

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“EQUIPAMIENTO, ELÉCTRICO DE UNA PLATAFORMA MÓVIL  
AUTOPROPULSADA DE 20 TM UTILIZANDO  
ACUMULADORES ELÉCTRICOS”**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:  
MIGUEL ANGEL NIN VALLEJOS**

**PROMOCIÓN 1984-II  
LIMA-PERÚ  
2004**

***Dedico este trabajo:***

***A mi padre,***

***A mi Esposa y mis hijas,***

***Y a mi alma Mater,***

***La Universidad Nacional de Ingeniería ,  
Sin lugar a dudas una de las mejores del Perú***

**EQUIPAMIENTO ELÉCTRICO DE UNA  
PLATAFORMA MÓVIL AUTOPROPULSADA DE 20 TM  
UTILIZANDO ACUMULADORES ELÉCTRICOS**

## **SUMARIO**

**En el presente trabajo se muestra una forma confiable de realizar los cálculos estimativos de los parámetros mas importantes para el equipamiento eléctrico de una plataforma móvil autopropulsada de 20 toneladas métricas de peso total incluyendo la carga, la cual debe trasladarse sobre rieles de acero a lo largo de una trayectoria de 1,240 metros transportando maquinaria pesada desde un muelle en el puerto de Ilo hasta la zona de despacho de una compañía de servicios mineros de la costa sur del Perú. La energía eléctrica será suministrada por un acumulador eléctrico instalado en la misma plataforma, y la potencia impulsora será desarrollada por motores eléctricos de corriente continua de devanado serie gobernados por un equipo de control de velocidad operado desde la cabina del piloto. Los cálculos, en general se sustentan en las teorías de tracción eléctrica desarrolladas a partir de las necesidades de la industria ferrocarrilera y fabricante de vehículos grúa sobre rieles de acero. Unas cuantas y simples ecuaciones de la mecánica y algunas gráficas, tablas y datos empíricos obtenidos experimentalmente a lo largo de varias décadas de investigación de dicho sector industrial son las herramientas que nos permitirán alcanzar los objetivos propuestos.**

# INDICE

## SUMARIO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
---------------------	----------

## CAPITULO I

### **DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA IMPULSORA**

<b>1.1 Par y potencia mecánica</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Formulación del esfuerzo resistente y de tracción</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Determinación del esfuerzo resultante</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Resistencia en recta y horizontal</b>	<b>14</b>
<b>1.5 Resistencia en pendientes y curvas</b>	<b>18</b>
<b>1.6 Resistencia de inercia</b>	<b>22</b>
<b>1.7 Determinación del máximo esfuerzo de tracción</b>	<b>25</b>
<b>1.8 Nociones sobre adherencia</b>	

## CAPITULO II

### **SELECCIÓN DE LOS ACUMULADORES**

<b>2.1 El acumulador eléctrico</b>	<b>33</b>
<b>2.2 Elementos fundamentales del acumulador eléctrico de plomo ácido</b>	<b>39</b>
<b>2.3 Principio de operación</b>	<b>45</b>
<b>2.4 Criterios para la selección de la batería</b>	<b>55</b>
<b>2.5 Carga de la batería</b>	<b>64</b>
<b>2.6 Regímenes de carga</b>	<b>67</b>

**CAPITULO III****EL CARGADOR DE BATERIA**

3.1 Criterios de selección del cargador	71
3.2 Métodos de carga	72
3.3 Tipos de cargadores estáticos	75
3.4 El cargador estático ferro resonante	76
3.5 El cargador estático de estado sólido	95

**CAPITULO IV****LOS EQUIPOS DE POTENCIA Y CONTROL**

4.1 Alternativas de potencia y control	103
4.2 Motores de tracción en DC	110
4.3 Principios básicos de operación	119
4.4 El régimen de aceleración	131
4.5 Control de frenado	143
4.6 Frenado regenerativo	147
4.7 Frenado reostático	148
4.8 El control por resistencias en DC	149
4.9 El control serie paralelo	151
4.10 El control electrónico de la velocidad	153

**CAPITULO V****DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS TECNICOS DE SELECCIÓN**

5.1 Datos generales	165
5.2 Determinación de la aceleración promedio lineal	166

<b>5.3 Determinación de la potencia impulsora</b>	<b>168</b>
<b>5.4 Determinación del máximo torque de operación</b>	<b>173</b>
<b>5.5 Determinación del esfuerzo de frenado</b>	<b>175</b>
<b>5.6 Determinación de la capacidad de la batería</b>	<b>177</b>
<b>5.7 Elección del cargador de batería</b>	<b>178</b>
<b>5.8 Elección del control de la velocidad</b>	<b>179</b>
<b>5.9 Costos de inversión</b>	<b>180</b>

## **CONCLUSIONES**

## **ANEXOS**

## **BIBLIOGRAFIA**

## **INTRODUCCIÓN**

**La aplicación de baterías eléctricas como fuente de energía en general y su utilización para alimentación de motores eléctricos en particular es muy poco difundida y estudiada en el Perú. Es así como en la mayoría de programas curriculares universitarios de electricidad, electrónica y mecánica eléctrica, se le presta muy poca atención. Considerando además que el material bibliográfico especializado disponible en nuestro medio es escaso, podría explicarse la razón por la cuál, en muchos casos, el proyectista no toma en cuenta esta tecnología como alternativa a evaluar frente a otras opciones en aplicaciones donde podría haber sido conveniente una solución de este tipo.**

**Las baterías, a pesar de su temprano descubrimiento (la primera batería o pila eléctrica fue atribuida al físico italiano Alessandro Volta alrededor del año 1,800) no encontraron aplicación industrial en muchos años y fueron relegadas por el auge de los generadores prácticamente a la condición de curiosidad de laboratorio. Posteriormente, con el advenimiento de la industria automotriz, la batería encontró un impulso importante en su estudio y fabricación. Y es así como en la segunda mitad del siglo veinte muchos estudios e investigaciones consiguieron gradualmente ampliar sus potenciales aplicaciones al mejorar**



grandemente su rendimiento, vida útil, y reducir sus costos. En la actualidad, la importancia de la batería como fuente de suministro de energía esta fuera de toda duda. Sin embargo, aparte de las aplicaciones de muy pequeña potencia, se le asocia principalmente a la industria automotriz.

En los vehículos eléctricos de tracción, la batería a encontrado una aplicación en la cual, dentro de ciertos rangos de potencia y condiciones de utilización, logra mantener ventajas sobre sistemas alternativos mas convencionales, no solamente por los bajos niveles de contaminación frente, por ejemplo, al empleo de un vehículo con motor de explosión, sinó también en costos de operación e inclusive costos de inversión. Podemos citar, a manera de ejemplo, el caso de las locomotoras mineras impulsadas exclusivamente a baterías con requerimientos de potencia que van desde 1 hasta 50 HP, o los montacargas eléctricos que mantienen autonomía de operación durante seis u ocho horas de uso continuo. También podemos mencionar el caso de los denominados vehículos híbridos que son novedosos vehículos automotores dotados de motores eléctricos alimentados por una batería de plomo ácido que alternan la operación con un motor de explosión alcanzando notables mejoras en la eficiencia y rendimiento del vehículo respecto de un automóvil convencional.

En el presente caso, se trata de equipar una plataforma móvil que debe trasladar carga consistente en maquinaria pesada cuyo peso máximo estimado es de 15 Toneladas métricas, desde un punto ubicado en un muelle de Ilo

hasta una zona de tránsito temporal definida por una compañía de servicios mineros de la costa sur del Perú, en una trayectoria recta horizontal de aproximadamente 1,240 metros. A efecto de lo cual se ha proyectado el diseño y construcción de una unidad móvil consistente en una estructura metálica que se apoya en un conjunto de ocho ruedas de acero de 12 pulgadas de diámetro efectivo, y que soporta una plataforma rectangular de 4 metros de ancho y 10 metros de largo. El conjunto tiene un peso total de 5 toneladas métricas sin considerar la carga y debe desplazarse sobre rieles de acero de 115 lbs/yarda con una trocha de 1.8 metros para una frecuencia de uso máxima de dos viajes de ida y vuelta cada 45 ó 60 días. La trayectoria no presenta curvas pero sí tres tramos con inclinaciones que deben ser superadas en ambos sentidos. El más grande de esos tramos tiene una pendiente de 2.45% con una longitud de 236 metros, un segundo tramo tiene una pendiente de 2.08% en el mismo sentido de la anterior con una longitud de setenta y dos metros y finalmente el otro tramo con inclinación de sentido opuesto a los 2 tramos anteriores presenta una pendiente de 2.08% con una distancia de también setenta y dos metros. No es propósito de el presente trabajo definir los detalles del diseño, construcción y características de resistencia y estabilidad de la estructura mecánica. Tal responsabilidad recae en una compañía especializada del sector metal mecánico. Tampoco es nuestro objetivo hacer un estudio técnico económico comparativo de las diversas opciones de equipamiento eléctrico como por ejemplo la utilización de líneas eléctricas de

alimentación a lo largo del recorrido, aunque solamente para fines ilustrativos, hemos incluido en el apéndice una relación de algunos de los costos que implicarían el tendido de una línea de alimentación con colectores de corriente deslizantes con valores tomados de los precios de lista de compañías que representan en el Perú a fabricantes de este tipo de equipos y de algunas cotizaciones presentadas como alternativa técnica, de modo que sin mucho análisis pueda verificarse, para la presente aplicación, una clara ventaja de costos de inversión a favor de la solución con acumuladores. La tarea nuestra consiste mas bien en proponer una solución con acumuladores eléctricos para el equipamiento de la estructura móvil proyectada, de forma tal que sea autopropulsada, y gobernada de una manera segura y confiable por un operador que comande el vehículo desde una cabina ubicada en la parte superior de la plataforma, desarrollando una velocidad máxima sugerida de 3.6 Km/hora. Sin embargo, nuestro principal objetivo es proporcionar al lector los criterios que deben tenerse en cuenta para dimensionar el equipamiento eléctrico de una aplicación particular de tracción de un vehículo autopropulsado sobre rieles de acero mostrando métodos de evaluar los parámetros que influyen en la determinación de la potencia que pueden ser utilizados, con muy poca diferencia, para cualquier otra aplicación similar, por ejemplo para locomotoras mineras de socavón propulsadas eléctricamente a través de acumuladores de plomo ácido, cuyo uso es muy difundido en el Perú. Otro objetivo importante es estimular al lector en el conocimiento de los más

importantes aspectos involucrados en la utilización de las baterías de plomo ácido para aplicaciones de tracción mostrando unos cuantos y simples criterios necesarios para su adecuada selección y dimensionamiento, que sin embargo, son poco conocidos por un buen número de ingenieros proyectistas.

