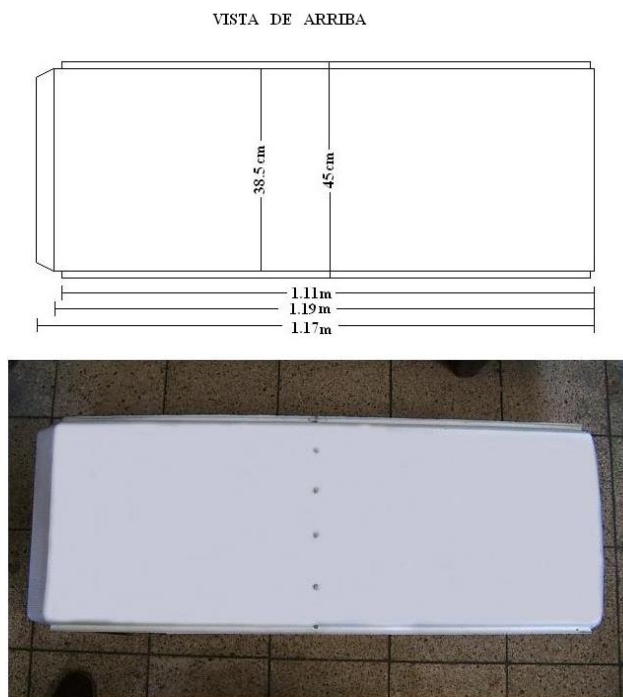


Fig. 3. 4
Vista Superior de la Carrocería del Bus

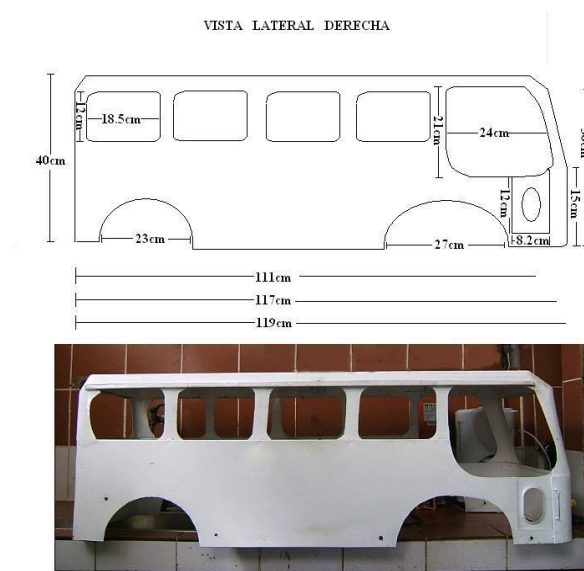


Fig. 3. 5
Vista Lateral Derecha de la Carrocería del Bus

VISTA LATERAL IZQUIERDA

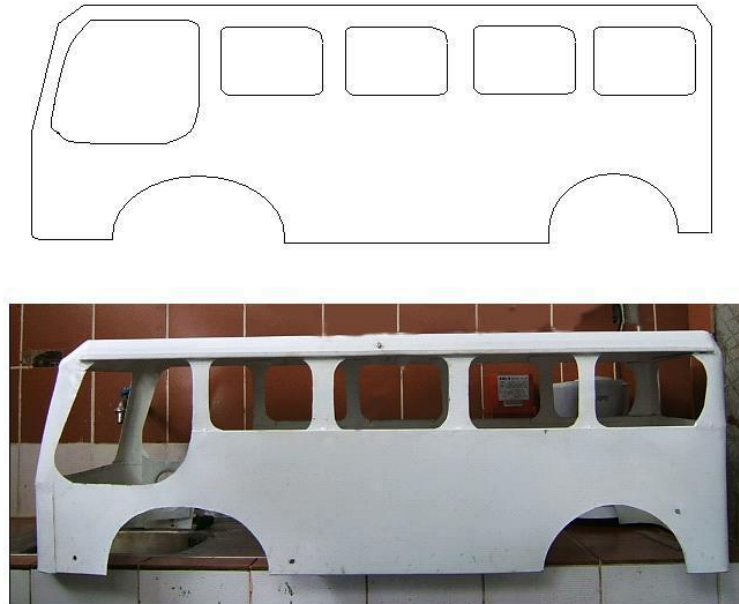


Fig. 3. 6
Vista Lateral Izquierda de la Carrocería del Bus

VISTA FRONTAL



VISTA DE ATRAS

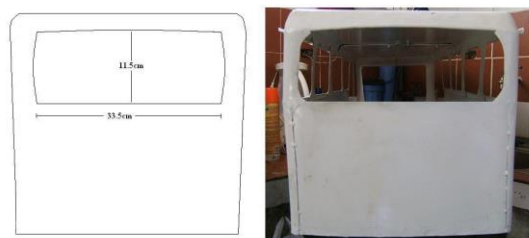


Fig. 3. 7
Vista Frontal y Trasera de la Carrocería del Bus

3.1.3.2 CHASIS DEL BUS

El chasis del bus esta hecho de metal, este se lo compro ya hecho debido al alto costo de mandarlo a hacer. Aquí se muestran los gráficos del chasis del bus.

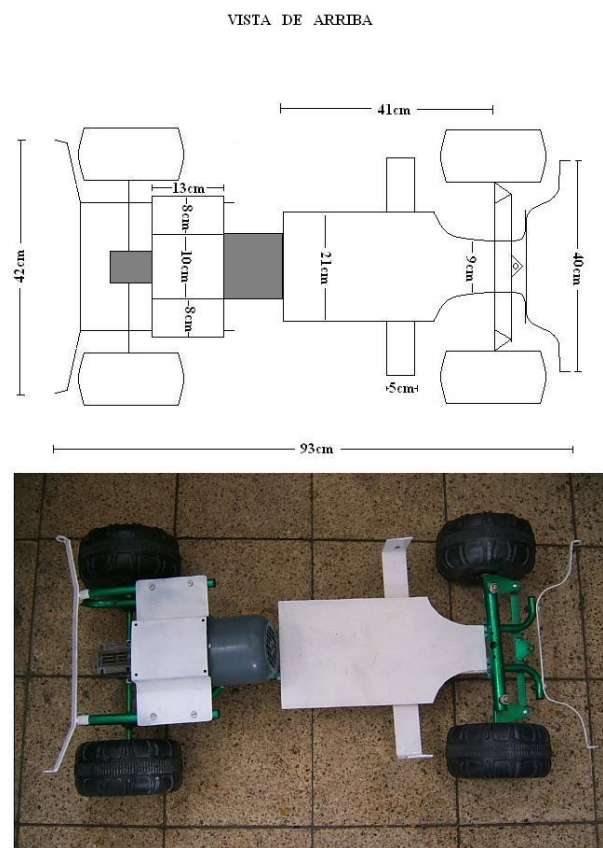


Fig. 3. 8
Vista Aérea del chasis del bus

VISTA LATERAL DERECHA

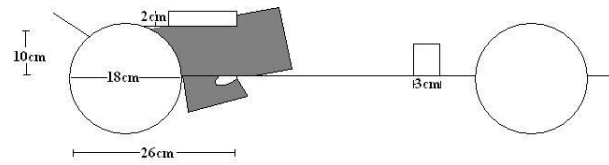


Fig. 3. 9
Vista Lateral Derecha del Chasis del Bus

VISTA LATERAL IZQUIERDA



Fig. 3. 10
Vista Lateral Izquierda del Chasis del Bus

Para que el bus se pueda movilizar por la pista sin que se descarrile se colocó dos guías, una en la parte delantera para que gire junto con las ruedas y la otra en la parte trasera. Estas guías están hechas con nylon y son de forma cilíndrica para que vayan girando al mismo tiempo que el bus se vaya deslizando por la pista. En la siguiente foto se pueden observar las guías y donde están colocadas en el bus, (ver anexo D).

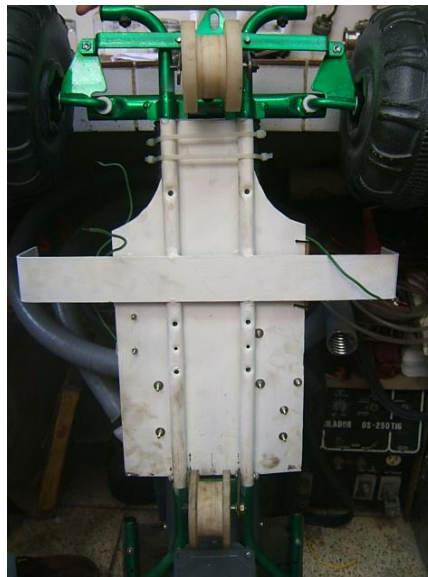


Fig. 3. 11
Vista de las Guías del Bus

3.1.4 SISTEMA ELÉCTRICO DEL BUS

La parte mas importante de la construcción del modelo a escala es el sistema eléctrico, entonces se ha dividido esta parte de la siguiente manera:

- Selección del motor para el modelo a escala y sus especificaciones.
- Diseño y construcción del pantógrafo a escala.
- Selección y especificaciones del inversor para el modelo a escala.
- Selección del PLC para el modelo a escala con sus especificaciones y programación.
- Baterías, circuito control de velocidad para el pantógrafo.
- Diagramas y esquemáticos.

3.1.4.1 ESPECIFICACIONES DEL MOTOR

Para la construcción del modelo a escala se utilizo un motor trifásico jaula de ardilla con un reductor, las especificaciones del motor son las siguientes:

- 0.25Kw
- 0.30HP
- $f = 50,60 \text{ Hz}$
- $I = 1.4$
- $\cos \theta = 0.66$
- 1600 rpm – 1380rpm,
- 220 V – 240 V

La relación de vueltas del reductor es de 7.5 . A continuación se muestran las fotos del motor utilizado con el reductor.



Fig. 3. 12
Vista del Motor y su Reductor



Fig. 3. 13
Vista Frontal del Motor (Derecha) y Vista de la Caja de
Conexiones del Motor (izquierda)

3.1.4.2 CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DEL PANTÓGRAFO

En la construcción del pantógrafo en el modelo a escala utilizamos un diseño que difiere con el modelo real, esto debido a que era más complicado y costoso. El sistema para subir y bajar el pantógrafo se lo realiza por medio de un motor DC, este motor trabaja con 12V y 2.2A.

Adicional se hizo un circuito variador de velocidad para el motor DC, esto se lo hizo para poder regular la velocidad del pantógrafo

cuando sube y cuando baja, el esquema de este circuito se lo muestra mas adelante. El motor va agarrado a una barra de nylon, que esta a su vez esta sujeta al techo del chasis del bus por medio de unos pernos con unos resortes, estos resortes sirven para darle flexibilidad al pantógrafo al momento de estar en contacto con las líneas. El eje del motor esta sujeto en un pequeño cilindro de acero. En este cilindro se soldaron dos varillas de acero inoxidable en paralelo separadas aproximadamente 4cm. Las varillas están unidas entre si en la parte superior de estas por medio de una pequeña barra de nylon, esto se lo hizo para aislar las varillas una de otra y que no se produzca algún contacto entre ellas al momento de transferir la energía al bus, a cada lado de la barra de nylon se colocaron los colectores, o sea por donde va a pasar la corriente hacia el sistema de control del bus, estos colectores se los hizo con bronce y en forma de un cilindro, pero en la mitad se le hizo una abertura para que la línea de tensión pase por allí, en el diseño de los colectores del modelo a escala al igual que el real se los hizo para que sean rotativos, esto quiere decir que a medida que los colectores van tocando las líneas de

tensión estos van a ir rotando en su propio eje, esto ayuda a reducir la fricción de contacto entre la línea y el colector. A continuación se muestran fotos y diagramas del pantógrafo.

