



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE
TRACCIÓN-FRENADO PARA EL ELEMENTO MP-68
DEL STC METRO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTAN:
JOHNATAN FLORES MORENO
JESSICA JAZMÍN MARTÍNEZ ROMERO**

**DIRECTOR TÉCNICO
DR. JAIME JOSÉ RODRÍGUEZ RIVAS**

**DIRECTOR METODOLÓGICO
M. en C. GUILIBALDO TOLENTINO ESLAVA**

MÉXICO, D. F.

DICIEMBRE 2013

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN
DEBERA (N) DESARROLLAR

INGENIERO ELECTRICISTA
TESIS Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
JOHNATAN FLORES MORENO
JESSICA JAZMÍN MARTÍNEZ ROMERO

“PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE TRACCIÓN – FRENADO PARA EL ELEMENTO
MP-68 DEL STC METRO”

DESARROLLAR UNA PROPUESTA PARA MEJORAR EL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO
EXISTENTE BASADO EN MOTORES DE INDUCCIÓN CON UNA EFICIENCIA MAYOR AL 90%
ACCIONADOS POR ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y CON LA CAPACIDAD DE INCORPORAR
SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

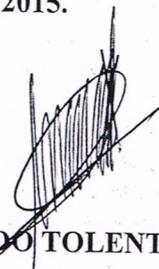
- RESUMEN.
- INTRODUCCIÓN.
- SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO.
- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO DE LOS ELEMENTOS MP-68 Y MP-82.
- DESARROLLO DE LA PROPUESTA DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO.

MÉXICO D.F., A 12 DE ENERO DEL 2015.

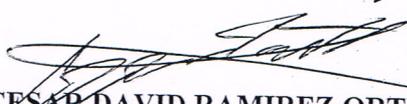
ASESORES



DR. JAIME RODRÍGUEZ RIVAS



M. EN C. GUILIBALDO TOLENTINO ESLAVA



ING. CESAR DAVID RAMIREZ ORTIZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

CONTENIDO

	Pág.
RELACIÓN DE FIGURAS	IV
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	VIII
INTRODUCCIÓN	IX
CAPÍTULO 1- SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO	2
1.1 GENERALIDADES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO	2
<i>1.1.1 Conformación de un tren del metro</i>	<i>2</i>
<i>1.1.2 Cuerpo del carro</i>	<i>3</i>
<i>1.1.3. La vía</i>	<i>4</i>
<i>1.1.4 Funcionamiento del carro motriz neumático y del carro motriz férreo</i>	<i>7</i>
<i>1.1.5 Parque vehicular</i>	<i>10</i>
1.2 MOTOR SERIE DE CORRIENTE CONTINUA	10
<i>1.2.1 Sensibilidad a Carga Nula</i>	<i>16</i>
<i>1.2.2 Método de control de la velocidad en la máquina serie de CC</i>	<i>16</i>
<i>1.2.3 Configuración de la máquina CC para un sistema de frenado</i>	<i>21</i>
1.3 MÁQUINAS DE INDUCCIÓN Ó ASÍNCRONAS	23
<i>1.3.1. Concepto de deslizamiento y velocidad síncrona</i>	<i>23</i>
<i>1.3.2 Circuito equivalente de la máquina de inducción</i>	<i>25</i>
<i>1.3.3 Operación del motor de inducción a frecuencia variable</i>	<i>32</i>
	I

	Pág.
1.3.4 <i>Operación del motor de inducción a frecuencia variable y tensión constante</i>	33
1.3.5 <i>Operación de la máquina de inducción a tensión y frecuencia variable</i>	35
CAPÍTULO 2- DESCRIPCION DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO DE LOS ELEMENTO MP-68 Y MP-82	38
2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO DEL ELEMENTO MP-68	38
2.1.1 <i>Servomotor eléctrico</i>	39
2.1.2 <i>Operación del sistema de tracción</i>	41
2.1.3 <i>Operación del Sistema de Frenado</i>	44
2.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO DEL ELEMENTO MP-82	47
2.2.1 <i>Convertidor CC-CC o CHOPPER</i>	47
2.2.2 <i>Aplicación del chopper durante la tracción</i>	49
CAPÍTULO 3- DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO	61
3.1 REGIONES DE OPERACIÓN DEL ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN	61
3.2 FRENADO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN	62
3.2.1 <i>Frenado dinámico</i>	63
3.2.2 <i>Frenado regenerativo</i>	64
3.3 ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS OPERATIVOS	65
3.4 MOTORES DE TRACCIÓN	67

	Pág.
3.4.1 <i>Método de cálculo</i>	67
3.4.2 <i>Cálculo para los motores de tracción</i>	72
3.5 CONVERTIDOR CC-CA	78
3.6 FRENADO DEL ELEMENTO	79
3.7 ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO PARA LOS DOS MOTORES DE TRACCIÓN DE UN BOGUIE	83
3.8 COSTOS	85
3.8 COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO PROPUESTO Y EL TIPO JH	88
CONCLUSIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
1.1	Convoy de rodadura neumática de 3 elementos STC METRO	2
1.2	Convoy de rodadura neumática de 2 elementos STC METRO	2
1.3	Convoy férreo de 6 carros del STC METRO	4
1.4	Carro de rodadura neumática	4
1.5	Perfil de acero de la pista de rodamiento [8]	5
1.6	Perfil utilizado para las vías de seguridad [8]	6
1.7	Bogie motriz neumática de un tren MP-68 [12]	8
1.8	Conjunto de ruedas en una carretilla en condiciones normales de operación [8]	8
1.9	Operación de la rueda de seguridad con una rueda desinflada (izquierda) y una rueda portadora desinflada (derecha) [8]	9
1.10	Carro de rodadura férrea	9
1.11	Circuito equivalente de un motor de cc serie [10]	12
1.12	Característica momento de torsión –velocidad de un motor serie [10]	15
1.13	Curva característica momento de torsión –velocidad de un motor serie variando la tensión	17
1.14	Diagrama de control de un motor CC serie de tracción	18
1.15	Características par- velocidad	20
1.16	Relación entre la Potencia (P), el momento (τ_e) y la velocidad (ω) en por unidad	20
1.17	Cambio de configuración de la máquina CC	21
1.18	Acoplamiento mecánico y fuerzas que interactúan	22
		IV

Figura	Título	Pág.
1.19	Circuito equivalente de una máquina de inducción respecto al estator [11]	25
1.20	Circuito equivalente aproximado sin considerar la R_m	27
1.21	Circuito equivalente aproximado por fase [11]	27
1.22	Curva característica del momento par-velocidad de un motor de inducción, que muestra los límites de funcionamiento extendidos [11]	30
1.23	Fuerzas resultantes en el eje o flecha de la máquina de inducción	32
1.24	Curva característica de magnetización de la máquina [10]	34
1.25	Curvas par-velocidad a frecuencia variable [11]	35
1.26	Curvas par velocidad a tensión y frecuencia variable [11]	36
2.1	Principio de funcionamiento del JH	41
2.2	Sistema de Tracción-Frenado	42
2.3	Sistema de frenado	45
2.4	Principio de funcionamiento del convertidor CC-CC	47
2.5	Resultantes de la tensión aplicada al conjunto de motor y la inductancia	48
2.6	Funcionamiento del convertidor CC-CC o Chopper	48
2.7	Diagrama simplificado del chopper de bajada utilizado para tracción [9]	50
2.8	Diagrama simplificado del chopper de subida utilizado para el frenado [9]	51
2.9	Red de apagado forzado del tiristor principal TH11 [9]	52
2.10	Diagrama eléctrico de una de las fases del chopper [9]	54
2.11	Diagrama general del sistema chopper – motores de tracción [9]	55

Figura	Título	Pág.
2.12	Sistema de debilitamiento de campo (puenteo progresivo) [9]	57
2.13	Sistema de frenado dinámico [9]	58
3. 1	Topología general de accionamiento eléctrico [11]	61
3. 2	Curvas de par-velocidad [11]	62
3.3	Efectos de la variación de frecuencia, aumento de la tensión (V_s) y carga del par (T_e)	63
3. 4	Capacidad del frenado dinámico [11]	64
3. 5	Regímenes de operación de los motores de tracción.	68
3. 6	Diagrama del convertidor CC-CA a base de IGBT's	79
3.7	Circuito equivalente térmico	82
3. 8	Diagrama eléctrico del sistema propuesto	84
3. 9	Diagrama de comparación	89

AGRADECIMIENTOS

Para nuestros padres, quienes siempre han creído en nosotros, por su comprensión y apoyo en momentos malos y no tan malos, porque nos han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Y es que gracias a ellos hemos aprendido que la vida es breve, el arte es largo, la ocasión fugaz y la elección difícil.

Nos han dado todo lo que somos como personas, nuestros valores, nuestros principios, nuestra perseverancia y nuestro empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio. Por ser quienes nos han dado ejemplo de constancia, esfuerzo y dedicación a la hora de alcanzar las metas propuestas.

Porque son las personas que más directamente han sufrido las consecuencias de nuestro trabajo realizado. Realmente ellos nos llenan por dentro para conseguir un equilibrio que nos permite dar nuestro máximo. Nunca les podremos estar suficientemente agradecidos.

A todos ellos muchas gracias de todo corazón.

RESUMEN

En esta tesis se realizó un análisis de los de los diferentes tipos de sistemas de Tracción-Frenado con los que cuenta el STC METRO que son tipo JH, chopper y tracción asíncrona. Se desarrolló una propuesta para la mejora del Sistema de Tracción-Frenado del MP-68 que utiliza motores de inducción y accionamientos electrónicos basados en el uso de transistores IGBT's con sistema de recuperación de energía.

Se efectuó un levantamiento de información y requerimientos del STC para realizar la mejora del Sistema de Tracción-Frenado del elemento MP-68. Después se determinaron mediante cálculos las características electromecánicas de los nuevos motores de inducción para la tracción y frenado considerando la tensión, potencia y par desarrollado por el motor. Posteriormente se seleccionaron los nuevos motores de inducción a través de catálogos proporcionados por la empresa WEG.

Además se realizó la selección del accionador electrónico basado en transistores bipolares de puerta aislada (IGBT, del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor) a través de cálculos y catálogos. Se realizó el análisis para determinar la potencia que entrega el sistema durante el frenado regenerativo para encontrar los parámetros de la resistencia y chopper del frenado dinámico.

Se obtuvo la selección de los motores de inducción, el accionador electrónico, la resistencia y chopper de frenado para la propuesta. También se elaboró un diagrama eléctrico de la de mejora del Sistema de Tracción-Frenado, se consideró equipo con el que actualmente cuenta el Sistema de Tracción-Frenado del MP-68 para generar un ahorro económico en la propuesta.

La propuesta del Sistema de Tracción-Frenado estima una reducción de pérdidas de hasta el 20% ya que el accionamiento del JH está basado en un control resistivo con motores de CC con eficiencias menores al 90% y el sistema propuesto utiliza motores de inducción con una eficiencia del 95.8% y un accionamiento electrónico con una eficiencia del 96% capaz de devolver la energía eléctrica regenerada durante el frenado, elevando la eficiencia del Sistema de Tracción-Frenado del MP-68 aproximadamente 10% .

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Transporte Colectivo (STC) METRO que circula actualmente en el D.F., funciona con un sistema de tracción basado en motores de corriente alterna ó corriente directa. El parque de trenes del STC METRO está constituido por 354 trenes, de los cuales 296 usan motores de corriente continua (CC) como sistema de propulsión. Algunos de los trenes basados en motores de CC usan un control basado en reóstato lo cual resulta en un sistema extremadamente ineficiente [2].

Los Sistemas de Tracción-Frenado en uso en el STC METRO se dividen en 3 tipos: Tipo JH, Tipo Chopper y de Tracción Asíncrona. Algunos de los sistemas antes citados (Tipo JH y Tipo Chopper) presentan problemas en funcionamiento y confiabilidad baja del 80%, derivados de la obsolescencia tecnológica y del mantenimiento deficiente de los equipos, que implica un mayor uso de Recursos Humanos y Materiales [1].

El parque de trenes con el que cuenta la línea 1 es de 50 trenes, de los cuales 4 trenes son modelo MP-68 de Rodadura neumática y Sistema de Tracción-Frenado controlado electromecánicamente JH[1]. De los 4 trenes del modelo MP-68 utilizados en la línea 1 se tendrá como referencia un elemento de este modelo conformado por dos carros motrices y un remolque, el Sistema de Tracción de este elemento cuenta con 8 motores de CC.

Las características eléctricas de estos motores de CC hacen que durante el arranque del vehículo las corrientes demandadas a su sistema de potencia sean altas del orden de 3 a 6 veces de su valor nominal, provocando que sus fuentes de energía (subestaciones) estén sobredimensionadas y/o sometidas a fuertes sobrecargas, reduciendo su tiempo de vida útil [2].

Durante la etapa de frenado del tren MP-68, el motor regenera energía eléctrica, esta energía no es capaz de regresar a la barra guía; esto significa que cuando el tren es frenado la energía regenerada es disipada a través de resistores en forma de calor presentando pérdidas del orden del 30%. El Sistema de Tracción-Frenado del elemento MP-68 requiere de un mantenimiento correctivo semanal que representa tiempo del personal y si llega a requerir cambio de piezas, estas piezas ya son obsoletas y se tienen que solicitar en pedidos especiales lo cual representa un costo mayor para el STC.

Para solucionar la problemática de operar un sistema de tracción altamente ineficiente con costos altos tanto de consumo de energía como de procesos y tiempos de mantenimiento se tiene como objetivo desarrollar una propuesta para mejorar el Sistema de Tracción-Frenado existente basado en motores de inducción con una eficiencia mayor al 90% accionados por electrónica de potencia y con la capacidad de incorporar sistemas de recuperación de energía.

Para alcanzar el objetivo de esta tesis se desarrollaron tres capítulos:

En el primer capítulo se realizó un estudio acerca del STC METRO describiendo la conformación de los trenes, el funcionamiento del carro motriz neumático y del carro férreo, el parque vehicular del STC METRO. Además se realizó un análisis los motores series de CC y los motores asíncronos que conforman los diferentes sistemas de Tracción-Frenado, la sensibilidad en la carga nula, así como la característica principal de par-velocidad. También se analizan los diferentes métodos de control de la velocidad en la máquina serie de CC y la máquina asíncrona de CA

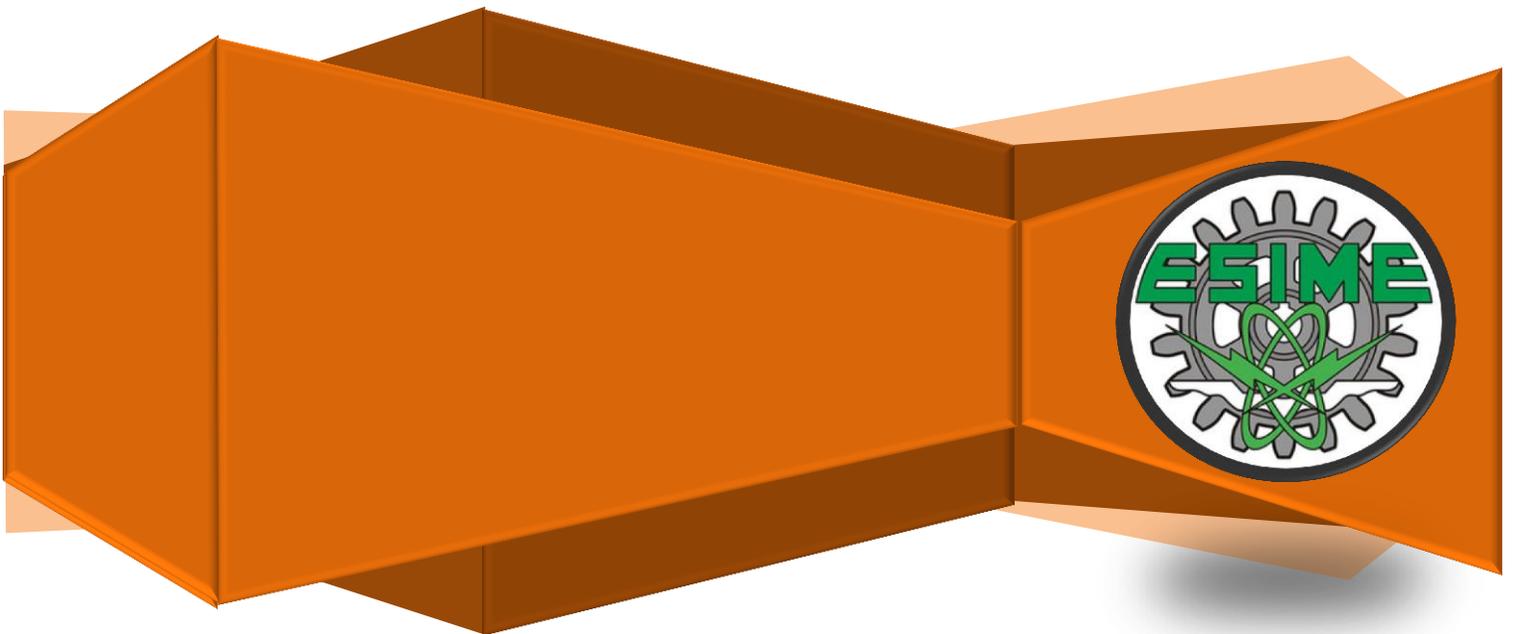
En el segundo capítulo se describe el funcionamiento del sistema de Tracción-Frenado tipo JH y CHOPPER a través del análisis de los elementos MP-68 y MP82, en donde se muestran los diagramas de control y su descripción de cada Sistema de Tracción-Frenado. Además se muestran características de los elementos MP-68 y MP-82

En el tercer capítulo se muestra un análisis de los Sistemas de Tracción-Frenado de tecnología asíncrona, además se citan los requerimientos del STC para elaborar la mejora del Sistema de Tracción-Frenado del elemento MP-68. Se presenta el desarrollo de la propuesta para la mejora describiendo las características electromecánicas de los nuevos motores de inducción para la tracción mediante cálculos, la selección de los nuevos motores inducción de tracción a través de catálogo y la selección del accionador electrónico basado en transistores bipolares de puerta aislada (IGBT, del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor) a través de cálculos y catálogos. Por último se plantea el presupuesto aproximado de la propuesta.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas a través del desarrollo de la tesis.

CAPÍTULO 1

SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO



CAPÍTULO 1- SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO.

1.1 GENERALIDADES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO.

1.1.1 Conformación de un tren del metro

El Sistema de Transporte Colectivo conforma sus trenes de la siguiente forma: Cada tren también llamado convoy puede estar compuesto por uno, dos o tres elementos. Cada elemento, está compuesto por dos carros motrices (es decir, que tienen tracción propia) y un carro remolque(es decir sin tracción propia).

La mayoría de los convoyes del STC están formados por tres elementos (Figura 1.1), nueve carros: seis motrices (entre todos arrastran al convoy), los trenes restantes son remolques.



- M:** Representa a los carros motrices equipados con cabina de conducción y con tracción propia.
- N:** Representa a los carros motrices con tracción propia y sin cabina de conducción.
- R:** Representa a los carros remolques.
- PR:** Representa el carro remolque central con sistema de pilotaje automático.

Figura 1. 1 Convoy de rodadura neumática de 3 elementos STC METRO

Por otra parte los convoyes de dos elementos, seis carros (Figura 1.2), tienen cuatro carros motrices y dos remolques. Esta formación puede aumentarse a nueve carros, dependiendo de la demanda de transporte [3].



Figura 1. 2 Convoy de rodadura neumática de 2 elementos STC METRO.

Los trenes que son de rodadura de acero (figura 1.3), tipo ferroviario (se denominan férreos, ya que no cuentan con llantas o neumáticos) están integrados cada uno por seis carros, de los cuales 4 son motrices, 2 remolques y de igual forma que los convoyes de rodadura neumática, uno de ellos está equipado con el sistema de pilotaje automático.



Figura 1. 3 Convoy férreo de 6 carros del STC METRO

En los trenes férreos la alimentación es por catenaria con 750 VCD (en forma similar a los trolebuses, por medio de un cable de cobre o aluminio, soportado con aisladores) y la toma de alimentación es por medio de un mecanismo de pantógrafo, con un patín de rozamiento de carbón. Las ruedas metálicas, en acero forjado, realizan la misma función de guiado y transmiten los esfuerzos de tracción-frenado.

1.1.2 Cuerpo del carro.

Al cuerpo del carro donde viajan los pasajeros, se le llama caja (Figura 1.4). La caja de los carros se encuentra sobre dos carretillas portadoras llamadas boguies. En el caso de los carros motrices, cada boguie está equipado con dos motores de tracción -un total de cuatro por cada carro motriz-, los boguies de los carros remolque carecen de motor. Los carros motrices son alimentados a través de la barra guía, de 750 V, mediante las escobillas, situadas entre las dos ruedas de cada boguie [5].

En la parte inferior las cajas de los carros motrices, entre los boguies, están colocados los siguientes equipos que regulan el funcionamiento de los motores de tracción:

1. El compresor, que produce el aire a presión para el frenado neumático y el cierre de puertas.
2. El motogenerador, que genera corriente alterna de 250 V, destinada al alumbrado de los carros. El compresor y el motogenerador trabajan con la corriente de 750 V, proporcionada por la motriz N adyacente.

3. El banco de baterías, que generan corriente de tensión baja (72 V), para los circuitos de mando del tren.
4. En el remolque que ocupa la posición intermedia se encuentra instalado el captor del pilotaje automático.

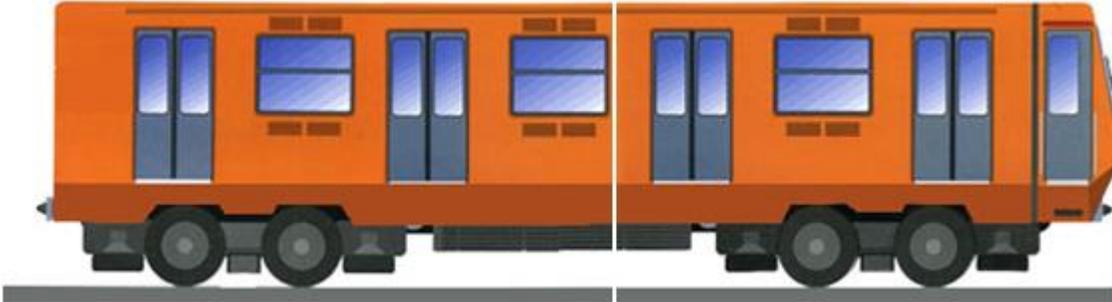


Figura 1. 4 Carro de rodadura neumática

1.1.3. La vía

El tren sobre neumáticos utiliza una vía formada por tres pares de perfiles de acero paralelos entre sí. Estos reciben un nombre según su función, los cuales son la pista de rodamiento, la vía de seguridad y la barra guía.

1.1.3.1 Pista de Rodamiento

La pista de rodamiento está formada por dos viguetas “H” de 140 mm de peralte, con patines de 230 mm y 18 m de longitud de acero estructural ASTM A-36, sobre los que se apoyan las llantas neumáticas de carga. Su peso es de 68.334 kg por metro lineal, soldados entre sí por el procedimiento aluminotérmico y fijadas a los durmientes.

Las longitudes de los tramos soldados varían entre 36 m y 108 m (dos a seis tramos de 18 metros), según el tipo de implantación de la vía. La pista de rodamiento es la vía de circulación y soporte del material rodante con rodadura neumática, y sirve también para señalización, ya que forma parte de ésta [8].

En la figura 1.5 se muestra un corte de sección transversal de un perfil de la pista de rodamiento y todas sus partes.

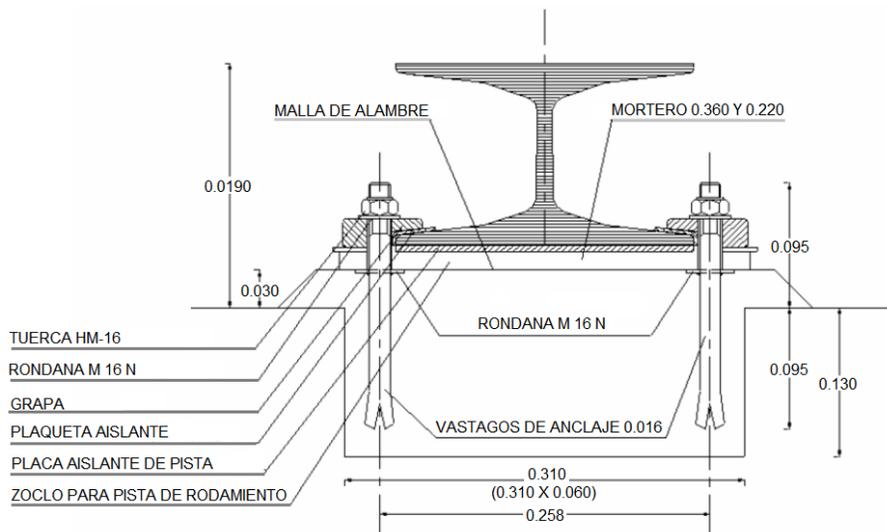


Figura 1. 5 Perfil de acero de la pista de rodamiento [8]

1.1.3.2 Vía de Seguridad

La vía de seguridad se compone de dos perfiles metálicos laminados de geometría especial, y están constituidos por tramos de 18 m. soldados entre sí por medio del procedimiento aluminotérmico, y se encuentran fijos a los durmientes. Al igual que los tramos de pista de rodamiento, las longitudes de los tramos soldados varían de 36 m. a 108 m, según el tipo de implantación de vía. La parte superior del riel se denomina “hongo”, la parte intermedia “alma” y la parte inferior “patín”.

Normalmente se utilizan dos tipos de riel: 80 ASCE (80 libras por yarda, igual a 39.807 kilogramos por metro), y 100 RE (100 libras por yarda, igual a 50.391 kilogramos por metro). En tramos de vía normal, en terminales y talleres, el riel utilizado es el 80 ASCE. En cambio, en los aparatos de vía sólo se utiliza el riel 100 RE, para absorber las diferencias de alturas del riel 80 ASCE con las piezas moldeadas de altura superior. La unión de ambos tipos de rieles se realiza por medio de un riel de enlace mixto 80/100, emplanchuelado del lado del aparato de vía y soldado del lado de la vía normal. El riel 100 RE requiere de un maquinado especial en los durmientes que lo soportan [8].

Sobre la vía de seguridad, se apoyan las ruedas metálicas adicionales en caso de baja de presión en una rueda portadora (como se le llama a las ruedas neumáticas). También, a través de estos rieles, se verifica el regreso de la energía de tracción, circulación de los vehículos de mantenimiento y funcionamiento de la señalización. La sección del perfil de la vía de seguridad se observa en la figura 1.6.

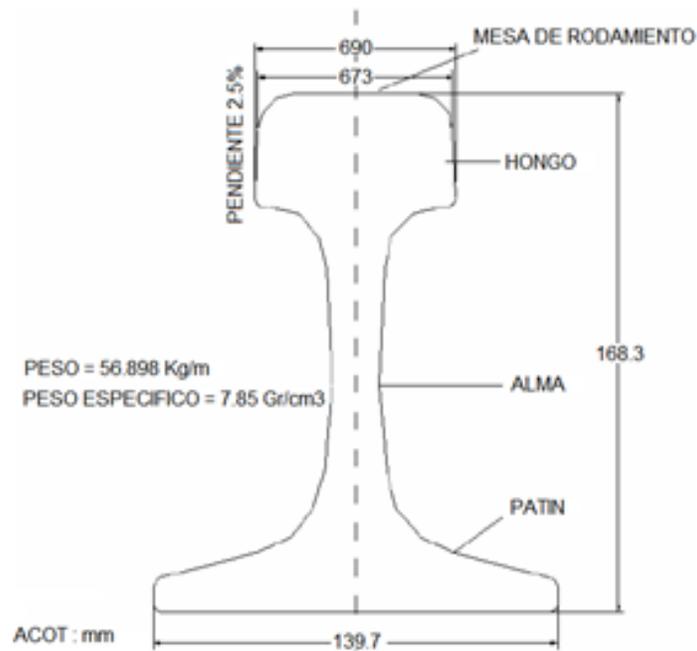


Figura 1. 6 Perfil utilizado para las vías de seguridad [8]

1.1.3.3 Barra Guía

La barra guía está formada por dos ángulos con sección de 10.16 cm por 15.24 cm y espesor de 2.22 cm (7/8”), ubicados cada uno, a los lados de la pista, en donde se apoyan las llantas neumáticas horizontales de menor diámetro que las de carga, formando parte de la carretilla y que guían a los trenes en su recorrido normal. Los ángulos mencionados también sirven como conductores de la energía de tracción, y sobre ellos, está colocado el tapiz, una cinta conductora de ondas de alta frecuencia para el sistema de pilotaje automático de los trenes.

Las pistas y rieles se apoyan y fijan por medio de tirafondos a durmientes (que pueden ser de varios tipos), separados 75 cm en tramos de vía común en tangente, y éstos a su vez, sobre una cama de balasto. Los soportes del ángulo guía son de dos tipos de material: de poliéster y metálicos, aislados en la parte superior por vidrio; los primeros se emplean en los tramos y los segundos, para los tramos de estación y zona de maniobras.

1.1.3.4 Durmientes

Los durmientes son los elementos de madera o concreto que se disponen horizontalmente sobre el balasto en dirección transversal al eje de la vía, sobre los que se colocan y fijan los rieles, y constituyen a través de la fijación, el elemento de unión entre el riel y el balasto, formando el armado de la estructura de la vía.