En el primer capítulo se plantean de una manera breve las formulaciones básicas que fundamentan los cálculos para la determinación de la potencia, y que son necesarias para asegurar el adecuado desplazamiento de vehículos que deban trasladarse sobre rieles de acero. Hay que aclarar que los criterios planteados en el referido capítulo forman parte del conocimiento y la experiencia de la industria ferrocarrilera en primer lugar y de la dedicada a la fabricación de vehículos grúa sobre rieles en segundo término, ambas de muy larga data y trayectoria a nivel mundial, y cuyo desarrollo es la base donde se apoyan normas y estándares de fabricación.

Una plataforma autopropulsada como la que se requiere en el presente caso, si bien es una aplicación particular poco convencional y por lo tanto, no existen normas técnicas específicas al respecto, guarda una obvia similitud con los equipos fabricados por los sectores industriales arriba mencionados. Motivo por el cuál hemos tomado en cuenta sus métodos y experiencia.

En el segundo capítulo se presentan los criterios básicos necesarios para la selección y determinación de la capacidad de un acumulador eléctrico para aplicaciones de tracción mostrando a la vez las características más importantes de los equipos que se fabrican en la actualidad.

En el tercer capítulo se describen algunas de alternativas comercialmente disponibles de los equipos cargadores de baterías que son indispensables para cualquier aplicación con acumuladores recargables como es el caso que nos ocupa. El conocimiento de las características de carga resulta de particular importancia puesto que el tipo de cargador y por ende el tipo de carga a la que sometamos a la batería es un factor determinante en lo que respecta al rendimiento, perfil de operación y vida útil de la batería. Por lo cuál al incluir este capítulo se ha tenido en mente que las ventajas que pudieran representar una aplicación con acumuladores eléctricos en la actualidad (por ejemplo vida útil promedio superior a los cinco años de operación) podrían ser neutralizadas totalmente por una mala selección del cargador.

En el cuarto capítulo se describen las características de algunas alternativas de control y potencia para aplicaciones de tracción con énfasis en los equipos destinados a operar con motores de tracción de corriente continua de conexión serie, que en aplicaciones como la presente, para los rangos de potencia involucrados y suministro de energía mediante baterías, son los de mayor difusión y disponibilidad comercial principalmente entre otras cosas, en razón de los resultados satisfactorios obtenidos por los usuarios a través de los años y su larga experiencia de utilización.

Finalmente el quinto capítulo tiene por objeto presentar los cálculos justificativos y la selección de los equipos resultado de la aplicación de los criterios expuestos en los capítulos anteriores. Hay que señalar aquí que solo

se definen y detallan aquellos componentes del equipamiento que pueden considerarse esenciales y que inciden tanto en el perfil técnico operativo que va a desarrollar el vehículo como aquellos que inciden con gran influencia en los costos. Otros aspectos, como por ejemplo la determinación de los calibres de los conductores, los circuitos de iluminación, señales auditivas y otros circuitos auxiliares no indispensables que, aunque han sido incluidos en el proyecto original, no se describen aquí ni en ninguno de los otros capítulos por considerarlos elementos no sustantivos en los objetivos del presente trabajo. Si bien, algunos detalles se incluyen en los anexos a manera de información complementaria. Asimismo y por la misma razón no se exhiben planos ni esquemas detallados de interconexiones y cableados.

# CAPITULO I

## DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA IMPULSORA

### 1.1 Par y potencia mecánica

El trabajo mecánico quedó definido por Sir Isaac Newton como la integral de la fuerza por la distancia a través de la cuál actúa

$$W = \int f \delta x \quad (1.1)$$

Siendo :

$W \Leftrightarrow$  Trabajo en Joules

$f \Leftrightarrow$  fuerza en Newton

$\delta x \Leftrightarrow$  diferencial de la distancia  $x$  en metros

La Potencia fue definida como la velocidad con la cuál se ejecuta el trabajo, de modo que en términos diferenciales:

$$P = \frac{(\delta W)}{\delta t} \quad (1.2)$$

Donde:

$P \Leftrightarrow$  Potencia en Watts

$\delta t \Leftrightarrow$  Diferencial de tiempo en segundos

$\delta w \Leftrightarrow$  Diferencial de trabajo en Joules

Para una rueda de radio "r" metros la cuál se halla sometida a una fuerza tangencial que la hace girar un ángulo diferencial " $\delta\theta$ " radianes:

(ver figura 1.1).

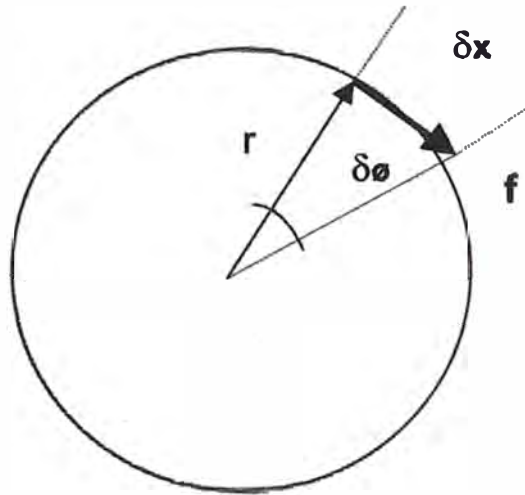


Figura 1.1  
Rueda de radio r sometida a una fuerza tangencial f

Sabemos que:

$$\delta\theta = \frac{\delta x}{r}$$

es decir:

$$\delta x = r \delta\theta$$

Aplicando a la ecuación (1.1)



$$W = \int f r \delta\theta \quad (1.3)$$

El par motor aplicado al eje de rotación es por definición la fuerza tangencial multiplicada por la distancia a la cuál se aplica dicha fuerza, es decir:

$$T = f r$$

Luego en (1.3)

$$W = \int T \delta\theta$$

Derivando respecto al tiempo para determinar la potencia:

$$P = \frac{\delta W}{\delta t} = \frac{T \delta\theta}{\delta t}$$

Siendo la velocidad angular  $\omega$  en radianes por segundo

$$\omega = \frac{\delta\theta}{\delta t}$$

Luego:

$$P = T \omega \quad (1.4)$$

Donde:

$P \Leftrightarrow$  Potencia en Watts

$T \Leftrightarrow$  Par motor en Newton - metro

$\omega \Leftrightarrow$  Velocidad angular en radianes por segundo

Además como:

$$\omega = \frac{V}{r} \quad (1.5)$$

donde:

$V \Leftrightarrow$  Velocidad Tangencial en m/seg

$r \Leftrightarrow$  Radio en metros

La ecuación (1.4) puede expresarse también como:

$$P = FV \quad (1.6)$$

Donde:

$F \Leftrightarrow$  Fuerza tangencial en Newtons

$V \Leftrightarrow$  Velocidad tangencial en m/seg

## 1.2 Formulación del esfuerzo resistente y de tracción

El estudio de la capacidad de tracción de un vehículo rodante supone el conocimiento de ciertas nociones básicas referentes a sus características de utilización, características de la vía de rodadura y otras inherentes a cada aplicación. En el caso que nos ocupa, un vehículo de tracción eléctrica que va a desplazarse sobre rieles de acero, tales nociones básicas pueden estudiarse a través del análisis de los siguientes aspectos:

- Los esfuerzos resistentes debidos al movimiento
- El esfuerzo de tracción necesario para desarrollar determinada velocidad
- Las limitaciones al esfuerzo de tracción.

En la figura 1.2 representamos esquemáticamente, una rueda de radio " $r$ " impulsada por un par motor " $T$ " aplicado en su eje de rotación. En este caso, a la fuerza " $F$ " tangencial a la circunferencia que actúa sobre la vía de rodadura la llamamos "Esfuerzo de tracción", siendo  $V$  la velocidad de traslación del vehículo. Como consecuencia de este esfuerzo de tracción, aparecerá una fuerza " $R$ " que tenderá a oponerse al esfuerzo de tracción y a la cuál denominamos "Esfuerzo resistente."