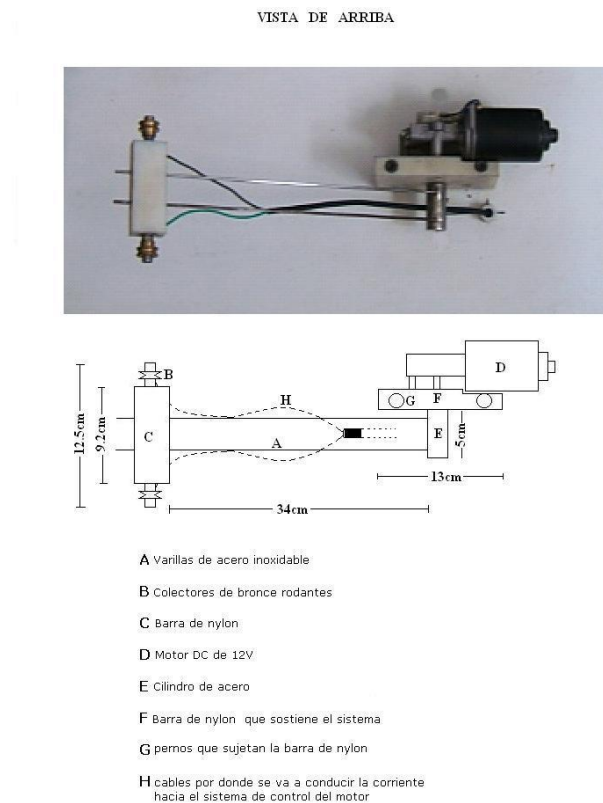


Fig. 3. 14
Vista Superior del Pantógrafo con sus Respetivos Elementos

VISTA LATERAL IZQUIERDA

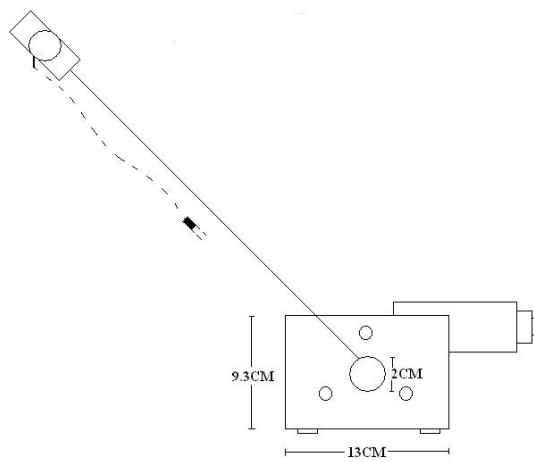
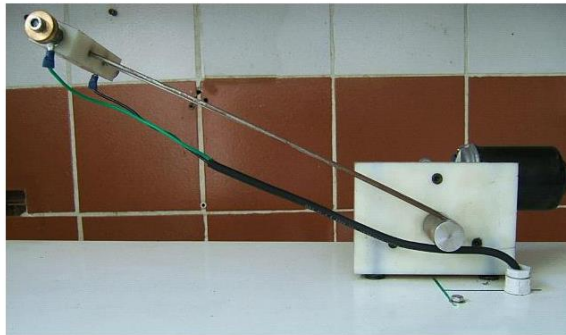


Fig. 3. 15
Vista Lateral Izquierda del Pantógrafo

VISTA LATERAL DERECHA



Fig. 3. 16
Vista Lateral Derecha del Pantógrafo

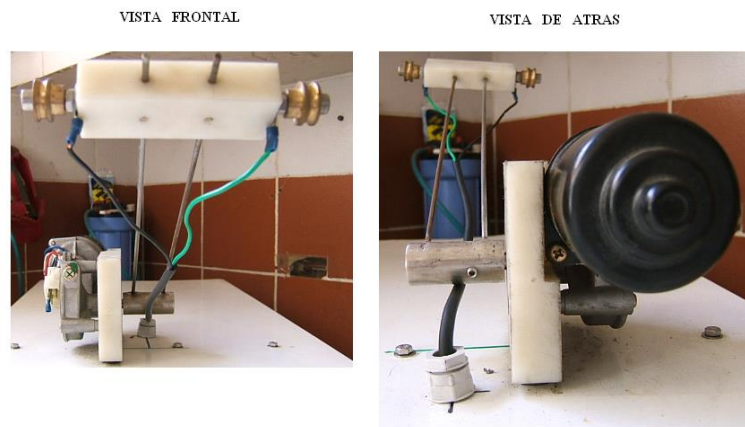


Fig. 3. 17
Vista Frontal y Posterior del Pantógrafo

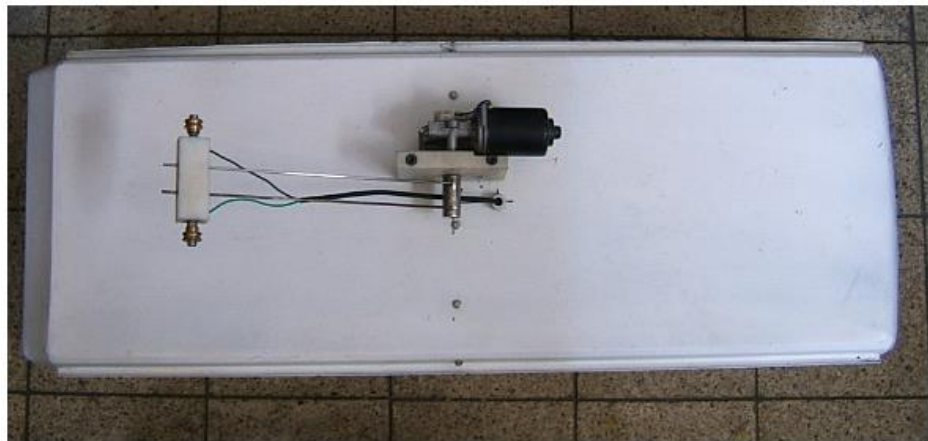


Fig. 3. 18
Posición del Pantógrafo en el Bus (Techo)

3.1.4.3 ESPECIFICACIONES DEL INVERSOR (INVERTER)

El inversor que se utilizo para el sistema de control del motor para el bus es un inversor transistorizado hecho por la empresa japonesa MITSUBISHI ELECTRIC y el modelo es el FREQROL-A200 versión FR-A 220-0.4K(P). a continuación se menciona las principales características del inversor y sus diagramas de conexiones.

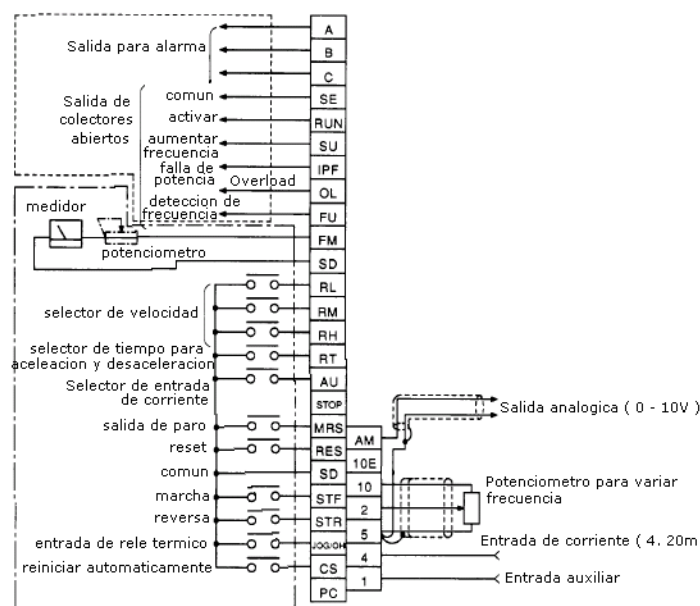


Fig. 3. 19
Grafico del Circuito de Control del Inversor

La *figura 3.20* muestra el esquema con transistores del modulo de salida del inversor.

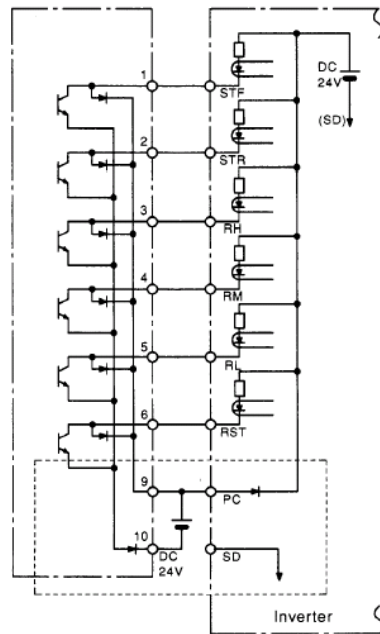


Fig. 3. 20
Gráfico del Esquema de los Transistores del Inversor

El siguiente esquema es el diagrama de bloques del inversor

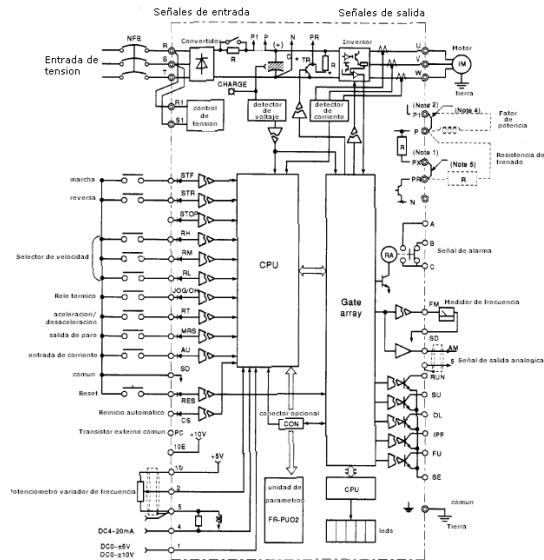


Fig. 3. 21
Diagrama de Bloques del Inversor

Al inversor se lo puede alimentar con voltaje trifásico o monofásico, y la salida es trifásica, en el siguiente gráfico se muestra los terminales donde va conectada las entradas ya sea trifásica o monofásica y la salida al motor.

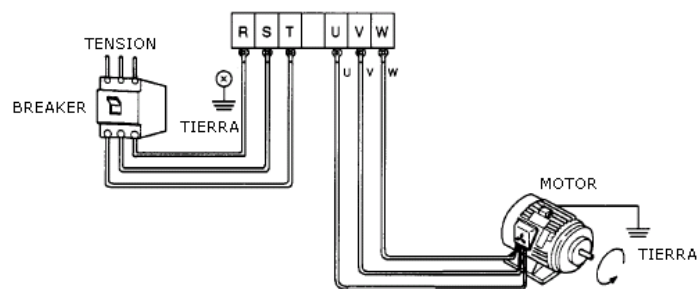


Fig. 3. 22
Diagrama de las Conexiones de Salida y Entradas al Inversor

TABLA XI: Características del Inversor Mitsubishi Electric Freqrol-A200

HP	1
KVA	1.1
Corriente continua	3.6
Voltaje	tres fases, 200V a 220V 50Hz , 200V a 230V 60Hz
Fluctuaciones de Voltaje permitidas	170V a 242V 50Hz, 170V a 253V 60Hz
Peso aproximado	2.1Kg
Sistema de control	Variación de frecuencia por medio de control PWM
Rango de salida de frecuencia	0.2 - 400Hz
Resolución de frecuencia	0.015Hz/60Hz entrada analógica 0.01Hz/60Hz entrada digital
Temperatura ambiente	-10 a +50°C
Humedad	90%

3.1.4.3.1 ENTRADAS/SALIDAS DEL INVERSOR

Las entradas utilizadas del inversor para el control de velocidad del motor son las siguientes :

STF: Entrada digital enviada por el PLC para que el bus arranque.

STR: Entrada digital enviada por el PLC para que el bus arranque en reversa.

RL: Entrada digital enviada por el PLC para que el bus ande a velocidad mínima

RM: Entrada digital enviada por el PLC para que el bus ande a velocidad media

RH: Entrada digital enviada por el PLC para que el bus ande a velocidad máxima

SD: Es el común para todas las entradas

R, S: Es la entrada monofásica de 480V AC

U, V, W: Es la salida trifásica de 480V AC para el motor

A continuación se muestra la foto del inversor usado para el control del bus eléctrico a escala.

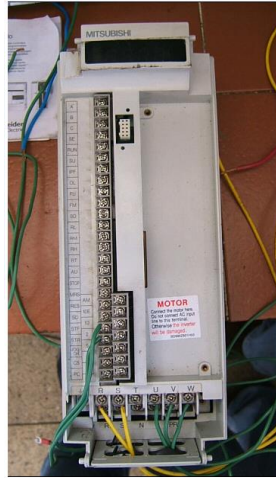


Fig. 3. 23
Inversor Mitsubishi Electric Freqrol-A200

3.1.4.3.2 SELECCIÓN DE VALORES DE FRECUENCIA DEL INVERSOR

Para seleccionar los valores de frecuencia primero se decidió a que velocidad se quería que vaya el bus como la pista tiene 7 metros de largo en la parte recta antes de entrar a la curva lo que se hizo fue hacer que el bus varíe su velocidad y al llegar a la curva disminuya, los valores de velocidad que se escogió fueron :

- velocidad 1: 0.5 m/seg,
- velocidad 2: 1 m/seg,
- velocidad 3: 1.5 m/seg,
- velocidad 4: 2 m/seg.

Ahora para sacar los valores de frecuencia primero se saca el perímetro de la rueda del bus teniendo como dato que el radio de la rueda es de 9cm, entonces como el perímetro es:

$$2\pi r = 2 \cdot 3.1416 \cdot 9\text{cm} = 56.54 \text{ cm},$$

Entonces para sacar las revoluciones por minutos, la cual es igual a:

$$120f / P,$$

Se despeja f que es la frecuencia, P es el numero de polos del motor, y esto se lo divide para 7.5, que es la relación de vueltas del reductor que tiene el motor, como

$$1 \text{ rev} = 56.54,$$

Entonces

$$(120 \cdot f \cdot 56.54) / 7.5 \cdot 4 \text{ cm} / \text{min},$$

como lo que se quiere es en m / seg esta ecuación se la multiplica por 1 / 6000 y se despeja f , entonces

$$f = x / 0.03769 \text{ Hz},$$

entonces queda:

$$f_1 = 12\text{Hz}$$

f2 – 25Hz

f3 – 40Hz

f4 – 53Hz.

3.1.4.4 ESPECIFICACIONES DEL PLC

El PLC usado para el control del motor del modelo a escala pertenece a la compañía SCHNEIDER ELECTRIC modelo **TWIDO SERIE TWDLMDA20DRT**, este PLC cuenta con 12 entradas y 8 salidas, la alimentación es de 24V DC.

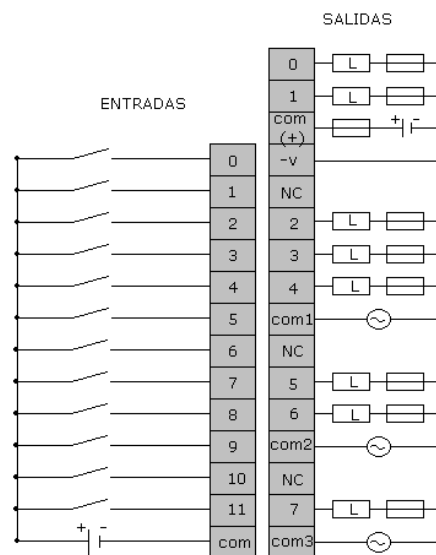


Fig. 3. 24
Diagrama de Entradas y Salidas al PLC

En el esquema de arriba se ve las entradas y salidas físicas del PLC, Para el modelo a escala se usaron 6 entradas y todas las 8 salidas, a continuación se muestra las señales de entrada y salida al PLC.