El durmiente tiene los siguientes objetivos:

- a) Servir de soporte a los perfiles (riel, pista de rodamiento y barra guía), fijando y asegurando la posición del riel en lo referente al ancho de las vías férreas e inclinación (de 1/20).
- b) Recibir las cargas verticales y horizontales transmitidas por los rieles y repartirlas sobre el balasto a través de su superficie de apoyo.
- c) Mantener la estabilidad de la vía en el plano horizontal (longitudinal y transversalmente) y en el vertical, frente a los esfuerzos estáticos procedentes del propio peso y las variaciones de temperatura, así como frente a los esfuerzos dinámicos generados al paso de los trenes.
- d) Mantener siempre que sea posible por sí mismo y sin ayuda de elementos específicos incorporados a la fijación, el aislamiento eléctrico entre las dos filas del riel cuando la línea está dotada de circuitos de señalización.
- e) El durmiente deberá ofrecer características aislantes con objeto de evitar conexiones eléctricas no deseables

1.1.4 Funcionamiento del carro motriz neumático y del carro motriz férreo

1.1.4.1 Motriz neumático

Cada boguie (Figura 1.7), consta de dos ejes, en cuyos extremos están fijas dos llantas portadoras neumáticas infladas con nitrógeno comprimido, que quedan perpendiculares a la vía, teniendo por función transportar al tren sobre la pista de rodamiento. Por dentro del boguie y montada sobre el mismo eje de cada una de las llantas portadoras, existe una rueda de seguridad de acero que, en caso de que una llanta portadora se quede sin nitrógeno por algún suceso, la rueda de seguridad hace contacto con un riel de seguridad paralelo a la pista de rodamiento para los neumáticos y sostiene el peso del carro, asegurando además su permanencia dentro de las vías. En condiciones normales, la rueda de seguridad no hace contacto con el riel [5].

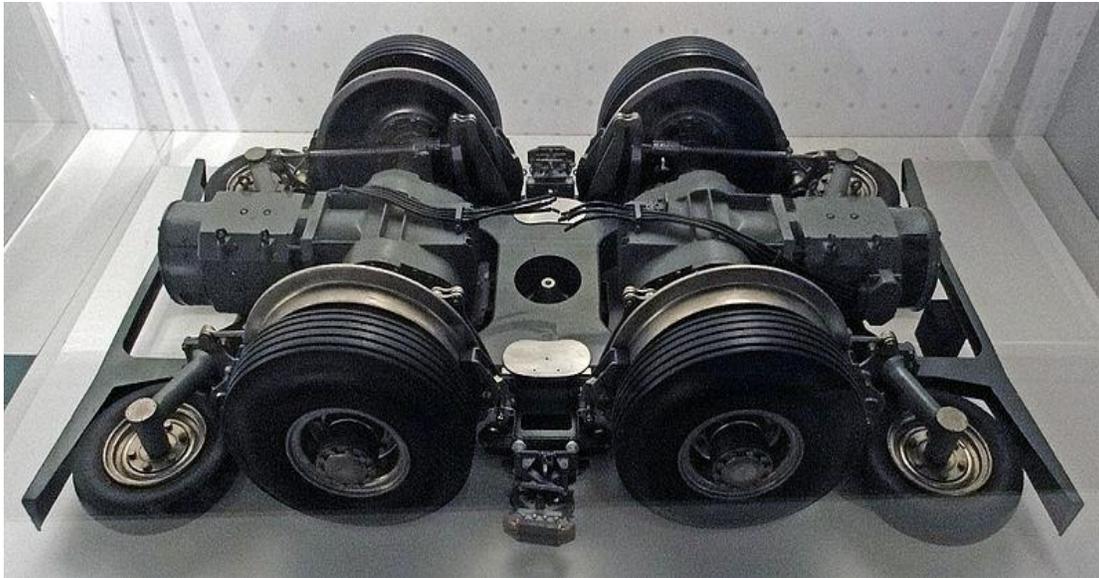


Figura 1. 7 Bogue motriz neumática de un tren MP-68 [12]

El bogie cuenta además con cuatro ruedas de guía, más pequeñas, que giran en un plano perpendicular al de las portadoras y están fijadas en los brazos de las extremidades del chasis del bogie. Estas ruedas se apoyan sobre la barra guía y ayudan a mantener el carro en el centro del carril de rodamiento, amortiguando el vaivén en las laterales del bogie. Todo lo anterior se aprecia en las figuras 1.8 y 1.9.

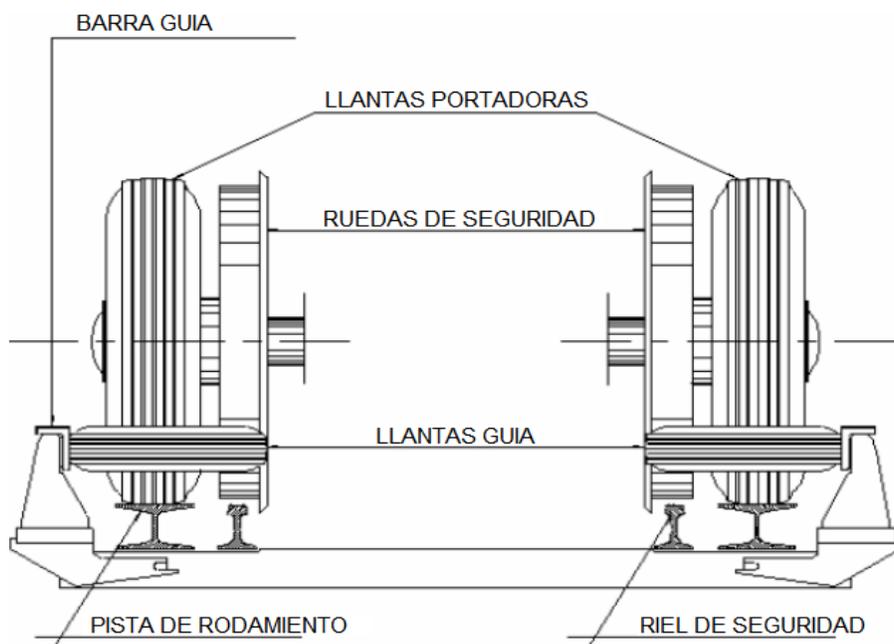


Figura 1. 8 Conjunto de ruedas en una carretilla en condiciones normales de operación [8]

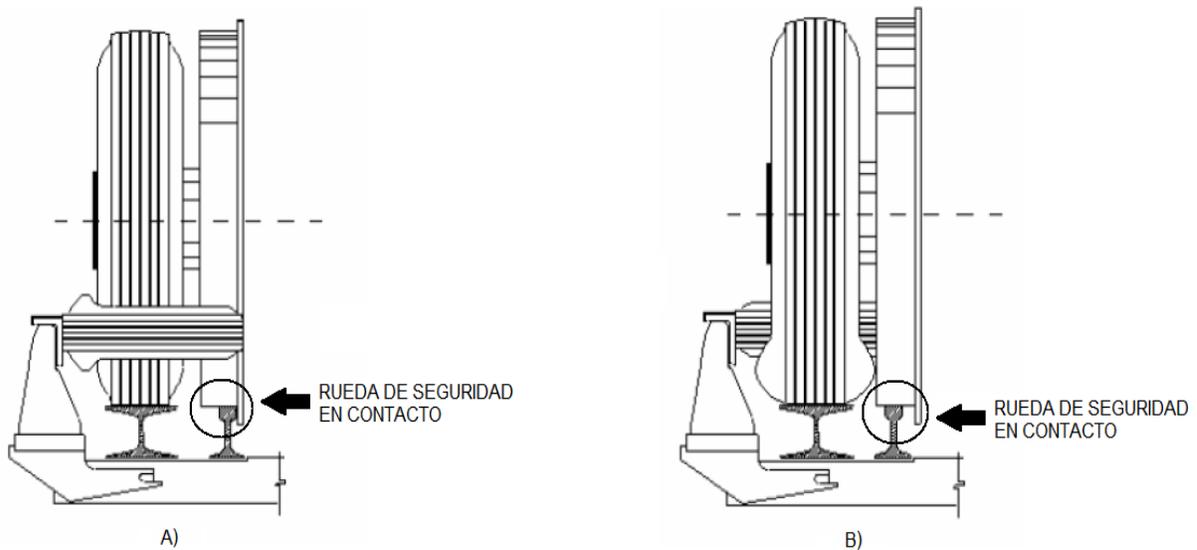


Figura 1. 9 Operación de la rueda de seguridad con una rueda desinflada (izquierda) y una rueda portadora desinflada (derecha) [8]

1.1.4.2 Motriz Férreo

Cada carro Férreo (Figura 1.10) está soportado por dos boguies tipo férreo, cada uno consta de dos ejes en cuyos extremos se encuentran fijadas dos ruedas metálicas, mismas que ruedan sobre rieles metálicos de tipo ferroviario, las ruedas además de soportar la carga del vehículo, sirven para el guiado de los trenes así como para su desplazamiento.

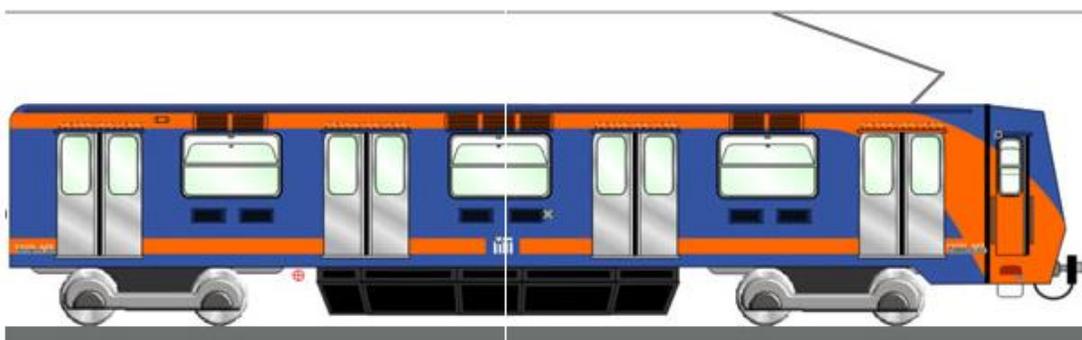


Figura 1. 10 Carro de rodadura férrea

La carretilla tiene un sistema de frenos de disco en cada eje, en ambas caras del disco actúan las guarniciones de frenado que funciona a base de aire comprimido.

La alimentación de los carros motrices se efectúa a través del pantógrafo, equipo montado en la parte superior de los carros que tiene movimiento ascendente y descendente, el cual se mantiene en contacto durante el movimiento de los trenes con el hilo de contacto de la catenaria compuesta, se trata de un sistema de alimentación, cuya función es proporcionar energía eléctrica a trenes en movimiento, se encuentra conformada por 7 hilos sujetos a péndulos y arneses que permiten su fijación a postes a lo largo de la Línea [5].

1.1.5 Parque vehicular

Para que el usuario pueda trasladarse a los distintos puntos de destino del Distrito Federal y zona metropolitana, el Sistema de Transporte Colectivo tiene un parque vehicular de 355 convoyes, de los cuales 291 son de 9 carros y 31 de 6, en ambos casos de rodadura neumática, así como 33 de rodadura férrea de 6 carros, 39 carros sin formación (están en reserva o en proceso de conversión de M a N) lo que hace un total de 3 042 carros [7].

El parque vehicular (mostrado en la tabla 1.1) está integrado por 13 modelos, 2 de ellos férreos y el resto neumáticos. Se distinguen 2 tipos de tecnología en su fabricación: el 30% cuenta con sistema de tracción-frenado del tipo electromecánico JH (árbol de levas) y el resto cuenta con un sistema de tracción-frenado con semiconductores y control electrónico, lo que permite aumentar la fiabilidad y reducir los costos de operación y mantenimiento, debido a que tienen mayor eficiencia en la recuperación de energía durante la etapa de frenado eléctrico [7].

1.2 MOTOR SERIE DE CORRIENTE CONTINUA

Los motores utilizados para la tracción en sistemas JH y Chopper son de corriente continua tipo serie. Este tipo de motor debe su nombre al hecho de que su devanado de campo, formado de pocas espiras de grueso calibre, está conectado en serie con la armadura, lo cual significa que fluye una corriente común a través de ambos devanados. Lo que suceda a la corriente de armadura a causa del impulso de una carga se “refleja” automáticamente en los devanados de campo. El resultado es un motor serie que tiene una característica momento de torsión-velocidad con una caída brusca.

Tabla 1. 1 Parque vehicular del STC METRO [7].

MODELOS NO. SERIE	PROCEDENCIA	TIPO	CONSTRUCTORA	CARACTERISTICAS
MP-68R93	Francesa	JH	Bombardier	Rodadura neumática y control Electromecánico.
MP-68R96	Francesa	JH	Bombardier	Rodadura neumática y control electromecánico
NM-73 A	Mexicana	JH	Concarril	Rodadura neumática y control electromecánico
NM-73 B	Mexicana	JHR	Concarril	Rodadura neumática y control electromecánicas
NM-79	Mexicana	Chopper	Concarril	Rodadura neumática y control electrónico
NC-82	Canadiense	Chopper	Alsthom	Rodadura neumática y control electrónico
MP-82	Francesa	Chopper	Bombardier	Rodadura neumática y control electrónico
NM-83 A	Mexicana	Chopper	Concarril	Rodadura neumática y control electrónico
NM-83 B	Mexicana	Chopper	Concarril	Rodadura neumática y control electrónico
FM-86	Mexicana	Chopper	Concarril	Rodadura férrea, tracción frenado de corriente directa
NE-92	Española	Chopper	CAF	Rodadura neumática y control electrónico
FM-95A	Mexicana	Asíncrono	Concarril	Rodadura férrea y tracción frenado de corriente alterna
NM-02	Mexicana	Asíncrono	Consorcio Bombardier Transportation y CAF	Rodadura neumática y tracción frenado de corriente alterna

El circuito equivalente de un motor de corriente continua serie puede apreciarse en la figura 1.11. En un motor serie la corriente inducida (I_A), la corriente de campo (I_C) y la corriente de línea (I_L) son lo mismo y analizando el circuito a través de la ley de tensión de Kirchhoff se obtiene que la ecuación para este motor es [10]:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (1. 1)$$

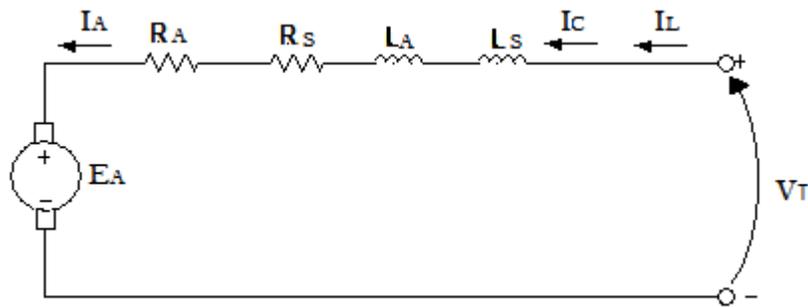
De donde

V_T , Tensión aplicada al motor cc serie, V

E_A , Fuerza contra electromotriz, V

I_A , Corriente inducida, A

R_S , Resistencia de campo, Ω



L_A Inductancia de armadura (H)

I_C Corriente de campo (A)

R_A Resistencia de armadura (Ω)

I_L Corriente de linea

L_S Inductancia de campo (H)

Figura 1. 11 Circuito equivalente de un motor de cc serie [10]

En el caso de existir rizado en los valores instantáneos de las corrientes y tensiones en el circuito equivalente de la figura 1.11, el término de la caída de tensión en los inductores de la armadura y de campo no aparece en la ecuación (1.1) ya que se utilizan valores promedio, y considerando que en un periodo la energía neta demandada en los inductores es cero, entonces la caída de tensión promedio sería cero.

En esta máquina el momento inducido (τ_e) y la tensión de armadura (E_A) están dados por las siguientes ecuaciones [10]:

$$E_A = K\phi\omega \quad (1.2)$$

$$\tau_e = K\phi I_A \quad (1.3)$$

De donde

τ_e , Par inducido en la máquina, N.m

K , Constante que depende de la construcción de la máquina

ϕ , Flujo inducido en la armadura, Weber

ω , Velocidad angular, rad/s

El flujo en la máquina es directamente proporcional a la corriente del inducido (al menos hasta cuando se sature el hierro). Por tanto, el flujo puede determinarse por la ecuación (1.4).

$$\phi = cI_A \quad (1.4)$$

De donde
c, es una constante de proporcionalidad.

Sustituyendo la ecuación (1.4) en (1.3) se tiene que el momento o par inducido en la máquina está dado por:

$$\tau_e = KcI_A^2 \quad (1.5)$$

El momento de torsión en el motor es proporcional al cuadrado de la corriente en el inducido. Como resultado de esta relación, se puede observar que el motor serie tiene un mayor momento de torsión por intensidad de corriente que cualquier otro motor de CC y esta es una de las razones por la cual es utilizado en los sistemas de tracción JH y Chopper del STC METRO, ya que se requiere de momentos de torsión muy altos.

Por otra parte si se sustituye la ecuación (1.2) en (1.1) se tiene que:

$$V_T = K\phi\omega + I_A(R_A + R_S) \quad (1.6)$$

A partir de esta ecuación se puede obtener la velocidad angular ω del motor de CC serie:

$$\omega = \frac{V_T - I_A(R_A + R_S)}{K\phi} \quad (1.7)$$

O también a partir de la ecuación (1.5), la corriente inducida puede expresarse como:

$$I_A = \sqrt{\frac{\tau_e}{Kc}} \quad (1.8)$$

Y al sustituir las ecuaciones (1.2) y (1.8) en la ecuación (1.1) se tiene que:

$$V_T = K\phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_e}{Kc}}(R_A + R_S) \quad (1.9)$$

Si el flujo puede eliminarse en esta expresión, esto relacionará directamente el momento de un motor con su velocidad. Para eliminar el flujo es necesario despejar I_A de la ecuación (1.4), obteniéndose:

$$I_A = \frac{\phi}{c} \quad (1.10)$$

Y por lo tanto la ecuación de momento inducido puede expresarse como:

$$\tau_e = Kc \left(\frac{\phi}{c}\right)^2 \quad (1.11)$$

$$\tau_e = \frac{K}{c} \phi^2 \quad (1.12)$$

Por lo tanto el flujo puede escribirse como:

$$\phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_e} \quad (1.13)$$

Y al sustituir la ecuación (1.13) en la (1.9) y despejar la velocidad se tiene que:

$$V_T = K \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_e} \omega + \sqrt{\frac{\tau_e}{Kc}}(R_A + R_S)$$

$$\sqrt{\tau_e} \sqrt{Kc} \omega = V_T - \frac{R_A + R_S}{\sqrt{Kc}} \sqrt{\tau_e}$$

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{\tau_e} \sqrt{Kc}} - \frac{R_A + R_S}{Kc}$$

Y la relación del momento resultante es:

$$\omega = \left(\frac{V_T}{\sqrt{\tau_e}} * \frac{1}{\sqrt{Kc}} \right) - \frac{R_A + R_S}{Kc} \quad (1.14)$$

Obsérvese en la ecuación (1.14) que en un motor CC serie no saturado la velocidad varia como el reciproco de la raíz cuadrada del momento. Esta característica ideal de momento de torsión-velocidad aparece en forma de gráfica en la figura 1.12, de la cual se deduce que en el motor serie el par y la velocidad son inversamente proporcionales. Esto significa que, cuando el par es elevado, la velocidad es baja; y cuando el par es bajo, la velocidad es alta siendo esta otra de las razones por la cual el motor serie de corriente continua ha sido muy empleado para los sistemas de tracción eléctrica, aplicándose con este tipo de motores a sistemas de control como el JH o el Chopper.

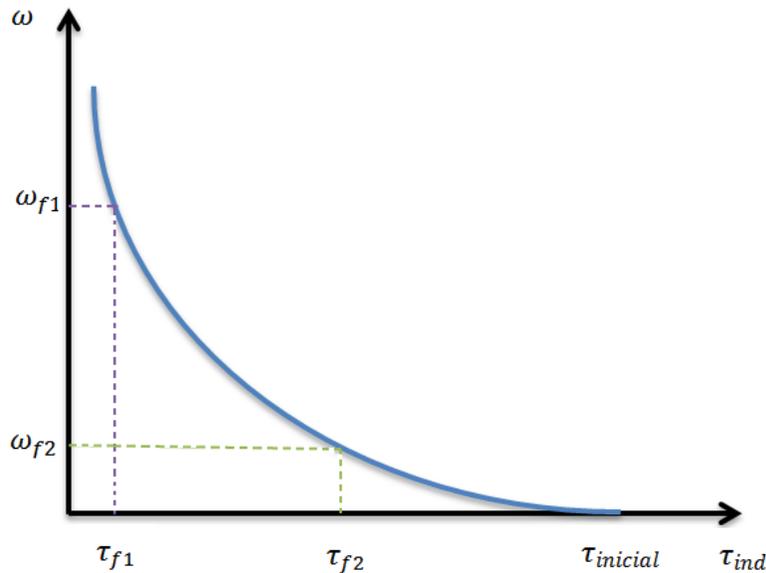


Figura 1.12 Característica momento de torsión –velocidad de un motor serie [10]

1.2.1 Sensibilidad a Carga Nula

La característica par-velocidad muestra una tendencia a incrementar excesivamente si se le pone en marcha en vacío o se le deja funcionar sin carga. Esto se debe a que cuando el motor no tiene carga, se necesita un par (τ_e) muy bajo para hacer que gire la armadura. En consecuencia y de acuerdo a la ecuación (1.14), la velocidad aumenta notablemente, provocando un incremento de la fuerza contra electromotriz (E_A) según se observa en la ecuación (1.2). El incremento de E_A genera una corriente de armadura menor (ecuación (1.15)), la cual produce un par menor (ecuación (1.5)).

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A + R_S} \quad (1.15)$$

Cuando la máquina opera a una velocidad mayor, el flujo de campo magnético también se reduce debido a la reducción de la corriente de armadura y la velocidad se tiene que incrementar aún más para mantener el valor de la E_A a nivel de punto de equilibrio obtenido a partir de la ecuación (1.5) y (1.15). Por lo tanto, la armadura gira a una mayor velocidad y produce aún más E_A . El incremento de la velocidad puede alcanzar valores excesivos que puede provocar la destrucción de la armadura debido a la fuerza centrífuga alcanzada en muy altas velocidades, combinándose el calentamiento por fricción y la fuerza centrífuga.

1.2.2 Método de control de la velocidad en la máquina serie de CC

Los métodos de control de la velocidad de la máquina serie de C.C utilizados en los sistemas de Tracción-Frenado eléctrico del METRO son dos:

- Variación de tensión.
- Variación en la resistencia del circuito de armadura.

Para explicar el principio de operación de ambos métodos, se escribe de nuevo la ecuación (1.14) añadiendo el término de resistencia externa:

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{\tau_e}} \frac{1}{\sqrt{KC}} - \frac{R_A + R_S + R_{ext}}{KC} \quad (1.16)$$

De donde

R_{ext} , Resistencia externa conectada en el circuito de la armadura

1.2.2.1 Control variando tensión

El control de la velocidad variando tensión se realiza con una resistencia externa cero, para el ajuste de tensión se utiliza un convertidor CC-CC conocido en el METRO como circuito CHOPPER. La tecnología chopper es la más usada en el METRO y data de finales de los años 70, y son trenes fabricados por la empresa japonesa MITSUBISHI y francesa ALSTOM, los trenes de esta última empresa fueron remodelados por la misma empresa y se sustituyó la tecnología a tiristores con conmutación forzada por una tecnología chopper con transistores de compuerta aislada (IGBT).

En la figura 1.13 se muestra las características de par-velocidad y la de variar la velocidad del vehículo eléctrico con una máquina serie de CC al disminuir la tensión de armadura V_T (ver ecuación 1.16).

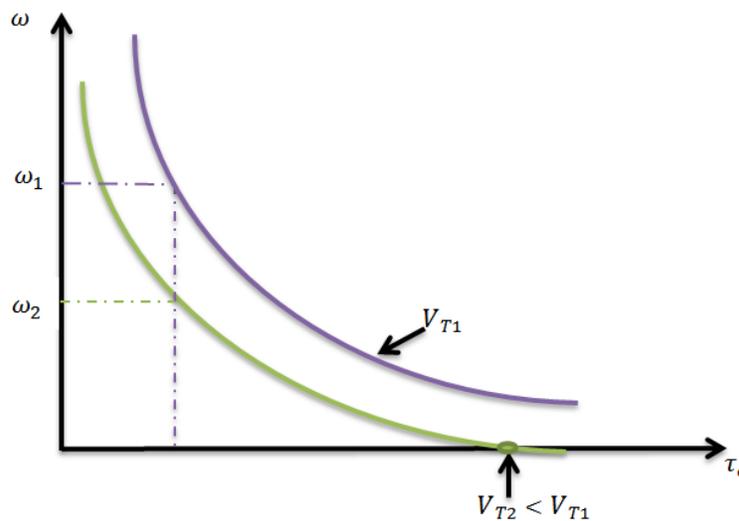


Figura 1. 13 Curva característica momento de torsión –velocidad de un motor serie variando la tensión

1.2.2.2 Control variando la resistencia de armadura y debilitando el campo magnético

La máquina de CC de tipo serie tiene un devanado de campo serie con la armadura. Este devanado es de alambre grueso y pocas vueltas debido a que debe conducir la corriente de armadura que es de valor mayor que la corriente del devanado de campo de derivación que requiere de un mayor número de vueltas para generar el flujo principal de la máquina. Debido a lo anterior existen diferencias físicas entre estos dos tipos de máquinas de CC.

En la figura 1.14 se muestra el diagrama del accionamiento de velocidad variable de una máquina serie de tracción, como la que emplea en el METRO, para variar la velocidad utilizando resistores.

Las resistencias R_{x-a} y R_{x-b} están representadas en la figura 1.13 por resistencias variables, pero en realidad son un grupo de resistencias controladas por un sistema de contactores. El propósito del arreglo de resistencias es poder controlar la corriente de armadura I_A y la corriente en el devanado de campo I_S , así como la velocidad de la máquina.

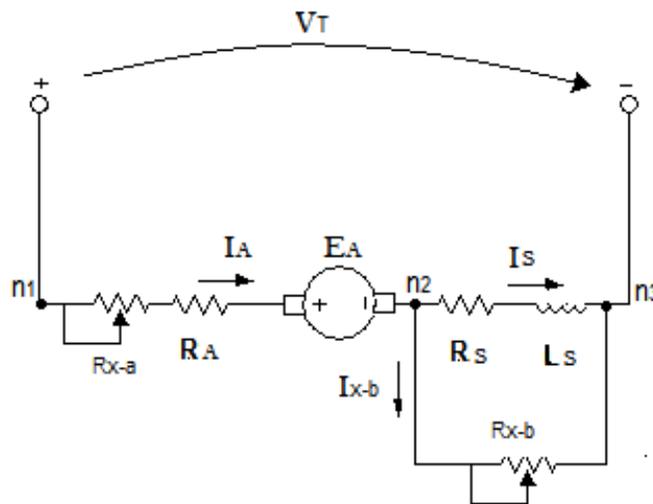


Figura 1. 14 Diagrama de control de un motor CC serie de tracción

De acuerdo con la ecuación (1.16) si se mantiene constante la tensión V_T (ver figura 1.14) y se varía la resistencia externa, se obtiene las características par-velocidad como se muestra en la figura 1.15 para el intervalo de velocidad desde cero hasta 1 en por unidad (p.u), el valor de la velocidad base ω_b de la máquina pudiera ser su velocidad nominal ω_{nom} .

Se debe resaltar que la ecuación (1.16) fue deducida a partir de que la corriente de armadura y la corriente de campo son iguales, por lo tanto esta ecuación no es válida cuando hay una derivación de la corriente de campo a través de las resistencias R_{x-b} de la figura 1.14. En la figura 1.15 se muestra el valor de par nominal de la máquina, este valor está relacionado con la corriente nominal por la ecuación (1.8).

Para lograr velocidades superiores a la ($\omega^m/\omega_b > 1$), es necesario debilitar el campo magnético mediante resistencias en derivación R_{x-b} donde se deriva parte de la corriente de armadura. En este caso la corriente de campo se hace menor que la corriente de armadura, reduciéndose el valor del flujo magnético (ecuación (1.4)).

Por lo tanto la ecuación (1.4) y (1.16) no son válidas, ya que a partir de la ecuación (1.7) se observa que, para una tensión de armadura constante y una resistencia externa cero, si el flujo magnético disminuye, entonces incrementaría la velocidad de la máquina de tracción, y por lo tanto se incrementa la velocidad del tren.

En esta región de operación, con campo magnético debilitado, las velocidades de la máquina de tracción son superiores a la velocidad nominal (1 en p.u.) por lo tanto, la máquina de tracción no soporta la corriente nominal ya que está trabajando con velocidades superiores a la nominal y la conmutación en el colector del rotor decae a velocidades altas debido a que su capacidad de conmutación disminuye.

Teniéndose que reducir la densidad de corriente en el colector, si a esto se le añade la reducción del flujo magnético debido a que la corriente de campo es menor que la corriente de armadura, la capacidad de generación de par electromagnético de la máquina decae considerablemente para velocidades mayores a 1 en valores en p.u.

Debido a lo anterior, en la ecuación (1.3) se observa que el par electromagnético desarrollado por la maquina tiende a caer debido a la reducción de la corriente de armadura por la conmutación y por la reducción del flujo magnético.

En la figura 1.15 se observa las características que se obtienen para un campo debilitado en altas velocidades de la máquina de tracción; obsérvese como las características están limitadas hasta un valor máximo de par. Los puntos 1, 2, 3 de la figura 1.15.

En la figura 1.16 se muestran las características de par-potencia en función de la velocidad de la máquina de tracción, además se observa como el par inducido comienza a decrecer en el punto en que la potencia alcanza su valor nominal (1pu). En este valor de la velocidad, la potencia de salida de la máquina alcanza su valor nominal y se mantiene constante cuando la velocidad aumenta debido a que los incrementos de velocidad se ven compensados por los decrementos en el valor del par, cabe mencionar que los motores de tracción están diseñados para poder soportar hasta tres veces su velocidad nominal.