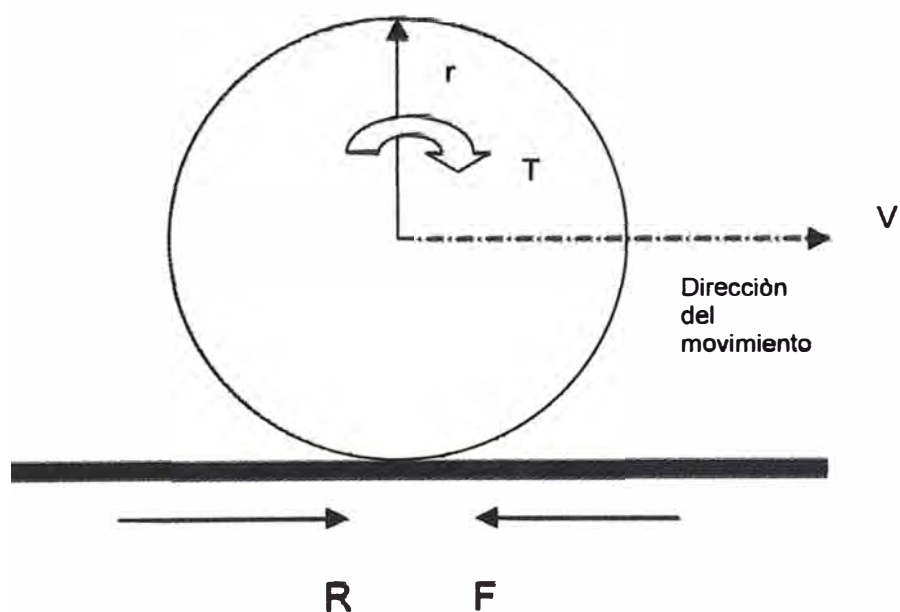


Figura 1.2  
Rueda impulsada sobre una superficie plana horizontal

### 1.3 Determinación del esfuerzo resistente

Los esfuerzos resistentes suelen expresarse en kilogramos por tonelada o en libras por tonelada (unidades inglesas), denominándose “Resistencia específica” al esfuerzo resistente que debe vencer el elemento motriz para desplazar o acelerar una tonelada del vehículo sobre la vía. En general :

$$R = r p \quad (1.7)$$

Donde:

$R \Leftrightarrow$  Esfuerzo resistente en kg

$r \Leftrightarrow$  Resistencia específica en kg / TM

$p \Leftrightarrow$  Peso en TM

Como es obvio, durante la traslación de un vehículo que se desplaza sobre ruedas a velocidad constante el esfuerzo de tracción “F” y el esfuerzo resistente “R” se equilibran exactamente de modo que también es válido decir que:

$$F = r p \quad (1.8)$$

El esfuerzo resistente es una composición de esfuerzos producidos a una velocidad determinada. Esta composición se presenta de la siguiente manera:

- La suma de resistencias de cualquier naturaleza que, en línea recta y horizontal se oponen al movimiento del vehículo
- Resistencias ocasionales debidas a pendientes y curvas
- Resistencias por inercia de las grandes masas que se ponen en movimiento durante los arranques y aceleraciones

#### **1.4 Resistencia en recta y horizontal**

Esta resistencia opuesta al movimiento se presenta cuando el vehículo se desplaza en línea recta horizontal, y constituye una fuerza retardadora que depende del tipo, peso, velocidad, geometría y forma constructiva del vehículo, así como del tipo y de las condiciones de la vía, es decir, proviene básicamente del comportamiento y estado, en las condiciones de operación, de los atributos internos del vehículo como son rodamientos, cajas de grasa de las ruedas, choques en las juntas, pérdidas de energía en las suspensiones, proviene también del rozamiento de las vías de rodadura ( por ejemplo los rieles ) con las ruedas, pestañas, y además de la resistencia del aire.

En base a lo expuesto se puede comprender que la determinación del valor de la resistencia en recta horizontal no se puede hacer simplemente mediante planteamientos teóricos, sino mas bien, se deduce de la experiencia adquirida durante ensayos y mediciones especialmente realizados a ese fin por fabricantes e investigadores involucrados con la industria y el negocio de los vehículos de transporte de carga o pasajeros según sea el caso. En general, la resistencia específica puede ser calculada mediante la utilización de fórmulas empíricas que involucran los factores que influyen significativamente en su magnitud, y como consecuencia de ello su valor dependerá de algunos coeficientes relativos al tipo de vehículo que se quiere calcular los cuales se resumen en la siguiente fórmula:

$$r_h = a + bV + cV^2 \quad (1.9)$$

Donde:

$r_h$  = Resistencia específica en línea recta horizontal

$V$  = Velocidad del vehículo.

$a$  = Coeficiente que representa los efectos de rodadura por resistencia en las cajas de grasa y cojinetes.

$b$  = Coeficiente que representa la influencia de los choques en las juntas de la vía y las pérdidas de energía.

$c$  = Coeficiente que representa la influencia del aire.

De acuerdo a lo dicho, tenemos las fórmulas de "Davis", las cuales son el resultado de los ensayos ejecutados por el Ingeniero W.J. Davis Jr. De la General Electric Company aplicados a vehículos locomotores de tracción eléctrica. De estas formulas, solo la ecuación (1.10) reviste interés para nosotros ya que los vagones tanto de carga como de pasajeros son arrastrados por la locomotora además de no presentar una superficie frontal al viento al estar ubicados detrás de la locomotora. De todos modos las otras 2 formulas las presentamos a manera de ilustración.

Fórmulas de Davis para locomotoras eléctricas:

$$r_h = 0.65 + \frac{13.15}{P} + 0.00932 V + 0.00456 \frac{A V^2}{P} \quad (1.10)$$

Para vagones de pasajeros:

$$r_h = 0.65 + \frac{13.15}{p} + 0.00932V + 0.000645 \frac{AV^2}{P} \quad (1.11)$$

Para vagones de carga con caja grasera y cojinetes:

$$r_h = 0.65 + \frac{13.15}{p} + 0.01398V + 0.0009428 \frac{AV^2}{P} \quad (1.12)$$

Donde:

$r_h \Leftrightarrow$  Resistencia específica en línea recta horizontal en kg/TM

$V \Leftrightarrow$  Velocidad del vehículo en Km/h

$A \Leftrightarrow$  Área de la sección frontal del vehículo en m<sup>2</sup>

$p \Leftrightarrow$  Peso por eje de vehículo en TM

$P \Leftrightarrow$  Peso total del vehículo en TM

Es necesario aclarar que algunos calculistas prefieren separar la resistencia específica del aire denominando resistencia específica a la rodadura en recta horizontal a los 2 primeros sumandos de la ecuación (1.9) y al tercer sumando resistencia específica del aire. Esto debido a que la resistencia del aire, la cual es producida por la presión del aire que a altas velocidades actúa sobre la superficie delantera de la locomotora y sobre las superficies longitudinales del vehículo a manera de rozamiento lateral además de un efecto de aspiración por el vacío producido en la parte posterior del vehículo, depende mucho de la

forma aerodinámica que cada fabricante le da a sus diseños. Por ejemplo, "El Manual del Ingeniero de Locomotoras SEAC" recomienda la siguiente fórmula para la resistencia específica del aire:

$$r_v = \frac{\beta V^2}{100} \quad (1.13)$$

donde :

$\beta = 0.033$  para locomotoras con vagones de 2 o 3 ejes

$\beta = 0.025$  para expresos con vagones de carros giratorios de 300 a 400 TM

$\beta = 0.1$  para trenes de carga con vagones vacíos

$\beta = 0.05$  para trenes de carga (800 a 1000 TM) con parte de vagones vacíos

$V \Leftrightarrow$  Velocidad en km/h

$r_v \Leftrightarrow$  Resistencia específica del aire en kg/TM

Por otro lado los fabricantes de grúas pórticos y grúas puente asignan otros valores, por ejemplo los fabricantes americanos agrupados en las normas CMAA recomiendan evaluar la resistencia específica del aire de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$r_v = 0.004 \frac{V_w^2 A_w}{PE} \quad (1.14)$$

Donde :

$V_w \Leftrightarrow$  Velocidad del viento en millas/h

$r_v \Leftrightarrow$  Resistencia específica del aire en lb/Ton

$A_w \Leftrightarrow$  Superficie efectiva frontal expuesta al viento en  $ft^2$



**E** ⇔ Factor de eficiencia mecánica.

**P** ⇔ Peso total del vehículo

Donde no se tenga datos de la velocidad del viento se podría utilizar:

$$r_v = \frac{5 A_w}{P E} \quad (1.15)$$

Para tener en cuenta el efecto de succión en diseños no aerodinámicos se debe corregir el área efectiva frontal expuesta al viento multiplicando su valor por 1.2

### 1.5 Resistencia en pendientes y curvas

Las resistencias por pendientes se presentan cuando el vehículo debe elevarse a una cierta altura (pendiente positiva) o bajar (pendiente negativa) a través de una rampa y puede ser calculada fácilmente por las leyes de la mecánica.

En la figura 1.3 están representadas las componentes de las fuerzas que se toman en consideración para el cálculo de la resistencia específica por pendiente para un tramo horizontal de 1000 metros de la vía de rodadura. En este caso el vehículo es impulsado a subir por una pendiente positiva que hace un determinado ángulo  $\alpha$  con la horizontal. El análisis para el caso en el cuál el vehículo se desplaza a través de una pendiente negativa es básicamente similar salvo que hay que cambiar el sentido de los esfuerzos resistentes y de tracción y resulta intrascendente para la determinación de la potencia motora pero fundamental para el cálculo del esfuerzo de frenado como se verá mas adelante. Como es de suponer, el valor de la referida resistencia es

influenciada fuertemente por el ángulo de inclinación de la rampa y por la acción de la gravedad.

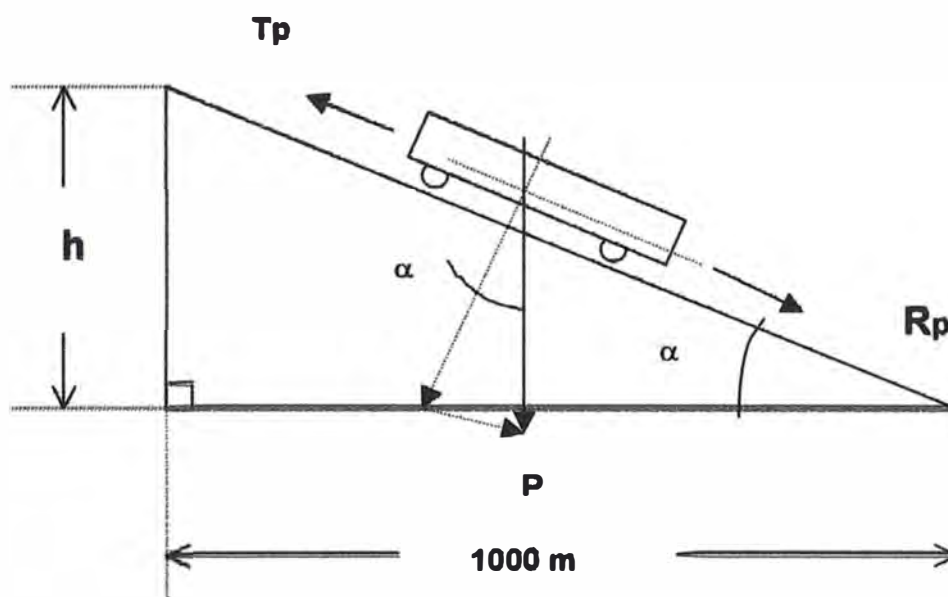


Figura 1.3  
Resistencia por pendiente

Donde:

$T_p \Leftrightarrow$  Esfuerzo de tracción para vencer la pendiente (cuanto menos de valor igual a  $R_p$ )

$R_p \Leftrightarrow$  Resistencia en la pendiente

$\alpha \Leftrightarrow$  Angulo de inclinación de la pendiente

$h \Leftrightarrow$  Altura de la pendiente en metros

$P \Leftrightarrow$  Peso total del vehículo

Sabemos que:

$$R_p = P \text{ Sen } \alpha$$

Si consideramos un peso  $P$  de una tonelada métrica, es decir 1000kg, resulta:

$$R_p = 1000 \text{ Sen } \alpha$$

Siendo la distancia horizontal de 1000 metros y  $h$  la altura vertical del gradiente, tenemos que:

$$\text{Tang } \alpha = \frac{h}{1000}$$

La cantidad  $h$  representará la pendiente expresada en milésimas.