ENTRADAS

- | | |
|----------|---|
| 0 | Entrada digital por medio de una botonera para dar la señal de marcha |
| 1 | Entrada digital por medio de una botonera para dar la señal de paro |
| 6 | Entrada digital por medio de una botonera para dar la señal de subir pantografo |
| 7 | Entrada digital por medio de una botonera para dar la señal de bajar pantografo |

SALIDAS

- | | |
|----------|--|
| 0 | Salida digital que activa los dos reles para que el motor del pantografo gire a la derecha |
| 1 | Salida digital que activa los dos reles para que el motor del pantografo gire a la izquierda |
| 2 | Salida digital que manda la señal de marcha al inverter |
| 3 | Salida digital que manda la señal de reversa al inverter |
| 4 | Salida digital que manda la señal de velocidad minima al inverter |
| 5 | Salida digital que manda la señal de velocidad media al inverter |
| 6 | Salida digital que manda la señal de velocidad maxima al inverter |
| 7 | Señal digital que manda a activar el freno del motor |

A continuación se muestra una foto del PLC usado en el modelo a escala

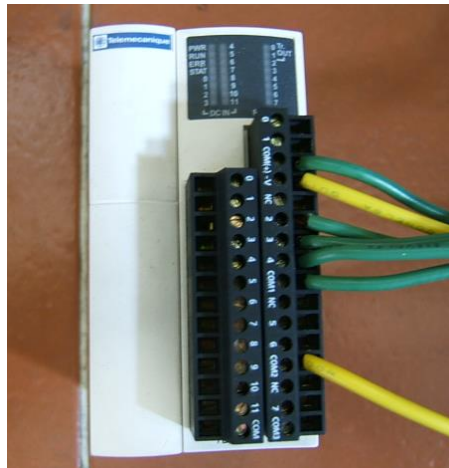


Fig. 3. 25
Foto del PLC Usado en el Bus

Debido a que el bus esta en movimiento se decidió que inicialmente el pantógrafo suba y baje por medio de una botonera, al momento de activar la señal de marcha el PLC se encargara de todo, de variar la velocidad, de frenar y hacer que el bus vaya en reversa. El programa del PLC se lo muestra en el anexo C.

3.1.4.5 ELEMENTOS ADICIONALES

Los tres elementos más importantes para el control eléctrico y electrónico del bus a escala son el pantógrafo, motor, inversor y el PLC, pero aparte de estos elementos se tuvo que diseñar circuitos complementarios para ayuda del control. Estos son, un circuito variador de velocidad, un banco de relés y dos baterías de 12V cada una. A continuación se explica con detalle cada uno de estos elementos.

3.1.4.5.1 VARIADOR DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR DC

Este variador de velocidad se lo usa para el control del pantógrafo, se lo diseñó debido a que originalmente la velocidad del motor para subir y bajar el pantógrafo era muy rápida, es un circuito sencillo que consta de un 555 y un mosfet para el control. Se muestra el esquema y una foto del circuito ya hecho.

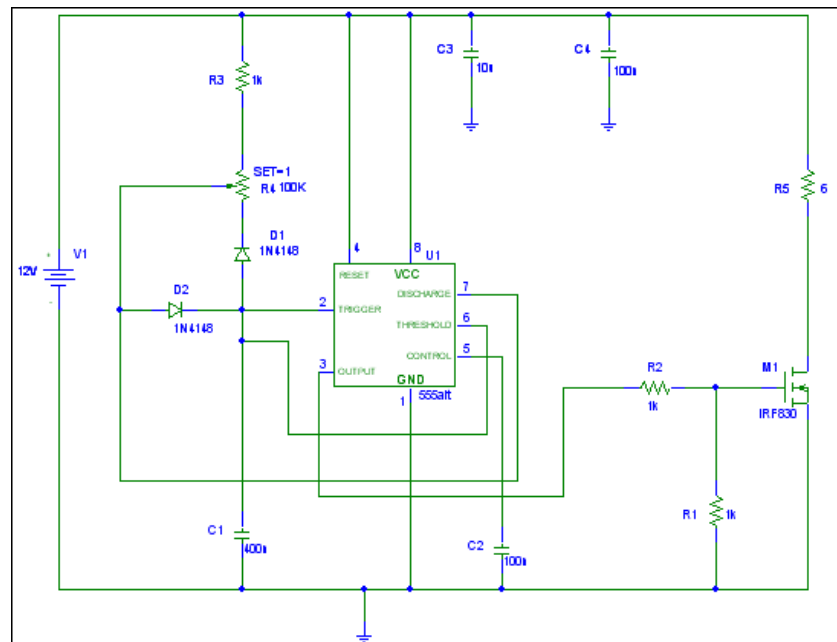


Fig. 3. 26
Esquema del Circuito Variador de Velocidad para el
Pantógrafo

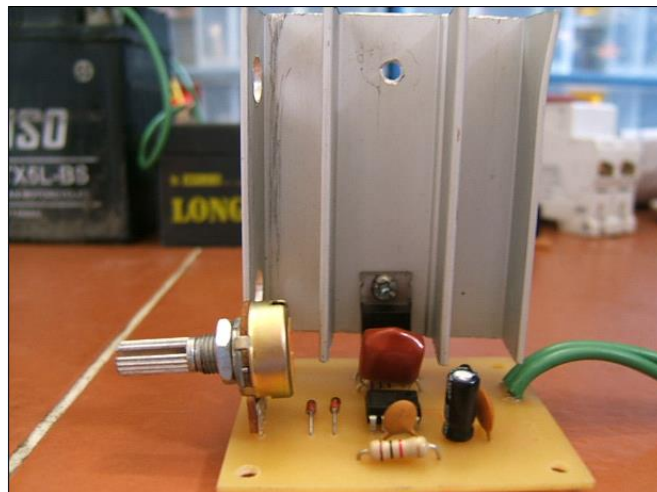


Fig. 3. 27
Foto del Variador de Velocidad Terminado

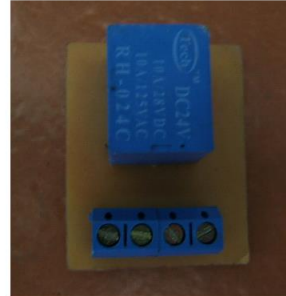
3.1.4.5.2 BANCO DE RELÉS

El banco de relés tiene dos funciones, se usan cuatro relés para controlar el motor del pantógrafo, dos de estos se activan para subir el pantógrafo y los otros dos para bajarlo, el quinto y ultimo relé se lo usa para activar el freno del motor, cuando se le manda señal al relé este manda a activar el freno parando completamente al bus. Se muestran el esquema y fotos de los circuitos hechos.

RELES PARA CONTROL DEL MOTOR DEL PANTO



RELE PARA EL FRENADO DEL MOTOR



ESQUEMA BASICO DEL CONTROL DEL MOTOR DEL PANTO

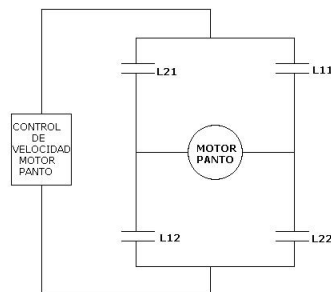


Fig. 3. 28

Esquema y Fotos del Banco de Relés para el Control del Pantógrafo

3.1.4.5.3 BATERÍAS

Un problema que se tenía originalmente era que al principio el bus no iba a tener energía y por lo tanto no se podía subir el pantógrafo para la alimentación, por esta razón se puso la batería y lograr que el pantógrafo suba y baje sin depender del voltaje de las líneas, el motor del pantógrafo usa 12V y por lo tanto una sola batería pero se uso dos baterías debido a que

con estas se alimenta al PLC, se colocaron dos baterías de 12V cada una en serie para la alimentación al PLC la cual necesita 24V. A continuación se muestra una foto de las dos baterías usadas.



Fig. 3. 29
Baterías Usadas en el Bus

3.1.5 DIAGRAMAS Y ESQUEMAS PARA EL CONTROL DEL MOTOR AC

3.1.5.1 DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE REGULACIÓN

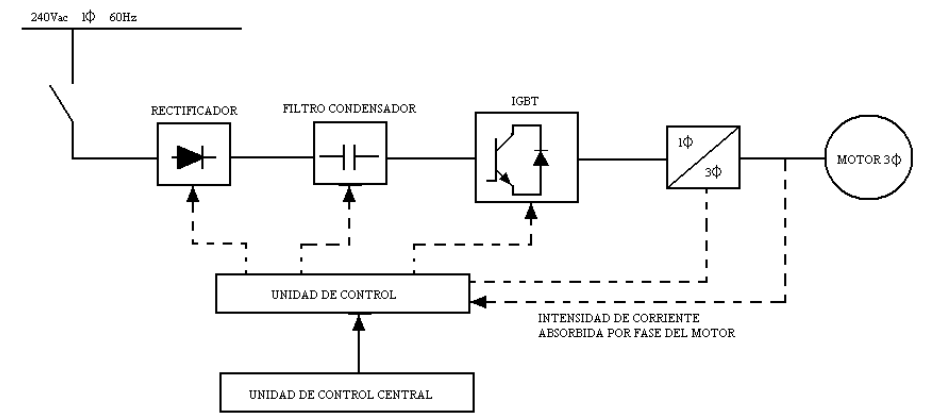


Fig. 3. 30
Diagrama de Conexión de Regulación

3.1.5.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL REGULADOR MARCHA

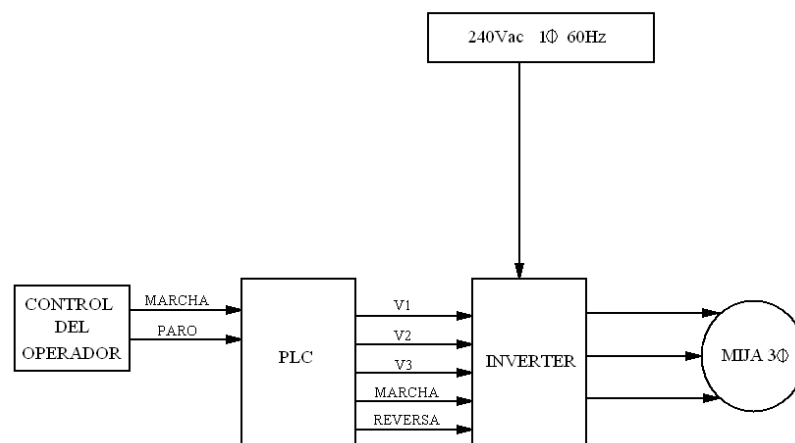


Fig. 3. 31
Diagrama de Bloques del Regulador Marcha

3.1.6 DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL SISTEMA DE CONTROL

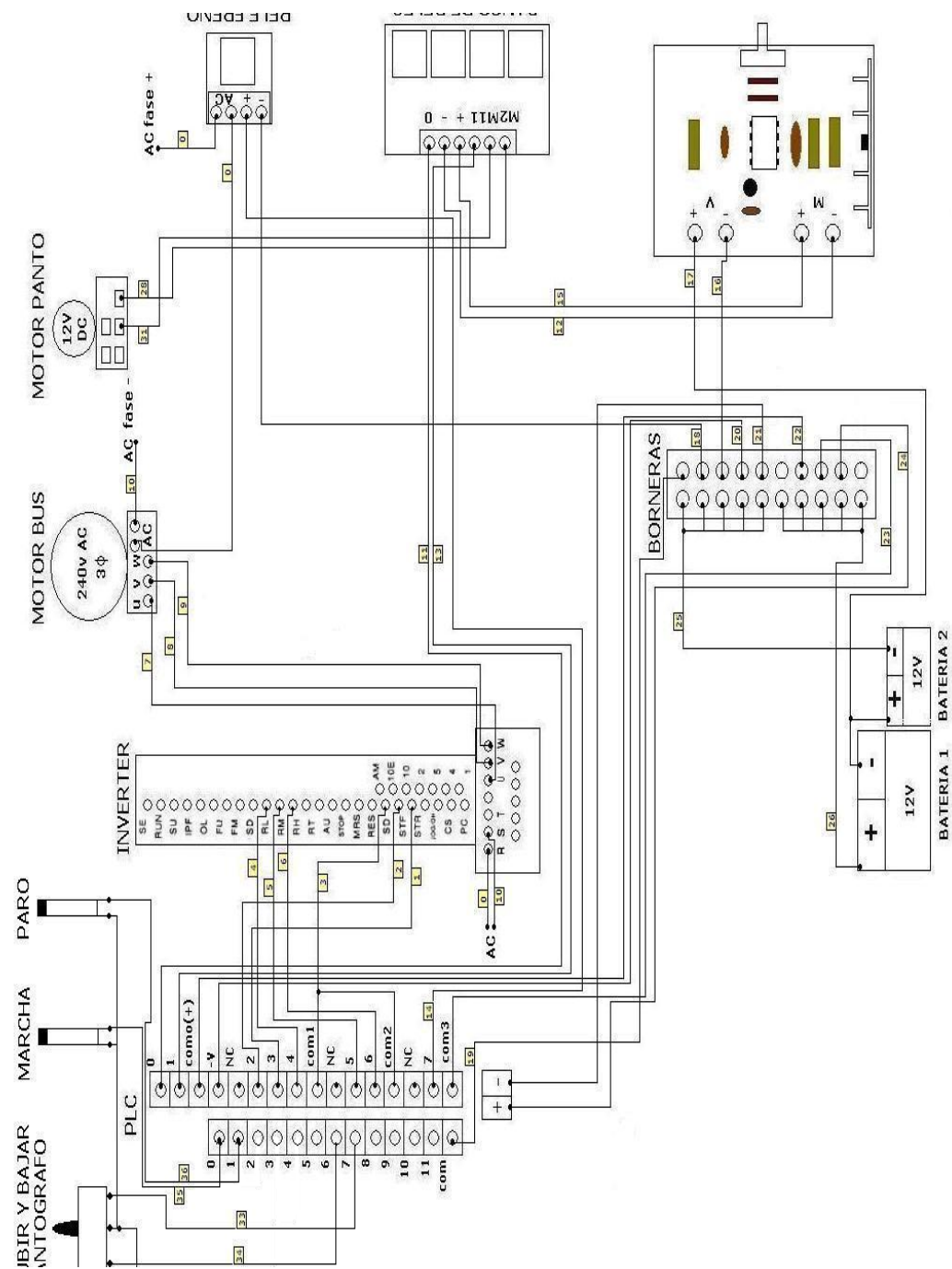


Fig. 3. 32
Diagrama Conexiones del Sistema de Control

3.1.7 PRUEBA REALIZADA

Esta prueba consistió en medir la cantidad de corriente que paso por las líneas de tensión que alimentan al bus y también la corriente que circula en el motor, estos valores se los midió en el arranque y variando la velocidad del bus, tomando en consideración que el peso del bus es de 45Kg, en la *Tabla 3.2* se muestran estos resultados.