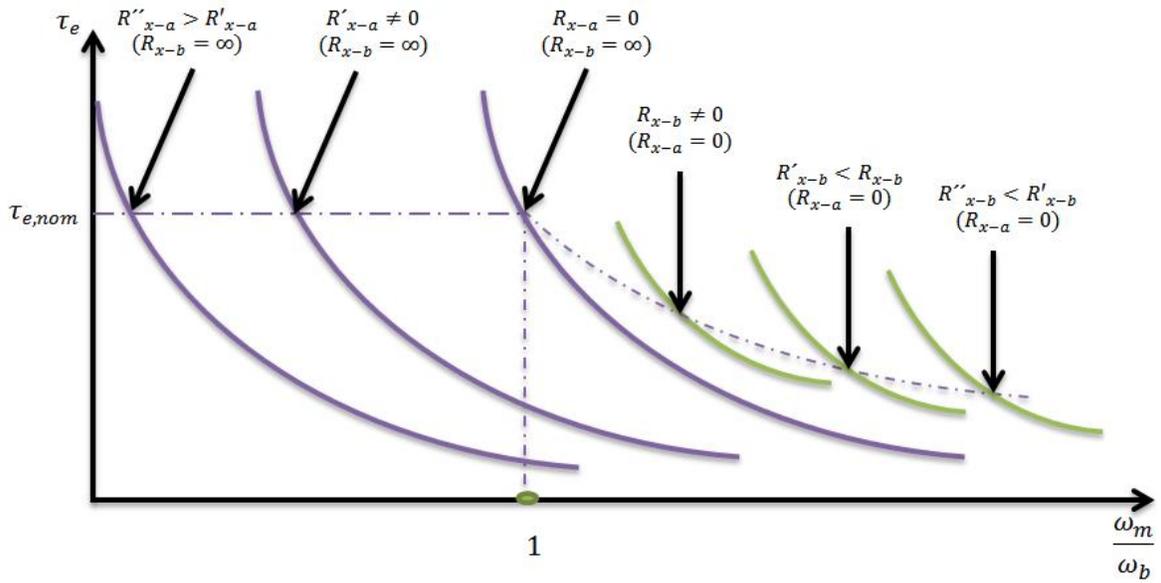


Figura 1. 15 Características par- velocidad

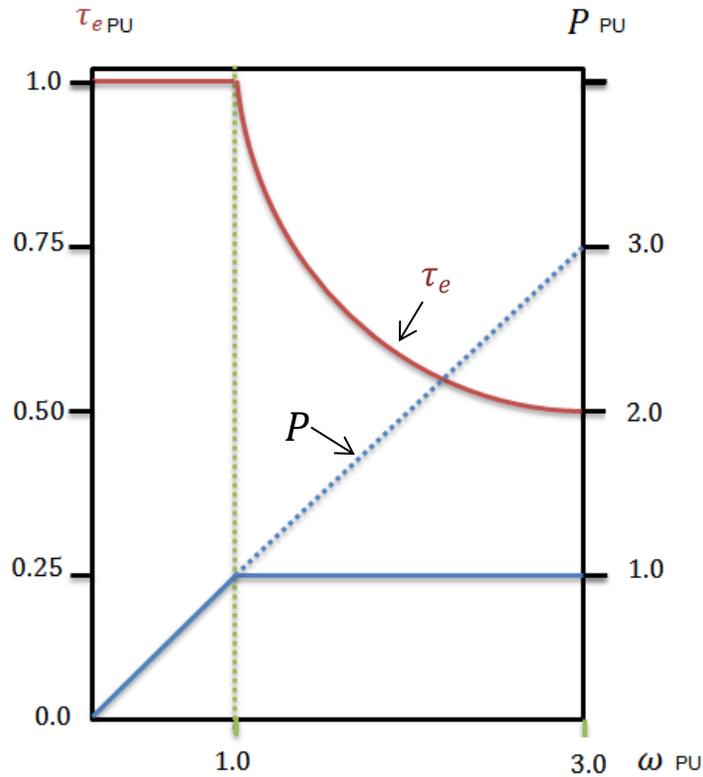


Figura 1. 16 Relación entre la Potencia (P), el momento (τ_e) y la velocidad (ω) en por unidad

1.2.3 Configuración de la máquina CC para un sistema de frenado

El frenado eléctrico de los trenes MP-68 en el METRO es de tipo dinámico (reostático según se le llama en el METRO), donde la energía del frenado se disipa en resistores. El frenado regenerativo ocurre cuando la energía cinética de los trenes se convierte en la máquina serie en energía eléctrica, y esta se inyecta al bus de CC, este tipo de frenado no se utiliza en el MP-68.

En la figura 1.17 se muestran las dos topologías diferentes del accionamiento de la máquina serie durante la tracción y el frenado eléctrico reostático. El paso de una topología a otra se realiza mediante la apertura y cierre de contactos, como se podrá observar más adelante en el plano general del accionamiento eléctrico de la máquina serie de los trenes MP-68.

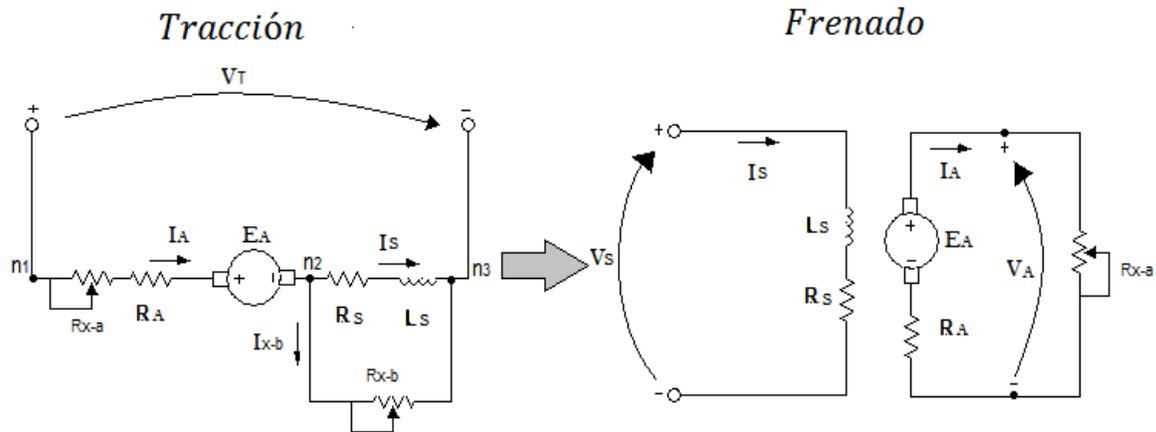
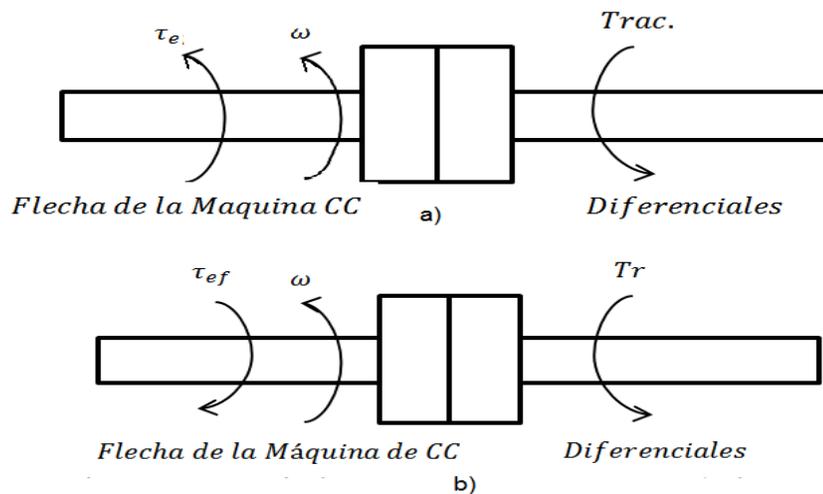


Figura 1. 17 Cambio de configuración de la máquina CC

En la figura 1.18 se muestra los pares de torsión que se producen en el punto de acoplamiento entre el eje de la máquina de tracción y el diferencial mecánico localizado en los boguies del tren, también se muestra el sentido de la velocidad que se asume. El par mecánico de carga es la sumatoria de todos los pares de fricción en el tren referidos al eje de la máquina. Aquí se incluyen los pares de fricción de todas las partes en movimiento del mecanismo de tracción del tren, es decir:

- La fricción de las llantas con la vía.
- La fricción con el aire en los túneles.
- El par que se debe generar cuando la vía tiene algún ángulo de inclinación con la horizontal durante un ascenso o descenso, es decir la componente de la fuerza de gravedad la cual puede ser a favor del movimiento o en contra.



- τ_e Par electromagnético de tracción desarrollado por la máquina serie.
- ω Velocidad angular desarrollada por la máquina serie.
- τ_r Par mecánico de carga.

Figura 1. 18 Acoplamiento mecánico y fuerzas que interactúan

Con las figuras 1.17 y 1.18 se pueden comprender como se realiza el proceso de frenado reostático en los trenes MP-68. Cuando el motor se encuentra traccionando, se encuentra conectado el accionamiento eléctrico mostrado en el lado izquierdo de la figura 1.17, obsérvese que la corriente de la armadura (I_A) entra por el punto positivo de la fuerza contraelectromotriz (E_A), lo cual indica que la máquina está trabajando como un motor de tracción. El par que desarrolla la máquina es el par de tracción T_e , el cual tiene el mismo sentido que la velocidad de rotación ω (ver figura 1.18a), el par de fricción T_L tiene sentido contrario.

Para comenzar el frenado eléctrico reostático del tren, se debe reconectar el accionamiento eléctrico y pasar a la topología mostrada del lado derecho de la figura 1.17, se observa que después de la reconexión, el devanado de campo (L_s , R_s) es alimentado con una fuente independiente V_s con una corriente de campo constante I_s y con un flujo magnético constante, durante todo el proceso del frenado, lo cual permite generar altos valores de par de frenado T_{ef} .

Siguiendo con el análisis del lado derecho de la figura 1.17 se observa que la corriente de armadura I_A varió su sentido, ahora la corriente sale por el punto positivo la fuerza contraelectromotriz E_A , trabajando la máquina como generador. De lo anterior se concluye que la energía cinética del tren se convierte en energía eléctrica en el convertidor electro-mecánico (generador serie) y esta se disipa en los resistores de frenado R_{x-a} que son los mismos que se utilizaron para controlar la velocidad durante la tracción.

Al variar el sentido de la corriente de la armadura y la dirección del flujo magnético sin cambio, la dirección del par electromagnético desarrollado por la máquina también cambia de sentido (ver ecuación (1.3)), mostrándose en la figura 1.18b como T_{ef} . En esta figura se observa que el par de frenado se opone a la velocidad ω y se suma al par del tren T_L , el cual ayuda a que el tren frene.

A medida que el tren frena y su velocidad disminuye, el valor de la fuerza electromotriz E_A disminuye (ecuación (1.2)) y por lo tanto la corriente I_A y el par de frenado T_{ef} también disminuye para evitar que el par de frenado disminuya se van eliminando resistores, R_{x-a} de tal forma que la corriente I_A durante el frenado permanezca lo más constante posible y la desaceleración se realice aproximadamente a un valor constante.

1.3 MÁQUINAS DE INDUCCIÓN Ó ASÍNCRONAS

Las máquinas de inducción o asíncronas son máquinas de corriente alterna (CA) que pueden trabajar como generador (durante el frenado regenerativo en mecanismos de tracción), o como motores durante la tracción. La conversión de energía en estas máquinas se puede realizar de eléctrica a mecánica en el caso de trabajo como motor de tracción o como mecánica a eléctrica en el caso del frenado regenerativo.

El campo magnético rotatorio en el entrehierro de una máquina de inducción es generado por el devanado trifásico del estator al ser alimentado por un sistema trifásico de corrientes desfasadas 120° en el tiempo. El devanado trifásico tiene sus fases a 120° en el espacio. Al cortar las líneas de fuerza magnética del flujo rotatorio los conductores del rotor, se generan corrientes inducidas en el rotor. El rotor puede estar formado por barras (Jaula de ardilla) o conductores formando un devanado trifásico (rotor devanado).

En cualquiera de los dos casos, las corrientes al interactuar con el flujo magnético rotatorio generan un par de torsión, que al tener el mismo sentido de la velocidad de giro del rotor será un par de tracción, sin embargo si el sentido es contrario será un par de frenado.

1.3.1. Concepto de deslizamiento y velocidad síncrona.

En los motores de inducción dos términos se usan comúnmente para definir el movimiento relativo del rotor y de los campos magnéticos. Uno es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor [11].

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r \quad (1.17)$$

De donde

ω_{sl} , Velocidad de deslizamiento, rad/s

ω_e , Velocidad síncrona, rad/s

ω_r , Velocidad eléctrica del rotor, rad/s

El otro término usado para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, el cual está dado por [11]:

$$S = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{N_e - N_r}{N_e} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_e} \quad (1.18)$$

De donde

S Deslizamiento

N_e Velocidad síncrona, r/min

N_r Velocidad eléctrica del rotor, r/min

De las cuales se tiene que la velocidad síncrona para una máquina de dos polos es igual a [11]:

$$\omega_e = 2\pi f_e \quad (1.19)$$

Y también puede ser expresada para una máquina de P polos como [11]:

$$N_e = \frac{120f_e}{P} \quad (1.20)$$

De donde

f_e Frecuencia de alimentación del motor

P Número de polos

Además se tiene que la velocidad mecánica del motor (ω_m) es igual a [11]:

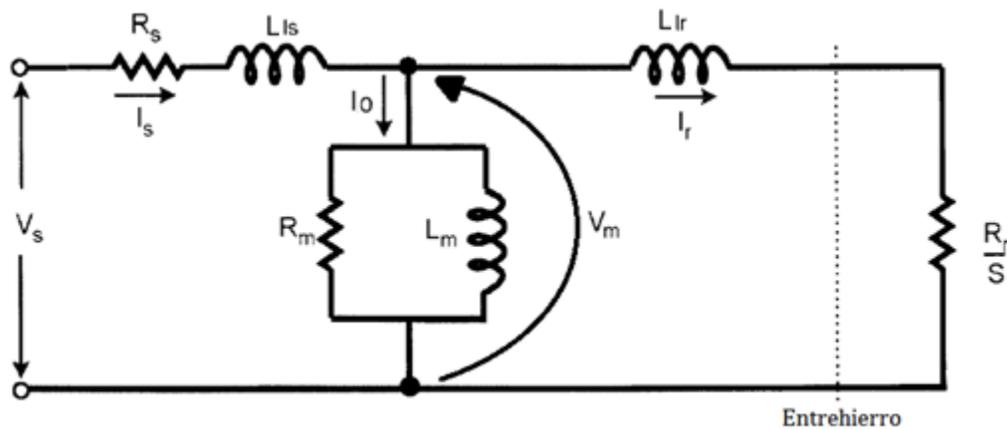
$$\omega_m = \frac{2\omega_r}{P} \quad (1.21)$$

Y a partir de esta ecuación se deduce que la velocidad eléctrica y mecánica del rotor son iguales si y solo si la máquina es de dos polos.

1.3.2 Circuito equivalente de la máquina de inducción.

Una máquina de inducción (MI) depende para su funcionamiento de que el circuito del estator induzca tensiones y corrientes en el circuito del rotor (acción transformadora). Puesto que la inducción de tensiones y corrientes en el circuito del rotor de una MI es, esencialmente una operación de transformación; el circuito equivalente de una MI terminará por ser muy similar al circuito equivalente de un transformador.

El circuito equivalente por fase de la MI se muestra en la figura 1.19



V_s Tensión de fase del estator	L_{ls} Reactancia de dispersión del estator
I_s Corriente de fase del estator	L_m Inductancia de magnetización
I_r Corriente de fase del rotor	R_m Resistencia de las pérdidas de núcleo
I_0 Corriente de magnetización	L_{lr} Inductancia de dispersión del rotor
R_s Resistencia del estator	V_m Fuerza electromotriz

Figura 1. 19 Circuito equivalente de una máquina de inducción respecto al estator [11]

La figura 1.19 muestra el circuito equivalente por fase de un motor de inducción. Si este circuito se examina cuidadosamente, puede emplearse para deducir las ecuaciones de potencia y momento de torsión que controlan el funcionamiento del motor de inducción.

La corriente de entrada a una fase del estator puede hallarse dividiendo la tensión de entrada entre la impedancia equivalente total.

$$I_s = \frac{V_s}{Z_{EQ}} \quad (1.22)$$

Por lo tanto las pérdidas en el cobre del estator, en el núcleo y en el entrehierro pueden calcularse. Las pérdidas en el cobre del estator (P_{es}) están dadas por:

$$P_{es} = 3I_s^2 R_s \quad (1.23)$$

Las pérdidas en el núcleo (P_{ec}) pueden ser por histéresis y por corrientes parasitas en el estator y se obtienen por:

$$P_{ec} = 3 \frac{V_m}{R_m} \quad (1.24)$$

La potencia que permanece en este punto se traslada al rotor de la máquina, a través del entrehierro entre el estator y el rotor. Esta potencia se llama potencia de entrehierro de la máquina (P_g) y está dada por:

$$P_g = 3I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (1.25)$$

Después de que la potencia se traslada al rotor, una parte de ellas se pierde en el cobre del rotor, siendo estas las pérdidas en el rotor (P_{er}) y están dadas por:

$$P_{er} = 3I_r^2 R_r \quad (1.26)$$

Por lo tanto la potencia desarrollada en un motor de inducción es la potencia que es entregada en el entrehierro menos las pérdidas en el rotor (P_{er}) y es igual a:

$$P_0 = P_g - P_{er} \quad (1.27)$$

Finalmente la potencia que se entrega en el eje de la máquina (P_{sh}) es igual a la potencia desarrollada menos las pérdidas por rozamiento y por fricción con el aire (P_{fw})

$$P_{sh} = P_0 - P_{fw} \quad (1.28)$$

Para el estudio de las máquinas de inducción como motores de tracción se puede utilizar el circuito equivalente aproximado, en el cual no se considera la resistencia R_m y el circuito queda de acuerdo a la figura 1.20 [11].

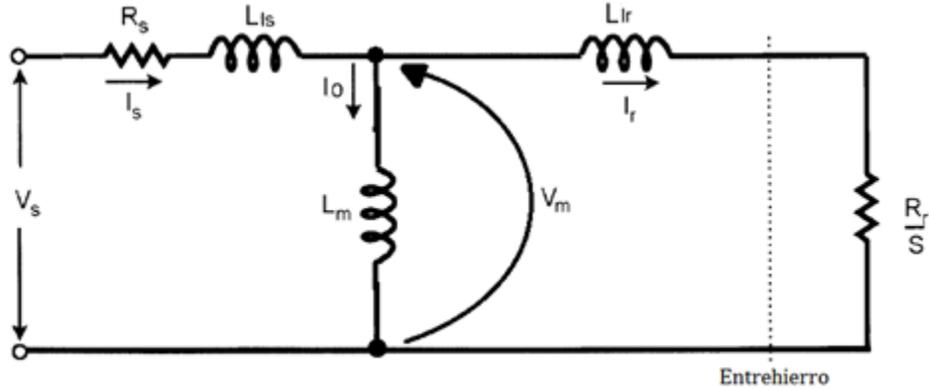


Figura 1. 20 Circuito equivalente aproximado sin considerar la R_m

Posteriormente se desplaza la inductancia L_m al principio del circuito, obteniéndose el circuito equivalente aproximado mostrado en la figura 1.21, del cual se procederá a realizar un análisis para determinar las características de la MI como motor de tracción [11].

Para la máquina de inducción se tiene que la potencia desarrollada está dada también por el producto del par desarrollado en la maquina (T_e) y la velocidad angular de la máquina (ω_m) [11].

$$P_0 = T_e \omega_m \tag{1. 29}$$

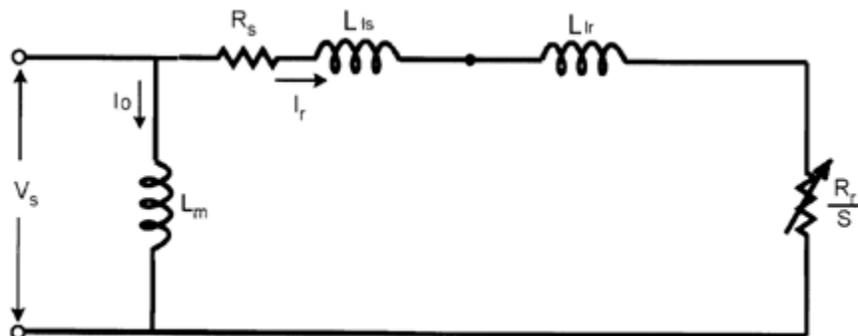


Figura 1. 21 Circuito equivalente aproximado por fase [11].

Despejando de la ecuación (1.29) el par desarrollado en la máquina se obtiene que:

$$T_e = \frac{P_0}{\omega_m} \quad (1.30)$$

Si se sustituye las ecuaciones (1.25) y (1.26) en la ecuación (1.27) se obtiene que:

$$P_0 = 3I_r^2 R_r \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (1.31)$$

Y sustituyendo la ecuación (1.31) en la (1.29) se obtiene una nueva ecuación de par.

$$T_e = \frac{3}{\omega_m} I_r^2 R_r \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (1.32)$$

Por otra parte si de la ecuación (1.18), donde $S = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}$, se despeja ω_r se tiene que:

$$\omega_r = \omega_e(1-S) \quad (1.33)$$

Posteriormente sustituyendo la ecuación (1.33) en la ecuación (1.21) la velocidad angular de la máquina es igual a:

$$\omega_m = \frac{2}{p} \omega_e(1-S) \quad (1.34)$$

Ahora sí se sustituye la ecuación (1.34) en la ecuación (1.32) se tiene que:

$$T_e = \frac{3}{\frac{2}{p} \omega_e(1-S)} I_r^2 * R_r \left(\frac{1-S}{S} \right) = 3 \frac{P R_r(1-S)}{2 \omega_e(1-S)S} I_r^2$$

$$T_e = 3 \frac{P R_r}{2 S \omega_e} I_r^2 \quad (1.35)$$

Pero la corriente en el rotor I_r esta dada por (ver figura 1.21):

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + R_r/S)^2 + \omega_e^2(L_{ls} + L_{lr})^2}} \quad (1.36)$$

Y sustituyendo la ecuación (1.36) en la ecuación (1.35) se tiene que:

$$T_e = 3 \frac{P R_r}{2 S \omega_e} \left(\frac{V_s}{\sqrt{(R_s + R_r/S)^2 + \omega_e^2(L_{ls} + L_{lr})^2}} \right)^2$$

$$T_e = 3 \frac{P R_r}{2 S \omega_e} \frac{V_s^2}{(R_s + R_r/S)^2 + \omega_e^2(L_{ls} + L_{lr})^2} \quad (1.37)$$

Si se supone que V_s y la frecuencia son constantes se puede obtener la gráfica mostrada en la figura 1.22, donde el valor del par desarrollado está en función de la velocidad y el deslizamiento.

En la figura 1.22 se observa que la máquina de inducción cuenta con tres zonas de trabajo. La primera zona de trabajo es llamada frenado plugging o forzado el cual se da cuando en la máquina existe un deslizamiento mayor a 1, la segunda zona de trabajo es cuando el deslizamiento es menor a uno y la maquina funciona como motor de inducción y la tercera ocurre cuando el deslizamiento en la maquina es menor que cero donde la maquina funciona como generador de inducción.

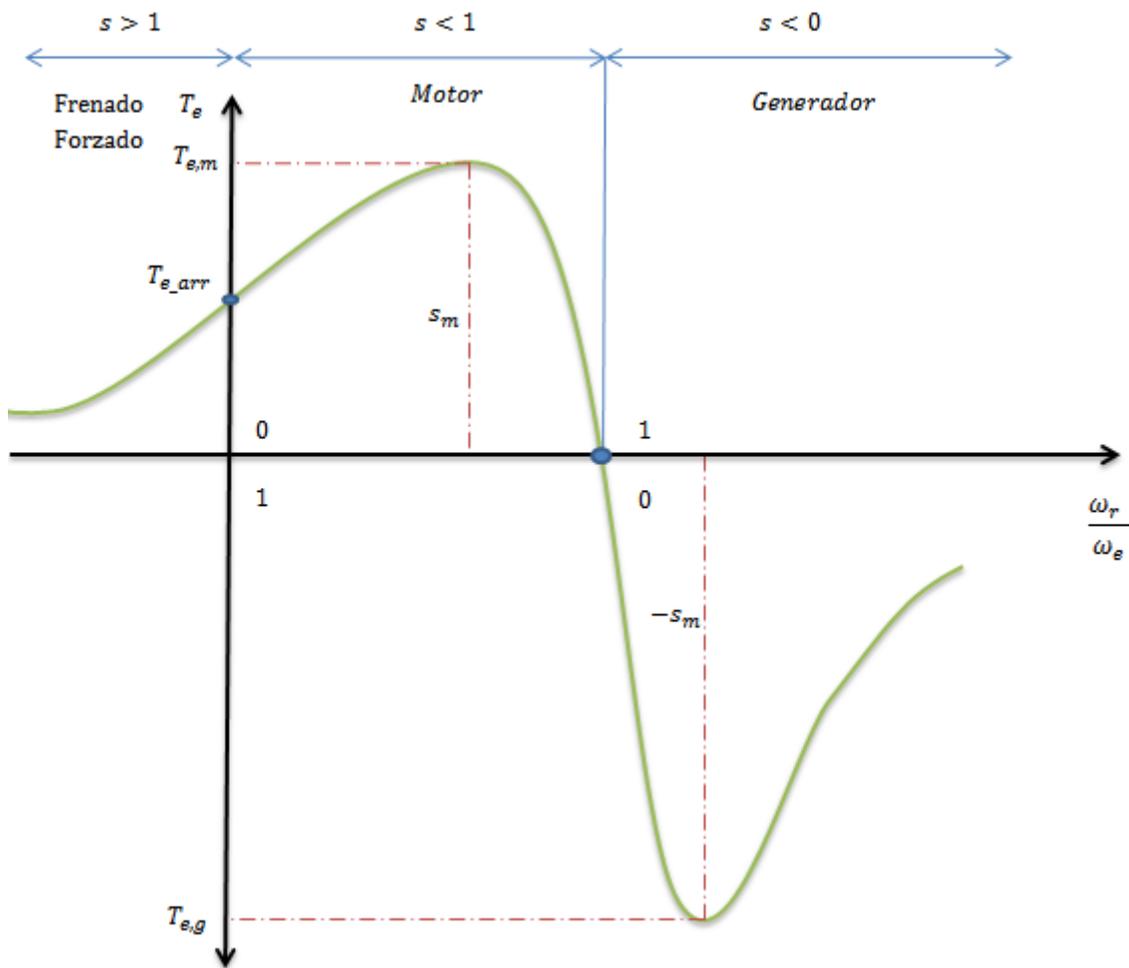
De la figura 1.22 se pueden calcular los valores máximos del par como motor y como generador, para ello se considera que $\frac{dT_e}{dS} = 0$, se obtiene:

$$T_{e,m} = 3 \frac{P R_r}{2 S \omega_e} \frac{V_s^2}{(R_s + R_r/S)^2 + \omega_e^2(L_{ls} + L_{lr})^2} \quad (1.38)$$

$$T_{e,g} = - \left(3 \frac{P R_r}{2 S \omega_e} \frac{V_s^2}{(R_s + R_r/S)^2 + \omega_e^2(L_{ls} + L_{lr})^2} \right) \quad (1.39)$$

Y

$$s_m = \pm \frac{R_r}{\sqrt{(R_s)^2 + \omega_e^2(L_{ls} + L_{lr})^2}} \quad (1.40)$$



- $T_{e,m}$ Par máximo desarrollado cuando la máquina trabaja como motor
- $T_{e,g}$ Par máximo desarrollado cuando la maquina trabaja como generador
- T_{e-arr} Par que se genera en el instante del arranque de la máquina

Figura 1. 22 Curva característica del momento par-velocidad de un motor de inducción, que muestra los límites de funcionamiento extendidos [11]

Para poder simplificar un poco más la ecuación del par se considerara que $R_s = L_{ls} = 0$, lo cual no es irracional para motores integrales (>1HP) particularmente si la velocidad es superior al 10% de referencia ($(\frac{\omega_r}{\omega_e}) > 10\%$). Lo que provoca que la ecuación de par quede de la siguiente forma [11]:

$$T_e = 3 \frac{P R_r}{2 S \omega_e} \frac{V_s^2}{(R_r/S)^2 + \omega_e^2 (L_{lr})^2} \quad (1. 41)$$

Si se despeja ω_{sl} de la ecuación (1.18) se tiene que:

$$\omega_{sl} = S\omega_e \quad (1.42)$$

Tomando en cuenta esto y si se multiplica por

$$\left(\frac{1}{\omega_e^2} \right)$$

Se tiene que:

$$T_e = 3 \frac{P R_r}{2 S \omega_e} \frac{\frac{V_s^2}{\omega_e^2}}{[(R_r/S)^2 + \omega_e^2 (L_{lr})^2] \frac{1}{\omega_e^2}} \quad (1.43)$$

$$T_e = 3 \frac{P R_r}{2 S \omega_e} \frac{V_s^2}{\omega_e^2} \frac{1}{[(R_r/S\omega_e)^2 + (L_{lr})^2]} \quad (1.44)$$

Y si la ecuación (3.28) se multiplica por $\frac{\omega_{sl}^2}{\omega_{sl}^2}$, se obtiene:

$$T_e = 3 \frac{P R_r}{2 \omega_{sl}} \frac{V_s^2}{\omega_e^2} \frac{\omega_{sl}^2}{[(R_r/\omega_{sl})^2 + (L_{lr})^2] \omega_{sl}^2} \quad (1.45)$$

$$T_e = 3 \frac{P}{2} \left(\frac{V_s}{\omega_e} \right)^2 \frac{R_r \omega_{sl}}{(R_r)^2 + (L_{lr})^2 \omega_{sl}^2} \quad (1.46)$$

A partir de esta ecuación se pueden determinar los valores máximos como motor y como generador y a que valores de deslizamiento ocurren estos, también se pueden hacer el análisis de las diferentes operaciones de la máquina de inducción como se verá a continuación. En la figura 1.23 se observa que cambia el sentido de los pares aplicados a la flecha de la máquina de inducción con respecto a cada zona de trabajo. De estas tres zonas de trabajo de la máquina de inducción usada en un sistema de Tracción-Frenado solo interesan las zonas en la que la maquina trabaja como motor, la cual sería utilizada durante la tracción y la de generador que sería utilizada durante el frenado regenerativo.