Como, además el ángulo  $\alpha$  debe ser muy pequeño, es válido considerar:

$$\text{Tang } \alpha = \text{Sen } \alpha = \frac{h}{1000}$$

De forma tal que la resistencia de rampa resulta ser:

$$R_p = \frac{1000 \cdot h}{1000} = h$$

Además por tratarse de la resistencia para un peso de vehículo de una tonelada,  $R_p$  resulta ser equivalente a la resistencia específica por  $r_p$ . Por lo tanto la resistencia específica por pendiente se calcula:

$$r_p = h \quad (1.16)$$

donde:

$r_p \Leftrightarrow$  resistencia específica por pendiente en kg/TM

$h \Leftrightarrow$  gradiente de la rampa expresada en milésimas

Por otro lado, en las curvas se produce una resistencia adicional por fricción, dado que las pestañas de las ruedas del vehículo apoyarán lateralmente sobre los carriles. El valor de esta resistencia depende del radio de la curva y de la

trocha del vehículo, es decir del ancho de la vía, mas claramente, de la distancia de separación de los ejes centrales de los rieles. Se han establecido formulas empíricas para la determinación de la resistencia específica de curvas, sobre todo entre los fabricantes de ferrocarriles y locomotoras. Entre ellas tenemos la formula de Desdovits:

$$r_c = \frac{500 b}{R} \quad (1.17)$$

Donde:

$r_c \Leftrightarrow$  resistencia específica en curva en kg/TM

$b \Leftrightarrow$  ancho de la trocha en metros

$R \Leftrightarrow$  radio de la curva en metros

Otros fabricantes recomiendan las siguientes formulas, para dimensiones de trocha estandarizadas:

$$r_c = \frac{\lambda}{(R - \kappa)} \quad (1.18)$$

Donde:

Para trochas de 1435 mm  $\lambda = 650$ ,  $\kappa = 55$

Para trochas de 1000 mm  $\lambda = 400$ ,  $\kappa = 20$

Para trochas de 750 mm  $\lambda = 350$ ,  $\kappa = 10$

Para trochas de 600 mm  $\lambda = 200$ ,  $\kappa = 5$

## 1.6 Resistencia de inercia

Llamada también resistencia de aceleración.

Para poder lograr que un vehículo en reposo alcance determinada velocidad debe comunicársele cierta aceleración que ponga la masa en movimiento desde la velocidad cero hasta un valor predeterminado. Cuanto mayor sea el valor de la aceleración, tanto mas rápidamente se alcanzará dicha velocidad

Se consigue acelerar el vehículo cuando el esfuerzo de tracción es mayor que las sumas de las resistencias descritas anteriormente. Del mismo modo que en aquellos casos puede determinarse una resistencia específica de inercia, el esfuerzo de tracción necesario para acelerar un vehículo de una tonelada métrica de peso. Para comunicar a una masa de una tonelada, una aceleración de  $a$  m/seg<sup>2</sup> será necesario un esfuerzo de tracción que puede calcularse a partir de la 2da ley de Newton:

$$F = M a \quad (1.19)$$

Donde :

$F \Leftrightarrow$  Fuerza en Kg

$M \Leftrightarrow$  Masa en Newton

$a \Leftrightarrow$  Aceleración en m/seg<sup>2</sup>

Si  $P$  es el peso del vehículo que va a acelerar expresado en Tonelada métricas, la ecuación (1.19) puede expresarse como:

$$F = \frac{1000 P a}{g} \quad (1.20)$$

Luego:

$$\frac{F}{P} = \frac{1000 a}{g}$$

Donde  $\frac{F}{P}$  representa la resistencia específica inercial o acelerante, por lo cual:

$$r_{ac} = \frac{1000 a}{g} \quad (1.21)$$

donde:

$r_{ac}$  ⇔ resistencia específica acelerante en kg/TM

$a$  ⇔ aceleración promedio o uniforme equivalente del vehículo en m/seg<sup>2</sup>

$g$  ⇔ aceleración de la gravedad equivalente a 9.81 m/seg<sup>2</sup>

La ecuación (1.21) representa la resistencia específica a consecuencia de la aceleración equivalente aplicada a la masa total del vehículo, inyectándole un movimiento a lo largo de la vía de rodadura, sin embargo, además de este movimiento de la masa total, existen masas giratorias o de movimiento alternativo que requieren ser aceleradas en un movimiento rotacional (y/o alternativo según sea el caso). Esto exige un incremento adicional en el esfuerzo de tracción que puede ser representado por un factor determinado que llamaremos  $\beta$ , Esto equivale a aumentar en una cierta cantidad la masa del vehículo, compensando así el incremento del esfuerzo de tracción. Por lo tanto la ecuación (1.21) podría quedar como:

$$r_{ac} = \frac{1000 a \beta}{g} \quad (1.22)$$

Donde, de acuerdo al Manual del Ingeniero de Locomotoras, se tienen los siguientes valores para  $\beta$  :

Para tranvías y coches automotores en general:  $\beta \approx 1.05$  a  $1.08$

Para locomotoras con transmisión por engranajes:  $\beta = 1.4$  a  $1.6$

Para vehículos remolcados sin mecanismos:  $\beta = 1.04$

Los fabricantes agrupados en las normas CMAA de los E.E.U.U dan a este factor la siguiente forma:

$$\beta = \frac{C_r}{E} \quad (1.23)$$

Donde:

$$C_r = \frac{WK1^2 + WK2^2}{WK1^2} \quad (1.24)$$

En caso que  $WK1^2$  y/o  $WK2^2$  No puedan ser evaluados

$$C_r = 1.05 + \frac{a}{7.5} \quad (1.25)$$

Siendo:

$WK1^2 \Leftrightarrow$  Momento de inercia total

$WK2^2 \Leftrightarrow$  Momento de inercia de la masa en rotación

$C_r \Leftrightarrow$  Factor de inercia rotacional

$E \Leftrightarrow$  Eficiencia mecánica de la maquinaria de transmisión expresado en por unidad (decimal).

Como es lógico, en este caso se aplica dicho factor al equivalente de la ecuación (1.22) en unidades inglesas, es decir la fórmula de la resistencia específica acelerante quedaría:

$$r_{ac} = \frac{2000 a Cr}{g E} \quad (1.26)$$

Siendo:

$r_c \Leftrightarrow$  Resistencia específica acelerante en lb/Ton

$a \Leftrightarrow$  Aceleración promedio, o uniforme equivalente en ft/seg<sup>2</sup>

$g \Leftrightarrow$  Aceleración de la gravedad en unidades inglesas, es decir 32.2 ft/seg<sup>2</sup>

### 1.7 Determinación del máximo esfuerzo de tracción

Como ya se ha mencionado anteriormente, el esfuerzo de tracción debe vencer a la suma de todas las fuerzas resistentes que se opongan al movimiento. Es decir, debe cuanto menos equilibrarlas para mantener una velocidad promedio uniforme y debe superarlas cuando se requiera aceleración con el vehículo en marcha o en reposo.

La transmisión del esfuerzo de tracción desde los motores a las ruedas motrices posibilita el movimiento del vehículo a consecuencia del rozamiento entre estas y las vías carrileras. Por lo tanto, la fricción es fundamental para el movimiento por rodadura, este fenómeno se denomina adherencia, para mas entendimiento, cuando no hay rozamiento o dicho de otra forma, cuando no



hay adherencia, las ruedas patinan sobre el carril y no se produce el avance del vehículo.

Si tenemos un vehículo de peso total  $P$  Toneladas métricas, para calcular con mayor propiedad denominamos  $p$  en toneladas métricas a la parte del peso total que descansa sobre las ruedas motrices. Designando como  $\mu$  al coeficiente de adherencia entre las ruedas motrices y el riel El máximo esfuerzo de que podrían desarrollar dichas ruedas sería:

$$F_m = 1000 \mu p \quad (1.27)$$

Donde:

$F_m$  ⇔ Máximo esfuerzo de tracción en Kg

$\mu$  ⇔ Coeficiente de adherencia (sin unidades)

$p$  ⇔ Peso del vehículo que descansa sobre las ruedas motrices en Tm.