TABLA XII: Resultados

	LINEA (A)	MOTOR (A)
ARRANQUE	0.33	3.50
MARCHA	0.25	2.12
VELOCIDAD 1	0.35	2.12
VELOCIDAD 2	0.44	2.12
VELOCIDAD 3	0.52	2.12

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Diversas conclusiones se obtienen de esta tesis, sobre todo porque se realizó una implementación práctica (modelo a escala), la cual permitió observar las diferentes ventajas y desventajas del proyecto y mediante las cuales se basó para desarrollar el modelo real.

El PLC en este caso controla y evalúa los diferentes tiempos y valores que cada botonera o sensor envía como dato a este, y así poder alertar al conductor de algún fallo o mando que este envía. Este sintetizó en gran parte el cableado por medio de contactores y relés controlados de forma programada, esto hace que el mantenimiento sea más cómodo y le resta dificultad en el momento de quitar o agregar alguna función en el control. Minimiza el espacio de ocupación, sin embargo el manejo del autómata tiene que hacerlo una persona capacitada para ello.

Un inconveniente que presenta esta tesis es que el PLC no controla directamente la velocidad del motor eléctrico alterno. Para ello se recurre

a un inversor, el cual es controlado por el PLC, quien es el que manda la orden para los diferentes cambios de velocidad que el bus tomaría.

Otro inconveniente es la selección del inversor. Para este caso particular, el inversor que se necesita no es muy frecuente encontrarlo en el mercado ecuatoriano, habría que recurrir al mercado internacional. Estos son diseñados para esta clase de manejos especiales. Este proyecto necesitaría un inversor con las siguientes características: Marcha, Reversa y 6 velocidades, con un manejo de potencia de 150 hp y una entrada ya sea monofásica o DC.

Para este proyecto se decidió implementar líneas monofásicas como fuente de energía principal. El alto valor del voltaje AC ($13/\sqrt{3}$ KV) escogido nos permite tener un rango de corriente manejable entre las líneas de alto voltaje y el pantógrafo (colectores), es decir evita que el grosor del cable sea exagerado y a su vez nos permite manejar potencias altas. Sin embargo el uso de voltaje AC no es tan necesario ya que el bus es implementado sólo dentro del perímetro de la ESPOL (Campus Prosperina) y la caída de voltaje se la puede despreciar, entonces un voltaje DC sería lo más recomendable, pero para poder implementarlo se

tendría que adicionar una subestación para disminuir el voltaje y luego rectificarlo, sistema que utilizamos dentro de del bus (para una alimentación de voltaje AC).

En el modelo a escala el PLC controla toda la parte electrónica del carro, pero quien controla la velocidad del motor es el inversor. Para el modelo a escala, se lo pudo haber diseñado sólo con el inversor ya que el inversor es el que arranca, frena, invierte el sentido del motor y cambia la velocidad, todo esto con diferentes botoneras, sin embargo este no controlaría lo que es el pantógrafo, y entonces se hubiese tenido que agregar algunas botoneras más y relés para el circuito de control, esto significa más inversión; si se lo aplica al modelo a escala, no representaría un gran problema, sin embargo ya en el modelo real se complica, ya que la parte del pantógrafo tiene muchas opciones y el costo subiría considerablemente. Es por esto que el uso de un PLC pequeño simplifica mucho este problema. Los datos obtenidos del modelo a escala (corriente de una fase de la alimentación, y corriente de una fase en el motor) se ajusta a lo que en teoría se ha explicado, es decir el inversor

mantiene su constante v/f , esto justifica el uso de un inversor en el modelo real.

Esta tesis es el comienzo para el desarrollo de vehículos eléctricos en nuestro país. Se recomienda un estudio económico para la implementación del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

- (1) ASHFAQ AHMED, Power Electronics for Technology, Prentice Hall, Upper Saddle River-New Jersey, Columbus-Ohio 1999, Chapter 10.
- (2) DANIEL W. HART, Introduction To Power Electronics, Prentice Hall, United States of America 1997, Chapter # 8.
- (3) GUY SÉGUIER, Electrónica de Potencia, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona 1976, pg 245-248, 272-287.
- (4) MICHAEL LIWSCHITZ-GARIK, Dr-Ing, CLYDE C. WHIPPLE, E.E., Máquinas de Corriente Alterna, Compañía Editorial Continental, S.A. México-España-Argentina-Chile 1970, Capítulo 17-19.
- (5) PROF. HANS TEUCHERT, La Escuela del Técnico Electricista Tomo XI: Fuerza Motriz y Tracción Eléctrica, Editorial Labor S.A., España 1961, pg. 280-305, 321-341.
- (6) FRIEDRICH KIEßLING, RAINER PUSCHMANN, AXEL SCHMIEDER, Contact Lines for Electric Railways, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich, Publicis Corporate Publishing, Munich Erlangen 2001.
- (7) UOST (UNIDAD OPERADORA DEL SISTEMA TROLEBUS), Manual de Usuario: Sistema de Transporte Mediante Trolebuses – Quito, 1995.
- (8) A. STEIMEL, Electric Railway Traction In Europe, IEEE Industry Applications Magazine-November/ December 1996, pg. 6-17.

- (9) BERMUDEZ H. WELLINGTON, Construcción de un Modelo Experimental a Escala de un Vehículo de Transporte Impulsado por un Motor Lineal de Inducción, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Eléctrica, ESPOL 1986.
- (10) J. ROLDAN VILORIA, Motores Eléctricos: Variación de Velocidad, Editorial Paraninfo S.A., España 1993, pg. 155-174.
- (11) RAYMOND RAMSHAW, Electrónica de Potencia: Potencia Controlada por Tiristor para Motores Eléctricos, España, MARCOMBO S.A. 1977, Capítulo 3.
- (12) JOHN D. CONSTANCE, Electrical Engineering for Professional Engineers' Examinations, McGraw-Hill Book Company, United States of America, Third Edition 1975, pg. 186-189, 213-220.
- (13) <http://www.kiepe-elektrik.com/english/frameset-bahn.htm>
- (14) <http://www.convertidorestrifasicos.com/EstaticosAplicaciones.htm>

ANEXOS

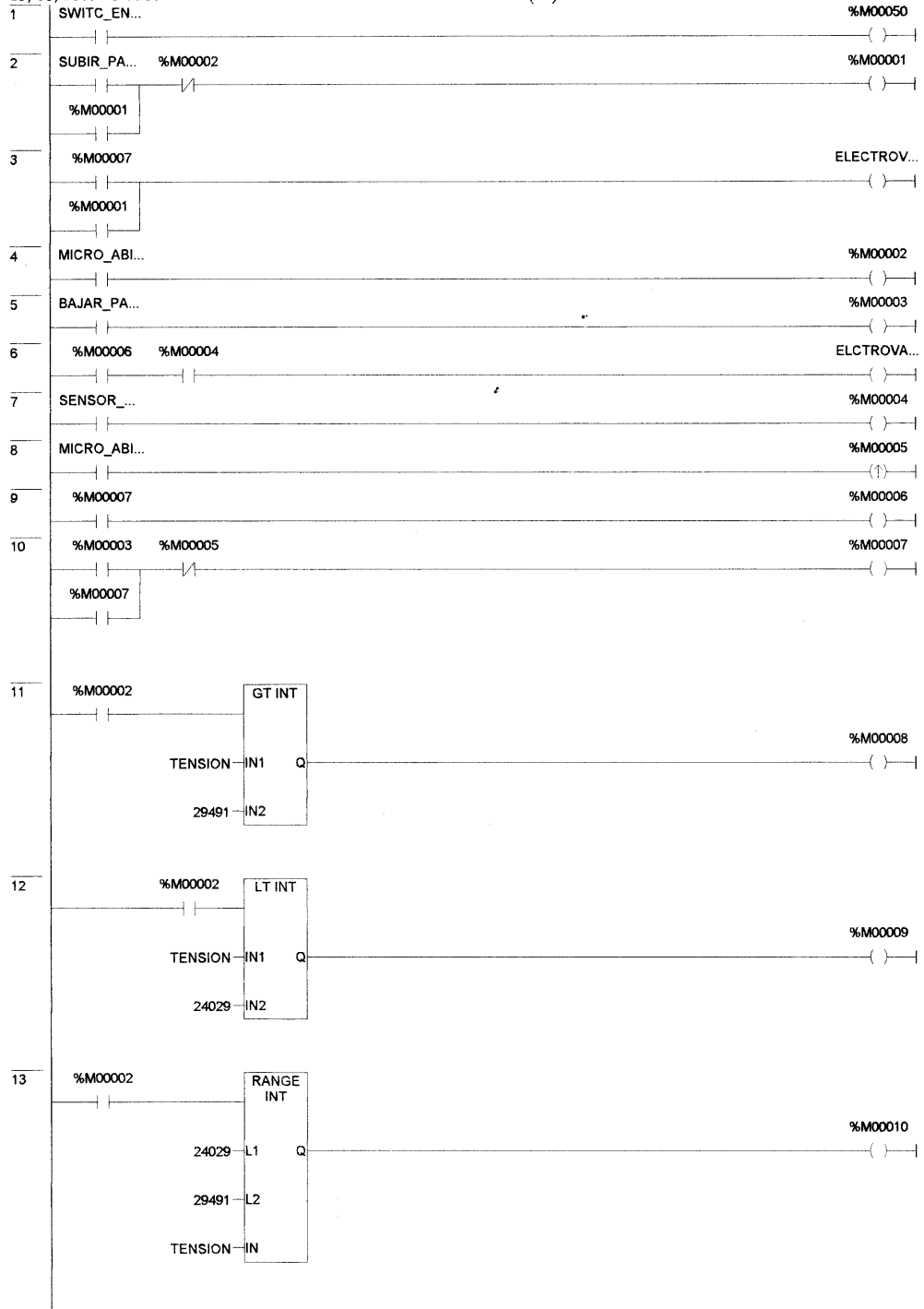
ANEXO A

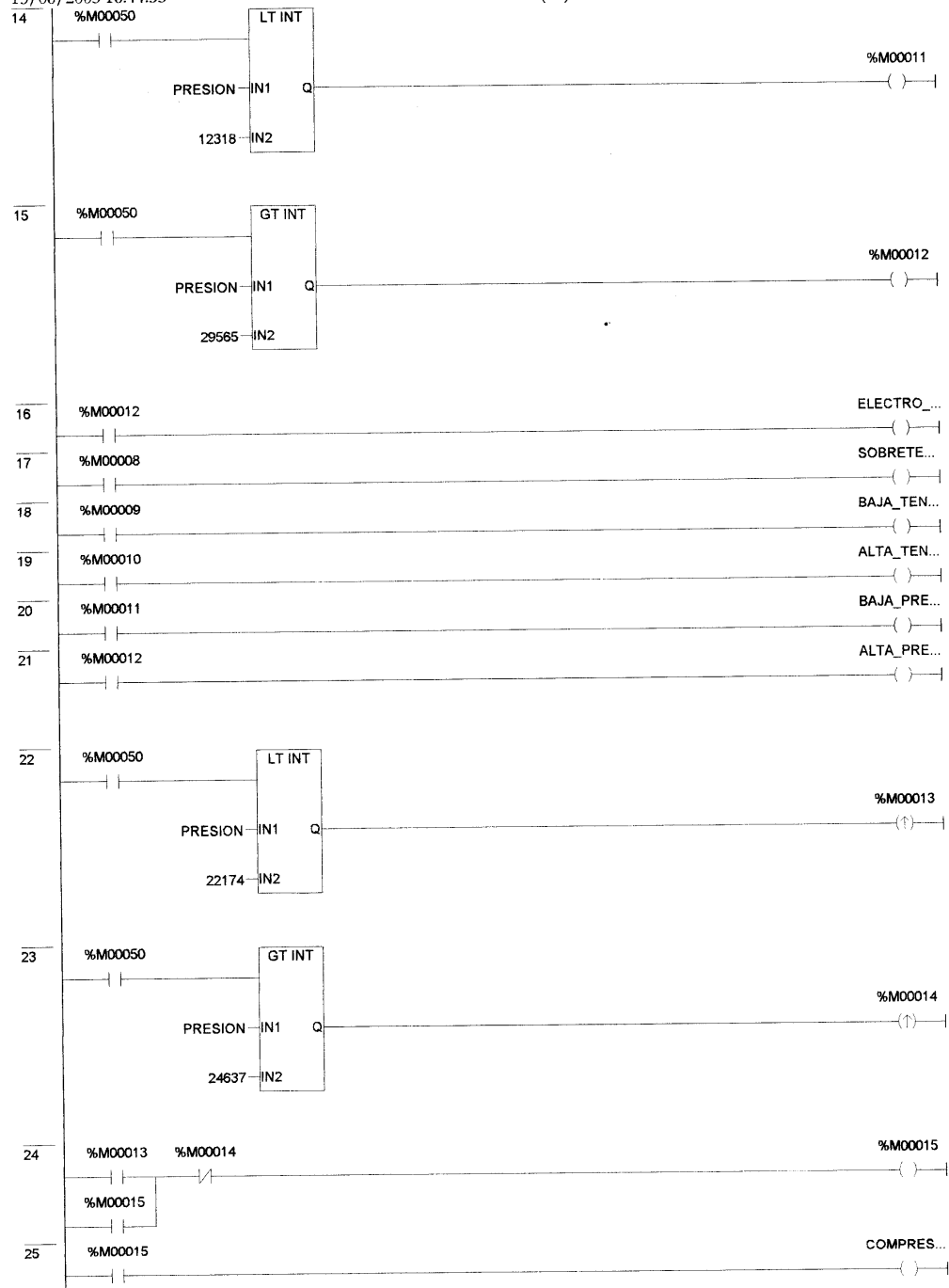
Escuela Superior Politécnica Del Litoral: Control De Activos Fijos