En la figura 1.23 se observa que cuando la máquina trabaja como motor, se desarrolla un par (T_e) y una velocidad eléctrica del rotor (ω_r) en el mismo sentido, oponiéndose al par de carga (T_r). En estas condiciones el motor tracciona, permitiendo el avance del tren e incluso la aceleración. Cuando la máquina trabaja como generador, la ω_r y el T_e tienen sentidos opuesto y este último se suma al T_r lo que provoca a su vez una oposición a la ω_r provocando el frenado del tren.

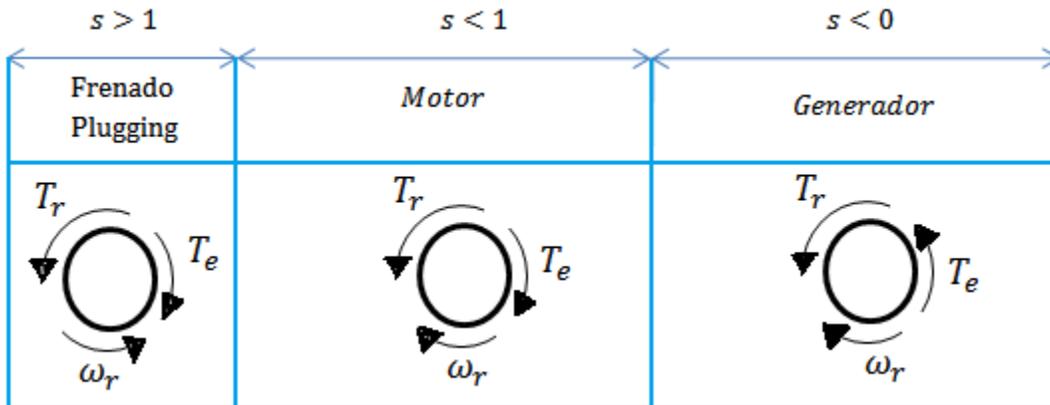


Figura 1. 23 Fuerzas resultantes en el eje o flecha de la máquina de inducción

1.3.3 Operación del motor de inducción a frecuencia variable

De acuerdo a la segunda ley de Newton se tiene que:

$$T_e - T_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.47)$$

Si el resultado de la ecuación (1.47) es cero se tiene una velocidad constante en la máquina, si la diferencia es positiva se tiene una aceleración y si la diferencia es negativa se obtiene una desaceleración o frenado, debido al signo de la derivada.

Si la frecuencia de alimentación (f_e) aumenta en el motor de inducción entonces, aumenta la velocidad síncrona (ω_e) de acuerdo a la ecuación (1.19), lo que a su vez provoca un incremento del deslizamiento conforme a la ecuación (1.18), produciendo un aumento en la corriente (I_r) del rotor como se puede observar de la ecuación (1.38). El incremento de la corriente provoca un aumento en el par de la máquina de acuerdo a la ecuación (1.37) y generando un incremento del valor de T_e en la ecuación (1.47) y por lo tanto $J \frac{d\omega}{dt}$ tendría un signo positivo por lo que provocaría una aceleración.

Sin embargo para que se produzca este incremento en el par y que la máquina acelere, es necesario variar la tensión en el estator en la misma proporción a la variación de la frecuencia.

A partir de la ecuación (1.46) se observa que el cociente $\frac{V_s}{\omega_e}$ debe permanecer constante para que no exista caída del par cuando se incrementa la frecuencia y se varíe ω_e .

1.3.4 Operación del motor de inducción a frecuencia variable y tensión constante

Antes de analizar en detalle esta operación se analiza que ocurre si solamente se varía la frecuencia de alimentación del motor de inducción. La fuerza electromotriz (fem) en una máquina de inducción está expresada de la siguiente forma [10]:

$$V_m = 4.44 f_e \psi_m k_m \quad (1.48)$$

De donde

V_m , Fuerza electromotriz (fem)

ψ_m , Flujo magnético en la máquina de inducción

k_m , Constante que es el factor de devanado

Siendo el flujo magnético en la máquina de inducción igual a (ver figura 1.21) [11]:

$$\psi_m = L_m I_0 = \frac{V_s}{\omega_e} \quad (1.49)$$

De donde

I_0 , Corriente que pasa por la inductancia L_m del circuito equivalente

L_m , Inductancia en el circuito equivalente de la máquina de inducción y es constante, siempre y cuando la máquina no se sature

Al graficar ψ_m vs I_m se obtiene la característica de magnetización de la máquina de inducción que se muestra en la figura 1.24. Las máquinas se diseñan con su punto de operación cerca del punto de saturación cuando trabajan a condiciones nominales, de esta forma se puede aprovechar al máximo el material ferromagnético con que está construido la máquina de inducción, por lo que la frecuencia solamente se puede variar desde la frecuencia nominal hasta valores superiores a la nominal, ya que al disminuir el valor de la f_e , ψ_m aumenta conforme a la ecuación (1.48) llevando a la máquina a la saturación aumentando la corriente I_m considerablemente lo que aumentaría las pérdidas y provocaría daños irreversibles al motor de inducción.

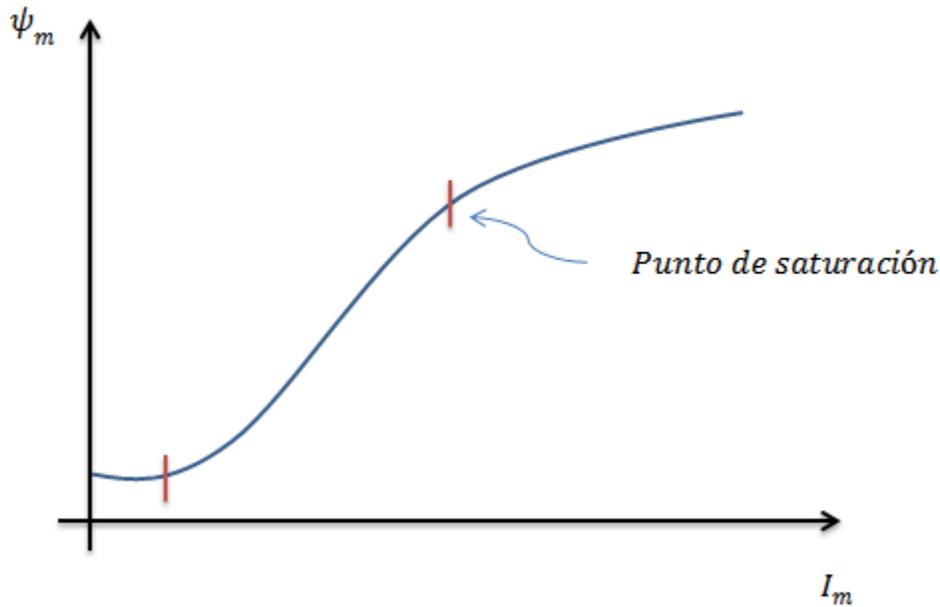


Figura 1. 24 Curva característica de magnetización de la máquina [10]

Ahora al aumentar la frecuencia y teniendo una tensión V_s constante la característica de par-velocidad de la máquina de inducción mostrada se modifica conforme al valor de la frecuencia (cabe mencionar que durante esta etapa solamente se analizara la parte de la curva en que la máquina trabaja como motor de inducción en donde el deslizamiento es menor a uno). El cambio que sufre la curva con respecto al aumento de la frecuencia se muestra en la figura 1.25.

Para calcular el valor del par máximo ($T_{e,m}$), se deriva la ecuación (1.46) en función del valor de la velocidad del deslizamiento (ω_{sl}) y se iguala a cero, de esta forma se calcula el valor del par máximo y del deslizamiento al cual ocurre, obteniéndose:

$$T_{e,m} = \left(\frac{3}{L_{lr}}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{V_s}{\omega_e}\right)^2 \quad (1.50)$$

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_{lr}} \quad (1.51)$$

Si se tiene en aumento que V_s es constante, entonces:

$$T_{e,m} * \omega_e^2 = Constante \quad (1.52)$$

Por lo que al incrementar la frecuencia el valor del par máximo ($T_{e,m}$) decae de la forma mostrada en la figura 1.25. En esta figura ω_b es la velocidad base a la cual se trabaja, normalmente el valor de la velocidad base es igual al valor de ω_e para la frecuencia nominal de la máquina. Esta operación es utilizada en los trenes del STC METRO para velocidades que superan los 30 km/h donde no se requiere de un par alto desarrollado para la máquina de tracción.

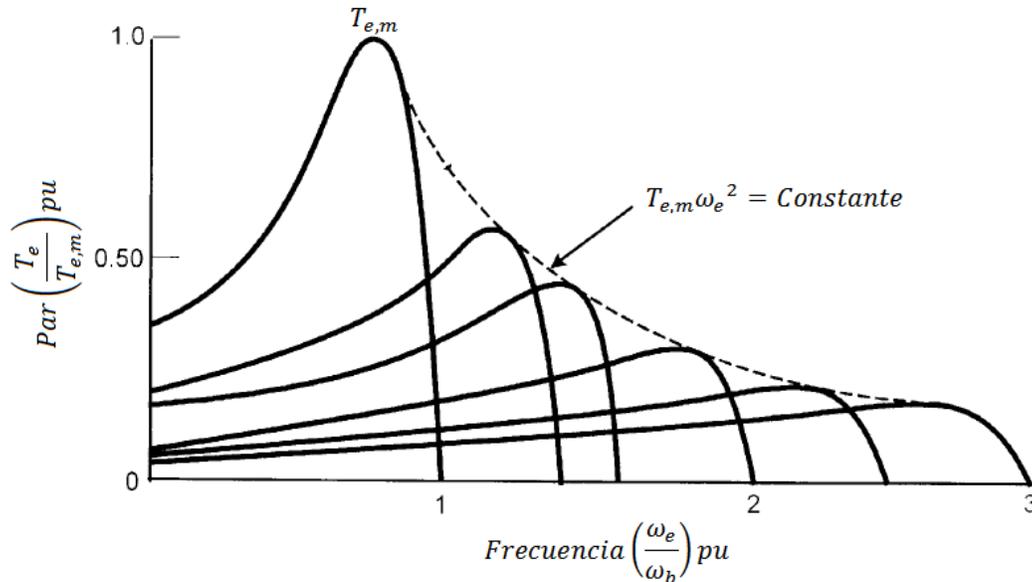


Figura 1. 25 Curvas par-velocidad a frecuencia variable [11]

1.3.5 Operación de la máquina de inducción a tensión y frecuencia variable

La operación de la máquina de inducción a tensión y frecuencia variable es la que se utiliza en los sistemas de Tracción-Frenado de tecnología asíncrona del STC METRO en su operación a bajas velocidades (aproximadamente por debajo de los 30 km/h). Durante la etapa de arranque las máquinas de inducción se comportan como motores de inducción encontrándose en la zona de trabajo con deslizamiento $S < 1$. Durante el arranque y a velocidades bajas ($< 30 \text{ km/h}$) se necesita la mayor cantidad de par que la máquina pueda entregar.

Para poder aumentar la velocidad se comienza a aumentar frecuencia aplicada a la máquina lo que influye directamente en la ecuación (1.19) produciendo un aumento en ω_e y para no disminuir el par nominal de la máquina, que se requiere durante esta primera etapa de aceleración, se aumenta al mismo tiempo la tensión V_s para mantener así el par conforme a la ecuación (1.46). De esta operación se obtiene la familia de curvas mostradas en la figura 1.26.

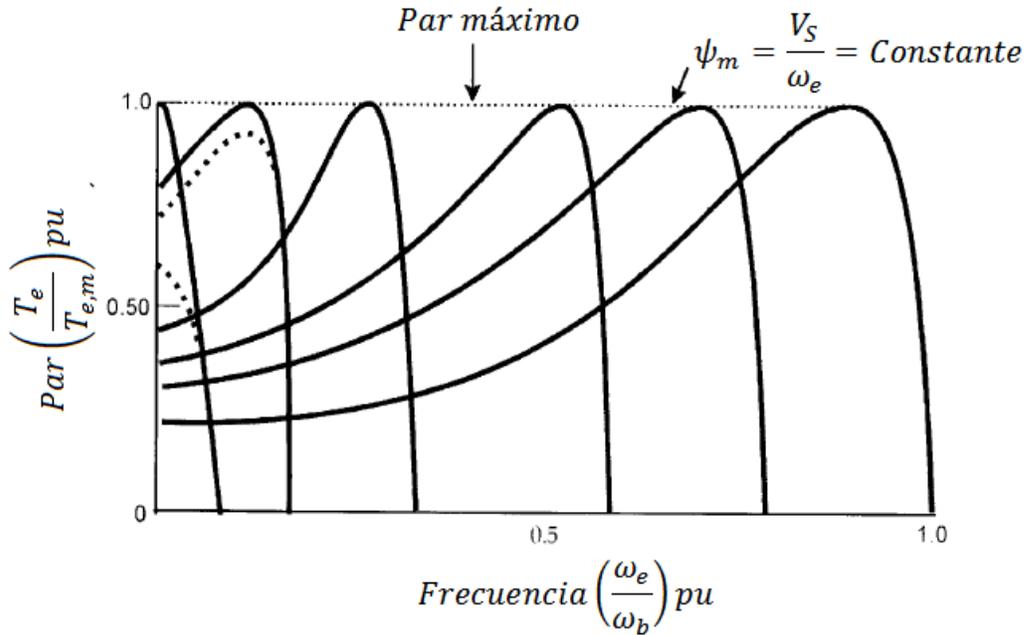


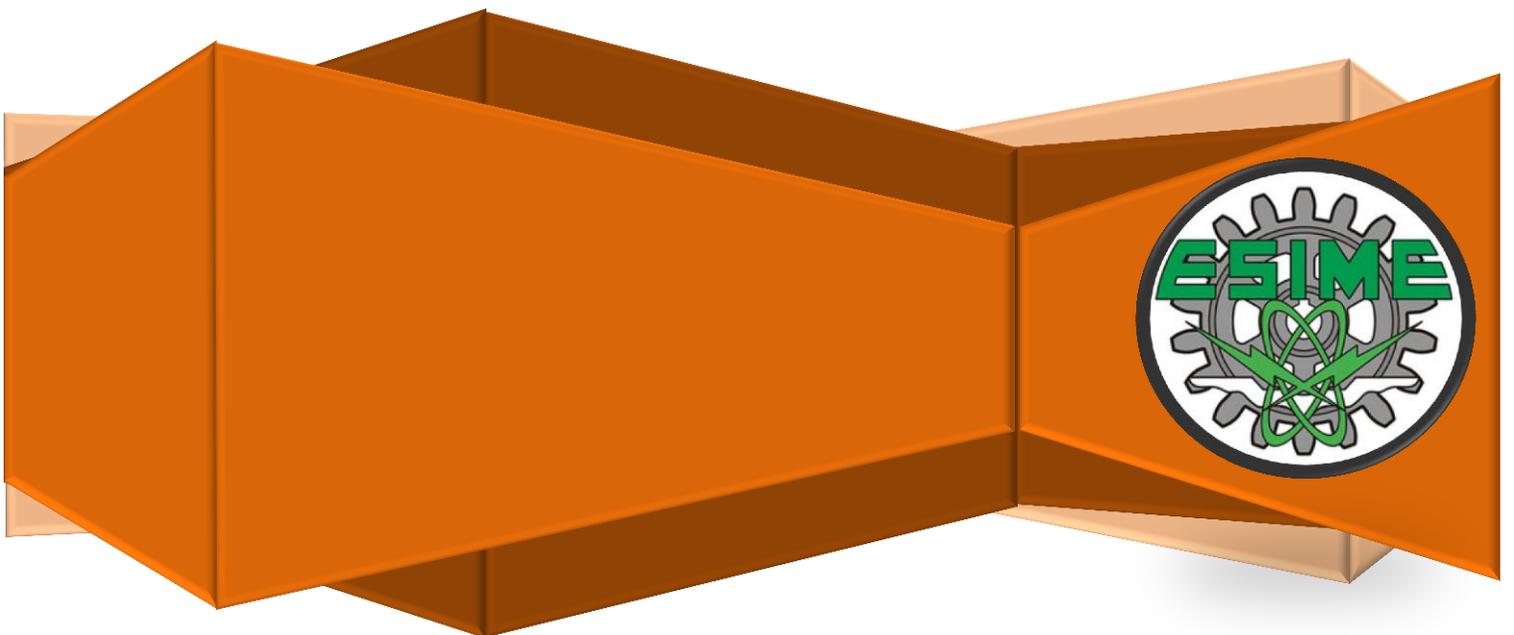
Figura 1. 26 Curvas par velocidad a tensión y frecuencia variable [11]

En la figura 1.26 se observa que conforme aumenta la tensión y la frecuencia (manteniendo así un flujo magnético constante) en la máquina, cuando se encuentra trabajando como motor, es posible tener una aceleración pero sin aumentar ni disminuir el par máximo necesario de la máquina y esto hasta que se llega a la tensión nominal de la máquina. A partir de ese punto la tensión V_s se vuelve constante y solamente la frecuencia sigue aumentando, ya que de seguir aumentando la tensión V_s se pueden dañar los aislamientos de la máquina.

Debido a que el par máximo se mantiene constante desde la velocidad cero hasta la velocidad nominal de la máquina ($0 < S \leq 1$), a esta región se le denomina de par constante, donde el motor tiene la posibilidad de desarrollar el mayor par posible durante la tracción. En esta región de operación del motor de tracción, la velocidad del tren por lo general es menor a 30 km/h donde se requiere la máxima generación de par del motor de tracción.

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN- FRENADO DE LOS ELEMENTOS MP-68 Y MP-82



CAPÍTULO 2- DESCRIPCION DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO DE LOS ELEMENTO MP-68 Y MP-82

2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO DEL ELEMENTO MP-68

Cada tren o convoy del elemento MP-68 puede estar conformado por nueve carros, seis motrices, cuatro de arrastre y uno con pilotaje automático, con una configuración M-R-N-N-PR-N-N-R-M, o por seis carros de los cuales cuatro son motrices, dos son remolques y de igual forma que los convoyes de rodadura neumática de nueve carros, uno de ellos está equipado con el sistema de pilotaje automático, configurados M-R-N-N-PR-M.

Cada elemento MP-68 cuenta con las siguientes datos y características generales.

- Velocidad Máxima: 80 km/h.
- Velocidad Comercial: 36 km/h.
- Aceleración Máxima: 1.33 m/s^2 con $\frac{3}{4}$ de carga.
- Aceleración Máxima: 1.24 m/s^2 con $\frac{4}{4}$ de carga.
- Desaceleración Máxima: 2.00 m/s^2 con $\frac{4}{4}$ de carga.
- Desaceleración Máxima: 1.80 m/s^2 con $\frac{3}{4}$ de carga.
- Tiempo Para Alcanzar la Velocidad Máxima: 62.5 s con $\frac{4}{4}$ de carga [8].

Los carros motrices están equipados cada uno con cuatro motores de tracción de corriente continua tipo serie y los diferenciales encargados de transmitir el torque del motor de tracción al eje de las ruedas son del tipo doble reducción, con una relación de transmisión de $\frac{1}{9.2285}$ [8].

Las características de los motores son:

- Corriente de Arranque: 400 A.
- Tensión de Alimentación: 750 Vcc.
- 152 CP (114 kW a 41% de campo).
- 144 CP (108 kW a 100% de campo).
- Aislamiento Clase H.

El combinador de arranque está formado por un módulo de árboles de levas que consta de un árbol de levas principal que acciona los contactores de acoplamiento, puenteo y eliminación de resistencias de arranque, un inversor de sentido de marcha, y un conmutador de tracción-frenado.

A continuación se presenta una tabla con datos relativos a capacidades, medidas y características generales de los carros MP-68.

Tabla 2. 1 Datos relativos a capacidades, medidas y características generales de los carros MP-68[8]

Concepto	Tipo de Carro			Total Tren de Nueve Carros	Total Tren de Seis Carros
	M	N	R y PR		
Longitud (m)	17.18	16.18	16.18	147.62	99.08
Ancho (m)	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
Altura (m)	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60
Peso Vacío (kg)	27 300	26 400	19 830	219 690	147 060
Capacidad					
Pasajeros Sentados	38	39	39	349	232
Pasajeros de Pie	132	131	131	1 181	788
Total	170	170	170	1 530	1 020
Motores de Tracción	4	4	-	24	16
Escobillas					
Positivas	4	4	0	24	16
Negativas	2	2	0	12	8
De Masa	2	2	4	24	16
Ruedas					
Portadoras	8	8	8	72	48
De Seguridad	8	8	8	72	48
Guía	8	8	8	72	48

2.1.1 Servomotor eléctrico

El sistema tipo JH recibe, bajo el control del autómatas programable, las ordenes de arranque y de frenado dados por el manipulador en la cabina de conducción y conecta los circuitos de potencia según las órdenes recibidas.

El combinador JH es controlado por un servomotor eléctrico, y está compuesto por un control de árboles de levas y de tres conjuntos de árboles de levas montados sobre el mismo eje, los cuales son:

- 1 árbol de levas que acciona los contactores de acoplamiento de puenteo y de eliminación del reóstato (árbol de levas principal).
- 1 inversor de sentido de rotación (inversor).
- 1 conmutador tracción-frenado (conmutador TF).

El control de los árboles de levas realiza la puesta en sitio de éste último sobre las numerosas posiciones necesarias para asegurar las múltiples combinaciones del arranque, de la inversión y del puenteo. El desplazamiento angular de un punto a otro es pequeño, de unos 10° , y es necesario medirlo con precisión. Es realizado por un platillo P provisto de una corona en la cual son talladas tantas ranuras radiales equidistantes como puntos a realizar (35 puntos)

En frente de este platillo está montado el servomotor eléctrico (SME), cuyo árbol lleva un manguito manivela. El botón de la manivela lleva un rodillo D que se ajusta tangencialmente en las ranuras del platillo para moverlo. Por otra parte, acciona una biela E y un segundo rodillo F, que guiado en su movimiento por la tija I articulada en H, penetra también en las ranuras del platillo para enclavarlo. Cuando el servomotor hace una vuelta, el platillo es agarrado por el rodillo motor D, desenclavado por el rodillo de cierre F, activado por un diente, enclavado de nuevo por el rodillo de cierre y por fin abandonado por el rodillo motor, este sistema se muestra en la figura 2.1.

Es el SME que por su movimiento mismo, para el platillo en el cerrojo y fija solo su posición. Esta ausencia de choque es la condición que permite las grandes velocidades de maniobra del árbol de levas. Todo no está, sin embargo, terminado, es necesario parar a su vez el servomotor antes de que entre de nuevo el platillo, pero para esta operación se dispone de una media vuelta muerta, es decir, tanto como de carrera activa, se procede entonces a un frenado progresivo y sin precisión.

El sistema presenta dos características esenciales:

- Instantaneidad de acción. Se dispone de sólo 0.03 segundos para detener el servomotor.
- Par adaptado a la velocidad.

El servomotor es un motor de corriente continua de excitación compuesta. Debido a su bobinado puenteo, esta máquina es un motor cuando se alimenta y un freno cuando se deja de alimentarla. El frenado es instantáneo porque la excitación persiste igualmente que la corriente de frenado en el inductor, y el par es, aproximadamente, proporcional al cuadrado de la velocidad del motor, así pues adaptado a la energía a absorber.

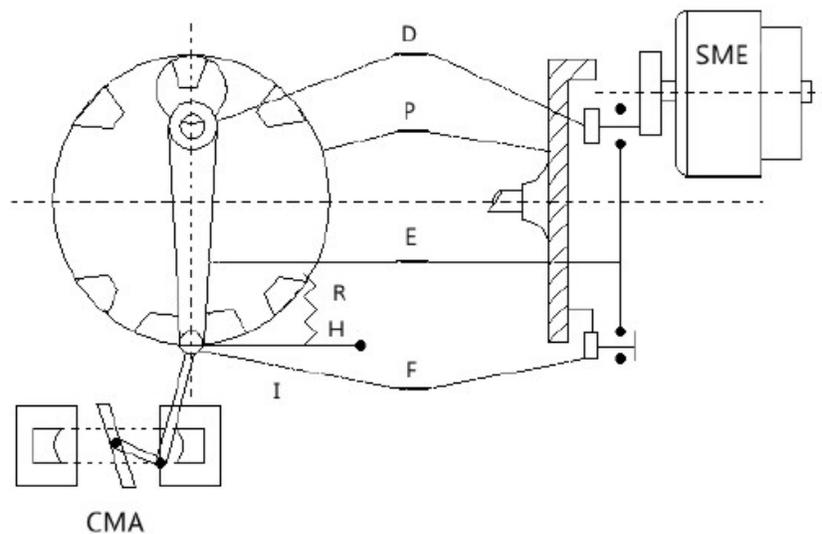


Figura 2. 1 Principio de funcionamiento del JH

La resistencia del circuito inductor determina el frenado para que el servomotor se pare poco más o menos a la mitad de su carrera muerta. Se tiene experimentalmente que este punto de parada no cambia de manera apreciable aunque la velocidad del servomotor se duplique. Para realizar los dos sentidos de marcha (progresión y regresión), se invierte el sentido de paso de la corriente en el inducido del servomotor, los dos inductores siempre recorridos en el mismo sentido por la corriente.

El árbol de levas está constituido por una barra de acero sobre la cual están enfiladas y chabetas las levas en tejido baquelitado moldeado. Dos paliers de extremidad y dos paliers intermedios de rodamiento de bolas, soportan este árbol.

2.1.2 Operación del sistema de tracción.

Cada carro motriz del elemento cuenta con dos boguies o carretillas y cada carretilla cuenta con dos motores que se conectan en serie y forman un grupo, teniendo así dos grupos por cada carro motriz del elemento. Los dos grupos de una motriz pueden ser conectados en serie o en paralelo, en cada una de sus conexiones los inductores pueden ser conectados en tres pasos y por último existen dos grupos de resistencias de arranque para los dos grupos de una motriz. El diagrama del sistema de tracción-frenado del elemento se muestra en la figura 2.2.

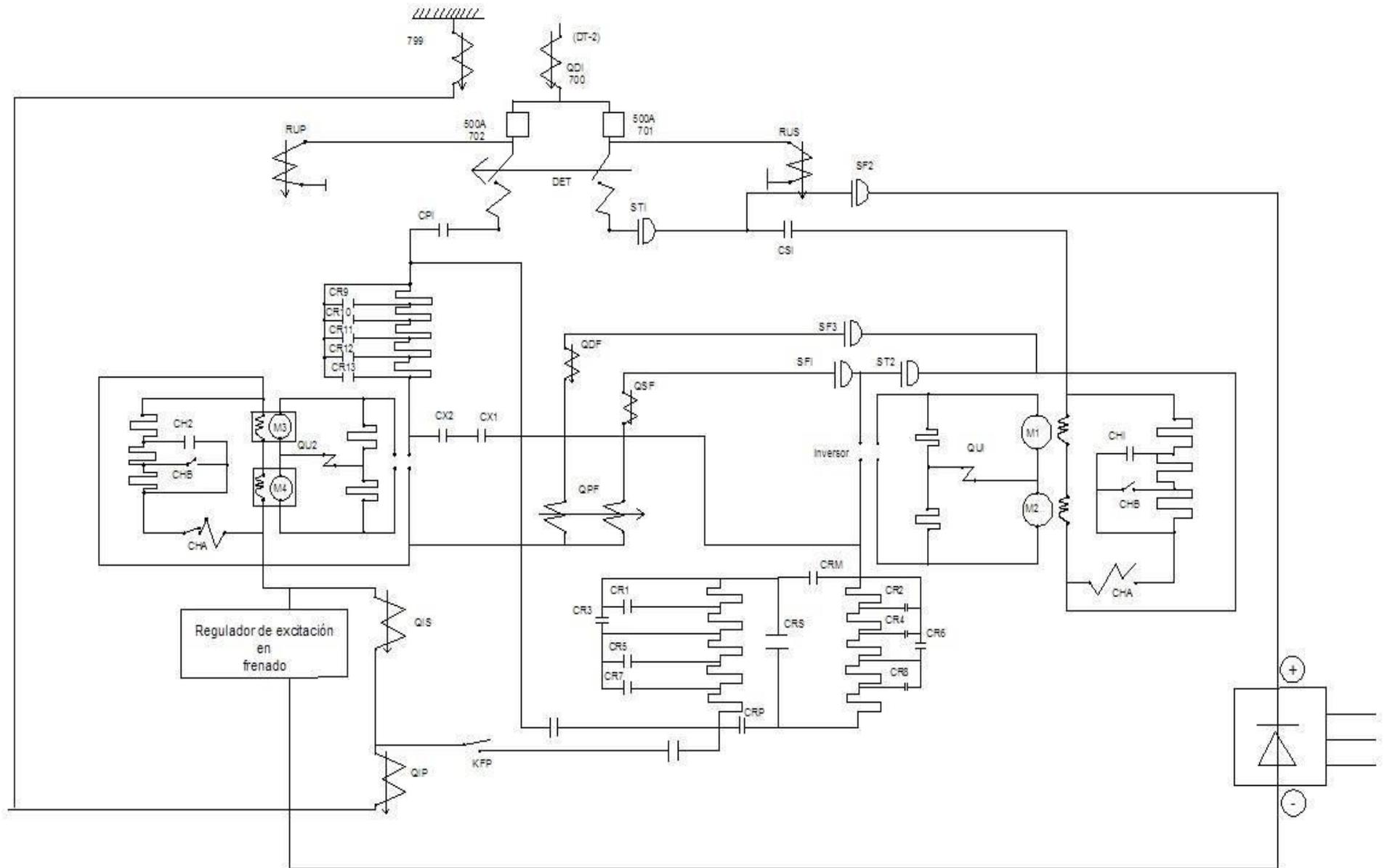


Figura 2. 2 Sistema de Tracción-Frenado

El arranque se efectúa en 15 puntos serie a campo completo y de tres puntos de puenteo. La transición por medio del puenteo a campo completo se efectúa en 12 puntos serie-paralelo en campo completo y tres puntos de puenteo. Cada punto (cada paso que realiza el JH) elimina resistencias de arranque del circuito de potencia, estando dado por una revolución del servomotor eléctrico sobre un platillo metálico con 35 ranuras equidistantes. La eliminación de resistencias de arranque y puenteo se efectúa por los contactores de conexión, obteniendo así cinco conexiones correspondientes a los 5 grados diferentes de tracción del tren.