### 1.8 Nociones sobre adherencia

De ocurrir que el esfuerzo de tracción necesario para poner en marcha al vehículo fuese superior al determinado por la fórmula (1.27), resultaría que este no adquiriría movimiento de traslación aunque los motores puedan desarrollar la potencia necesaria para aplicar dicho esfuerzo. Esto ocurre debido a que en estas circunstancias, las ruedas simplemente patinarían sobre los rieles. Es decir que las ruedas girarían sobre los carriles sin producir ningún movimiento relativo entre estos y el vehículo. Cuando las ruedas están en reposo apoyadas sobre los rieles existe entre ambos el rozamiento de reposo. En tanto si se

aplica un esfuerzo de tracción demasiado grande y las ruedas empiezan a patinar se produce el rozamiento de movimiento que es inferior al de reposo y que por lo tanto reduce el esfuerzo de tracción admisible. Es claro que el esfuerzo se traduce en una fuerza tangencial como se muestra en la figura 1.2 Si el vehículo avanza hacia adelante es por que tal fuerza tangencial encuentra en el riel un apoyo, es decir, una fuerza de reacción igual pero de sentido contrario que se constituye en el apoyo horizontal, al cuál denominamos R en la misma figura, la existencia de este apoyo hace que se produzca un deslizamiento de la rueda, a este efecto es al que se denomina adherencia. Como podemos observar, es necesario desarrollar un suficiente esfuerzo adherente para poder asegurar el desplazamiento adecuado del vehículo sin que se produzcan patinajes en las ruedas.

Según puede verse de la formula (1.27) el esfuerzo de tracción depende directamente del peso y del coeficiente de adherencia y este coeficiente, además, impone un límite al esfuerzo de tracción tanto en el reposo como a una velocidad dada. La adherencia de la rueda sobre el riel será mayor cuanto mayor sea el peso que apoya la rueda sobre el riel. Por todo lo cuál, el peso es un factor muy importante a tomar en cuenta no solo como carga a ser transportada, sino también como un parámetro que debe estar presente para asegurar el movimiento adecuado del vehículo.

En resumen, existirá adherencia mientras el esfuerzo de tracción de la rueda sea inferior al valor dado por la fórmula (1.27), a medida que este valor límite es

superado ocurre lo denominado ruptura de adherencia y la rueda empieza a resbalar en el riel.

La reacción del riel en la rueda cae a un valor inferior al necesario para equilibrar la fuerza de tracción, es decir, se reduce la consistencia del apoyo y por lo tanto, como consecuencia se produce una aceleración de la rotación de la rueda sobre su eje ocurriendo por consiguiente el patinaje.

El coeficiente  $\mu$  definido como coeficiente de adherencia, está pues, dado por la relación entre el esfuerzo máximo que puede aplicarse a la rueda sin que se produzca patinaje, y la carga vertical que soporta la rueda.

Existen muchos factores que influyen en el valor del coeficiente de adherencia, como por ejemplo, la humedad, o el estado y calidad de la vía, y otros que dependen del diseño y construcción del propio vehículo, por ejemplo las fluctuaciones de carga por eje a consecuencia del tipo de suspensión, estabilidad general de la maquina, etc. De modo que la mayoría de ensayos se suelen realizar procurando aproximar lo mejor posible las condiciones reales de operación, tanto para determinar el coeficiente de adherencia de un eje aislado del vehículo como el coeficiente de adherencia global, es decir el de la maquina en su conjunto incluyendo ejes de apoyo y de ser el caso vagones y coches de arrastre.

En general, los ensayos para determinar el coeficiente de adherencia se realizan midiendo y graficando los esfuerzos de tracción inmediatamente anteriores al patinaje tanto en el estado de reposo del vehículo como para

diferentes velocidades. De modo tal que se obtiene una nube de puntos que cubren una amplia región, dispersa a causa de su propia naturaleza, en un plano esfuerzo-velocidad. La región obtenida está limitada por dos envolventes correspondientes a las condiciones de adherencia con el riel seco y con el riel mojado respectivamente, pudiendo establecerse una curva media tal y como se indica en la figura 1.4. Aunque resulte razonable e efectos prácticos establecer curvas promedio, esta consideración implica riesgos por definición, de modo que se pueden utilizar las curvas de adherencia promedio para la determinación del esfuerzo máximo de tracción, siempre y cuando la seguridad del vehículo no este comprometida.

Algunos fabricantes principalmente de locomotoras y trenes, han encomendado la ejecución de diversos ensayos a fin de obtener una valoración cercana y confiable del coeficiente de adherencia, Los resultados han sido propuestos, generalmente, en función de la velocidad de marcha del vehículo y en relación a los coeficientes de adherencia iniciales  $\mu_0$ , es decir a los correspondientes al estado de reposo determinados mediante interpolación a la velocidad cero. Los resultados, algunos de los cuales presentamos en la figura 1.5, dependen del tipo de locomotora, como puede verse en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1**  
**Coeficientes de adherencia**

<b>INSTITUTOS DE INVESTIGACION</b>	<b>Tipo de Locomotora</b>	<b><math>\mu</math></b>	
<b>Ferrocarriles Nacionales del Japón - JNR</b>	<b>Locomotoras Diesel</b>	<b>0.285</b>	
	<b>Locomotoras Eléctricas de corriente continua</b>	<b>Clásicas</b>	<b>0.265</b>
		<b>Modernas</b>	<b>0.292</b>
	<b>Locomotoras eléctricas monofásicas</b>	<b>Clásicas</b>	<b>0.326</b>
<b>Modernas</b>		<b>0.359</b>	
<b>Caminos de Fierro de la Federación Suiza - CFF</b>	<b>Locomotoras clásicas</b>	<b>0.26 a 0.24</b>	
	<b>Locomotoras modernas</b>	<b>0.26 a 0.29</b>	
<b>Ferrocarriles Británicos - BR</b>	<b>Locomotora con Lijadora</b>	<b>0.34</b>	
	<b>Locomotora sin Lijadoras</b>	<b>0.20</b>	
<b>Sociedad Nacional de Caminos de Fierro de Francia - JNR</b>	<b>Locomotoras clásicas de corriente continua</b>		
	<b>Motores a Media Tensión</b>	<b>0.25</b>	
	<b>Motores a plena Tensión</b>	<b>0.27</b>	
<b>Deutschen Bundesbahn – Alemania - DB</b>	<b>Locomotoras eléctricas de Corriente Continua</b>	<b>0.33</b>	
	<b>Locomotoras Diesel</b>	<b>0.30</b>	

Quando no se puede determinar otra cosa, la mayoría de fabricantes tanto de Europa como de E.E.U.U. consideran suficiente designar al coeficiente de adherencia inicial valores que consideran seguros como se ve en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2**  
**Coeficientes de Adherencia sugeridos**

<b>Coeficiente de Adherencia <math>\mu_0</math></b>	<b>Para rieles secos</b>	<b>Para rieles húmedos</b>
<b>Fabricantes Europeos</b>	<b>0.25</b>	<b>0.16</b>
<b>Fabricantes Americanos</b>	<b>0.20</b>	<b>0.12</b>

Inclusive algunas normas Americanas como ANSI/ASME B30, o CMAA incorporan estos valores como referencias para establecer niveles límite de aceleración sugeridos para evitar el resbalamiento.