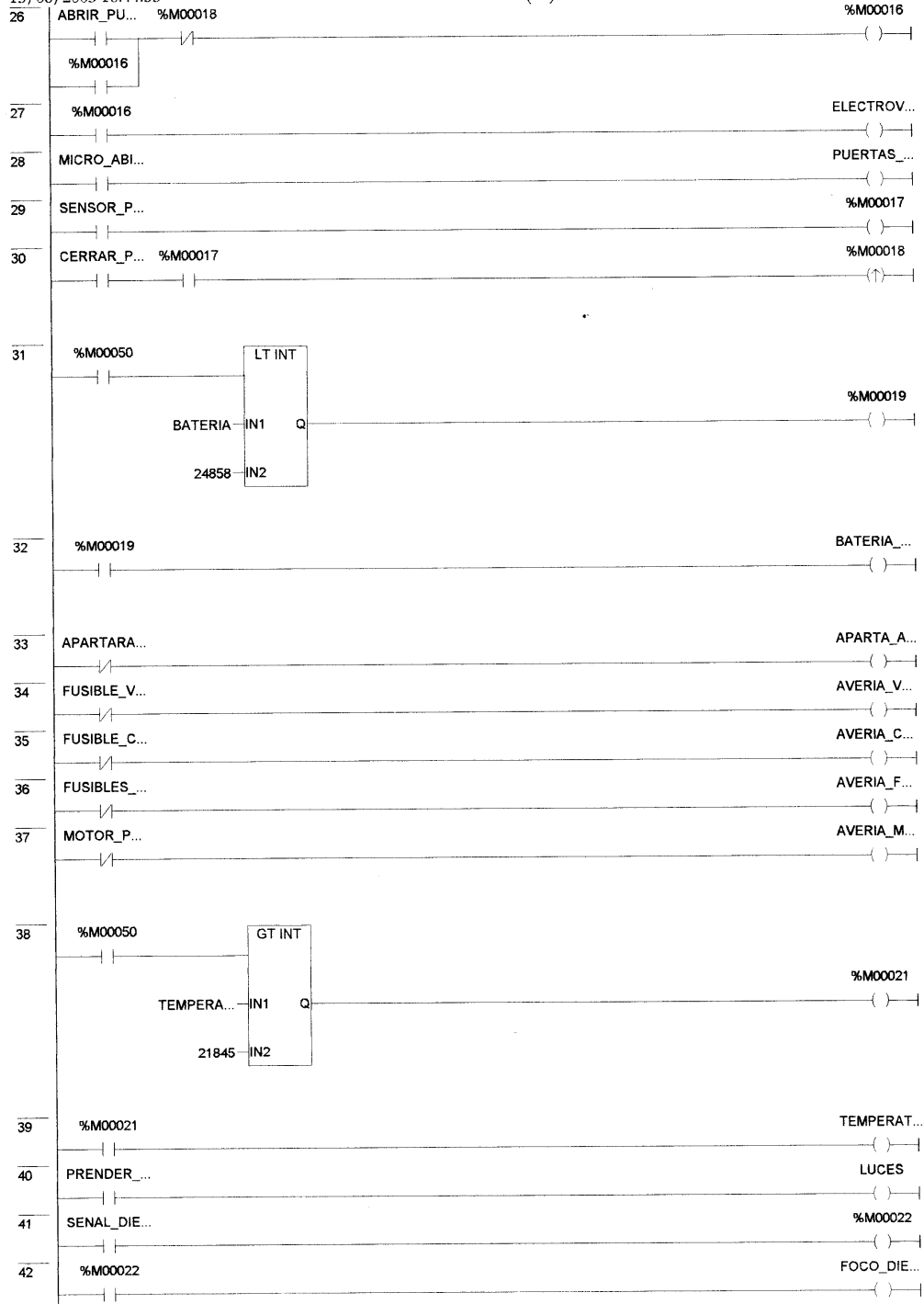
Emitido Por JZQUIERDO CEVALLOS, DANIEL ROLANDO

ANEXO B

Programa del PLC (VERSAPRO)