El JH puede, según la voluntad del conductor mediante el uso del manipulador, estar inmovilizado sobre las posiciones siguientes:

- N-Punto 0: Cada contactor de acoplamiento abierto.
- T1-Punto 3: Para maniobras de acercamiento y taller-(motores serie más resistencias). Este se da a través del cierre de los seccionadores de tracción ST1 y ST2, de los contactos de conexión en serie CS1 y CS2. Y por uno de los contactores de acoplamiento de resistencias
- T2-Punto 15: Motores en serie campo completo-(eliminación de resistencias). Se da a través del cierre de los contactores CR1 al CR3
- T3-Punto 16: Motores en serie a campo reducido al máximo admisible-(puenteo de los inductores). Este grado de tracción es a través de los contactores electromagnéticos de puenteo CHB y los contactores de puenteo CH1 y CH2
- T4-Punto 29: Motores en serie-paralelo a campo completo-(eliminación de resistencias). Este es debido al cierre de los contactores de puentes CP-1 y CP2, a los contactores de acoplamiento de resistencia y a la abertura de los los contactores CR1 al CR13
- T5-Punto 30: Motores en serie-paralelo a campo reducido al máximo admisible-(puenteo de los inductores). Este grado de tracción es a través de los contactores electromagnéticos de puenteo CHB y los contactores de puenteo CH1 y CH2

La anulación o la reducción del esfuerzo de tracción se hace progresiva por introducción de nuevo de las resistencias de arranque en el circuito. La protección del mismo está asegurada por dos fusibles, que constituyen la protección contra cortocircuitos; y la apertura de un disyuntor bipolar será provocada por:

- La diligencia del conductor.
- Por una falla a tierra (masa) en el circuito de tracción.
- Por la ausencia de tensión de línea o la fusión de un fusible de tracción.
- Por un defecto del funcionamiento del equipo JH.
- Por el mando de la inversión del sentido de marcha.
- Por el mando de un frenado.

La inversión del sentido de marcha está hecha por la inversión del sentido del paso de la corriente en las armaduras de los motores de tracción. El sentido de la corriente en los inductores queda sin cambio de dirección.

2.1.3 Operación del Sistema de Frenado.

El combinador de arranque permite por medio de un conmutador, conectar los motores para sean utilizados como generadores de excitación separada durante el frenado. A esta forma de frenado se le denomina frenado reostático o eléctrico.

El cierre de los contactores CS1 y CS2 y de los seccionadores SF1, SF2 y SF3, del circuito mostrado en la figura 2.2 mandado por el servosistema de los contactores de arranque permite que los motores de un carro queden conectados en serie y además permite el establecimiento de un circuito que alimenta los motores M1, M2, M3 y M4 modificando el circuito como se muestra en la figura 2.3.

Debido a que los motores siguen estando girando por estar acoplados a los diferenciales y a que sus inductores están alimentados, se transforman en generadores por lo que en sus bornes aparece una tensión que es consumida por los resistores de frenado llamadas reóstatos. Esta conversión de energía mecánica (movimiento del tren) a energía eléctrica, trae como consecuencia una fuerza en sentido contrario que se oponga a dicha transformación y por lo tanto tiende a disminuir la velocidad de giro de los motores que están funcionando en este momento como generadores.

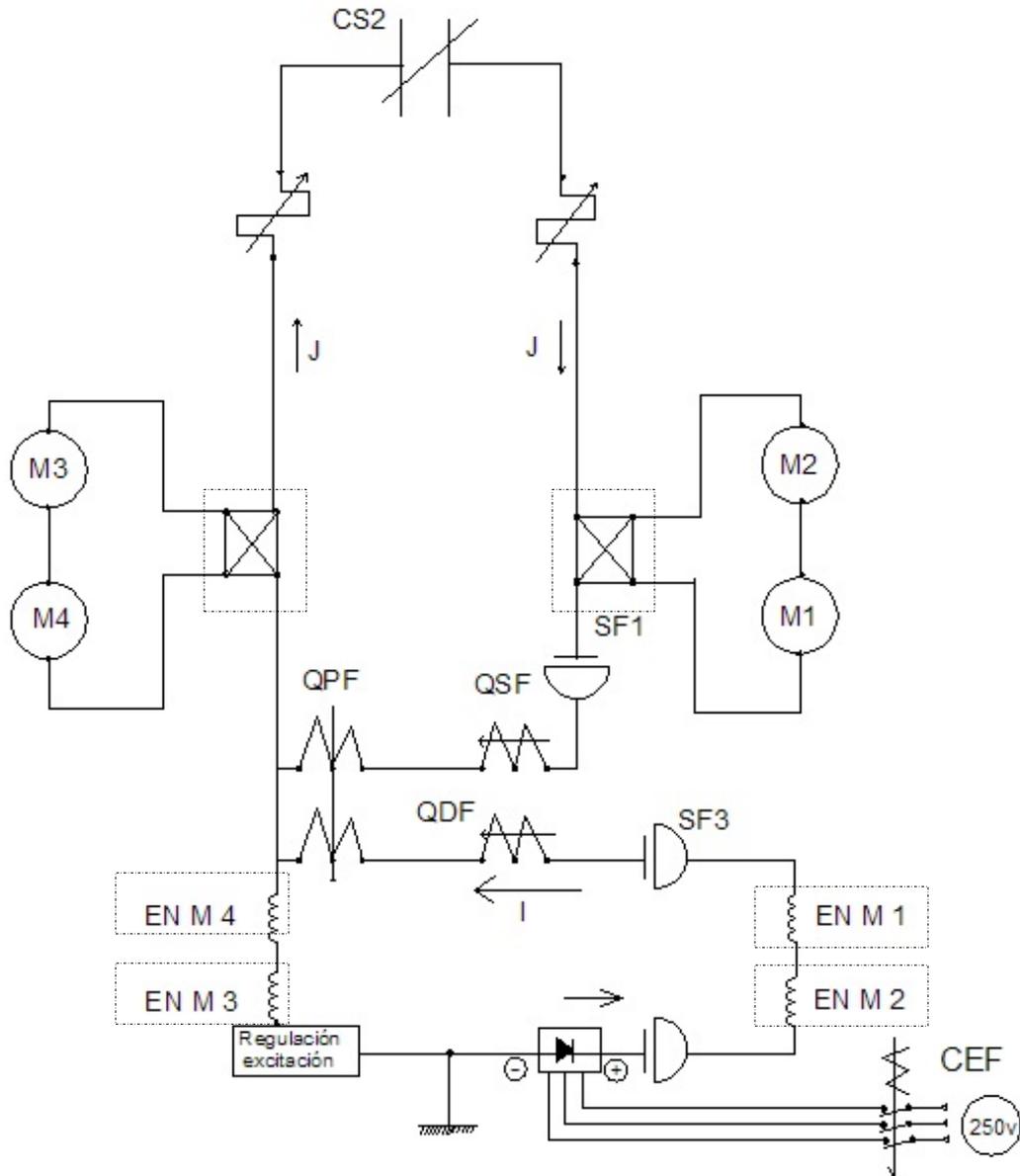


Figura 2. 3 Sistema de frenado

Al disminuir la velocidad de los generadores (motores) y como están acoplados a los diferenciales provocan la disminución de la velocidad del tren. De acuerdo sea el grado de frenado reostático aplicado, será el valor de la intensidad de corriente I que alimenta a los inductores y por consecuencia influirá en el aumento a disminución de la energía eléctrica generada y el valor de la fuerza que provoca el frenado del tren.

En el sistema de Tracción-Frenado tipo JH son posibles seis grados de frenado. Los tres primeros F1, F2 y F3, son asegurados por el freno reostático solamente. Los otros tres, F4, F5 y F6, son realizados por la combinación del frenado neumático y del frenado reostático, éste último suministrando entonces un esfuerzo de frenado correspondiente al grado F3.

De acuerdo a la figura 2.3, que es el diagrama de control del JH cuando se encuentra en la etapa de frenado, si se llama “J” a la corriente del inducido e “I” a la corriente de los inductores, el relevador de intensidad QPF del tipo diferencial permite establecer la relación:

$$aJ = I + C \quad (2.1)$$

Esta ley estando impuesta entre las corrientes I y J, para obtener los tres grados de frenado pedidos, para determinar el valor de la corriente I de excitación. El reóstato fue diseñado para utilizar las potencias máximas de los generadores. Entonces la potencia es igual al cociente de la tensión máxima por la corriente máxima.

$$P = V_{max} * J_{max} \quad (2.2)$$

El tipo de motor utilizado permite la aplicación del grado de frenado F3 con la velocidad de 80 km/h, el valor de la excitación se determina por la tensión máxima admisible en los bornes del inducido y se mantiene constante hasta el fin del frenado si el conductor, por uso del manipulador, no la modifica.

La corriente promedio de frenado es del orden de los 440 A para F3. La eliminación del reóstato de arranque se hace en nueve puntos para F3, 10 puntos para F2 y 12 puntos para F1, se mantiene el esfuerzo de frenado constante hasta unos 12 km/h. Debajo de esta velocidad, hay automáticamente la sustitución del frenado reostático por el frenado neumático con el mismo esfuerzo de retención si el operador no ha modificado su frenado. El frenado puede prácticamente estar expuesto a fallas en alguno de los casos siguientes:

- a) Masa en el circuito de frenado: una masa será detectada por un relevador denominado QDI que cortará la excitación del *statodyne*.
- b) Avería de la regulación de la excitación: ésta puede traducirse por una ausencia o un exceso de frenado.
- c) Avería del equipo. Todos los incidentes que en tracción provocan la apertura del disyuntor, provocarían en el frenado la interrupción de la excitación, así pues, la supresión del frenado eléctrico.
- d) Ausencia de tensión en la línea, que aun siendo transitoria, provoca inmediatamente la sustitución del frenado.

2.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO DEL ELEMENTO MP-82

2.2.1 Convertidor CC-CC o CHOPPER

Es un equipo a base de semiconductores de potencia y su función es análoga a la de un transformador en corriente alterna; es decir, el chopper transforma una tensión de corriente continua (tensión de línea) a una tensión de corriente continua de valor ajustable.

En corriente continua se puede obtener un ajuste de la tensión en la carga (motor), según el diagrama de principio de la figura 2.4; un interruptor (Int) pone periódicamente el motor bajo tensión y la tensión media V_o aplicada en el motor varía con los tiempos de cierre del interruptor.

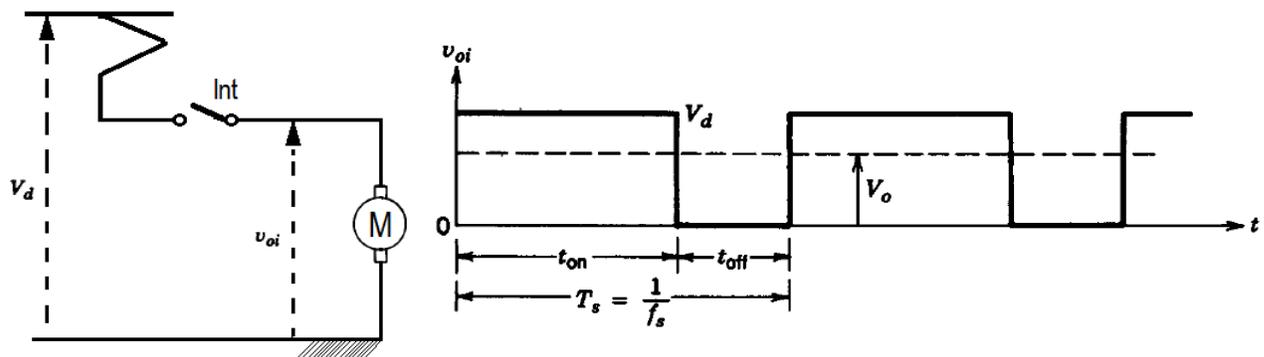


Figura 2. 4 Principio de funcionamiento del convertidor CC-CC

Además, para obtener un funcionamiento satisfactorio del motor, se debe completar el diagrama (figura 2.4) mediante el agregado de una inductancia de aislamiento y un diodo de rueda libre (D); en esta figura se aprecia la tensión resultante en el diodo de rueda libre durante la apertura y cierre del interruptor Int. La tensión periódica aplicada al conjunto del motor y la inductancia pueden descomponerse en una tensión continua (tensión media) y una tensión alterna (figura 2.5)

Se puede observar en la figura 2.6 que durante la aplicación de la tensión sobre el circuito, la intensidad suministrada por la fuente aparecerá como una sucesión de picos de tensión en donde la parte superior presenta una pendiente correspondiente a la limitación debida al efecto de la inductancia, la cual se comporta como un receptor de energía con una polaridad (+) (-) (ver figura 2.6a y 2.6c), almacenando por lo tanto energía.

Durante la apertura del interruptor Int , la inductancia se comporta como un generador de polaridad (-) (+) (ver figura 2.6b y 2.6d), que alimenta al circuito del motor cerrado a través del diodo de rueda libre (D).

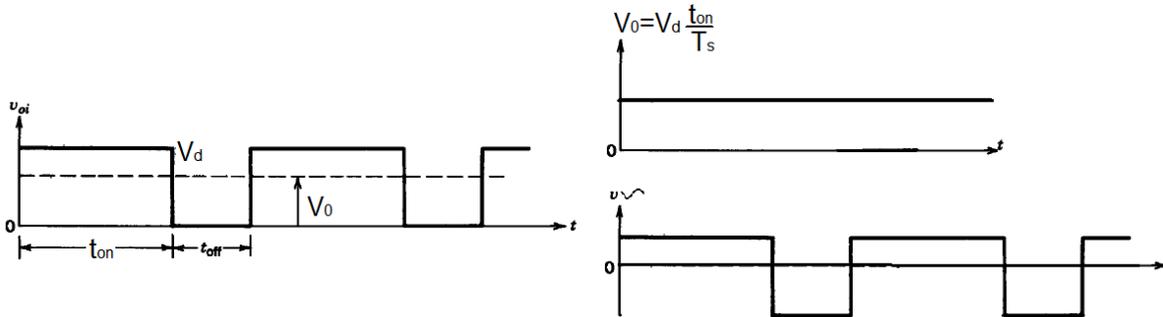


Figura 2. 5 Resultantes de la tensión aplicada al conjunto de motor y la inductancia

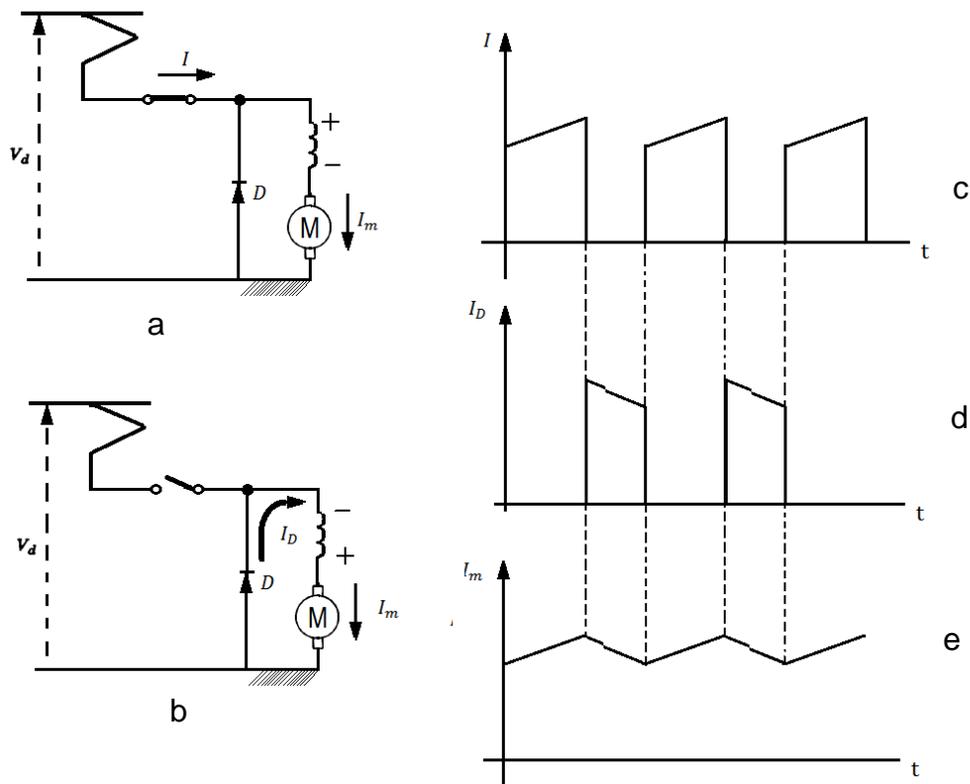


Figura 2. 6 Funcionamiento del convertidor CC-CC o Chopper.

Por lo tanto, el motor es alimentado con una corriente ondulada (ver figura 2.6e) y la tensión que se aplica es prácticamente continua; esta tensión tiene por magnitud el valor medio de la tensión periódica.

$$V_0 = V_d \left(\frac{t_{on}}{T_S} \right) \quad (2.3)$$

De donde

T_S Periodo de función del interruptor, s

t_{on} Tiempo de función del interruptor cerrado, s

$\frac{t_{on}}{T_S}$ Relación cíclica adimensional

V_0 Tensión media, V

V_d Tensión periódica, V

El convertidor CC-CC o chopper se comporta como un transformador de tensión, cuya relación de transformación es igual a la relación cíclica. El ajuste de la tensión puede obtenerse de dos formas: a frecuencia fija y tiempo de conducción variable o a frecuencia variable y tiempo de conducción fijo. Para evitar perturbaciones de los circuitos de señalización, sólo se utilizan los chopper de frecuencia fija en los vehículos del METRO.

2.2.2 Aplicación del chopper durante la tracción.

La aplicación de este equipo para controlar la máquina eléctrica depende esencialmente de la característica de par-velocidad que se desea obtener.

El chopper MP 82 está diseñado para realizar dos funciones esenciales: tracción y frenado con recuperación de energía hacia la fuente (regenerativo) o sin recuperación de la energía (dinámico). En su implementación se utilizan tiristores los cuales son controlados con circuitos de disparos integrados al sistema de control conocido como PCH. El control del inicio de la conducción del tiristor o SCR se realiza con un tren de pulsos inyectado a su compuerta o "gate" a través de transformadores de impulsos con doble secundario que garantizan que el arreglo de dos tiristores en serie (para los tiristores de principales, TH1, los de bloqueo, TH2, y para los de inversión, TH1') reciban al mismo tiempo los pulsos de disparo, garantizándose de esta forma que deban iniciar la conducción al mismo tiempo. Los tiristores para el frenado dinámico (TH3) y los tiristores de tracción y frenado, TH4T y TH4F respectivamente son simples.

Debido a que la fuente de alimentación es de corriente directa, es necesario que los tiristores conmuten de forma forzada al aplicárseles una tensión inversa mediante la utilización de capacitores de conmutación. El control del motor serie se realiza al variar la tensión promedio en sus terminales. En la figura 2.7 se muestra el diagrama simplificado del chopper para la fase 1. Para disminuir el rizado de las corrientes y las tensiones en los motores, se utilizan tres fases con un defasamiento en la operación de los tiristores de un tercio de su período de conducción.

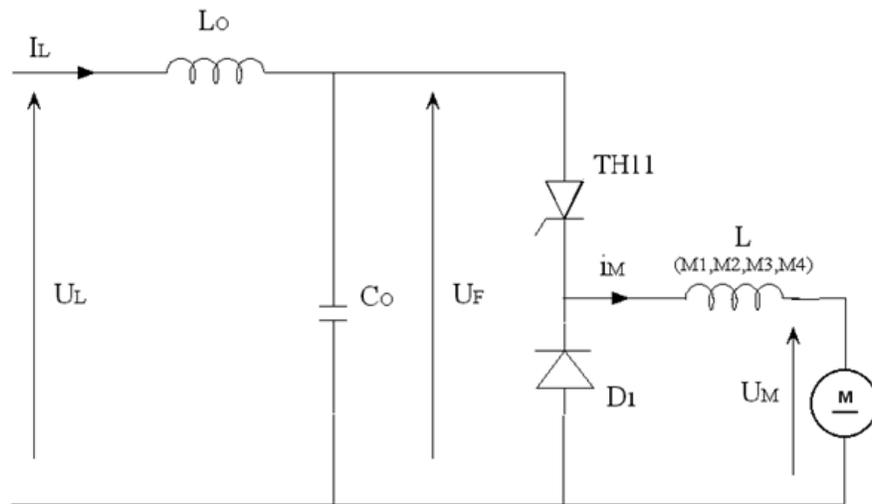


Figura 2.7 Diagrama simplificado del chopper de bajada utilizado para tracción [9].

La frecuencia de conducción de los tiristores en cada fase en el instante de arranque es de 90 Hz, incrementándose su valor a 120, 180, 240 y 360 Hz, siendo este último su valor máximo. El cambio de frecuencia se puede escuchar en los carros motrices cuando se inicia la tracción.

En la figura 2.7 cuando el tiristor TH11 conduce (fase 1), la tensión de la fuente se aplica al motor y su corriente fluye a través del tiristor. Debido a que son tres fases, la corriente de las dos ramas de motores (dos motores por rama) se divide entre tres soportando cada tiristor un tercio de la corriente total de los motores.

El diodo D1 sirve para que la corriente de fase no se interrumpa cuando el tiristor TH11 es bloqueado por la red de apagado forzado. El inductor L_0 y el capacitor C_0 forman un filtro paso bajos que evita que las componentes armónicas de la corriente fluyan hacia la fuente. La frecuencia de resonancia del filtro debe ser diferente a las frecuencias de operación del chopper. Las inductancias L en serie con la armaduras de los motores son sus devanados de campo.

En la figura. 2.8 se muestra la topología del chopper de subida para el frenado. El cambio de la figura 2.7 a la figura 2.8 se realiza cuando los tiristores de tracción TH4T dejan de conducir y entran en conducción los tiristores TH4F. De esta forma se reconectan los elementos de potencia y se pasa a la figura 2.8 para iniciar el frenado regenerativo. El principio se puede explicar de la siguiente forma: cuando TH11 conduce, se cortocircuita la armadura del motor y éste entrega energía a L incrementándose la energía almacenada en los campos.

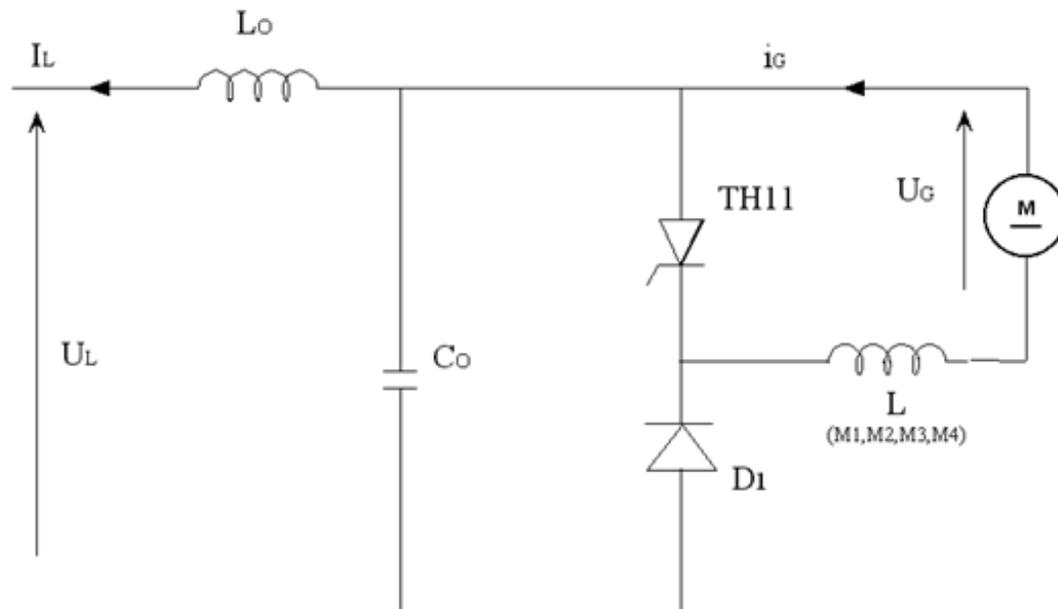


Figura 2. 8 Diagrama simplificado del chopper de subida utilizado para el frenado [9].

Cuando el TH11 está fuera de conducción (figura 2.9) la corriente por la L tiende a disminuir induciéndose de esta forma una fem (fuerza contraelectromotriz) que sumada con la fem del motor provoca que la corriente I_L cambie de signo y se le entregue la energía de frenado a la fuente. Esto provoca impulsos de potencia hacia la fuente. El diodo D_1 se le denomina diodo de libre camino (free wheeling) ya que ofrece una trayectoria alternativa a la corriente del motor cuando el tiristor TH11 es bloqueado.

En la figura 2.9 se muestra como se realiza el bloqueo del tiristor principal TH11 (para la fase 1). Cuando el chopper es energizado al cerrarse el interruptor DET, el capacitor de la red de apagado forzado se carga a la tensión de la fuente (750 V nominal) a través de la resistencia R, la corriente del capacitor es i_c . Cuando el capacitor termina su carga tendrá el positivo en su placa superior. Posteriormente los tiristores TH11 y TH 1'1 reciben pulsos de disparo por sus compuertas iniciando ambos la conducción en el mismo instante (en la figura 2.9 se han representado con un solo tiristor los tiristores TH11, TH1'2 y TH21).

Al entrar en conducción TH11 comenzará a fluir a través de este la corriente de motor y al entrar en conducción TH 1'1 comenzará la inversión de la polaridad del capacitor C debido al circuito resonante que forma con el inductor λ_1 . Cuando la corriente por el circuito resonante C- λ_1 tienda a cambiar el sentido, el tiristor TH1'1 se bloqueará de forma natural quedando el capacitor C con el positivo en la placa inferior y estaría listo para iniciar el bloqueo del tiristor principal.

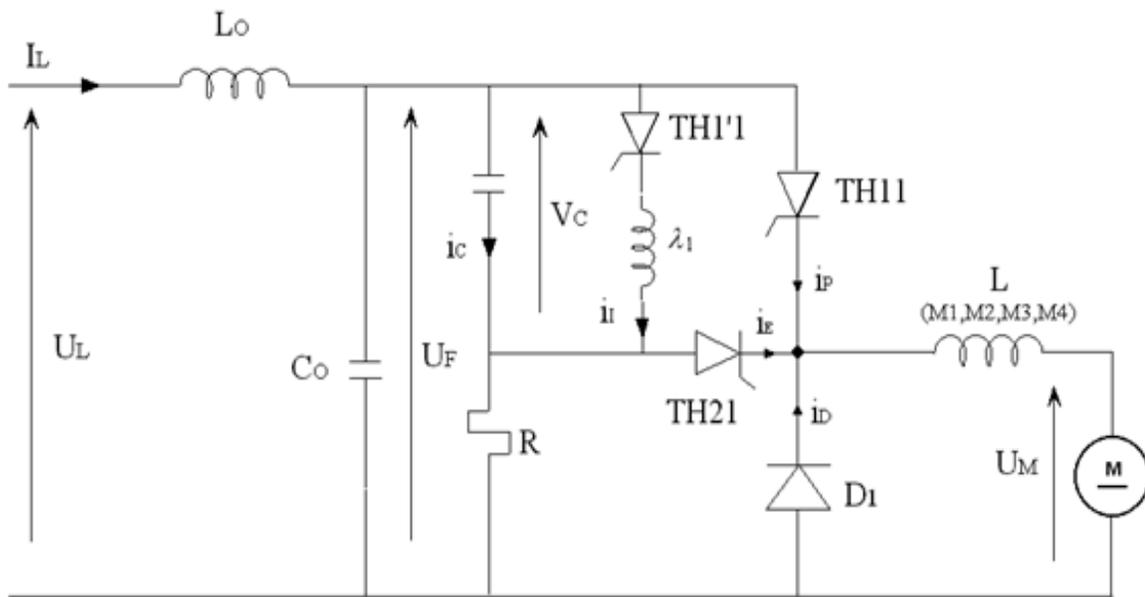


Figura 2. 9 Red de apagado forzado del tiristor principal TH11 [9].

El tiempo que dura este proceso determina al ancho mínimo del pulso o lo que es lo mismo el tiempo mínimo de conducción de TH11. Cuando el tiristor TH 21 (fase 1) es disparado, se le aplica al tiristor TH11 la tensión del capacitor que lo polariza inversamente sacándolo de conducción. En el instante en que TH21 es disparado, la tensión del nodo formado por la unión de los cátodos de TH11, TH21 y D_1 respecto al negativo de la fuente (tierra física) tiene un valor aproximadamente igual al doble de la tensión de la fuente debido a que se suman las tensiones de la fuente y del capacitor.