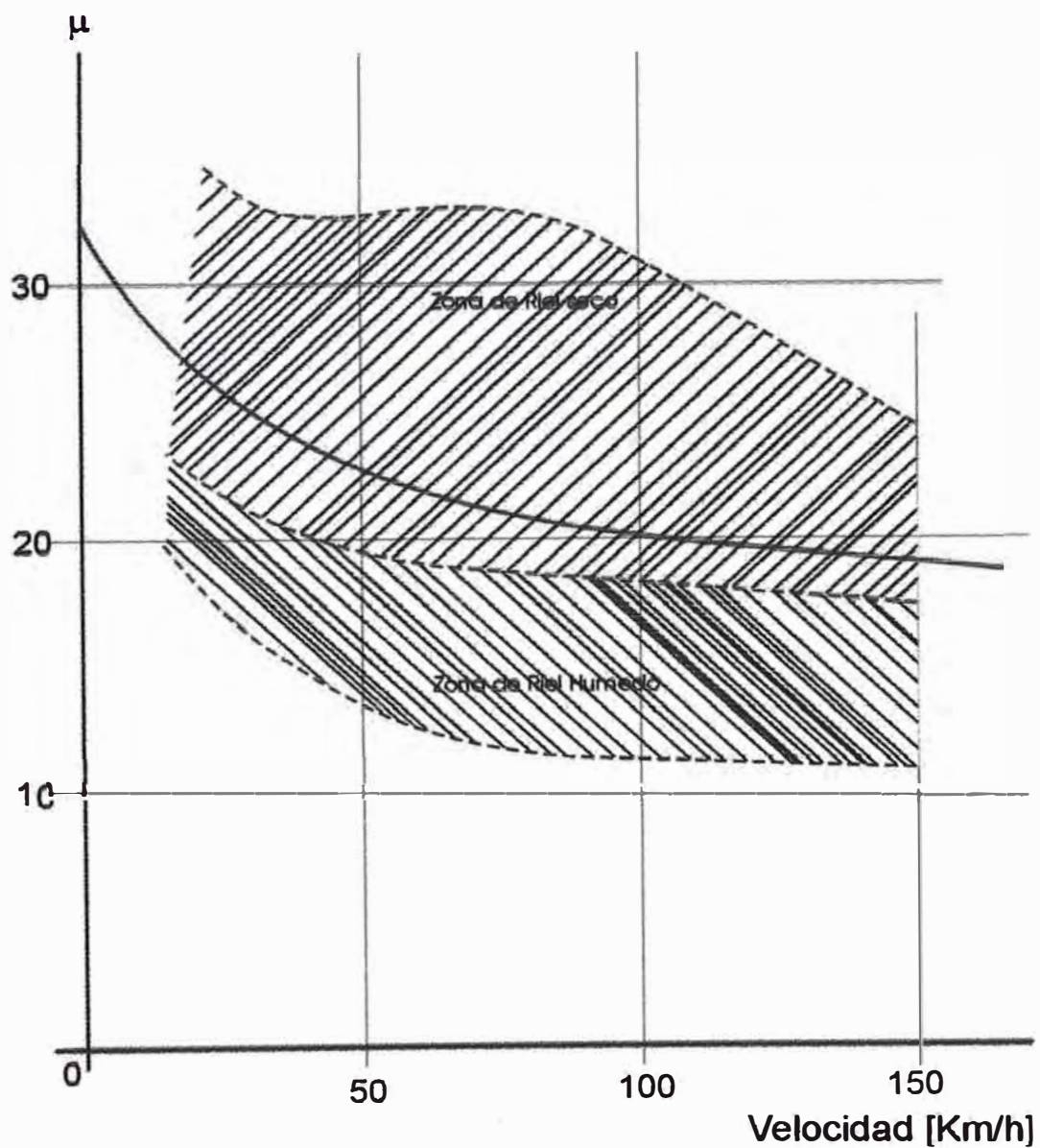
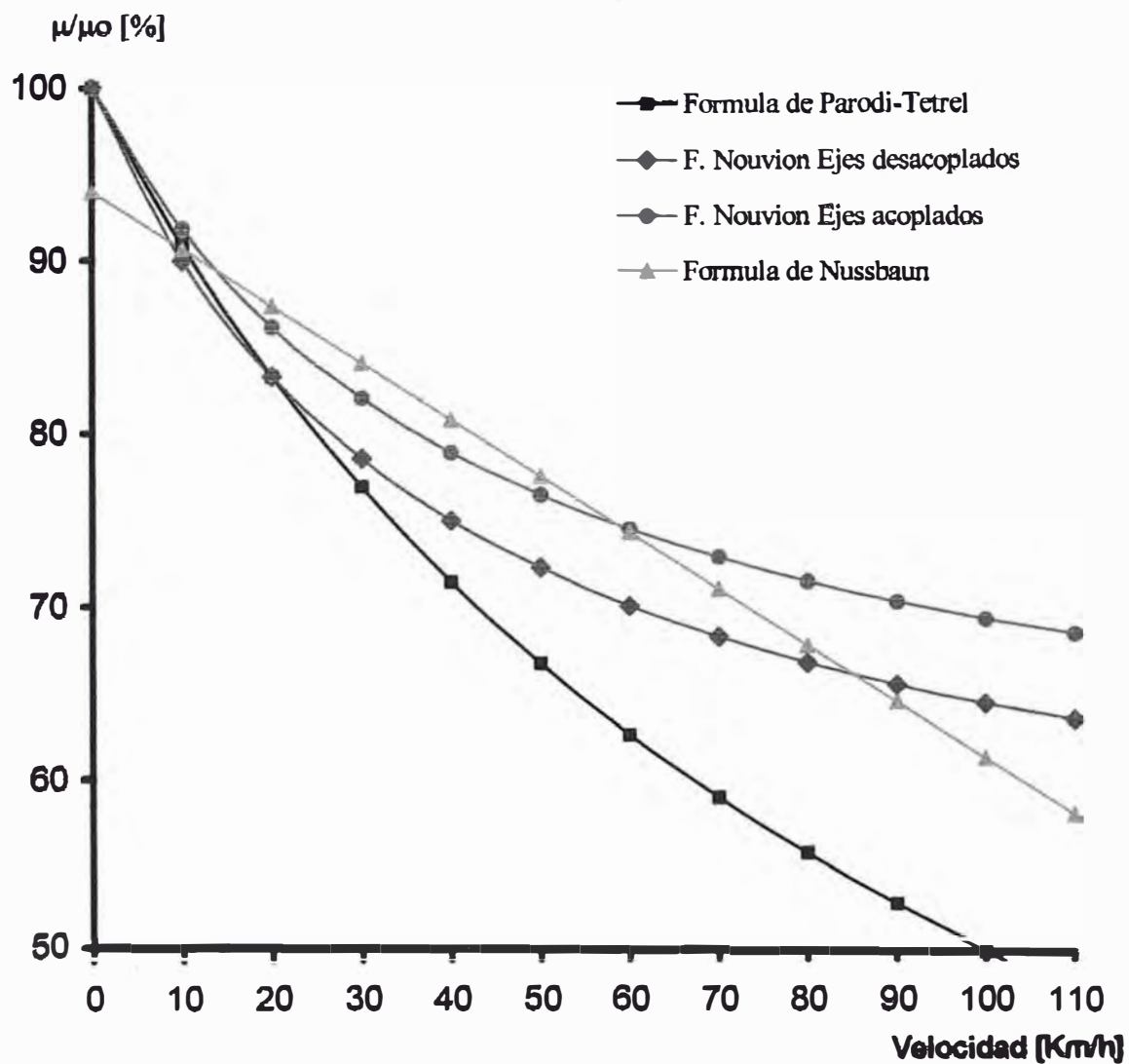


Figura 1.4  
Coeficiente de adherencia en función de la velocidad



**Figura 1.5**  
**Coeficiente de adherencia relativo en función**  
**de la velocidad**

## **CAPITULO II**

### **SELECCION DE LOS ACUMULADORES**

#### **2.1 El Acumulador eléctrico**

El acumulador eléctrico o batería es un dispositivo electroquímico el cuál es ampliamente usado en la industria como fuente de energía en una variada gama de productos. La energía química almacenada en una batería es convertida en corriente eléctrica durante la descarga. Esta corriente eléctrica es producida directamente por reacciones químicas que ocurren dentro del acumulador. Muchos y muy variados métodos y elementos han sido ensayados a lo largo de los años para almacenar la energía con igualmente variados grados de éxito, dependiendo en cada caso de la aplicación particular para la cuál se requería acumular energía. La investigación y desarrollo para encontrar o mejorar la batería como una fuente de suministro de energía para vehículos eléctricos ha sido muy activa desde 1945, y algunos importantes progresos han sido alcanzados. Sin embargo a pesar de ello, la fabricación hoy en día de baterías de plomo-ácido es considerada como la única tecnología disponible, comercialmente viable para ser aplicada a vehículos eléctricos de propulsión



independiente, y a decir verdad están lejos de ser ideales. Por esta razón, los vehículos eléctricos de transporte de carga o pasajeros alimentados con acumuladores tienen un limitado rango de utilización y una relativamente pobre performance a causa principalmente de los excesivos peso y volumen que alcanzan las baterías Y esto sin tener en cuenta su limitado período de vida . Desde el punto de vista del rendimiento, cualquier dispositivo electroquímico destinado a acumular energía eléctrica en aplicaciones de vehículos eléctricos, Idealmente, deberían reunir las siguientes características:

- Alta densidad específica de energía (Watts-hora por Kilogramo y Watts-hora por litro)
- Alta capacidad de descarga o Potencia específica (Watts por Kilogramo)
- Alto número de ciclos completos de carga y descarga (Vida útil).

La densidad específica de energía nos da, como es obvio, la relación de la energía disponible versus el peso, La Potencia específica es importante por ejemplo en la capacidad de respuesta de la batería ante requerimientos de aceleración o arranque de un determinado equipo, y el número de ciclos de carga y descarga está íntimamente relacionado como ya dijimos, con el tiempo de vida de la batería. Lamentablemente, las características descritas resultan ser mutuamente excluyentes si tenemos en cuenta la experiencia y los materiales disponibles en la actualidad. Una batería puede ser diseñada con una alta densidad de energía específica pero con un bajo rango de descarga, caso contrario, si incrementamos el rango de descarga, la densidad específica

de energía se reducirá significativamente, peor aún, una alta capacidad de descarga traería como consecuencia una disminución del número de ciclos de carga y descarga disponibles, es decir, una disminución de su vida útil. Sin embargo, aún siendo así, existen diversas aplicaciones, como es el caso presente y otras como las locomotoras mineras, y montacargas eléctricos donde la utilización de los acumuladores electroquímicos son, si no la única, la mejor alternativa para el suministro de energía eléctrica desde el punto de vista técnico-económico.

A continuación, y a manera de ilustración mostramos en la Tabla 2.1 características comparativas obtenidas en pruebas de laboratorio de algunos de los más importantes tipos de baterías que la tecnología actual pone a nuestra disposición, muchos de los cuales, a la luz de los avances logrados en los últimos años, han despertado muy buenas expectativas entre los investigadores respecto a las proyecciones de su desarrollo en el futuro próximo.

Como puede observarse casi todas las nuevas tecnologías de fabricación de baterías presentan muy buena performance inclusive comparadas con las clásicas de plomo ácido, sin embargo queda todavía mucho camino que recorrer para que aquellas estén comercialmente disponibles. Por otro lado es necesario indicar que los valores mostrados en la Tabla 2.1 han sido logrados en condiciones controladas de laboratorio con parámetros bastante exigentes, y con criterio comparativo, por ejemplo podemos decir que

**Tabla 2.1**  
**Cuadro Comparativo de performance de distintos tipos de batería**

<b>Tipo de batería</b>	<b>W-h/kg</b>	<b>W-h/l</b>	<b>W/kg</b>	<b>Ciclos de vida</b>
<b>Lithium/monosulfide</b>	<b>60 a 200</b>	<b>120 a 200</b>	<b>50 a 70</b>	<b>150 a 200</b>
<b>Zinc/Bromide</b>	<b>70 a 100</b>	<b>50 a 75</b>	<b>30 a 50</b>	<b>200 a 350</b>
<b>Nickel /Zinc</b>	<b>60 a 100</b>	<b>120 a 300</b>	<b>80 a 120</b>	<b>100 a 150</b>
<b>Nickel/Iron</b>	<b>50 a 90</b>	<b>100 a 150</b>	<b>80 a 120</b>	<b>500 a 1100</b>
<b>Nickel/Metal Hydride</b>	<b>50 a 90</b>	<b>150 a 300</b>	<b>100 a 140</b>	<b>80 a 500</b>
<b>Sodium/Sulfur</b>	<b>70 a 200</b>	<b>100 a 150</b>	<b>100 a 400</b>	<b>300 a 900</b>
<b>Lead/acid</b>	<b>30 a 60</b>	<b>30 a 60</b>	<b>20 a 80</b>	<b>300 a 500</b>

el tiempo de vida útil de una batería industrial de plomo ácido para vehículos de tracción , o dicho de otro modo, el número de ciclos de carga y descarga, se considera aceptable cuando oscila entre 1000 y 2000 es decir de tres a cuatro veces más de lo que se señala en la referida tabla, Esto se debe a que el tiempo de vida real en servicio de una batería no depende solamente de los materiales, elementos electrolíticos, y metales que la conforman sino también de otros factores como:

- **Construcción de la batería**
- **Procedimientos de carga y descarga**
- **Mantenimiento**
- **Condiciones de operación**

En la actualidad las baterías más usadas en aplicaciones de vehículos eléctricos son las baterías de plomo ácido, principalmente por 2 razones fundamentales: primero su bajo precio comparativo, y en segundo lugar, los elevados niveles de tensión que se logra en sus celdas, su principal desventaja es su sensibilidad al fenómeno de sulfatación.