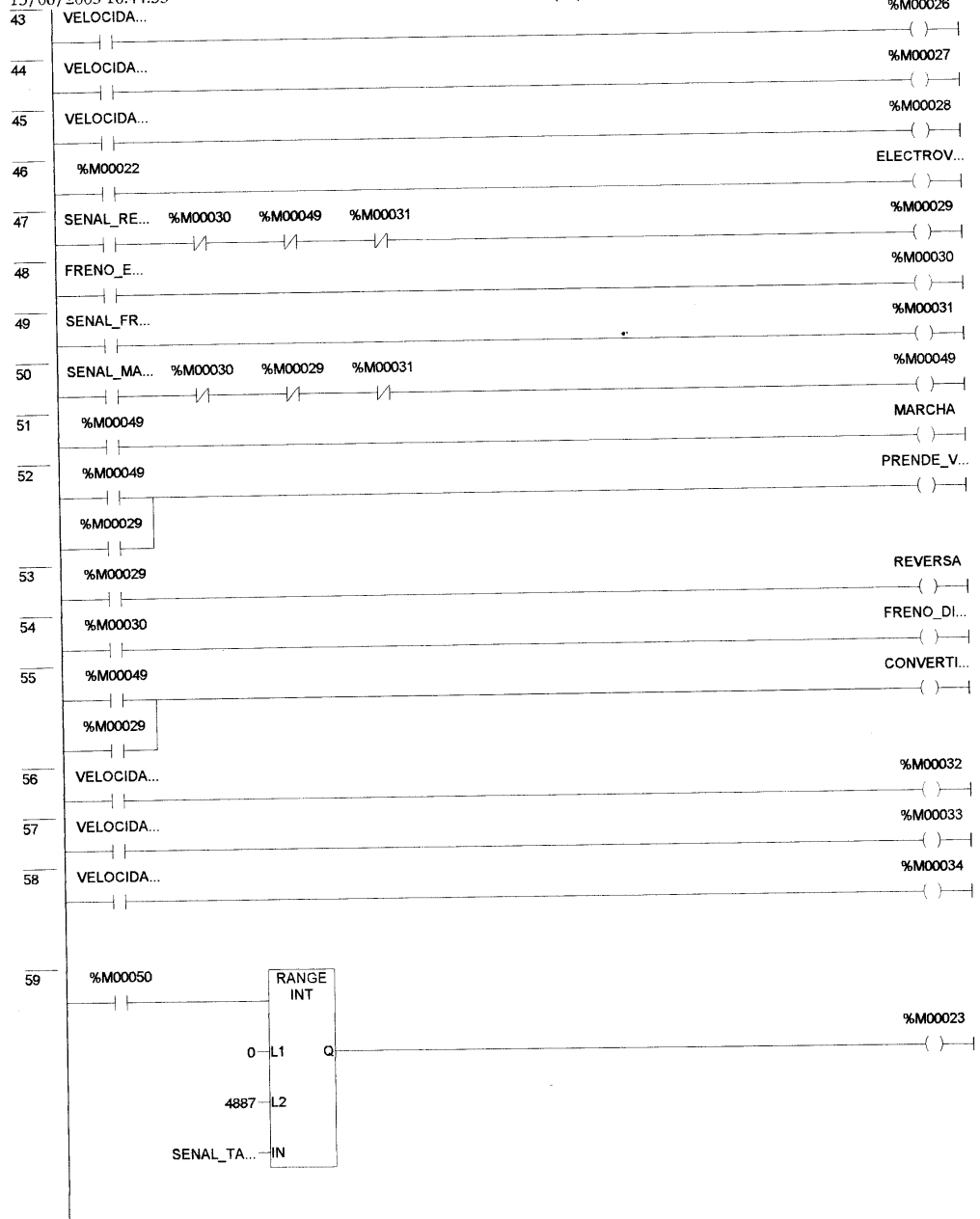


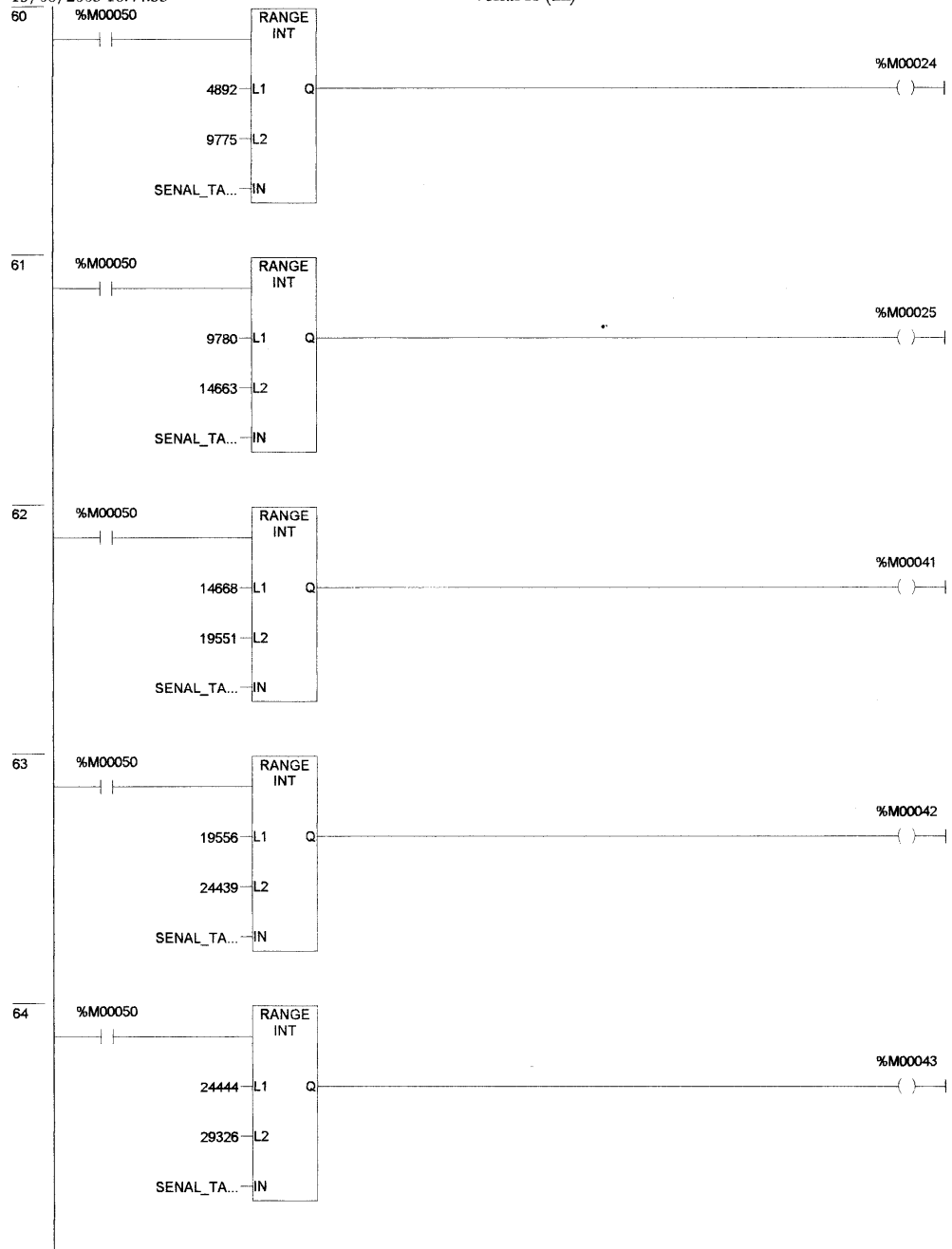


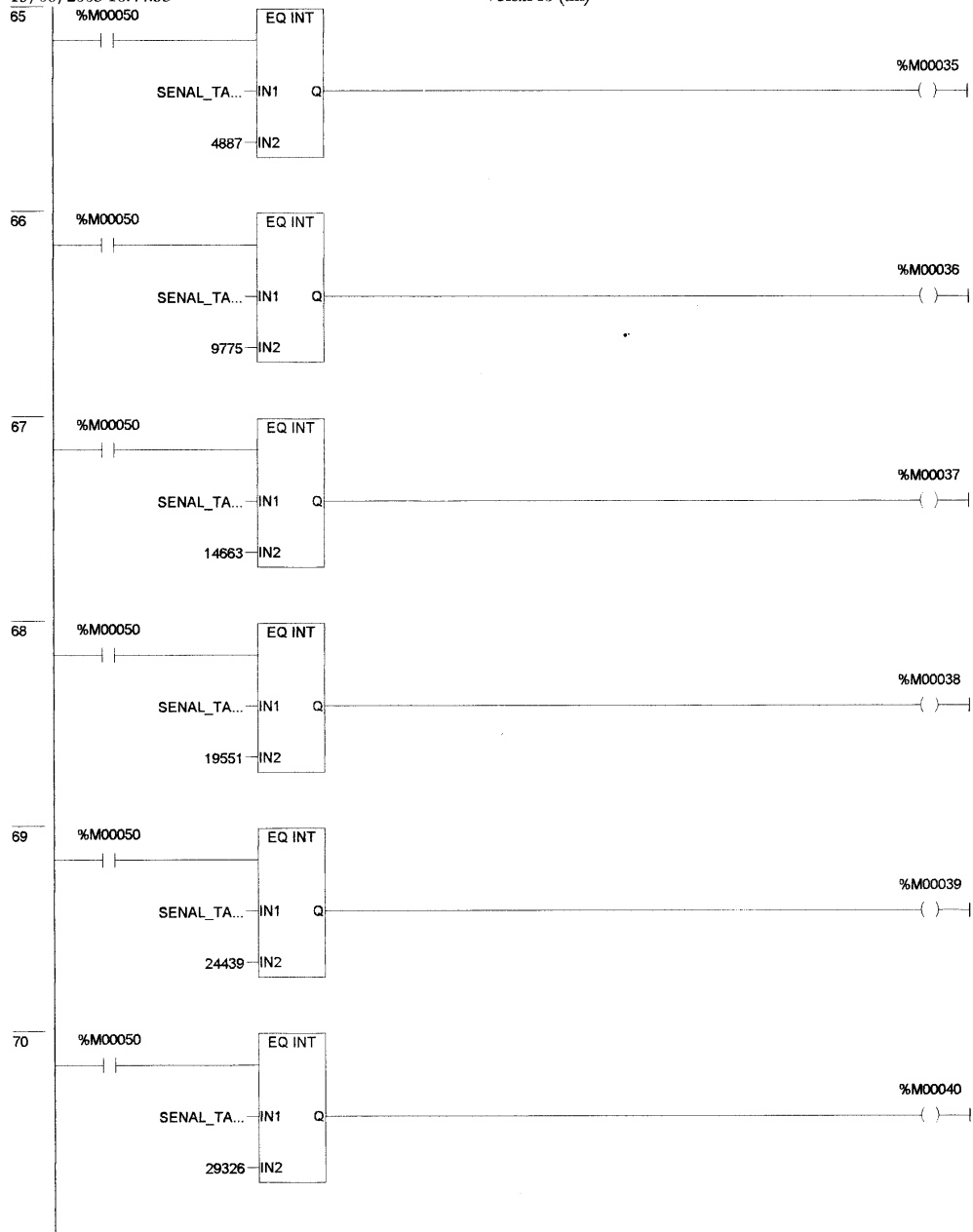
13/06/2005 16:44:35

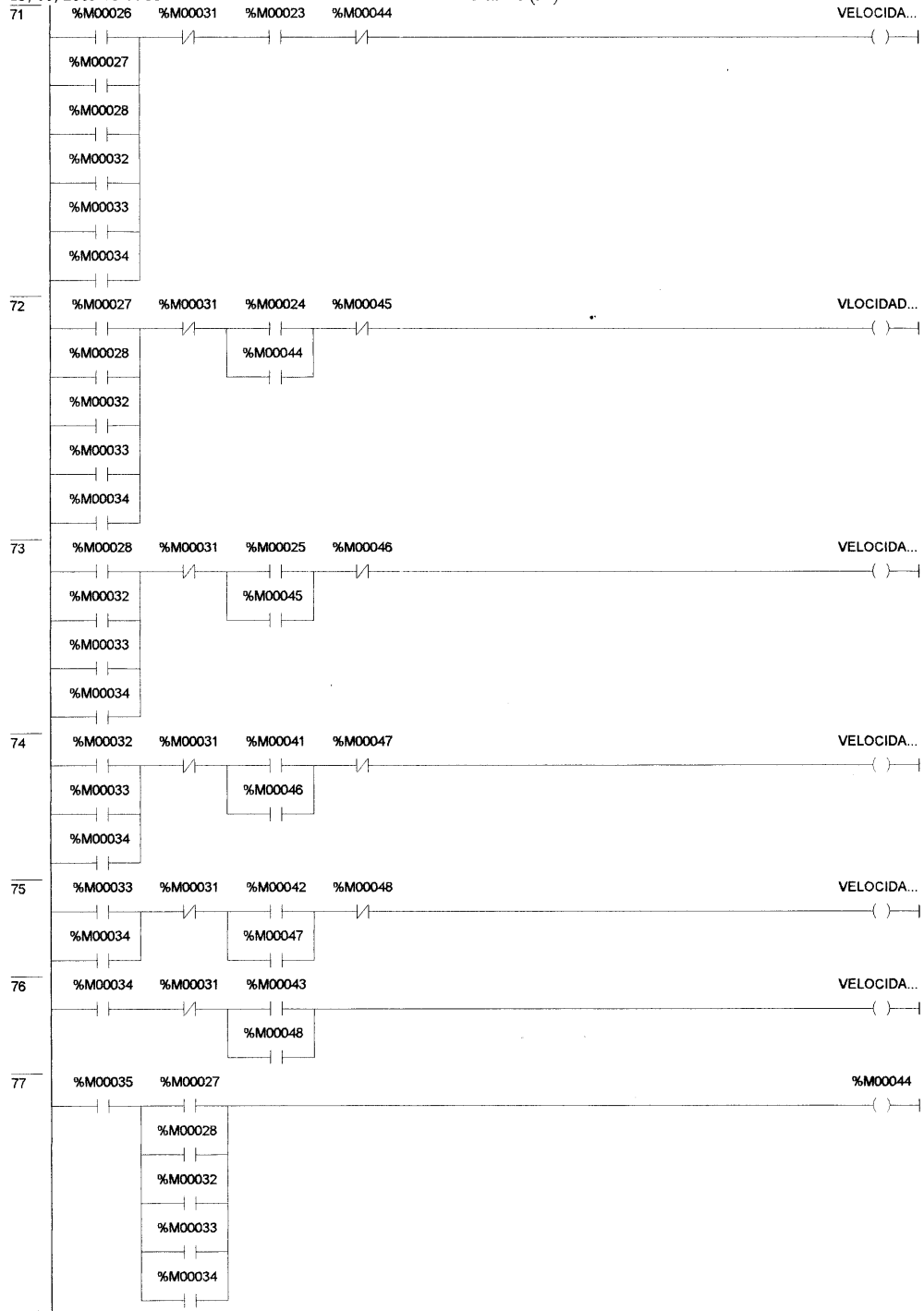
VersaPro (tm)

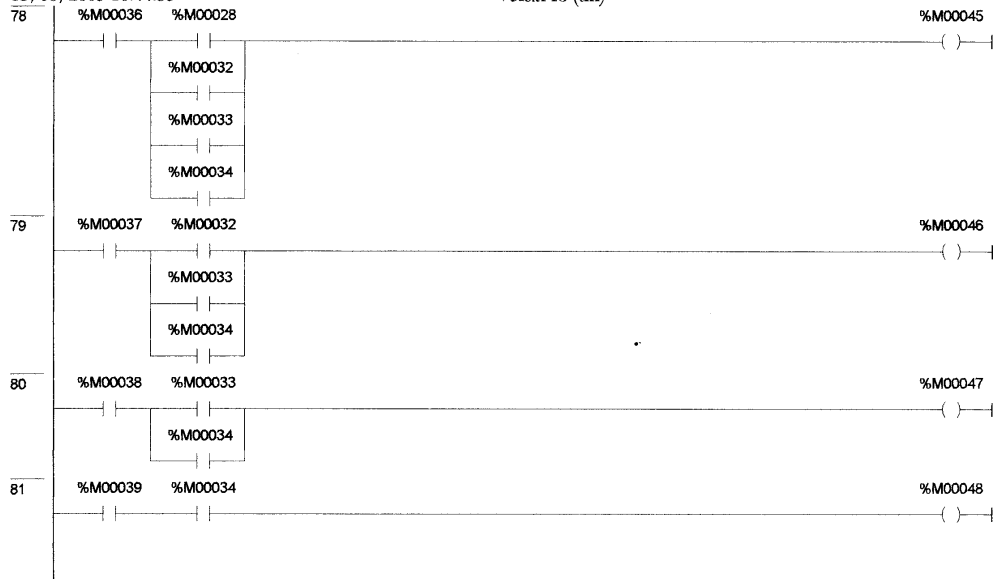
Page:











13/06/2005 16:47:14

VersaPro (tm)

Pag

Name	Type	Len	Address	Description	Stored Val	Scope	Ret	Ovr	Ei
SUBIR_PANTOGRAFO	BIT	1	%I00002	Botonera que sube el pantografo		Global	R		
%M00002	BIT	1	%M00002	**No Description**		Global	R		
%M00001	BIT	1	%M00001	**No Description**		Global	R		
%M00007	BIT	1	%M00007	**No Description**		Global	R		
ELECTROVALVULA1	BIT	1	%Q00003	Electrovalvula que sube y baja el pantografo		Global	R		
MICRO_ABIERTO1	BIT	1	%I00011	Micro que indica la altura deseada de pantografo		Global	R		
BAJAR_PANTOGRAFO	BIT	1	%I00003	Botonera que baja el pantografo		Global	R		
%M00003	BIT	1	%M00003	**No Description**		Global	R		
%M00006	BIT	1	%M00006	**No Description**		Global	R		
%M00004	BIT	1	%M00004	**No Description**		Global	R		
ELCTROVALVULA2	BIT	1	%Q00004	Electrovalvula que abre y cierra las puertas del bus		Global	R		
SENSOR_GANCHO	BIT	1	%I00027	Indica si el gancho que sostiene al pantografo esta abierto		Global	R		
MICRO_ABIERTO_3	BIT	1	%I00013	Micro que indica pantografo bajo		Global	R		
%M00005	BIT	1	%M00005	**No Description**		Global	R		
TENSION	WORD	1	%AI0006	Mide el voltaje en las lineas cuando el pantografo esta pegado		Global	R		
%M00008	BIT	1	%M00008	**No Description**		Global	R		
%M00009	BIT	1	%M00009	**No Description**		Global	R		
%M00010	BIT	1	%M00010	**No Description**		Global	R		
PRESION	WORD	1	%AI0007	Presion del compresor		Global	R		
%M00011	BIT	1	%M00011	**No Description**		Global	R		
%M00012	BIT	1	%M00012	**No Description**		Global	R		
SOBRETENSION	BIT	1	%Q00023	Salida que indica un exceso de tension en las lineas		Global	R		
BAJA_TENSION	BIT	1	%Q00011	Salida que indica baja tension en las lineas		Global	R		
ALTA_TENSION	BIT	1	%Q00012	Salida que indica alta tension en las lineas		Global	R		
BAJA_PRESION	BIT	1	%Q00014	Presion baja para el pantografo y las puertas		Global	R		
ALTA_PRESION	BIT	1	%Q00013	Demasiada presion en el tanque de almacenamiento		Global	R		
%M00013	BIT	1	%M00013	**No Description**		Global	R		
%M00014	BIT	1	%M00014	**No Description**		Global	R		
%M00015	BIT	1	%M00015	**No Description**		Global	R		
COMPRESOR	BIT	1	%Q00002	Prende compresor		Global	R		
ABRIR_PUERTA	BIT	1	%I00009	Botonera que abre puertas		Global	R		
%M00018	BIT	1	%M00018	**No Description**		Global	R		
%M00016	BIT	1	%M00016	**No Description**		Global	R		
ELECTROVALVULA_PUERTA	BIT	1	%Q00001	Electrovalvula que abre las puertas		Global	R		
MICRO_ABIERTO2	BIT	1	%I00012	Micro que indica que la puerta esta abierta		Global	R		
PUERTAS_ABIERTAS	BIT	1	%Q00016	Señal que indica puertas abiertas		Global	R		
SENSOR_PRESENCIA	BIT	1	%I00028	Fotodiodo que indica que una persona esta en la puerta		Global	R		
%M00017	BIT	1	%M00017	**No Description**		Global	R		
CERRAR_PUERTA	BIT	1	%I00010	Botonera que cierra las puertas		Global	R		
BATERIA	WORD	1	%AI0004	Señal que mide el voltaje de la bateria		Global	R		
%M00019	BIT	1	%M00019	**No Description**		Global	R		
BATERIA_BAJA	BIT	1	%Q00010	Señal que indica que la tension en la bateria esta baja		Global	R		
SENSOR_PESO	WORD	1	%AI0016	Compara el peso		Global	R		
%M00020	BIT	1	%M00020	**No Description**		Global	R		
SOBRE_PESO	BIT	1	%Q00006	Señal que me indica que el bus esta con sobrepeso		Global	R		
APARTARAYO	BIT	1	%I00018	Micro que indica si la caja apartarayo esta abierta		Global	R		
APARTA_ABIERTO	BIT	1	%Q00017	Señal que indica que la caja apartarayo esta abierta		Global	R		
FUSIBLE_VENTILADOR	BIT	1	%I00019	Fusible del ventilador		Global	R		