El tiristor TH21 sale de conducción de forma natural cuando el capacitor se vuelve a cargar a la tensión de la fuente y la corriente se hace cero. Este proceso se repite cíclicamente cada período de conducción del TH11.

En la figura 2.10 se muestra el diagrama eléctrico de una de las fases del chopper donde se puede observar los puntos de medición de las tensiones y de las corrientes. En esta figura se observan además los arreglos en serie de dos tiristores, las resistencias que se colocan en serie para equilibrar las tensiones entre los dos tiristores cuando se encuentran en estado de bloqueo y las redes RC o redes de Snubber utilizadas para proteger a los tiristores contra los transitorios de recuperación inversa.

En la figura 2.10 también se observa el diodo D_5 , el cual hace la función de recortador de tensión para evitar que picos de tensión de magnitud mayor a la tensión de línea (eUL) pasen hacia el motor. En lo anterior se observa como está conectado el diodo en la figura 2.10, de acuerdo a ésta figura el ánodo del diodo está en uno de los terminales del DIM y su cátodo en la línea de 750 V. A pesar de ésta conexión, los transitorios muy estrechos pueden pasar hacia el motor sin que el diodo entre en conducción. Esto demuestra que el diodo no cumple el objetivo previsto por el fabricante, es decir cuando los transitorios son muy estrechos el diodo D_5 es incapaz de recortarlos pasando de esta forma hacia el motor.

En la figura 2.11 se muestra el diagrama general del sistema observándose que para iniciar el frenado, se deben reconectar los elementos del circuito (como ya se mencionó, se debe pasar de la conexión mostrada en la figura 2.7 hasta la figura 2.8), esto se realiza cuando el TH4T deja de conducir y comienza la conducción TH4F. Cuando esto ocurre cuando los campos de los motores son reconectados quedando entonces los campos de los motores 3 y 4 en serie con las armaduras de los motores 1 y 2 y viceversa.

De esta forma se logra compensar cualquier variación del par de frenado de los motores de diferentes ramas y que éstos frenen con iguales pares de frenado. Por ejemplo supongamos que los motores 1 y 2 desarrollen un mayor par de frenado lo cual provoca un incremento de la corriente por esa rama (esto pudiera provocar un disparo de la protección diferencial QDM). Sin embargo un incremento de la corriente por la rama 1 – 2 provoca un incremento de la corriente de los campos de los motores 3 y 4 ya que están en serie, provocando por consiguiente un incremento del par desarrollado por los motores 3 y 4 lo cual tiende a compensar el incremento de par de los motores 1 y 2, de esta forma se equilibra el par desarrollado en los cuatro motores y se evita la operación del QDM.

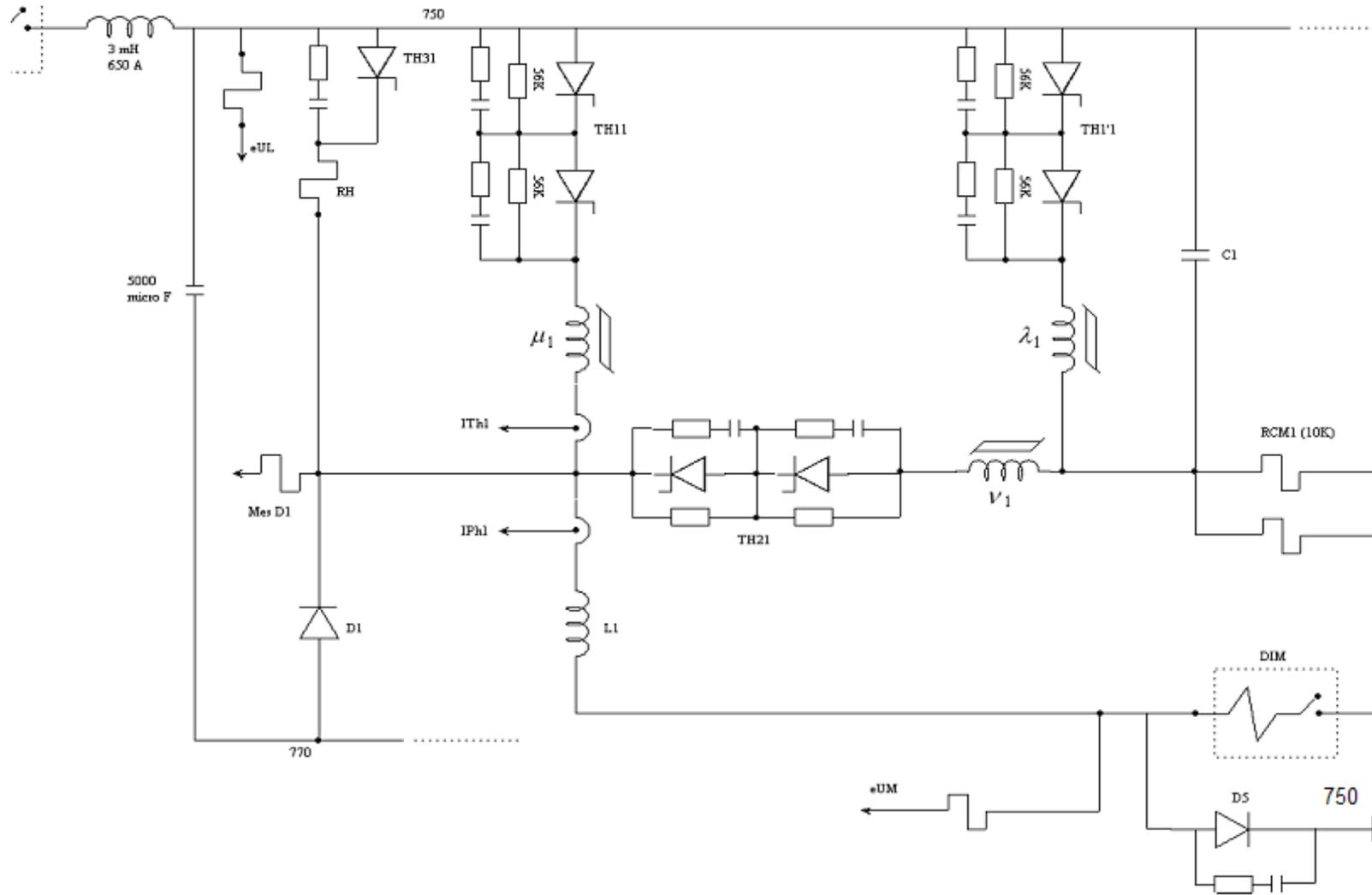


Figura 2. 10 Diagrama eléctrico de una de las fases del chopper [9]

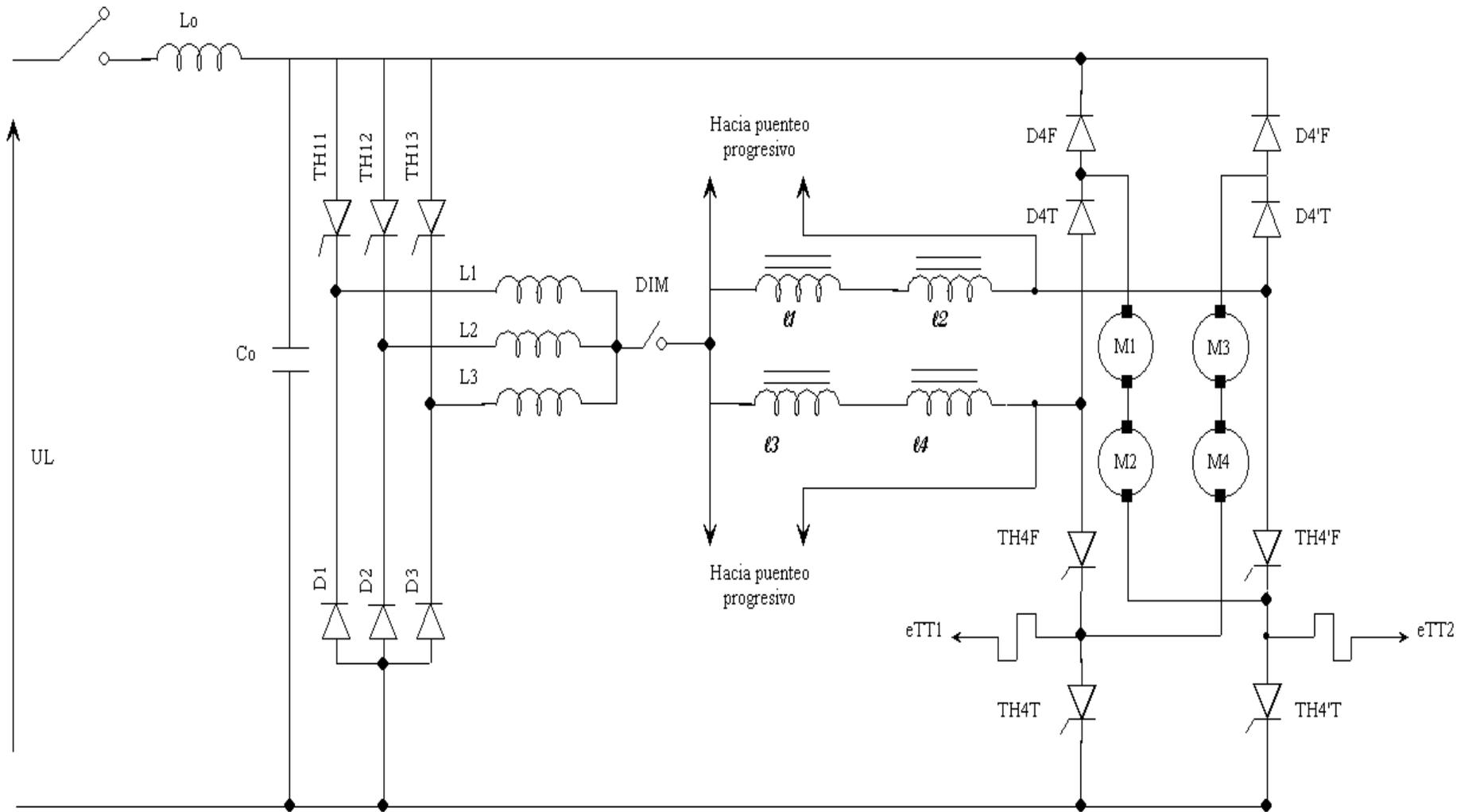


Figura 2. 11 Diagrama general del sistema chopper – motores de tracción [9].

Por supuesto esta compensación ocurre con una dinámica muy lenta por lo que no es posible por un problema de seguridad prescindir del QDM. Obsérvese por último que los tiristores TH4T y TH4F no pueden conducir al mismo tiempo ya que la fuente sería prácticamente cortocircuitada, por lo tanto la conducción de unos inhabilita la conducción del otro. En la figura 2.12 se observa como se realiza el debilitamiento del campo (“puenteo” progresivo) de los motores para lograr un incremento extra de la velocidad. La tensión en los terminales del motor en magnitudes promedio es:

$$U_a = I_A R_A + E_A = I_A R_A + K\phi\omega \quad (2.4)$$

De donde:

I_A , Corriente de armadura, A.

R_A , Resistencia equivalente del circuito de armadura, Ω .

De la ecuación (2.4) queda:

$$\omega = \frac{U_a - I_A(R_A)}{K\phi} \quad (2.5)$$

En un motor serie el devanado de campo está en serie con la armadura, es decir la corriente de armadura es también la corriente de campo ($I_a = I_f$) por consiguiente si no hay saturación del material ferromagnético, el flujo magnético es proporcional a la corriente de armadura, es decir: $\phi \propto I_a$ (ó I_f), entonces la expresión (2.5) queda:

$$\omega = \frac{U_a - I_A(R_A)}{K'I_f} \quad (2.6)$$

De donde:

K' , Constante.

I_f , Corriente que circula por el campo serie del motor, A.

Cuando no existe debilitamiento de campo, en la ecuación (2.6) se tiene que $I_a = I_f$ sin embargo si parte de la corriente es derivada a través de un circuito (figura 2.12) entonces: $I_f < I_a$. En la ecuación (2.6) se observa que al disminuir el valor de I_f , el valor de la velocidad tiende a incrementarse. En la figura 2.12 se muestra el circuito de debilitamiento de campo del MP 82, este circuito básicamente es otro chopper implementado con transistores.

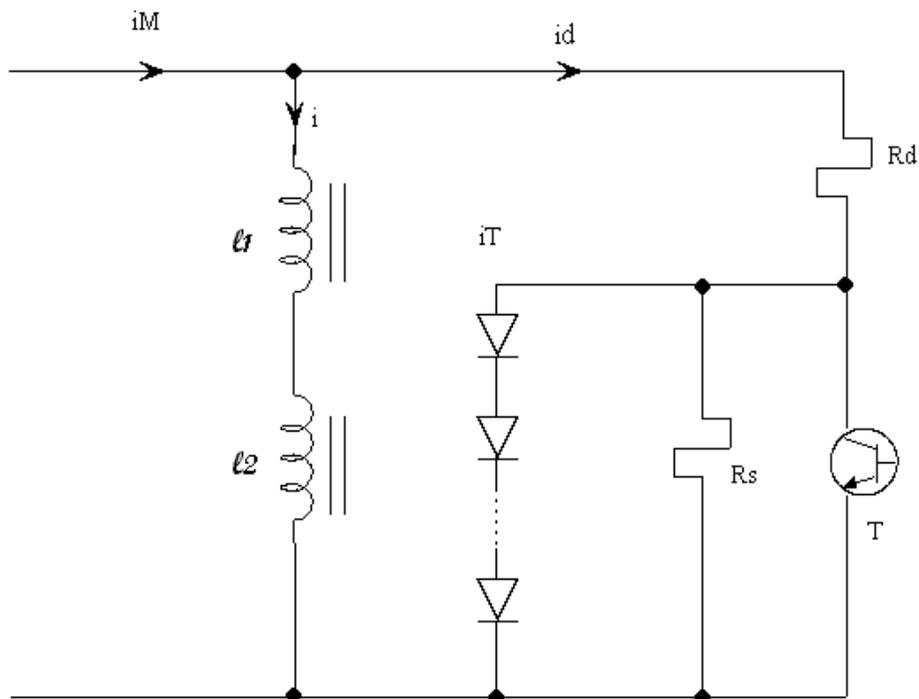


Figura 2. 12 Sistema de debilitamiento de campo (puenteo progresivo) [9].

El arreglo de diodo en serie limita la tensión entre colector y emisor en el transistor y por lo tanto lo protege contra sobre tensiones. La esencia de este circuito consiste en conectar una resistencia efectiva variable en paralelo con el devanado de campo. Si esta resistencia aumenta, se deriva una menor corriente a través de ésta y por lo tanto hay una mayor corriente por el campo y un mayor flujo; esto ocurre en velocidades bajas.

Obsérvese que en velocidades bajas esta señal es cero y por lo tanto el transistor no conduce apareciendo un máximo valor de la resistencia efectiva en paralelo con el devanado de campo, derivándose de esta forma una menor corriente, sin embargo cuando esta señal aparece a una determinada velocidad durante la tracción o el frenado, el transistor T trabajará como chopper variando su régimen de trabajo para que la resistencia efectiva equivalente en paralelo con el devanado de campo disminuya y se derive una mayor corriente, incrementándose la velocidad al debilitarse el campo magnético (ver la ecuación (2.6)).

Finalmente en la figura 2.13 se muestra el principio del frenado dinámico en el MP 82. Este tipo de frenado dinámico se realiza desconectando el chopper de la fuente (se abre el disyuntor DET) y conectando en paralelo con la armadura una resistencia de frenado RH. En la figura 2.13 el tiristor de frenado es el TH31.

El funcionamiento es similar al de la figura 2.8, circuito que se establece al iniciar la conducción los tiristores TH4F; la diferencia radica en que la energía no puede ser devuelta a la fuente ya que el DET está abierto. Cuando se inicia el frenado el tiristor TH31 de la figura 2.13 recibe pulsos por su compuerta y entra en conducción disipándose entonces la energía en los resistores de frenado los cuales se tiene uno en cada fase (se disipa un 33.33 % de la energía de frenado en cada resistor de fase).

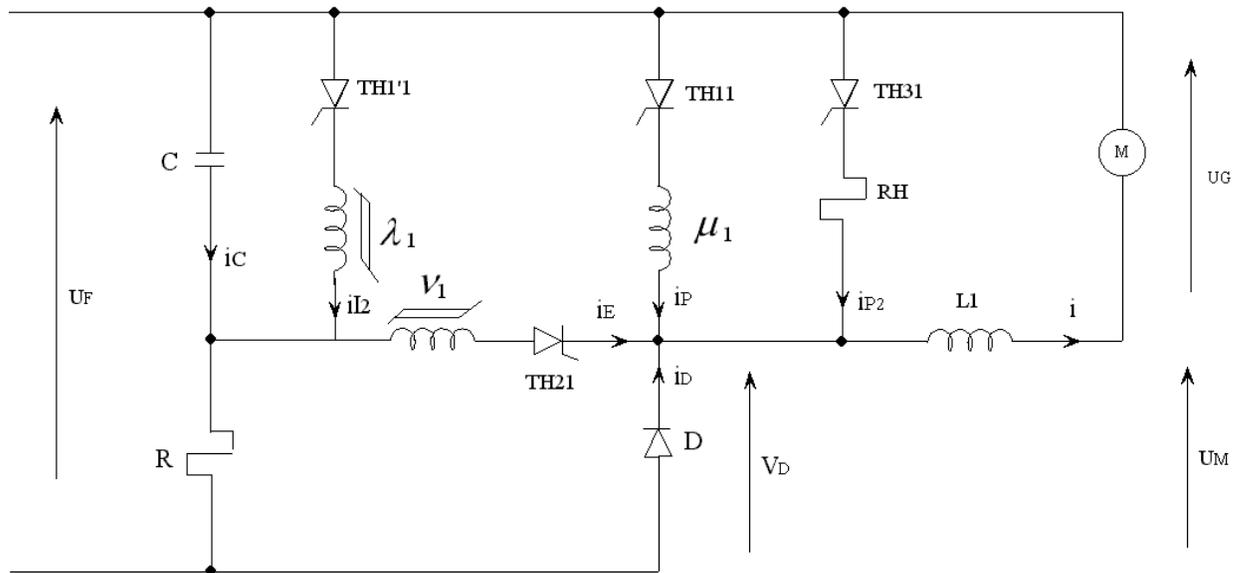


Figura 2. 13 Sistema de frenado dinámico [9].

Se observa que el tiristor principal TH13 controla la energía del frenado y por lo tanto controla el nivel de frenado al variar su régimen de ciclo:

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.7)$$

De donde:

t_{on} , Tiempo de conducción del tiristor principal, s.

T , Período de conducción de tiristor principal, s.

La resistencia efectiva de frenado depende del valor de δ y su valor es:

$$R_{ef} = R_n(1 - \delta) \quad (2.8)$$

Se observa como a medida que el tiristor principal conduce un menor tiempo (t_{on}), la resistencia de frenado RH estará un mayor tiempo conectada en paralelo con la armadura del motor y por lo tanto la resistencia efectiva (R_{ef}) o promedio en el período T será mayor. Cuando esto ocurre habrá una mayor disipación de energía y un mayor grado de frenado.

En el frenado dinámico se pueden presentar dos casos:

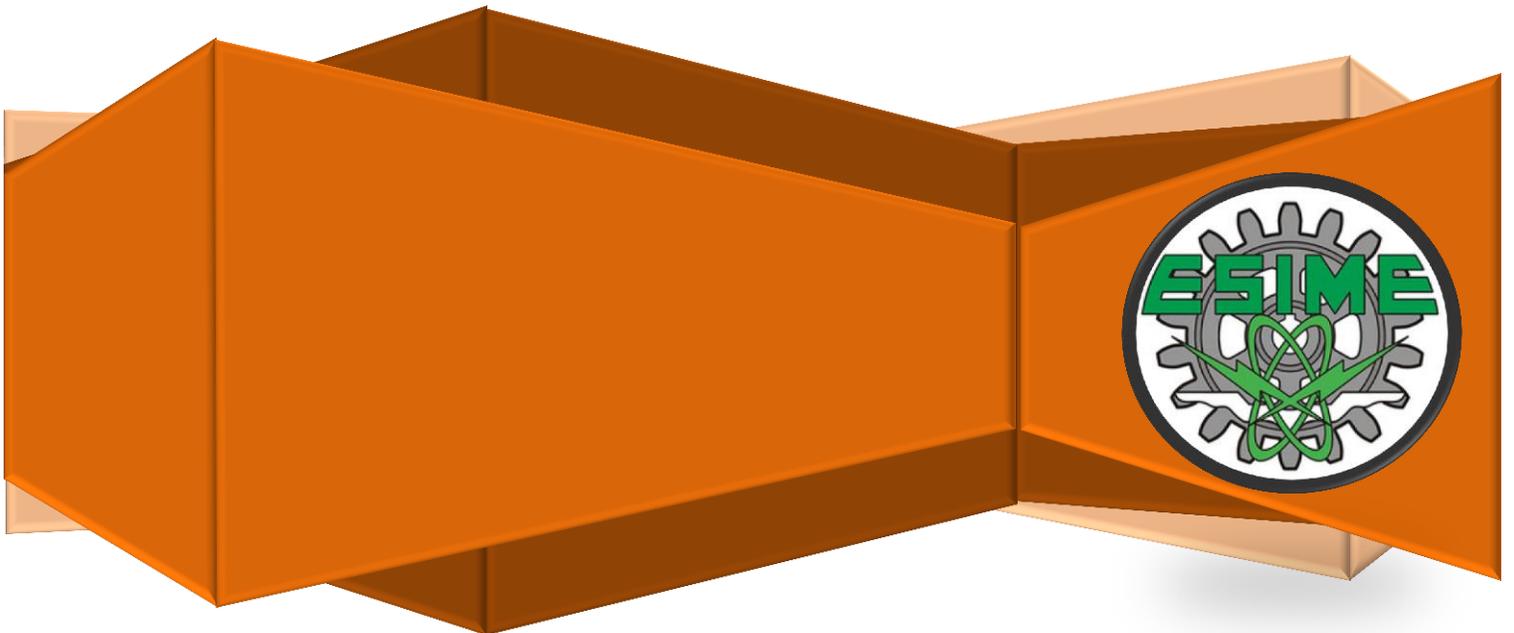
1. Se inicia el frenado regenerativo pero aparece una sobre tensión en la fuente debido a la regeneración de energía. Esta sobre tensión ocurre cuando el tensión de la fuente es mayor de 850 V. En este caso debe entrar el frenado dinámico. Para tensiones superiores a 850 V la eficacia del frenado regenerativo disminuye (el tren frena menos, es decir hay un menor par de frenado) y se hace menor que la del frenado dinámico, por este motivo debe entrar el frenado dinámico para este nivel de tensión.
2. Cuando se inicia el frenado pero no se habilita el frenado regenerativo (el tensión de la fuente es mayor a 850 V) entonces entra desde un inicio el frenado dinámico. En este caso se conecta en paralelo con el capacitor de filtro otra resistencia (REC_0) de 40 Ω para evitar posibles sobre tensiones en el capacitor de filtro C_0 . Esta resistencia incrementará la capacidad del frenado dinámico al conectarse otra resistencia de frenado adicional a RH.

En la mayoría de los trenes MP 82 se han eliminado el sistema de frenado dinámico, esto ha provocado los siguientes problemas:

1. Se incrementa el uso del frenado neumático y por lo tanto se incrementa el consumo de zapatas de freno y el desgaste de las ruedas de seguridad.
2. Al no existir la posibilidad de inhabilitar el frenado regenerativo cuando la tensión de línea se hace igual o mayor que 850 V el frenado eléctrico pierde efectividad y debe entrar el freno neumático en velocidades altas ya que no existe el frenado dinámico. Los valores altos de tensión de línea puede provocar problemas en los motores durante la conmutación. Si existiera frenado dinámico es posible que se logre limitar la tensión debido al incremento de la corriente de frenado.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE TRACCIÓN- FRENADO.



CAPÍTULO 3- DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO.

3.1 REGIONES DE OPERACIÓN DEL ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE TRACCIÓN.

La topología general de un accionamiento eléctrico (AE) de una máquina de inducción utilizada para in sistema de Tracción-Frenado se muestra en la figura 3.1.

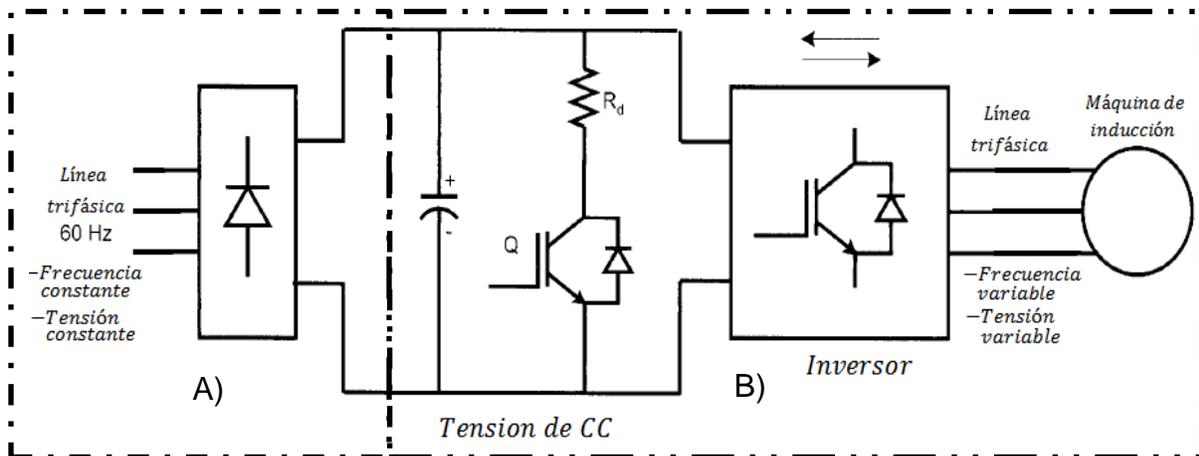


Figura 3. 1 Topología general de accionamiento eléctrico [11].

El sistema opera de la siguiente forma. La parte A representa a las estaciones rectificadoras del STC METRO, que se encargan de convertir las tensiones trifásicas de alimentación, las cuales tienen una amplitud y frecuencia constante, dando como salida CC que es suministrada a las barras guía. Los trenes toman la alimentación de las barras guía los cuales alimentan a su vez al inversor, que basa su funcionamiento en IGBT's. El inversor convierte la CC en CA con magnitud y frecuencia variables y alimenta a la máquina de inducción (MI). En el circuito de la figura 3.1 también se observa parte del sistema de frenado que se usa en el sistema de tracción-frenado el cual se explicara más adelante.

El inversor es el encargado de variar la tensión y la frecuencia que requiere la MI para su correcta operación en la etapa de tracción y es capaz de trabajar en las dos regiones que son necesarias para el funcionamiento de la MI que se muestran en la figura 3.2.

En la figura 3.2 se observa el par máximo se mantiene constante hasta que la MI alcanza su potencia nominal a una velocidad de 1 pu que es su velocidad nominal. Después de que la MI alcanza su velocidad nominal, el par en la comienza a disminuir con el fin de seguir aumentando la velocidad sin sobrepasar la potencia nominal del motor.

En la figura 3.3 se muestra una gráfica en la cual se aprecia como el par (T_e) y el flujo electromagnético (ψ_m) en la MI se mantienen constantes hasta que la tensión (V_s) y la potencia llegan su valor nominal y como a partir de ese punto V_s y la potencia son constantes y ahora T_e y ψ_m comienzan a decaer. Siendo este el principio de la MI como motor de tracción.

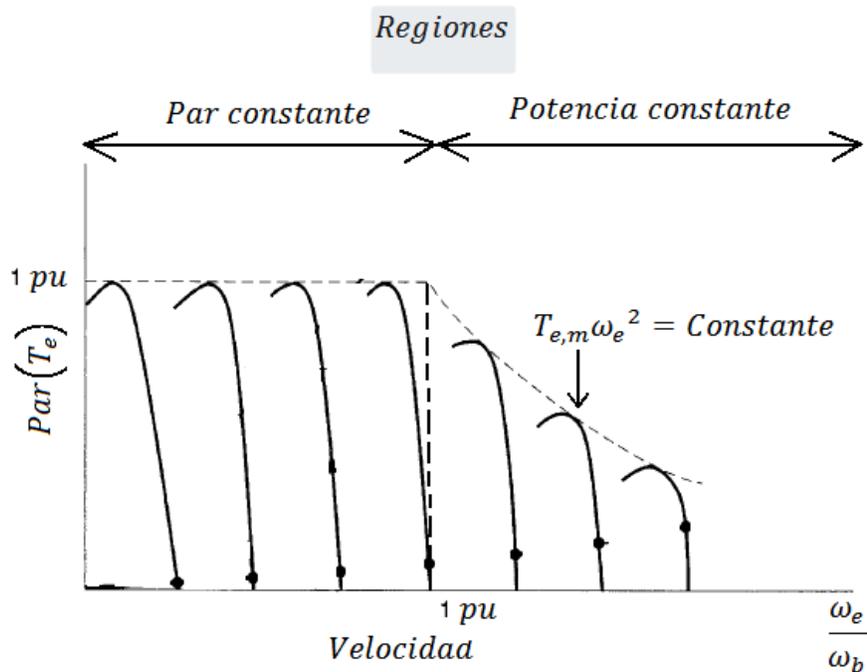


Figura 3. 2 Curvas de par-velocidad [11]

3.2 FRENADO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

En una operación a frecuencia variable, una máquina de inducción puede ser sometida a un frenado mecánico o eléctrico para la reducción de velocidad. El frenado mecánico se puede aplicar externamente o puede ser inherente por la carga. Por ejemplo, en una bomba o una unidad de tipo ventilador la propia carga puede ejercer el par de frenado mecánico para detener el motor.