Si comparamos una batería de plomo ácido con una batería alcalina por ejemplo de Níquel-fierro ó su variante Níquel-Cadmio estas últimas presentan sendas ventajas respecto a aquella, la primera ventaja es su mayor resistencia mecánica, lo cuál es lógico teniendo en cuenta que está compuesta por piezas de hierro mucho mas resistente que el plomo que es un metal mas bien blando. La segunda es que no se produce la sulfatación, que es el fenómeno que precisamente acorta la vida útil de la batería, de plomo, esto deriva además en la posibilidad de resistir grandes corrientes de 3 ò 4 veces su valor de régimen sin deterioro alguno, operan comparativamente mejor a bajas temperaturas, no pierde carga por almacenamiento por lo que ni necesita cargas periódicas cuando esta fuera de uso por algún tiempo, y por último al no contener ácido en su electrolito no hay peligro de corrosión. Todo esto hizo que por varios años las baterías alcalinas fueran preferidas sobretodo en aplicaciones de tracción por ejemplo en locomotoras mineras o montacargas, Sin embargo las mejoras técnicas experimentadas por las baterías de plomo ácido en los últimos años a la par de una reducción de sus costos que han incrementado la diferencia de precios aún más, han logrado revertir la situación, siendo que

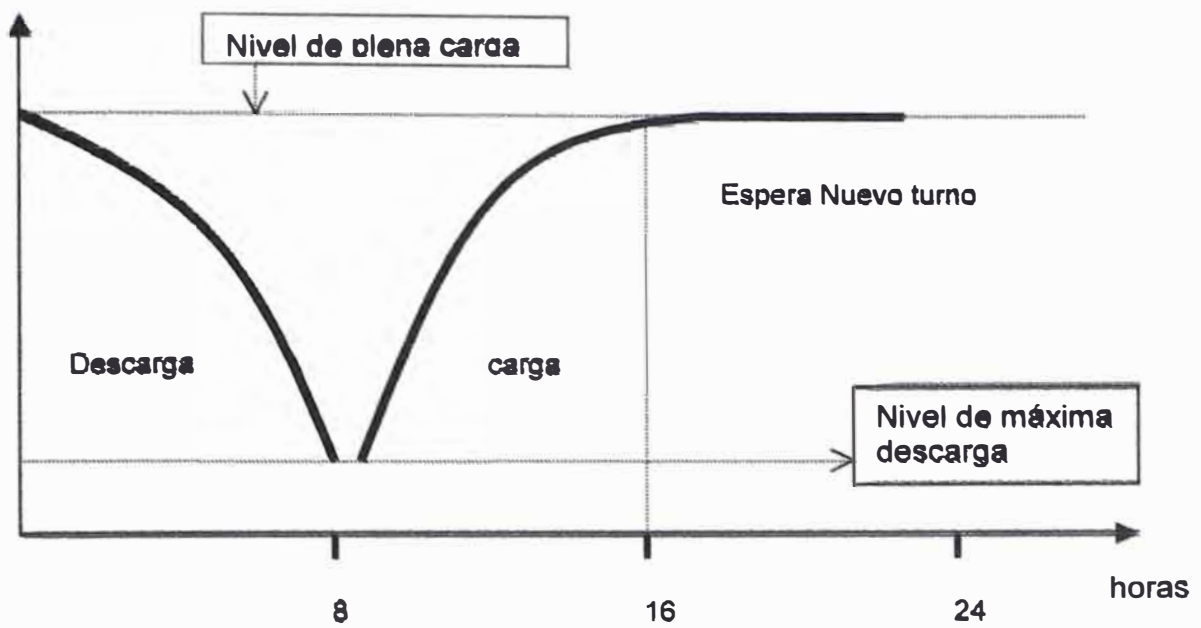
las baterías alcalinas, de momento, y a pesar de sus enormes ventajas han sido relegadas a aplicaciones especiales. En la actualidad los diseñadores de baterías de plomo ácido vienen consiguiendo optimizar las formas, materiales y dimensiones de cada elemento constituyente de las celdas para obtener mejores rendimientos y mejor perfil de funcionamiento logrando mejoras sustantivas en la calidad de estas baterías, por ejemplo se viene generalizando y a precios cada vez más competitivos las baterías de plomo ácido libres de mantenimiento que contienen en su electrolito un gel con componentes de óxidos de silicio, ( principalmente  $\text{SiO}_2$  ) que absorben los gases emanados durante el proceso electroquímico evitando la pérdida de Hidrógeno y Oxígeno y por lo tanto haciendo innecesaria la adición de agua a las celdas de modo que las baterías pueden ser casi totalmente cerradas.

El proceso de carga y descarga de una batería comercial de plomo ácido se realiza dentro de unos valores máximos y mínimos recomendados de densidad del electrolito y para un determinado proceso de carga y descarga en función del tipo de operación, por ejemplo, como ya hemos indicado, el tiempo de servicio comercialmente aceptable para la batería de plomo ácido para vehículos de tracción (Locomotoras, montacargas, etc.) oscila entre los 1000 y 2000 ciclos, lo cual suele representar un tiempo de vida de entre 5 a 10 años, mientras que una batería igualmente de plomo ácido para uso automotriz tiene una vida de aproximadamente 1 ó 2 años. La Figura 2.1 nos grafica los ciclos de carga y descarga típicos de dos baterías de plomo ácido en dos diferentes

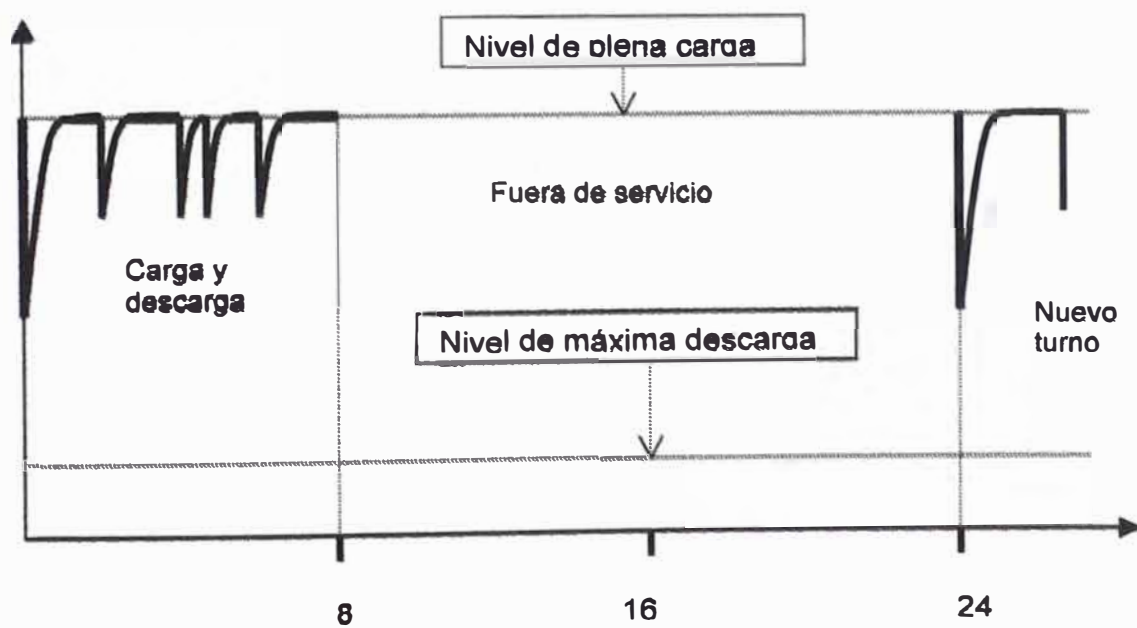
aplicaciones comerciales de uso muy común, es decir una batería de un automóvil, y una batería de un montacargas eléctrico. Observando la figura resulta clarísima la diferencia de aplicación y como consecuencia de concepción del diseño que debe tener cada una de estas baterías, mientras que la batería automotriz se usa básicamente para el arranque del motor de explosión lo que significa que debe ser capaz de entregar muy altas corrientes pero en períodos de tiempo bastante cortos y de manera infrecuente, luego de lo cual la recarga empieza tan pronto el motor de explosión alcanza su velocidad de operación, mientras que en el montacargas las baterías entregan corriente de manera continua y moderada hasta que se alcanza una descarga del 80 % aproximadamente luego de lo cuál debe empezar el período de carga, que continuará hasta que se alcance un nivel pre-establecido que se denomina carga completa. Lo descrito anteriormente nos induce a considerar que, en función de su operación, existen dos clases de baterías de plomo ácido de aplicación vehicular: una será la de tipo automotriz, y la otra será la llamada batería de tracción. Aunque su construcción puede diferir en unos cuantos aspectos, en general, la constitución de ambas clases de baterías es básicamente similar y los fundamentos que posibilitan su operación son los mismos.

## **2.2 Elementos fundamentales del acumulador eléctrico de plomo ácido**

La batería de plomo ácido está constituida por un determinado número de



**Batería de tracción**



**Batería de automotriz**

Figura 2.1  
 Características de carga y descarga para dos diferentes aplicaciones  
 comerciales de baterías de plomo ácido

celdas idénticas las cuales poseen básicamente dos placas separadas, una denominada placa positiva y la otra placa negativa, ambas se hallan inmersas en un electrolito conformado por una mezcla de ácido sulfúrico y agua, en la práctica, las celdas son construidas de un número de placas paralelas negativas conectadas en serie entre sí, entre las cuales se colocan las placas positivas también en paralelo y conectadas entre sí tal y como se aprecia en la figura 2.2, de este modo se aprovecha ambos lados de la placa positiva, en la producción de energía. Razón por la cuál siempre hay una placa negativa más que la cantidad de placas positivas.