Program: tesis

C:\Documents and Settings\Andrei-Soltysic\Mis documentos\andrei_tesis_tesisversa

GLOBAL VARIAB

13/06/2005 16:47:14

VersaPro (tm)

Page

Name	Type	Len	Address	Description	Stored Val	Scope	Ret	Ovr	Ex
AVERIA_VENTILADOR	BIT	1	%Q00021	Fusible del ventilador abierto		Global	R		
FUSIBLE_COMPRESOR	BIT	1	%I00020	Fusible del compresor		Global	R		
AVERIA_COMPRESOR	BIT	1	%Q00024	Fusible de compresor abierto		Global	R		
FUSIBLES_PRINCIPALES	BIT	1	%I00021	Fusibles Principales		Global	R		
AVERIA_FUSIBLE_PRINCI	BIT	1	%Q00018	Fusibles principales abiertos		Global	R		
PAL									
MOTOR_PRINCIPAL	BIT	1	%I00022	Fusible del motor pincipal		Global	R		
AVERIA_MOTOR_PRINCI	BIT	1	%Q00019	Fusible del motor principal		Global	R		
PAL				abierto					
TEMPERATURA	WORD	1	%AI0024	Temperatura del motor		Global	R		
				principal					
%M00021	BIT	1	%M00021	**No Description**		Global	R		
TEMPERATURA_ELEVAD	BIT	1	%Q00022	Senal que indica que la		Global	R		
A				temperatura del motor					
				principal es alta					
LUCES	BIT	1	%Q00020	Señal que manda a prender		Global	R		
				las luces del bus					
%M00022	BIT	1	%M00022	**No Description**		Global	R		
FOCO_DIESEL	BIT	1	%Q00026	Señal que indica que se		Global	R		
				trabaja a diesel					
%M00026	BIT	1	%M00026	**No Description**		Global	R		
%M00027	BIT	1	%M00027	**No Description**		Global	R		
%M00028	BIT	1	%M00028	**No Description**		Global	R		
ELECTROVALVULA3	BIT	1	%Q00015	Electrovalvula que permite la		Global	R		
				entrada de diesel					
%M00029	BIT	1	%M00029	**No Description**		Global	R		
%M00030	BIT	1	%M00030	**No Description**		Global	R		
%M00031	BIT	1	%M00031	**No Description**		Global	R		
%M00049	BIT	1	%M00049	**No Description**		Global	R		
MARCHA	BIT	1	%Q00032	Señal de marcha		Global	R		
PRENDE_VENTILADOR	BIT	1	%Q00027	Señal que prende ventilador		Global	R		
				de motor principal					
REVERSA	BIT	1	%Q00005	Señal para que el bus vaya		Global	R		
				en reversa					
FRENO_DINAMICO	BIT	1	%Q00025	Señal del freno dinamico		Global	R		
CONVERTIDOR_ESTATIC	BIT	1	%Q00028	Señal que activa el		Global	R		
O				convertidor estatico					
%M00032	BIT	1	%M00032	**No Description**		Global	R		
%M00033	BIT	1	%M00033	**No Description**		Global	R		
%M00034	BIT	1	%M00034	**No Description**		Global	R		
PRENDER_LUCES	BIT	1	%I00014	Botonera de luces		Global	R		
SENAL_DIESEL	BIT	1	%I00008	Botonera de diesel		Global	R		
VELOCIDAD1	BIT	1	%I00001	Velocidad minima		Global	R		
VELOCIDAD2	BIT	1	%I00025	Velocidad media baja		Global	R		
VELOCIDAD3	BIT	1	%I00026	Velocidad media alta		Global	R		
SENAL_REVERSA	BIT	1	%I00005	Botonera de reversa		Global	R		
FRENO_EMERGENCIA	BIT	1	%I00017	Botonera de freno de		Global	R		
				emergencia					
SENAL_FRENO	BIT	1	%I00023	Pedal freno		Global	R		
SENAL_MARCHA	BIT	1	%I00032	Botonera de marcha		Global	R		
VELOCIDAD4	BIT	1	%I00029	Velocidad comercial		Global	R		
VELOCIDAD5	BIT	1	%I00030	Velocidad alta		Global	R		
VELOCIDAD6	BIT	1	%I00031	Velocidad maxima		Global	R		
SENAL_TACOMETRO	WORD	1	%AI0015	Sensor tacometro		Global	R		
%M00023	BIT	1	%M00023	**No Description**		Global	R		
%M00024	BIT	1	%M00024	**No Description**		Global	R		
%M00025	BIT	1	%M00025	**No Description**		Global	R		
%M00041	BIT	1	%M00041	**No Description**		Global	R		
%M00042	BIT	1	%M00042	**No Description**		Global	R		
%M00043	BIT	1	%M00043	**No Description**		Global	R		
%M00035	BIT	1	%M00035	**No Description**		Global	R		
%M00036	BIT	1	%M00036	**No Description**		Global	R		
%M00037	BIT	1	%M00037	**No Description**		Global	R		
%M00038	BIT	1	%M00038	**No Description**		Global	R		
%M00039	BIT	1	%M00039	**No Description**		Global	R		
%M00040	BIT	1	%M00040	**No Description**		Global	R		
%M00044	BIT	1	%M00044	**No Description**		Global	R		
VELOCIDAD_MIN	BIT	1	%Q00007	Salida velocidad minma		Global	R		
%M00045	BIT	1	%M00045	**No Description**		Global	R		
VLOCIDAD_MEDIA_BAJA	BIT	1	%Q00008	Salida velocidad media baja		Global	R		
%M00046	BIT	1	%M00046	**No Description**		Global	R		
VELOCIDAD_MEDIA_ALTA	BIT	1	%Q00009	Salida velocidad media alta		Global	R		
%M00047	BIT	1	%M00047	**No Description**		Global	R		
VELOCIDAD_COMERCIAL	BIT	1	%Q00029	Salida velocidad comercial		Global	R		
%M00048	BIT	1	%M00048	**No Description**		Global	R		

Program: tesis

C:\Documents and Settings\Andrei-Soltysic\Mis documentos\andrei_tesis_tesisversa

GLOBAL VARIABLE

13/06/2005 16:47:14

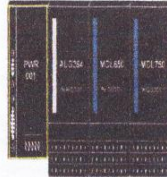
VersaPro (tm)

Page

Name	Type	Len	Address	Description	Stored Val	Scope	Ret	Ovr	Ext
VELOCIDAD_ALTA	BIT	1	%Q00030	Salida velocidad alta		Global	R		
VELOCIDAD_MAXIMA	BIT	1	%Q00031	Salida velocidad maxima		Global	R		
ELECTROFUGA	BIT	1		**No Description**		Global	R		
%Q00050	BIT	1	%Q00050	**No Description**		Global	R		
SWITC_ENCEN	BIT	1	%I00050	**No Description**		Global	R		
ELECTRO_ESCAPE	BIT	1	%Q00035	**No Description**		Global	R		
%M00050	BIT	1	%M00050	**No Description**		Global	R		

Table of Contents

Overview	1
Main Rack: I/O Carrier Barrier Style (IC200RAC001)	1
Detailed View	2
IC200PWR001 Power Supply 24VDC Input	2
Power Consumption	2
IC200CPU001 CPU Cfg User Memory Port 1 RS232 Port 2 RS485	2
Settings	2
Scan	2
Port 1 (RS-232)	2
Port 2 (RS-485)	2
Memory	2
Power Consumption	3
IC200ALG264 Analog Input 15 Bit Current 15Ch	3
Settings	3
Module Parameters	3
Input Parameters	3
Wiring	3
Power Consumption	3
Reference Details	4
%AI References	4
%I References	4
%Q References	4

Main Rack: I/O Carrier Barrier Style (IC200RAC001)

Main Rack: Slot 0**IC200PWR001 Power Supply 24VDC Input****Power Consumption****Voltages / Supplied**

+5.0 Voltage (Amps) : 1.50
+3.3 Voltage (Amps) : 0.25

Main Rack: Slot 0**IC200CPU001 CPU Cfg User Memory Port 1 RS232 Port 2 RS485****Settings****Parameters / Values**

I/O Scan-Stop: No
Power Up Mode: Last
Logic / Configuration From: RAM
Registers: RAM
Passwords: Enabled
Checksum Words: 8
Default Modem Turnaround Time (.01 Sec/Count): 0
Default Idle Time (Sec): 10
SFC Timer Faults: Disabled
SNP ID:
Switch Run / Stop: Enabled
Switch Memory Protect: Disabled
Diagnostics: Enabled
Fatal Fault Override: Disabled
EZ Program Store: RAM Only

Scan**Parameters / Values**

Sweep Mode: Normal
Sweep Timer (mSec): N/A

Port 1 (RS-232)**Parameters / Values**

Port Mode: SNP
Port Type: Slave
Data Rate (bps): 19200
Parity: Odd
Stop Bits: 1
Timeout: Long
Turnaround Delay (mSec in 10 mSec Increments): 0
SNP ID:

Port 2 (RS-485)**Parameters / Values**

Port Mode: SNP
Port Type: Slave
Data Rate (bps): 19200
Parity: Odd
Stop Bits: 1
Timeout: Long
Turnaround Delay (mSec in 10 mSec Increments): 0
SNP ID:
Converter Power Consumption (Amps) : 0

Memory[Detailed View](#)[GE Fanuc Hardware Configuration](#)[VersaMax](#)

Parameters / Values

%I Discrete Input: 2048
%Q Discrete Output: 2048
%S System Use: 128
%M Internal Use: 1024
%T Temporary Status: 256
%G Genius® Global: 1280
%AI Analog Input: 128
%AQ Analog Output: 128
%R Register Memory: 2048

Power Consumption**Parameters / Values**

+5.0 Voltage (Amps) : 0.040
+3.3 Voltage (Amps) : 0.100

Main Rack: Slot 1 IC200CHS022 I/O Carrier Box Style - Vertical**IC200ALG264 Analog Input 15 Bit Current 15Ch****Settings****Parameters / Values**

Reference Address: %AI0001
Length: 15

Module Parameters**Parameters / Values**

%AI Default / Hold Last State: Default
Report Faults: Enabled
Operation Mode: Current (4 - 20mA)

Input Parameters**Channel / Default Value**

1 0
2 0
3 0
4 0
5 0
6 0
7 0
8 0
9 0
10 0
11 0
12 0
13 0
14 0
15 0

Wiring**Terminal / Wiring Information**

From Terminal A1 to Terminal B18 : No wiring information.