El frenado eléctrico se clasifica en frenado dinámico y frenado regenerativo. En cualquier caso, la máquina de inducción es operada en el modo de generación y la energía cinética almacenada en la inercia del sistema se convierte en energía eléctrica. Un motor de inducción puede funcionar como un generador de velocidad mayor a la síncrona, cosa que se hace posible mediante la reducción de la frecuencia del inversor por debajo de la velocidad de la máquina ($\omega_e < \omega_r$).

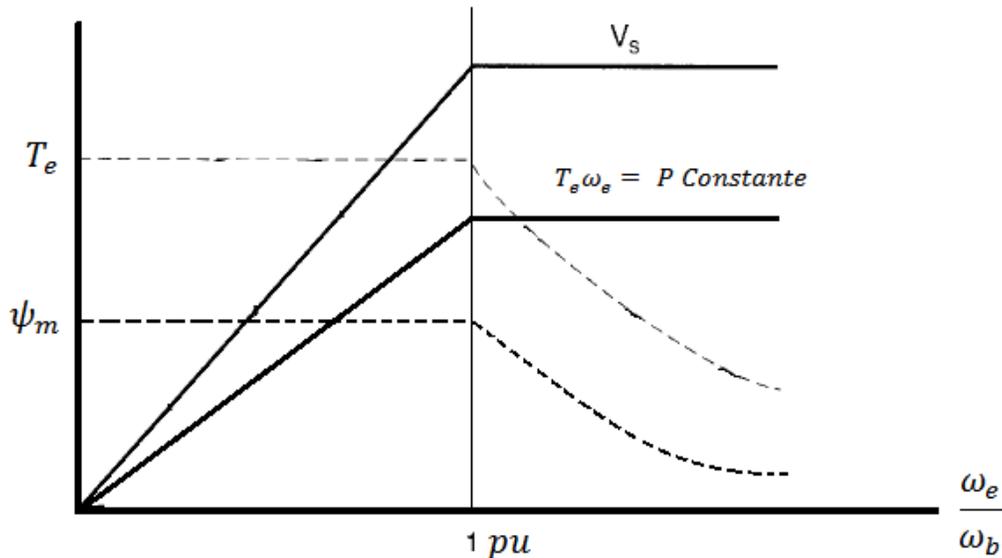


Figura 3.3 Efectos de la variación de frecuencia, aumento de la tensión (V_s) y carga del par (T_e)

3.2.1 Frenado dinámico.

En el frenado dinámico, la energía eléctrica recuperada en las terminales de la máquina de inducción se convierte en CC a través del inversor (el inversor actúa como un rectificador) y se disipa en una resistencia. Dado que la corriente no puede fluir hacia la fuente (línea trifásica) a través del diodo rectificador, se carga el condensador, aumentando la tensión del circuito intermedio.

Un circuito de frenado dinámico, como se muestra en la figura 3.1, está conectado para absorber el exceso de energía en la resistencia R_d y limitar la tensión V_d . La capacidad de frenado dinámico de un inversor PWM se muestra en la figura 3.4.

Desde el enlace de corriente continua de tensión V_d constante, la máxima potencia de frenado dinámico que puede ser absorbida por la resistencia R_d está dada por V_d^2/R_d cuando el IGBT Q está completamente encendido. Idealmente, la curva es idéntica a la del motor y viene dado por una línea recta de pendiente fija en la región de par constante y una línea horizontal en la región de potencia

constante. A cualquier velocidad, el ciclo de trabajo del IGBT se ajusta de modo que el inversor de alimentación de la máquina coincide con la potencia consumida en la R_d .

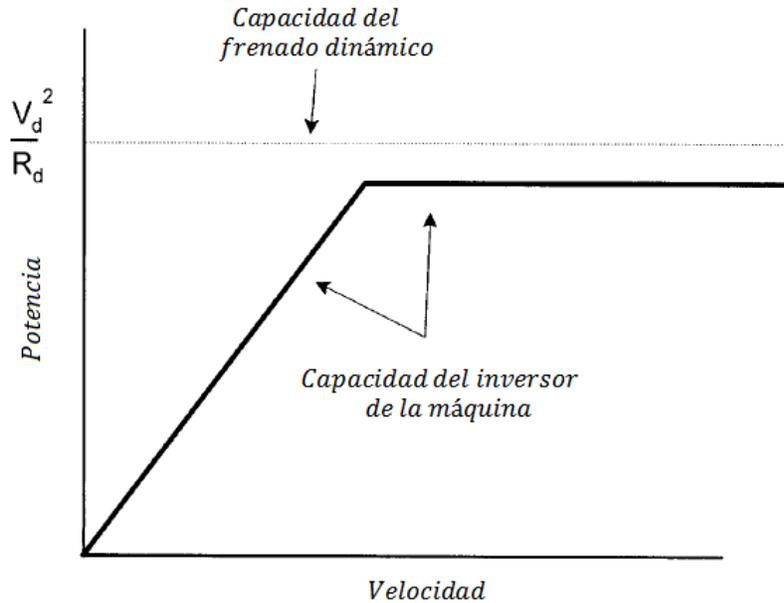


Figura 3. 4 Capacidad del frenado dinámico [11].

3.2.2 Frenado regenerativo.

En el frenado regenerativo, la energía eléctrica se recupera en la fuente para mejorar la eficiencia de la transmisión. Si el convertidor se suministra directamente por una fuente de corriente continua, tal como en un vehículo eléctrico o una unidad del STC METRO, la potencia de frenado en lugar de disiparse en una resistencia, vuelve a la fuente. La operación continua de regeneración de una unidad es posible si la máquina de carga es fuente de poder.

En el STC METRO la energía regenerada durante el frenado no es capaz de regresar a la alimentación de la compañía suministradora, la energía regenerada es aprovechada por otro tren que se encuentre traccionando cerca. Si el bus de CC no es receptivo, es decir no se encuentra otro tren que pueda utilizar durante su tracción la energía del frenado que ha sido inyectada en el bus de CC, entonces incrementa la tensión del bus de CC hasta un valor intolerable.

Para evitar el incremento de la tensión en los trenes del METRO, se desconecta el sistema motriz del bus de CD y se cambia automáticamente a un sistema de frenado dinámico disipando la energía regenerada y evitando sobretensiones en

las barras guía. Este cambio del tipo de frenado se realiza por el propio tren mediante la medición de la tensión en el bus. En los trenes JH, por diseño, el frenado siempre es dinámico.

3.3 ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS OPERATIVOS.

El clima de la ciudad de México se caracteriza por una temperatura variable de 0°C a 30°C, con variaciones fuertes durante el día, lluvias abundantes durante tres meses del año, la altitud media de la ciudad de México es de 2240m sobre el nivel del mar [11].

Características del Perfil de vía

Las condiciones límite del trazo son [9]:

- Pendientes de hasta 6.5%, llegando a ser excepcionalmente de 8%.
- Curva continua de 45m de radio, de un desarrollo superior a la longitud de dos carros enlazados tangencialmente, sin acoplamiento parabólico en los alineamientos que lo rodean, comprendiendo estos por lo menos la longitud de un carro.

Tensión de alimentación

- La tensión de alimentación de la línea es de 750 VCC y de acuerdo con las condiciones de carga de la red, se pueden tener valores límites de 500V a 900V, pudiendo variar bruscamente de un valor a otro.

Motores de tracción

- Los motores de tracción serán máquinas de inducción o asíncronas a frecuencia y tensión variable.
- Los motores actuarán sobre un mismo eje, por medio de un puente diferencial, los motores deberán ser autoventilados.
- Se propondrán dos motores para una misma carretilla o boguie, permaneciendo conectados en paralelo permanentemente, formando un grupo. Los dos grupos de un mismo carro motriz quedaran permanentemente conectados en paralelo.
- El número total de motores conectados en un tren de nueve carros será de 24 motores, teniendo cuatro motores por carro motriz.
- El puente de los motores será de acuerdo al sistema de tracción asíncrona.
- Estos motores podrán ser utilizados tanto en tracción como en frenado eléctrico (dinámico o regenerativo)
- Los motores a seleccionar deberán estar apegados a normas técnicas.

Velocidad

La velocidad máxima del servicio es de 80 *km/h* [9]

Características del vehículo

- El desarrollo de las ruedas neumáticas es de 3.04m
- El diámetro de las ruedas es de 976 mm
- La eficiencia de la transmisión es igual a 0.92
- La relación de transmisión es de 9.2285
- La resistencia al rodamiento para la rueda neumática es $R_n = \frac{11.6}{1000}$ del peso.
- La resistencia debido al aire para un tren de nueve carros es $F_a = 0.20v^2$ [11]

Cargas

Para el cálculo del comportamiento se consideraran dos estados de carga para un tren de nueve carros mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Masa del tren a considerar [9]

	Carga Nomina (3/4)	Carga de Afluencia (4/4)
Peso	308 ton	333 ton
Peso de inercia	351 ton	376 ton

Arranque

- El comando de la tracción frenado será continuo para evitar variaciones bruscas del par del motor, para tener suavidad durante la marcha del tren y comodidad para los usuarios.
- El tren con $\frac{3}{4}$ de carga y en plano horizontal podrá alcanzar 48 *km/h* en 12.5 s y 72 *km/h* en 30 s como máximo.
- La aceleración máxima (α_M) será de 1.4 *m/s²* [9].

Frenado

En caso de que la línea sea totalmente receptiva, el frenado regenerativo debe ser capaz de producir una desaceleración de 0.9 *m/s²*, desde una velocidad de 70 *km/h* en terreno horizontal y con una carga de 3/4[9].

3.4 MOTORES DE TRACCIÓN

3.4.1 Método de cálculo

Existen diferentes métodos para la suposición del régimen de los motores, tales como:

- Método del esfuerzo tractivo.
- Método por energía cinética
- Método por velocidades

EL método que se utilizará para el cálculo de los motores de inducción será el método por velocidades y se describe a continuación.

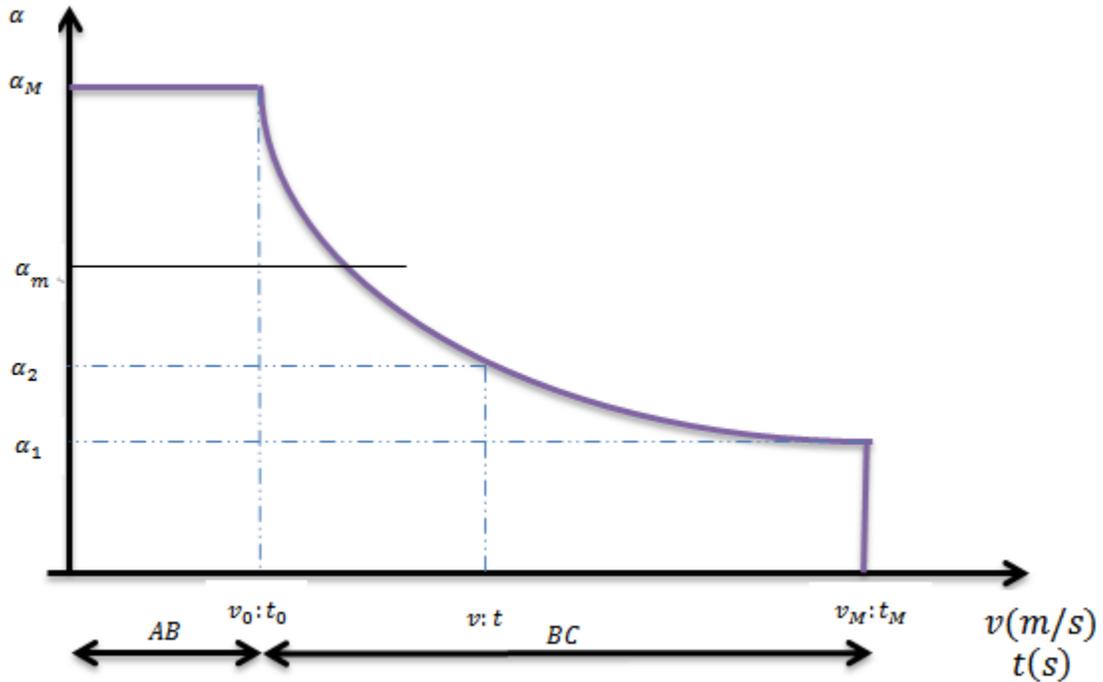
Este procedimiento de Método por velocidades (v_0, v_m) que se presenta a continuación se basa en el hecho de que en todos los motores, cuando son utilizados para la tracción de un vehículo, su dominio de regulación está limitado por dos características principales, comprendidas entre la velocidad cero y la velocidad máxima (v_m):

- a. De la velocidad cero a la velocidad, llamada v_0 “velocidad base” el dominio del funcionamiento está limitado por una característica de tensión y frecuencia variable y de par constante.
- b. De la velocidad a la velocidad, el dominio del funcionamiento está limitado por una tensión máxima y potencia constante.

Resumiendo el método consiste en determinar a partir de los datos conocidos la potencia de los motores a utilizar. En tracción eléctrica el arranque de los motores se realiza a par constante, hasta alcanzar una velocidad y una vez alcanzada ésta, se aplica un control en los motores a potencia constante ($P_0 = T_e \omega_m$) y esto desde v_0 hasta v_M .

Para encontrar las ecuaciones para la determinación de las potencias se partirá de la figura 3.5 en donde se observa el comportamiento de los diferentes valores de aceleración de los motores de tracción cuando llegan a una determinada velocidad en un determinado tiempo. Cabe mencionar que para poder realizar el cálculo de la potencia de los motores es necesario contar con las siguientes variables:

- α_M Aceleración máxima.
- M_t Masa del tren.
- $v_M \omega_M$ Velocidad lineal y angular máxima que podrá alcanzar el tren y el motor respectivamente.
- t_M Tiempo requerido para poder alcanzar la velocidad máxima.
- $v_0 \omega_0$ Velocidad lineal y angular mayor en la región de par constante que podrá alcanzar el tren y el motor respectivamente.



α_m	Aceleración media	v	ω	Velocidad lineal y angular cualquiera
α_1	Aceleración correspondiente a la velocidad máxima	t_M		Tiempo que se tarda en alcanzar la velocidad máxima
α_2	Aceleración cualquiera	t_0		Tiempo que se tarda en alcanzar la velocidad base

Figura 3. 5 Regímenes de operación de los motores de tracción.

Lo expresado anteriormente permite escribir las ecuaciones de velocidad, tiempo y espacio como:

En el intervalo $0 \leq v \leq v_0$:

$$v_0 = \alpha_M * t_0 \tag{3. 1}$$

$$v_M = \alpha_1 * t_M \tag{3. 2}$$

$$s = \frac{1}{2} \alpha_M * t^2 \tag{3. 3}$$

De donde
s es la longitud de una trayectoria cualquiera.

Y en el intervalo $v_0 \leq v \leq v_M$:

$$F_{tractiva} * v = F_{tractiva} * v_0 = F_{tractiva} * v_M = k' \quad (3.4)$$

Siendo

$$F_{tractiva} = M_t * \alpha \quad (3.5)$$

Y si se divide entre a ambos miembros de la ecuación (3.4) entre la masa de tren resulta.

$$\alpha_M * v_0 = \alpha_1 * v_M = k \quad (3.6)$$

Suponiendo que

$$k = \frac{k'}{M_t}$$

Y además si

$$\alpha_2 = \frac{dv}{dt}$$

Entonces la ecuación (3.6) se convierte en

$$\alpha_2 * v = v \frac{dv}{dt} = k \quad (3.7)$$

De donde se puede decir que

$$v dv = k dt \quad (3.8)$$

Y si se integra la ecuación (3.8) desde v_0 hasta v_M y desde t_0 hasta t_M se obtiene

$$\int_{v_0}^{v_M} v dv = k \int_{t_0}^{t_M} dt$$

$$\frac{v_M^2 - v_0^2}{2} = k(t_M - t_0)$$

Y despejando t_M se obtiene

$$t_M = t_0 + \frac{v_M^2 - v_0^2}{2k} \quad (3.9)$$

Ahora para obtener la expresión del espacio se empieza a partir de la ecuación (3.6). Multiplicando el primer miembro de la ecuación (3.7) por $\frac{ds}{ds}$, se obtiene

$$\frac{v dv}{ds} * \frac{ds}{dt} = k$$

Y si

$$\frac{ds}{dt} = v$$

Entonces

$$\frac{v dv}{ds} * v = k$$

$$v^2 \frac{dv}{ds} = k$$

De donde se puede decir que

$$v^2 dv = k ds \quad (3.10)$$

E integrando la ecuación (3.10) desde v_0 hasta v_M y desde s_0 hasta s_M se obtiene

$$\int_{v_0}^{v_M} v^2 dv = k \int_{s_0}^{s_M} ds$$

$$\frac{v_M^3 - v_0^3}{3} = k(s_M - s_0)$$

Y despejando $s = s_M - s_0$ se tiene

$$s = \frac{v_M^3 - v_0^3}{3k} \quad (3.11)$$

Despejando t_M de la ecuación (3.2) y t_0 de la ecuación (3.3) se obtiene

$$t_M = \frac{v_M}{\alpha_1} \quad (3.12)$$

$$t_0 = \frac{v_0}{\alpha_M} \quad (3.13)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.12), (3.13) y (3.6) ($\alpha_M * v_0 = k$) en la ecuación (3.9) se obtiene

$$\frac{v_M}{\alpha_1} = \frac{v_0}{\alpha_M} + \frac{v_M^2 - v_0^2}{2\alpha_M * v_0} \quad (3.14)$$

Multiplicando a toda la ecuación (3.14) por $2\alpha_M * v_0$ e igualándola a cero se obtiene

$$0 = v_0^2 + v_M^2 - \frac{2\alpha_M * v_0}{\alpha_1} \quad (3.15)$$

Ahora si se supone que [9]

$$\lambda = \frac{v_0}{v_M} \quad (3.16)$$

Y además si se despeja v_0 de la ecuación (3.16) se tiene que

$$v_0 = \lambda * v_M \quad (3.17)$$

Y sustituyendo la ecuación (3.17) en la ecuación (3.14) se obtiene

$$0 = 1 + \lambda^2 - \frac{2\alpha_M \lambda}{\alpha_1} \quad (3.18)$$

Entonces se puede observar que al encontrar el valor de λ , se puede encontrar implícitamente el valor de la velocidad base (v_0) y una vez que se ha obtenido este valor se sustituye en la ecuación (3.6) ($\alpha_M * v_0 = k$) se obtiene el valor de k y por ultimo si el valor de k se multiplica por la masa del tren (M_t) se obtiene la potencia máxima del equipo de tracción entonces:

$$P_{max} = k(M_t) \quad (3.19)$$

$$P_{max} = \alpha_M * v_0(M_t) \quad (3.20)$$

3.4.2 Cálculo para los motores de tracción.

Ahora se procederá aplicar el método anteriormente explicado para la determinación de los motores de tracción en el material MP-68 del STC METRO. Para la determinación de la potencia de los motores se parte de conocer los siguientes datos.

- Velocidad máxima que podrá alcanzar el tren = 80 km/h
- Tiempo requerido para poder alcanzar la velocidad máxima = 38s
- Aceleración media = $\frac{v_M}{t_M} = \frac{80/3.6}{38} = 0.548795 \text{ m/s}^2$
- Aceleración máxima = 1.4 m/s²

La aceleración media y la aceleración máxima se aplicaran a la ecuación (3.18)

$$0 = 1 + \lambda^2 - \lambda \frac{2\alpha_M}{\alpha_1}$$

$$0 = 1 + \lambda^2 - \lambda \frac{2(1.4 \text{ m/s}^2)}{0.548795 \text{ m/s}^2}$$

$$0 = 1 + \lambda^2 - 4.788\lambda$$

Se puede apreciar que es una ecuación cuadrática, cuya solución es:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-(-4.788) \pm \sqrt{(-4.788)^2 - (4 * 1 * 1)}}{2}$$

$$\lambda_1 = 4.56914$$

$$\lambda_2 = 0.2188595448$$

De donde se selecciona el valor de $\lambda_2 = 0.2188595448$; ya que $v_0 < v_m$, y aplicando la ecuación (3.17) se obtiene que la velocidad base es igual a

$$v_0 = \lambda * v_M$$

$$v_0 = 0.2188595448 * 80 \frac{km}{hr}$$

$$v_0 = 17.50876358 \frac{km}{hr}$$

$$v_0 = \left(17.50872 \frac{km}{hr}\right) \left(\frac{1hr}{3600s} \frac{1000m}{1km}\right) = 4.86354544 \text{ m/s}$$

Ahora sustituyendo el resultado de v_0 y el valor de α_M a la ecuación (3.6) ($\alpha_M * v_0 = k$) se obtiene

$$k = 1.4 \frac{m}{s^2} * 4.86354544 \frac{m}{s}$$

$$k = 6.808963616 \frac{m^2}{s^3}$$

Después para obtener la potencia máxima se aplica la ecuación (3.19)

a. Para carga de afluencia (4/4)

$$P_{max} = k(M_t)$$

$$P_{max} = \left(6.808963616 \frac{m^2}{s^3} \right) (376\,000\,kg)$$

$$P_{max} = 2\,560\,170.32 \frac{kg * m m}{s^2 s}$$

$$P_{max} = 2\,560\,170.32 N * \frac{m}{s}$$

$$P_{max} = 2\,560\,170.32 \frac{J}{s}$$

Y si $1 \frac{J}{s} = 1W$, entonces

$$P_{max} = 2\,560\,170.32\,W$$

$$P_{max} = 2\,560.170\,32\,kW$$

Es necesario mencionar que esta es la potencia necesaria para poder alcanzar la inercia del tren completo por lo tanto para poder determinar la potencia máxima de cada uno de los motores de tracción, es necesario dividir la potencia máxima obtenida entre el número total de motores de tracción con que cuenta el tren. Siendo un total de 24 motores, la expresión de potencia máxima por motor queda como se muestra a continuación

$$P_{max_{Por\ motor(4/4)}} = \frac{2\,560.170\,32}{24} kW$$

$$P_{max_{Por\ motor(4/4)}} = 106.673\,kW$$

Ahora es necesario tomar en cuenta el valor de la eficiencia de transmisión por lo que en realidad la P_{max} que los motores deben suministrar será de

$$P_{max_{mecánica\ en\ la\ flecha(4/4)}} = \frac{106.673kW}{0.92}$$

$$P_{max_{mecanica\ en\ la\ flecha(4/4)}} = 115.949kW$$

b. Y para la carga (3/4) nominal se tiene que

$$P_{max} = \left(6.808963616 \frac{m^2}{s^3} \right) (351\ 000\ kg)$$

$$P_{max} = 2\ 389\ 946.229\ W$$

$$P_{max} = 2\ 389.946\ 229\ kW$$

$$P_{max\ por\ motor(3/4)} = 99\ 581.092\ kW$$

Y afectándola por la eficiencia de transmisión =92%

$$P_{max\ mecánica\ en\ la\ flecha(3/4)} = 108.24\ kW$$

A partir de estos cálculos se ha determinado que la potencia necesaria de los motores a seleccionar deberá ser mayor o igual 115.949kW ya que es la potencia que se requiere para poder mover el tren en un estado de afluencia (4/4 de carga). El motor será seleccionado de un catálogo proporcionado por WEG Equipamientos Eléctricos S.A. División Internacional [15].

Ahora que se tiene la potencia de los motores se procederá a encontrar el par que deben desarrollar. Primero sustituyendo los datos de la M_t y la α en la ecuación 3.5 y dividiéndose entre 24 se obtendrá la fuerza tractiva máxima.

$$F_{tractiva} = M_t * \alpha = 376000kg * 1.4 \frac{m}{s^2} = 526.4x10^3 N$$

Y si el par es producto de la fuerza por el radio ($T_e = F_{tractiva} * r$) [13].

$$T_e = 526.4x10^3 N * \frac{0.976\ m}{2} = 256883.2\ Nm$$

Pero como además son un total de 24 motores por elemento entonces

$$T_{e1} = \frac{T_e}{24} = \frac{256883.2\ Nm}{24} = 10703.304\ Nm$$

Se tendrá en cuenta la relación de transmisión antes de elegir el motor. El par deberá reducirse [13].

$$T_{e*motor} = \frac{T_e}{\eta_{R.T}} * \frac{1}{R.T} = \frac{10703.304 Nm}{0.92} * \frac{1}{9.2285} = 1260.68 Nm$$

Dentro del catálogo proporcionado por WEG existen dos opciones del motor a utilizar y se muestran en la tabla 3.2, de donde se han sombreado los datos a utilizar para los siguientes cálculos. El motor seleccionado del catálogo es la opción 1 mostrado en la tabla 3.2 ya que el par máximo que puede desarrollar el motor es mayor que el calculado anteriormente. El motor es de cuatro polos que será alimentado a 460 V para contar con una corriente nominal de 170 A y esto es debido a que se quiere limitar al máximo posible las pérdidas por efecto Joule en los conductores.

La velocidad en km/h que el elemento alcanzará con los motores seleccionados a su velocidad nominal está dada por la siguiente ecuación.

$$v = \left(\frac{N}{R.T} \right) * D_R * \pi * 60x10^{-6} \quad (3.21)$$

De donde

N , Velocidad nominal del motor de tracción, RPM.

$R.T$, Relación de transmisión.

D_R , Diámetro de la Rueda, mm.

$$v = \left(\frac{1780}{9.23} \right) * 976 * \pi * 60x10^{-6}$$

$$v = 35.47 km/h$$

Un motor de inducción tiene la capacidad de alcanzar velocidades superiores a la nominal disminuyendo el par T_e lo que mantendría una potencia constante, por lo que es justificable la selección de este motor ya que será capaz de alcanzar la velocidad máxima requerida por el STC METRO

Tabla 3. 2 Motores y sus características.

		Opción 1	Opción 2
Potencia	CP	150	200
	kW	111.900	149.200
	min ⁻¹	1780	1785
Armazón NEMA		444/5T	504/5T
Corriente Nominal In (A)	230V	340.0	556.0
	460V	170.0	228.0
Corriente de Arranque	Letra	G	G
	Ia/In	6.6	6.6
Par Nominal Tn (Nm)		600.3	798.2
Par de Arranque Ta/Tn		2.0	2.2
Par Máximo		2.5	2.2
Eficiencia (% η)	Porcentaje de carga	50	95.4
		75	95.8
		100	95.8
Factor de Potencia (cos ϕ)	Porcentaje de carga	50	0.74
		75	0.82
		100	0.85
Inercia J		2.81036	3.21184
Tiempo de Rotor Bloqueado (s)		27	22
Peso (Kg)		760	868
Sonido		73	75

3.5 INVERSOR CC-CA.

El inversor seleccionado para la propuesta es desarrollado por la industria POWEREX y el modelo es el **PP450D120** y cuenta con las características mostradas en la tabla 3.3. La tensión máxima que el inversor puede entregar en las terminales de corriente alterna al funcionar como PWM vectorial está dada por la siguiente ecuación [16] [].

$$V_{LL} = \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \quad (3.22)$$

De donde

V_{LL} Tensión de línea en las terminales de CA del inversor, V

V_{CC} Tensión aplicada a las terminales de CC, V

Tomando en cuenta que la tensión aplicada a las terminales de CC es de 750 V_{CD} entonces se tiene que la tensión resultante máxima en las terminales de CA de acuerdo a la ecuación (3.22) será de

$$V_{LLmax} = \frac{750}{\sqrt{2}} = 530.33 \text{ V}$$

Tabla 3. 3 Características principales de inversor CC-CA

General	
Tensión aplicada a las terminales DC	800 V
Tensión de aislamiento, AC a 1 minutos, 60 Hz sinusoidal.	2500 V
Temperatura de operacion	25°C a 85 °C
Inversor IGBT	
Corriente del colector (25°C).	450 A
Corriente pico del colector	900 A
Corriente del emisor	450 A
Corriente pico del emisor	900 A

La tensión máxima a utilizar en las terminales de CA para los motores de inducción será de 460 V. Al alimentar los motores de inducción a una tensión de 460 V, demandan un corriente de 170.0 A y ya que se proponen dos motores en paralelo controlados por un mismo inversor, la corriente nominal que circulara de emisor a colector será de 340.0 A, los cuales no superan la intensidad de corriente nominal (ver corriente de colector tabla 3.3) que puede soportar el inversor en el emisor a colector.

De acuerdo a lo anterior se puede decir que el inversor seleccionado cumple con las características necesarias para la propuesta. En la figura 3.6 se muestra el diagrama del inversor propuesto.