Power Consumption**Parameters / Values**

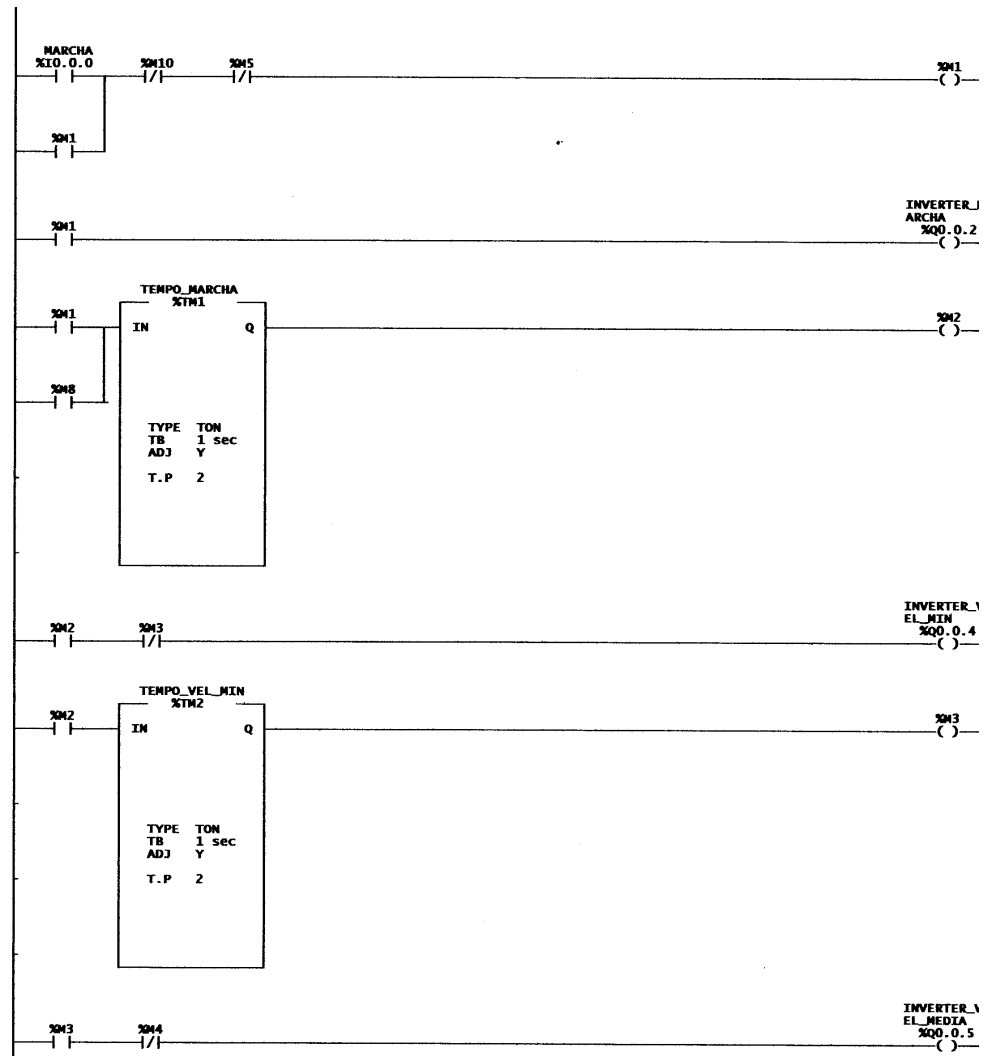
+5VDC (Amps): 0.125

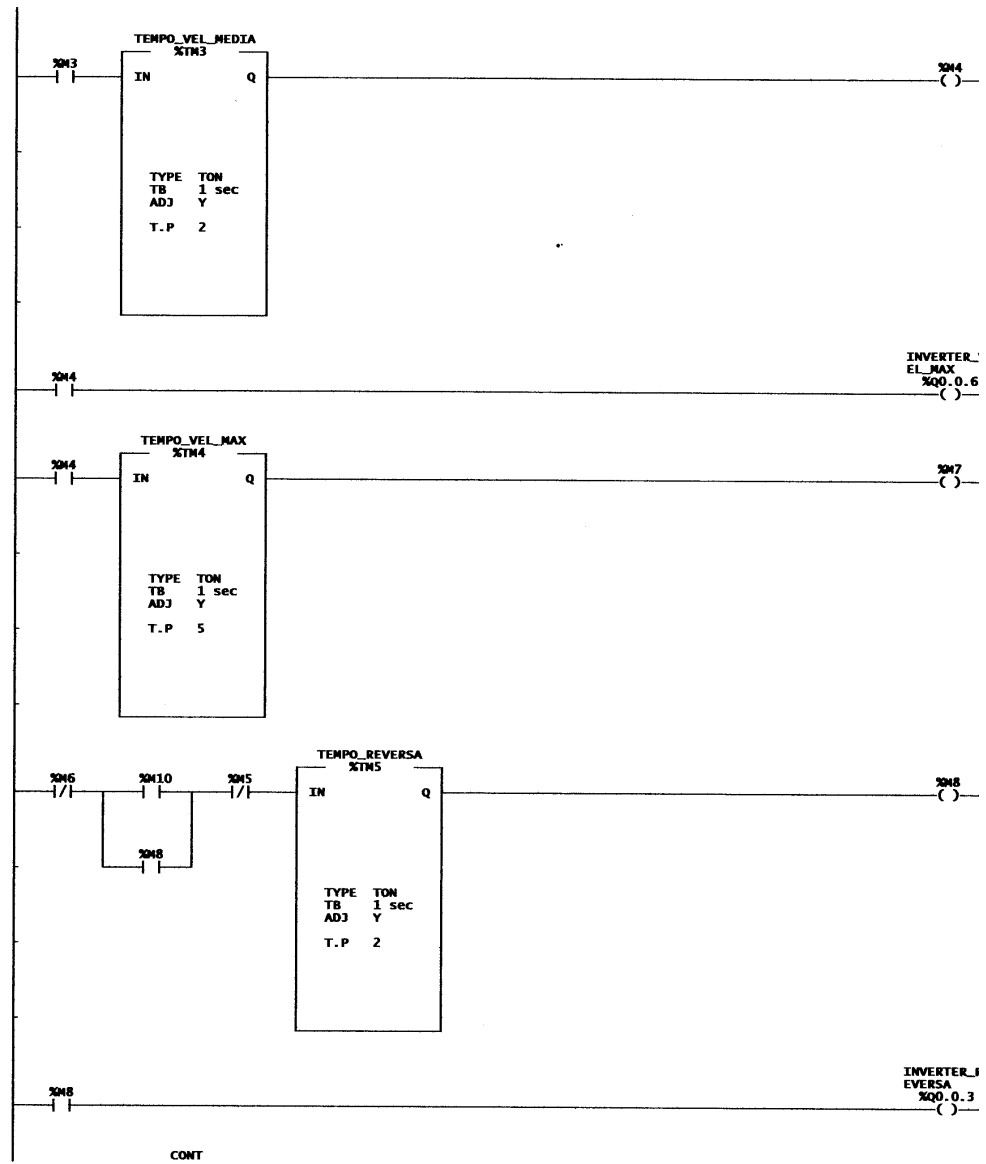
%AI References					
Overlap	Start	End	Addr	Mem Type	Cat Num
	1	15	(0.2)	Consumed	IC200ALG264
Total %AI: 15			Highest Reference: 15		
%I References					
Overlap	Start	End	Addr	Mem Type	Cat Num
	1	32	(0.3)	Consumed	IC200MDL650
Total %I: 32			Highest Reference: 32		
%Q References					
Overlap	Start	End	Addr	Mem Type	Cat Num
	1	32	(0.4)	Produced	IC200MDL750
Total %Q: 32			Highest Reference: 32		

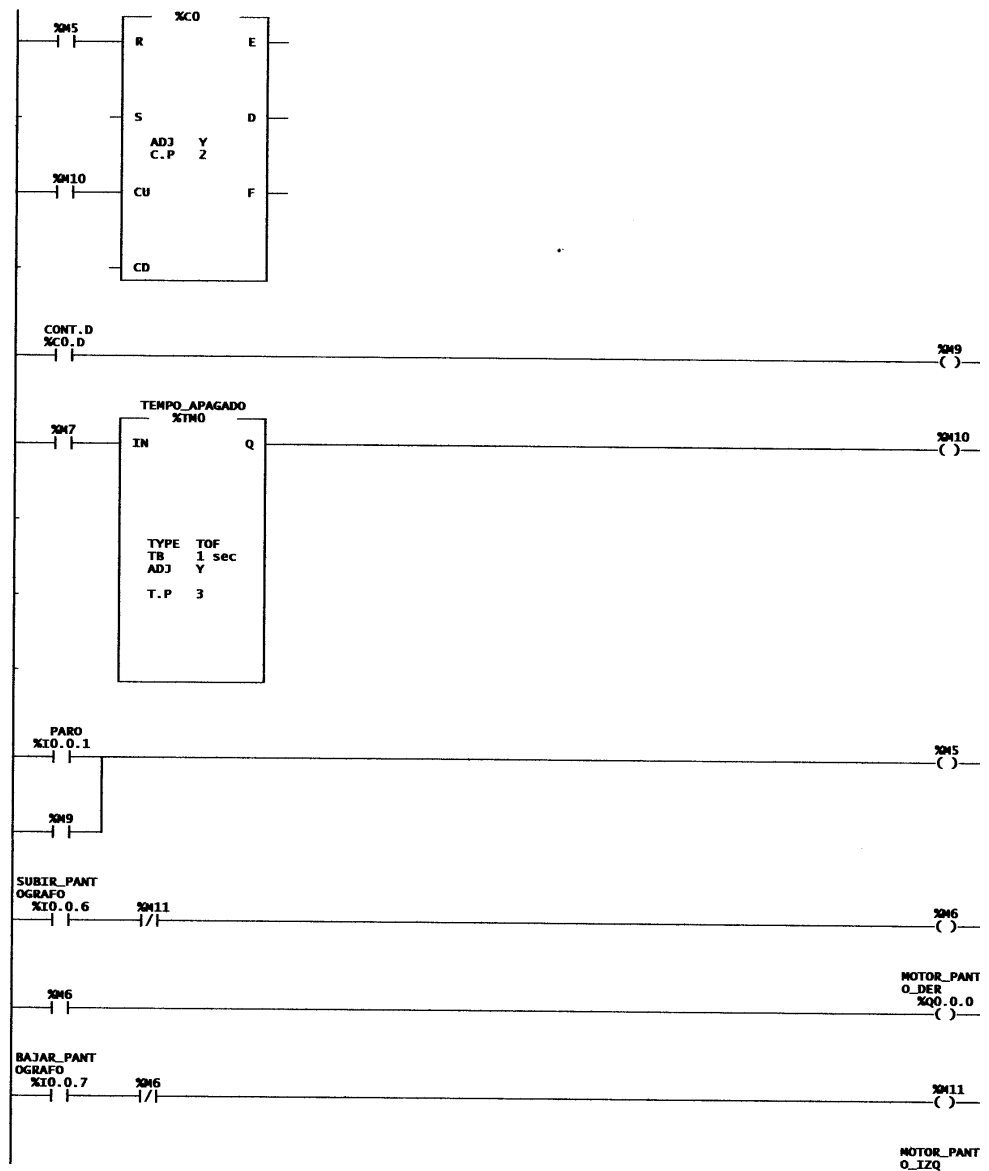
ANEXO C

Programa del PLC (TWIDO)

Ladder







2011

200.0.1

Lista

```
0 LD      %I0.0.0
1 OR      %M1
2 ANDN    %M10
3 ANDN    %M5
4 ST      %M1
5 LD      %M1
6 ST      %Q0.0.2
7 BLK     %TM1
8 LD      %M1
9 OR      %M8
10 IN
11 OUT_BLK
12 LD     Q
13 ST     %M2
14 END_BLK
15 LD     %M2
16 ANDN   %M3
17 ST     %Q0.0.4
18 BLK    %TM2
19 LD     %M2
20 IN
21 OUT_BLK
22 LD     Q
23 ST     %M3
24 END_BLK
25 LD     %M3
26 ANDN   %M4
27 ST     %Q0.0.5
28 BLK    %TM3
29 LD     %M3
30 IN
31 OUT_BLK
32 LD     Q
33 ST     %M4
34 END_BLK
35 LD     %M4
36 ST     %Q0.0.6
37 BLK    %TM4
38 LD     %M4
39 IN
40 OUT_BLK
41 LD     Q
42 ST     %M7
43 END_BLK
44 BLK    %TM5
45 LDN    %M6
46 AND(   %M10
47 OR     %M8
48 )
49 ANDN   %M5
50 IN
51 OUT_BLK
52 LD     Q
53 ST     %M8
54 END_BLK
55 LD     %M8
56 ST     %Q0.0.3
57 BLK    %C0
58 LD     %M5
59 R
60 LD     %M10
61 CU
```

```
62 END_BLK
63 LD      %C0.D
64 ST      %M9
65 BLK     %TMO
66 LD      %M7
67 IN
68 OUT_BLK
69 LD      Q
70 ST      %M10
71 END_BLK
72 LD      %I0.0.1
73 OR      %M9
74 ST      %M5
75 LD      %I0.0.6
76 ANDN    %M11
77 ST      %M6
78 LD      %M6
79 ST      %Q0.0.0
80 LD      %I0.0.7
81 ANDN    %M6
82 ST      %M11
83 LD      %M11
84 ST      %Q0.0.1
```

Referencia cruzada

OPERANDO	SÍMBOLO	ESCALÓN	OPERADOR
		2	IN
		2	BLK: OUT
		2	BLK: END
		4	IN
		4	BLK: OUT
		4	BLK: END
		6	IN
		6	BLK: OUT
		6	BLK: END
		8	IN
		8	BLK: OUT
		8	BLK: END
		9	)
		9	IN
		9	BLK: OUT
		9	BLK: END
		11	R
		11	CU
		11	BLK: END
		13	IN
		13	BLK: OUT
		13	BLK: END
Q		2	— —
		4	— —
		6	— —
		8	— —
		9	— —
		13	— —
%C0	CONT	11	BLK
%C0.D	CONT.D	12	— —
%I0.0	MARCHA	0	— —
%I0.1	PARO	14	— —
%I0.6	SUBIR_PANTOGRAFO	15	— —
%I0.7	BAJAR_PANTOGRAFO	17	— —
%M1		0	— —
		0	— —
		1	— —
		2	— —
%M2		2	— —
		3	— —
		4	— —
%M3		3	— —
		4	— —
		5	— —
		6	— —
%M4		5	— —
		6	— —
		7	— —
		8	— —

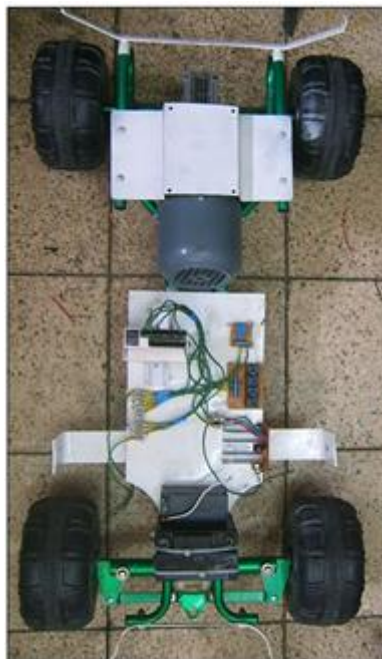
%M5		0 9 11 14	— / — — / — — / — —()—
%M6		9 15 16 17	— / — —()— — / — — / —
%M7		8 13	—()— — —
%M8		2 9 9 10	— — — — —()— — —
%M9		12 14	—()— — —
%M10		0 9 11 13	— / — — / — — / — —()—
%M11		15 17 18	— / — —()— — —
%Q0.2	INVERTER_MARCHA	1	—()—
%Q0.4	INVERTER_VEL_MIN	3	—()—
%Q0.5	INVERTER_VEL_MEDIA	5	—()—
%Q0.6	INVERTER_VEL_MAX	7	—()—
%Q0.3	INVERTER_REVERSA	10	—()—
%Q0.0	MOTOR_PANTO_DER	16	—()—
%Q0.1	MOTOR_PANTO_IZQ	18	—()—
%TM0	TEMPO_APAGADO	13	BLK
%TM1	TEMPO_MARCHA	2	BLK
%TM2	TEMPO_VEL_MIN	4	BLK
%TM3	TEMPO_VEL_MEDIA	6	BLK
%TM4	TEMPO_VEL_MAX	8	BLK
%TM5	TEMPO_REVERSA	9	BLK

ANEXO D

Bus Terminado



Posición del Inverter en el bus



Conexión del sistema de control del bus



Vista de cerca del sistema de control del bus



Vista del interior del bus



Vista de cerca del interior del bus



Vista del exterior del bus ya terminado



Foto de toda la pista



Foto de una seccion de la pista