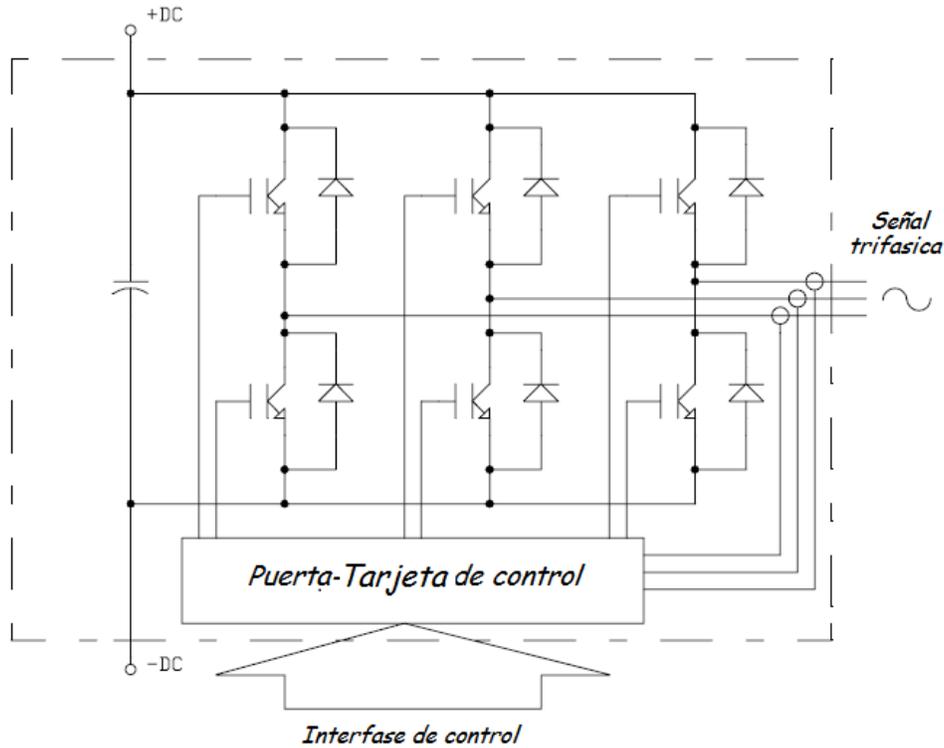


Figura 3. 6 Diagrama del convertidor CC-CA a base de IGBT's

3.6 FRENADO DEL ELEMENTO.

El frenado propuesto es del tipo regenerativo, el cual devolverá la energía regenerada durante el frenado del elemento a través del inversor CC-CA a las barras guía para que sea aprovechada por otro elemento se encuentre traccionando cerca. En caso de que no se encuentre ningún elemento cerca se propone además un frenado dinámico el cual limitara la tensión de bus de CC al dirigir la energía de frenado hacia una resistencia a través de un chopper de frenado.

El chopper de frenado es un conmutador eléctrico que conecta la tensión de bus de CC a una resistencia en la que la energía de frenado se transforma en calor. Los choppers de frenado se activan automáticamente cuando la tensión de bus de CC actual supera un nivel determinado de acuerdo la tensión nominal del inversor.

La resistencia de frenado deberá de ser capaz de disipar la energía regenerada desde una velocidad de 80 *km/h* hasta 17 *km/h*. El cálculo de la resistencia será a partir de la ecuación de la energía cinética.

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} M_t * v^2$$

$$E_{cinética} = \left(\frac{1}{2} * 376000 \text{ kg} \right) \left(\left(80 \frac{\text{km}}{\text{h}} - 17 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \left(\frac{1000\text{m}}{3600\text{s}} \right) \right)^2$$

$$E_{cinética} = 57\,570\,000 \text{ J}$$

Se debe tomar en cuenta la eficiencia de la relación de transmisión, y la eficiencia de la máquina de inducción al 100%, antes de elegir la resistencia. La $E_{cinética}$ deberá aumentar.

$$E_{cinética1} = \frac{E_{cinética}}{\eta_{R.T}} * \frac{1}{\eta_{MI}} = \frac{57\,570\,000 \text{ J}}{0.92} * \frac{1}{0.958} = 65\,325\,179.27 \text{ J}$$

La resistencia deberá de ser capaz de disipar 65 325 179.27 J. Y si 1 W*h son 3600 J entonces se tiene

$$E_{cinética1} = \frac{1 \text{ Wh}}{3600 \text{ J}} * \frac{65\,325\,179.27 \text{ J}}{1} = 18\,145.88 \text{ Wh} = 18.145\,88 \text{ kWh}$$

Se propone que cada boguie tenga un sistema de frenado dinámico y si son 12 boguies por elemento, cada boguie tendrá que disipar una energía de

$$E_{cinética*boguie} = \frac{18\,145.88 \text{ Wh}}{12} = 1\,512.15 \text{ Wh}$$

$$E_{cinética*boguie} = (1\,512.15 \text{ Wh}) \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) = 5\,443\,740 \text{ W} * \text{s}$$

De acuerdo con los datos vistos en el tema 3.3 la desaceleración durante el frenado deberá ser de 0.9 m/s^2 desde los 80 *km/h* hasta los 17 *km/h*, punto en el que entra el frenado neumático. Por lo tanto el tiempo de frenado será de

$$t = \frac{v_{final} - v_{inicial}}{-\alpha} = \frac{\left(17 \frac{km}{h} - 80 \frac{km}{h}\right) \left(\frac{1000m}{3600s}\right)}{0.9 m/s^2} = 19.44 s$$

Dividiendo la energía cinética entre el tiempo encontramos la potencia que las resistencias de frenado dinámico deberán soportar en cada boguie.

$$P_{resistencia} = \frac{E_{cinetica*boguie}}{t} = \frac{5\,443\,740\,Ws}{19.44\,s} = 279\,963.77\,W$$

$$P_{resistencia} = 279.96377\,kW$$

Se tomará una potencia de 300 kW, y el valor de la resistencia será de

$$P_{resistencia} = \frac{V_d^2}{R_d}$$

$$R_d = \frac{V_d^2}{P_{resistencia}} = \frac{(750\,V)^2}{300\,000\,W} = 1.875\,\Omega$$

Y a través de la resistencia circulará una corriente de

$$I_d = \frac{V_d}{R_d} = \frac{750\,V}{1.875\,\Omega} = 400\,A$$

Con el valor de corriente obtenido se seleccionó el chopper de frenado para la propuesta el cual es desarrollado por la industria POWEREX y el modelo es el **PM450DV1A120** y cuenta con las características mostradas en la tabla 3.4. Se observa en la tabla que el chopper seleccionado es capaz de soportar la corriente suministrada durante el frenado del elemento [17].

El chopper de frenado no cuenta con un sistema de enfriamiento propio, por lo que es necesario seleccionar un disipador de calor para ayudar a mantener al chopper operando en buenas condiciones.

Tabla 3. 4 Características principales del chopper de frenado [17].

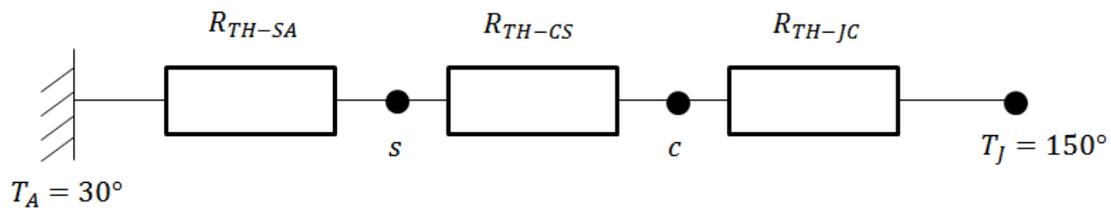
Chopper.		
Tensión de colector a emisor (VD = 15V, VCIN = 15V)	VCES	1200 V
Corriente de colector(TC = 25°C)	IC	450 A
Corriente pico de colector (Pulso)	CRM	900 A
Corriente de emisor(TC = 25°C)	IE	450 A
Corriente pico de emisor	IERM	900 A
Tensión de saturación entre emisor y colector	V _{CE(SAT)}	1.65 V
Temperatura de trabajo de la unión del dispositivo	T _j	(-20 a 150) °C
Características térmicas		
Resistencia térmica de la unión del encapsulado	R _{TH-CS}	0.056 °C/W
Resistencia térmica de contacto	R _{TH-JC}	0.018 °C/W

Para poder seleccionar el disipador de calor más adecuado es necesario [18]:

- 1) Calcular es la potencia que el chopper (P_{ch}) es capaz de disipar.

$$P_{ch} = V_{ce} * IE = 1.65 v * 450 A = 742.5 W$$

- 2) Realizar el circuito equivalente térmico (Figura 3.7) para el cálculo del disipador



T _j	Temperatura de trabajo de la unión del dispositivo	R _{TH-SA}	Resistencia térmica del disipador de calor
T _A	Temperatura ambiente	R _{TH-JC}	Resistencia térmica de la unión del encapsulado
R _{TH-CS}	Resistencia térmica de contacto		

Figura 3.7 Circuito equivalente térmico.

- 3) Con el circuito térmico equiválote (ver figura 3.7) se determina que la diferencia de la temperatura de unión de trabajo del dispositivo (T_J) y la temperatura ambiente (T_A) es igual a la potencia que disipa el chopper (P_{ch}) por la suma de las diferentes resistencias térmicas

$$T_J - T_A = P_{ch}(R_{TH-JC} + R_{TH-CS} + R_{TH-SA}) \quad (3.23)$$

- 4) Finalmente el disipador de calor más adecuado será seleccionado a partir del valor calculado de su resistencia térmica (R_{TH-SA}), y esto se logra al despejar R_{TH-SA} de la ecuación (3.23)

$$R_{TH-SA} = \frac{T_J - T_A}{P_{ch}} - (R_{TH-JC} + R_{TH-CS}) \quad (3.24)$$

$$R_{TH-SA} = \left(\frac{150^{\circ}C - 30^{\circ}C}{742.5 W} - \left(0.056 \frac{^{\circ}C}{W} + 0.018 \frac{^{\circ}C}{W} \right) \right)$$

$$R_{TH-SA} = 0.088 \text{ } ^{\circ}C/W$$

El inversor se seleccionará de un catálogo proporcionado por la empresa Fischer Elektronik. El inversor a seleccionar será el art. no. LA7, el cual cumple con la resistencia térmica anteriormente calculada [18].

3.7 ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO PARA LOS DOS MOTORES DE TRACCIÓN DE UN BOGUIE.

En la figura 3.8 se muestra el diagrama eléctrico por boguie desarrollado para la propuesta del nuevo sistema de tracción-frenado del elemento MP-68. En este diagrama se pueden visualizar las dos máquinas de inducción (MI) propuestas conectados y controlados por un inversor CC-CA (b) conectado a una alimentación de CC de 750 V, también se encuentra la resistencia (Rd) conectado al chopper (a) para el frenado dinámico, también se observan los relevadores diferenciales de intensidad (QDI), un relevador de sobre intensidad en frenado (QSF) y un relevador de tensión (RT), posteriormente se encuentra un disyuntor electromagnético de tracción (DET) y por último se visualizan dos fusibles (F1, F2) de 500 A cada uno.

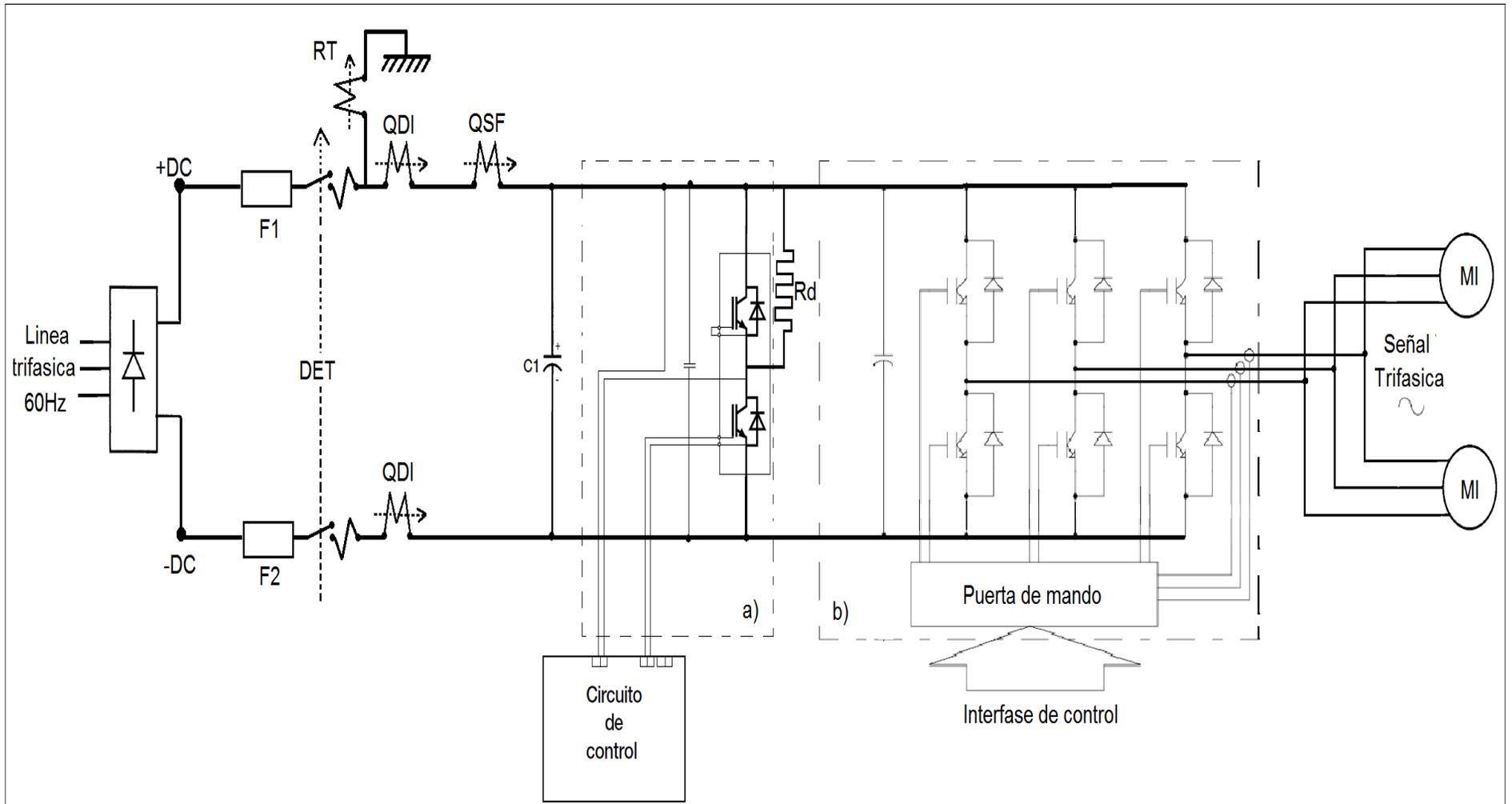


Figura 3. 8 Diagrama eléctrico del sistema propuesto

El convertidor CC-CA (b) será el encargado de controlar a las máquinas de inducción, provocando que estas trabajen como motores para la tracción o como generadores durante la etapa de frenado, además de generar la aceleración o desaceleración en las máquinas de inducción durante estas etapas. EL chopper de frenado (a) tendrá la función de disipar la energía eléctrica a través de la resistencia RD durante la etapa de frenado en caso de que esta energía no sea aprovechada por otro elemento y provoque un aumento en la tensión de CD en las barras de alimentación. Los fusibles, el DET, la resistencia de frenado dinámico y los relevadores se aprovecharán del sistema de tracción actual del elemento MP68 con el fin de generar un ahorro económico en la propuesta.

3.8 COSTOS

Un convoy MP-68 está conformado por tres elementos y a su vez cada elemento está conformado por dos carros motrices y un carro de arrastre, cada carro cuenta con dos boguies. Se propone comprar para cada boguie de los carros motrices dos motores de inducción, un convertidor CC-CA y un chopper de frenado de acuerdo a los capítulos anteriores y se plantea reutilizar la resistencias de frenado y los relevadores con los que cuenta actualmente el modelo MP-68 esto para generar el mínimo gasto.

Por lo tanto para llevar a cabo la propuesta para un convoy de nueve carros serán necesarios 24 motores de inducción, 12 convertidores CC-CA y 12 chopper de frenado.

Tabla 3. 5 Costos

	Precio por unidad	No. Unidades	Total
Convertidor CC-CA PP450D120	5800 USD	12	69 600 USD
Chopper de frenado PM450DV1A120	491 USD	12	5 892 USD
Motor de Inducción	5000 USD	24	120 000 USD
Total			195 492 USD

El costo aproximado de la propuesta será de 195 492 USD. Es necesario mencionar que no se han tomado en cuenta impuestos por lo que el costo real de la propuesta dependerá de los impuestos a pagar.

Antes de la puesta en marcha de cualquier proyecto empresarial y asumir el riesgo inherente a su desarrollo, es imprescindible realizar un análisis para comprobar su viabilidad económico-financiera, de tal forma que los resultados obtenidos nos permitirán concluir si es conveniente llevar a cabo dicho proyecto, si hay que realizar alguna modificación o conviene abandonar la idea.

A continuación se desglosa todo lo relacionado a los costos y precio final de la realización de la propuesta de este proyecto de conversión de trenes MP-68 de su sistema de tracción-frenado JH a un sistema de tracción asíncrona.

Aclarado lo anterior, en promedio, el precio de un tren neumático nuevo de nueve carros es del orden de \$208 000 000.00 (doscientos ocho millones de pesos). Este precio es el precio del producto final, tomando en cuenta mano de obra, materiales, utilidades del fabricante, etc. Desde luego que el precio fluctuará un poco dependiendo la marca del tren, las características y requerimientos. El tren como tal está compuesto por un conjunto de sistemas que conjuntamente proporcionan un adecuado funcionamiento. La distribución del precio de cada uno de estos equipos es el siguiente [8]:

Tabla 3. 6 Precios aproximados de las partes principales de un convoy del STC METRO [8].

Sistema del tren	Porcentaje (%)	Precio (\$)
Sistema de Tracción-Frenado	35	72 800 000.00
Carretilla y Equipos Mecánicos	15	31 200 000.00
Equipo de Pilotaje Automático	13	27 040 000.00
Caja	8	16 640 000.00
Resto de equipos	29	60 320 000.00
Total	100	208 000 000.00

Como se aprecia en la tabla anterior, el equipo de tracción frenado es el sistema más caro de todos los que conforman el tren, seguido por aquel que forma las carretillas y sus elementos mecánicos como zapatas de freno, ruedas de seguridad, ruedas guía, ruedas portadoras, etc. El restante 29 por ciento engloba lo relacionado con los sistemas de generación de energía y carga de baterías, señalización, registro y equipos de comunicación [8].

Para la conversión de un tren de sistema de tracción-frenado JH a un sistema de tracción asíncrona se tienen que tomar en consideración los parámetros del sistema de tracción-frenado, los equipos mecánicos y las carretillas, así como las cajas. En este caso particular de un MP-68, la caja está fabricada de fierro colado, de alta calidad y muy resistente a golpes y a la corrosión. La vida útil de una caja de este material es de 30 a 40 años. Las de los MP-68 tienen 40 años en servicio, pero hay trenes en servicio en Francia y en otros países que sobrepasan los 50 años y no presentan problemas en las estructuras de sus cajas, gracias a la calidad con la que fueron fabricadas [8].

La modernización o rehabilitación de un tren es de un 30 a un 40 por ciento más barata que la compra de un tren nuevo. Por lo tanto, a grandes rasgos, el precio aproximado sería el siguiente, tomando en cuenta un 36 por ciento como porcentaje de ahorro. Ese 36 por ciento se va a tomar en cuenta para determinar en el desglose el precio más exacto del valor total de la conversión de un tren JH a tracción asíncrona [8]:

$$\$C_A = \text{PrecioTrenNuevo} - 0.36\text{PrecioTrenNuevo} \quad 3.25$$

$$\$C_A = 208\,000\,000.00 - (0.36 * 208\,000\,000.00)$$

$$\$C_A = 208\,000\,000.00 - 74\,880\,000.00$$

$$\$C_A = 133\,120\,000.00$$

(Ciento treinta y tres millones ciento veinte mil pesos)

Donde, \$C_A es el precio de Conversión Aproximado final de la modernización de un tren, que incluye lo primordial, es decir, la conversión JH-Tracción asíncrona.

De lo anterior se entiende que el precio final aproximado de la conversión JH-Tracción asíncrona es de \$133 120 000.00 (Ciento treinta y tres millones ciento veinte mil pesos) Esto es un precio sólo para dar una idea del tamaño del ahorro que se tendría implementando un trabajo de esta magnitud.

Dicho lo anterior, a grandes rasgos los beneficios obtenidos al aplicar este proyecto se visualizan en el tema 3.8.

3.8 COMPARACIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN-FRENADO PROPUESTO Y EL TIPO JH

En la tabla 3.6 se muestran las principales diferencias del Sistema de Tracción-Frenado tipo JH y el sistema propuesto.

Tabla 3. 7 Comparación de los sistemas de tracción.

Sistema de Tracción-Frenado	Alimentación	Tracción				Frenado	
		Motores			Dinámico	Regenerativo	
		Potencia	F.P.	Control			
Actual (JH)	750 VCD	Motores de CC	114 kW	<90%	Resistivo	✓	
Propuesto (Tracción asíncrona)	750 VCD	Motores de Inducción	111.9 kW	>90%	Electrónico	✓	✓

En la tabla 3.7 se observan las ventajas y desventajas del sistema actual y del sistema propuesto. Con lo que se determina que la propuesta de mejora del Sistema de Tracción-Frenado es viable ya que representa un aumento en la eficiencia del sistema. Por ultimo en la figura 3.9 se presenta un diagrama de comparación del sistema actual y el sistema propuesto.

Tabla 3. 8 Ventajas y desventajas

Sistema de Tracción-Frenado JH		Sistema de Tracción-Frenado propuesto	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
	Mantenimiento preventivo y correctivo semanal.	Mantenimiento preventivo y correctivo casi nulo.	
	Motores serie CC con F.P.<90%	Motores de inducción con F.P.>90%	
	Control de par-velocidad resistivo	Control electrónico (IGBT's)	
	Frenado dinámico, pérdidas en calor aproximadamente del 30%	Frenado regenerativo, aprovechamiento de energía regenerada.	Frenado dinámico, pérdidas en calor aproximadamente del 15%

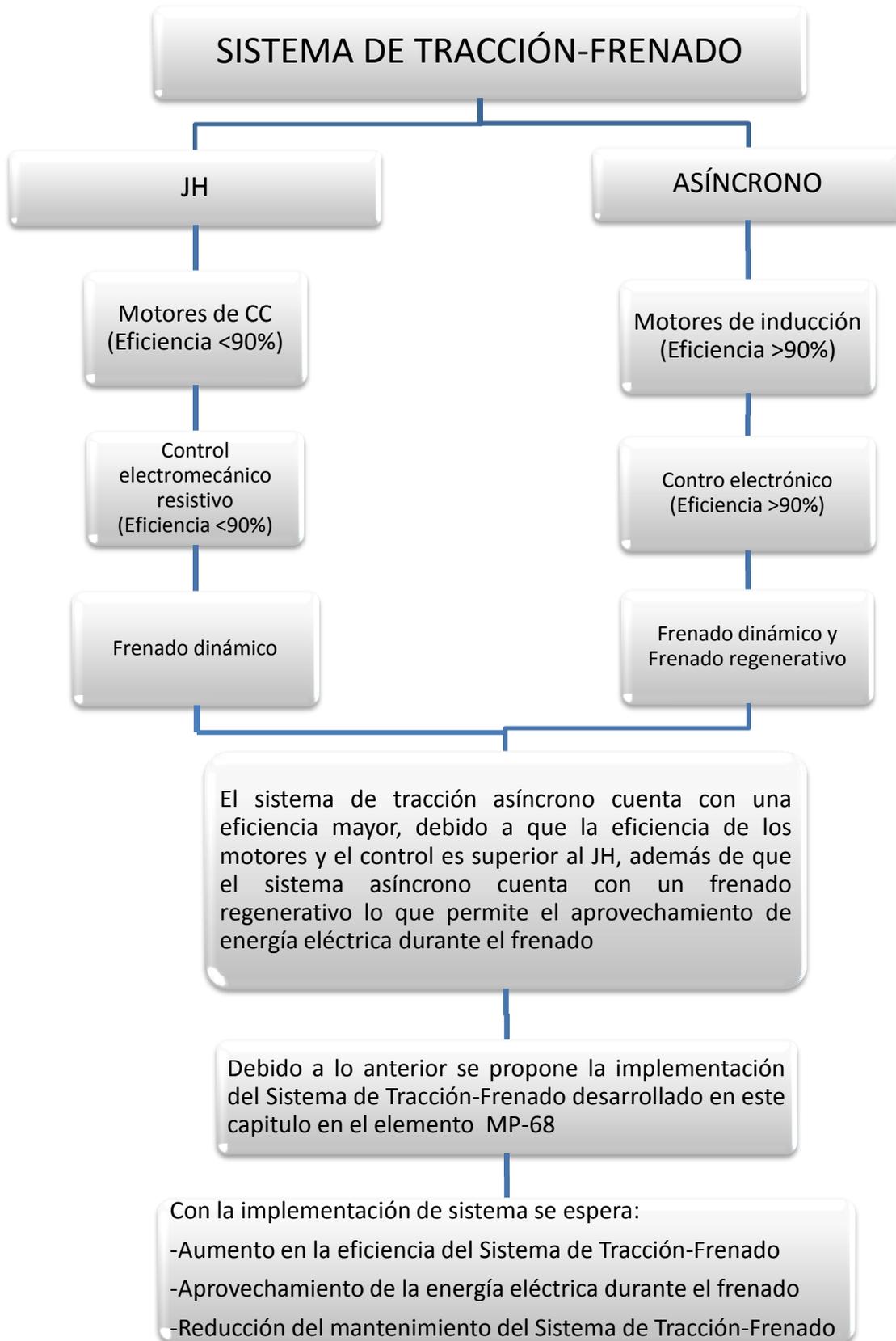


Figura 3. 9 Diagrama de comparación

CONCLUSIONES

Se desarrolló una propuesta para la mejora del Sistema de Tracción-Frenado del MP-68 que utiliza motores de inducción y accionamientos electrónicos basados en el uso de transistores IGBT's con sistema de recuperación de energía.

Para solucionar la problemática de operar un sistema de tracción altamente ineficiente con costos altos, tanto de consumo de energía como de procesos y tiempos de mantenimiento, se planteó una propuesta para mejorar del Sistema de Tracción-Frenado basado en motores de CA con una eficiencia de 96.2% con accionamientos electrónicos basados en el uso de transistores IGBT's y con la capacidad de incorporar sistemas de recuperación de energía hasta del 20 % y anulando el mantenimiento preventivo y correctivo así como ahorro en los gastos de operación y mantenimiento de los trenes es considerable, aproximadamente un 60% menor.

Por último se concluye que la propuesta del Sistema de Tracción-Frenado es viable ya que se estima una reducción pérdidas de hasta el 20% debido a que el accionamiento del JH está basado en un control resistivo con motores de CC con eficiencias menores al 90% y el sistema propuesto utiliza motores de inducción con una eficiencia del 95.8% y un accionamiento electrónico con una eficiencia del 96% capaz de devolver la energía eléctrica regenerada durante el frenado, elevando la eficiencia del Sistema de Tracción-Frenado del MP-68 aproximadamente 10% .

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CONACyT-Gobierno del Distrito Federal. (2012). *Demandas Específicas*. Recuperado el 4 de Abril del 2013 de <http://ebookbrowse.com/fomix-df-2012-02-demandas-especificas-stc-pdf-d362250501>.
- [2] CONACyT-Gobierno del Distrito Federal. (2012). *Desarrollo de un Sistema de Tracción y Frenado para los trenes del METRO de la Ciudad de México. Convocatoria: M0031-2012-0*. Recuperado el 6 de Abril del 2013 de <http://www.conacyt.gob.mx/convocatorias/paginas/default.aspx>.
- [3] Sistema de Transporte Colectivo. (2012). *Conformación de un tren del METRO*. Recuperado el 30 Abril del 2013 de <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/conformactren.html>.
- [4] Sistema de Transporte Colectivo. (2012). *Datos de operación*. Recuperado el 2 de Abril del 2013 de <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/index.html>.
- [5] Sistema de Transporte Colectivo. (2012). *Funcionamiento del carro*. Recuperado el 2 de Mayo del 2013 de <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/caraccarros.html#n>.
- [6] Sistema de Transporte Colectivo. (2012). *Características generales del material rodante*. Recuperado el 6 de Mayo del 2013 de <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/caractecnicas.html#n>.
- [7] Sistema de Transporte Colectivo. (2012). *Parque vehicular*. Recuperado el 8 de Mayo del 2013 de <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/index.html>.
- [8] Hernández Peñaloza, P. (2010). *Conversión de trenes del STC Mp-68R93 a Sistema de Tracción-Frenado VVVF*. (Tesis de Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, México, D. F.
- [9] Rivas, J. R. (2003). *Análisis del sistema de tracción-frenado del MP-82*. México, Distrito Federal.
- [10] Chapman, S. J. (1993). *Máquinas Eléctricas* (Segunda ed.). (M. E. Suárez R, Ed.) Impreso en Colombia: McGRAW-HILL.
- [11] Bose, B. K. (2002). *Modern power electronics and AC drivers*. Impreso en Estados Unidos de Norte America: Prentice Hall PTR.
- [12] *Wikimedia commons*. (s.f.). Recuperado el 22 de Octubre de 2013, de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metro_de_Paris_-_Bogie_de_MP_55_-_02.jpg

- [13]ABB. (s.f.). Recuperado el 03 de 11 de 2013, de [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/3c8c6aeae757c113c1256d28004110e1/\\$file/technical_guide_no_7.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/3c8c6aeae757c113c1256d28004110e1/$file/technical_guide_no_7.pdf)
- [14]ABB. (s.f.). Recuperado el 03 de 11 de 2013, de [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/92546f2be5281d93c1256d280041534a/\\$file/Technical_Guide_No_8_ES.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/92546f2be5281d93c1256d280041534a/$file/Technical_Guide_No_8_ES.pdf)
- [15]WEG México. (2012). W22-MOTOR TRIFASICO-Tecnico-Mercado-Mexicano-Catalogo-Espanol. México.
- [16]POWEREX. (2013). POWEREX PP450D120. *POW-R-PAKTM 450A / 1200V Half Bridge IGBT Assembly*. 200 Hillis Street, Youngwood, Pennsylvania, USA.
- [17]POWEREX. (2013). POWEREX PM450DV1A120. *Intellimod™ Module Single Phase IGBT Inverter Output 450 Amperes/1200 Volts*. Pavilion Lane, Youngwood, Pennsylvania, USA.
- [18]FISCHER ELEKTRONIK. (2013). heatsinks.pdf. *Extruded heatsinks LED headsinks cooling aggregates*. USA.