El número de placas que conforman una celda está relacionado con la intensidad de corriente que puede proporcionar la batería, Es decir que a mayor requerimiento de intensidad de corriente habrá que utilizar mayor número de placas o equivalentemente mayor superficie de placas. En aplicaciones de tracción las placas tienen rangos que generalmente están comprendidos entre los 55 a 160 Ampere-Hora por placa positiva.

En realidad las placas positivas son construidas como rejillas de una aleación de plomo-antimonio (también las hay de construcción tubular) las cuales poseen unos cubículos que se saturan con una pasta especial obtenida amasando óxido de plomo (Minio, Letargo) con ácido, agua, y un aglomerador (cola, glicerina, etc.) de modo tal que la rejilla se denomina soporte inactivo, y la pasta introducida en las rejillas se denomina material activo. Las placas negativas son de forma constructiva similar a las placas positivas pero están



fabricadas de pequeñas y finamente divididas partículas metálicas de plomo gris, por lo cuál se le denomina plomo esponjoso; las rejillas de estas placas no están sujetas a desgaste durante el ciclo normal de vida de la batería, razón por

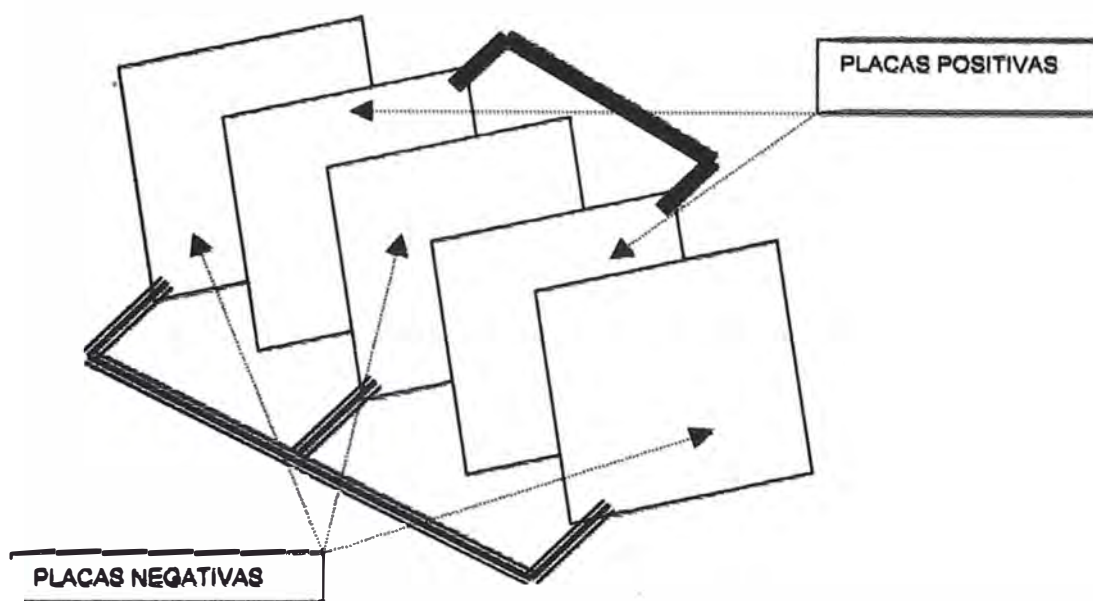


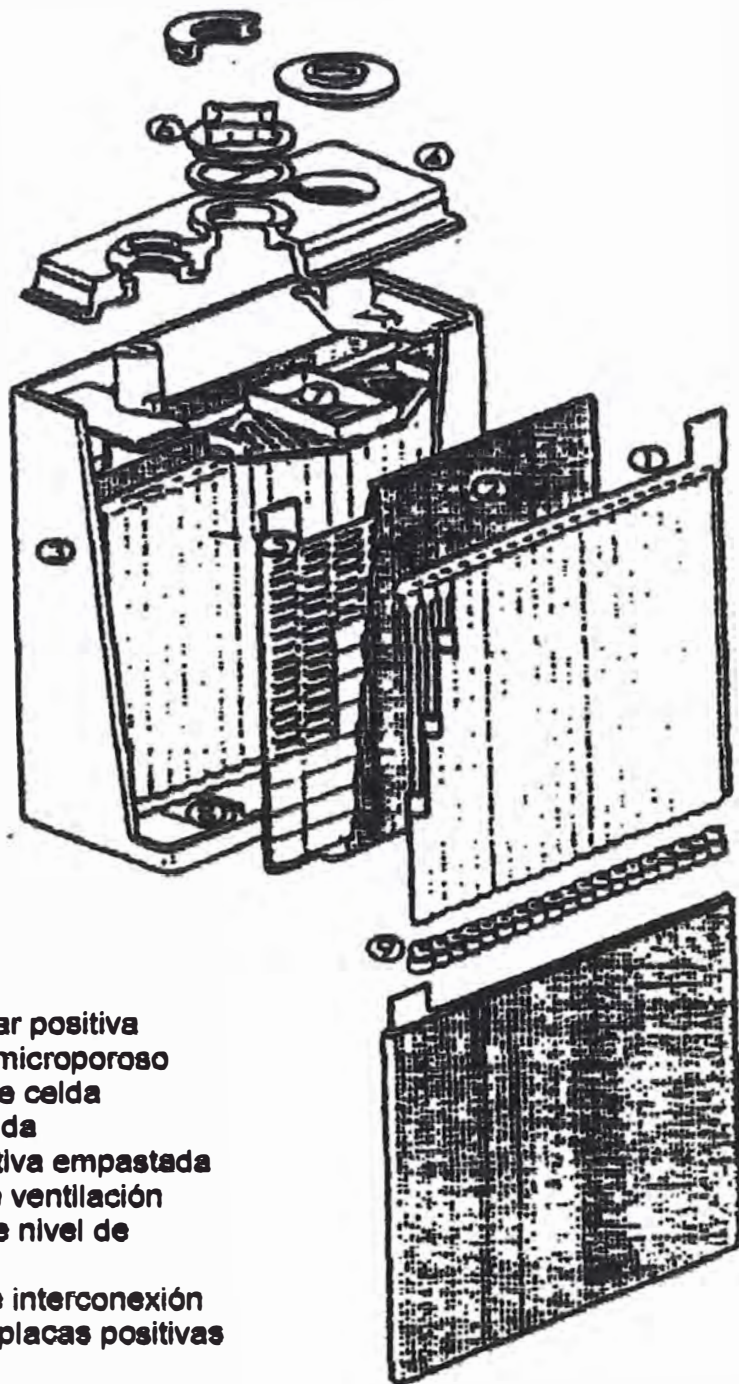
Figura 2.2  
Disposición de las placas en una batería de plomo ácido

la cual son mas ligeras en construcción y livianas en peso que las placas positivas. Materiales aislantes de caucho sintético altamente porosos (micro porosos) ó separadores plásticos son colocados para asegurar la separación física de las placas positivas y negativas sin interferir con la acción química. Todos los elementos descritos son ensamblados y ubicados al interior de un casquete de material aislante de alto impacto. Finalmente, dado que durante la

vida de la batería una cantidad de materia activa combinada con la solución electrolítica, termina cayendo al fondo del casquete en forma de sedimento, de manera que es indispensable colocar un soporte aislante al conjunto en la base interior del casquete para evitar que se produzca cortocircuito entre las placas adyacentes o inesperados caminos de conducción. En la figura 2.3 podemos observar las partes constitutivas de una celda de batería de plomo ácido.

Las celdas, que en resumen son constituidas por dos diferentes tipos de metal, en este caso peróxido de plomo para la placa positiva y plomo esponjoso para la placa negativa, introducidos en un electrolito, sometidas a acción electroquímica generaran una diferencia de potencial de aproximadamente 2 voltios, cuyo valor no depende para nada ni de las dimensiones ni del número de placas.

Dos postes terminales de plomo, uno conectado a las placas negativas, y el otro a las placas positivas llevan hacia el exterior de la celda la diferencia de potencial, de modo tal que con un conjunto de celdas conectadas en serie conformamos acumuladores eléctricos con niveles de tensión múltiplos de esta diferencia de potencial y cuyos valores nominales pueden ser cualquier múltiplo de la tensión nominal de una celda. Aunque, generalmente se usan valores normalizados que suelen ser de 6, 12, 24, 36, 48, 60, 80 Voltios entre los más usuales. Es claro que una batería de, por ejemplo, 6 Voltios nominales está conformada por 3 celdas en serie, una de 12 Voltios por 6 celdas, una de 24 Voltios por 12 celdas, y así sucesivamente. En la práctica, la tensión en las



1. Placa tubular positiva
2. Separador microporoso
3. Casquete de celda
4. Tapa de celda
5. Placa negativa empastada
6. Tapones de ventilación
7. Indicador de nivel de electrolito
8. Puentes de interconexión
9. Soporte de placas positivas

**Figura 2.3**  
**Partes constitutivas de una celda de plomo ácido**

**celdas varía desde 2.1 Voltios para una celda completamente cargada hasta aproximadamente 1.75 Voltios para una celda descargada a un nivel admisible, de forma tal que la medida real de la tensión entre los postes de una batería debe oscilar entre los múltiplos de aquellos valores, por ejemplo, una batería de 36 Voltios puede dar una medida de tensión entre sus postes terminales de entre 31.5 y 37.8 Voltios aproximadamente.**

**Los postes consecutivos de dos celdas adyacentes son sujetas usualmente soldándolas o prensándolas mediante placas especiales de plomo de modo tal que el poste negativo de la primera celda se suelda al positivo de la segunda, el negativo de la segunda al positivo de la tercera y así sucesivamente hasta alcanzar la tensión deseada.**

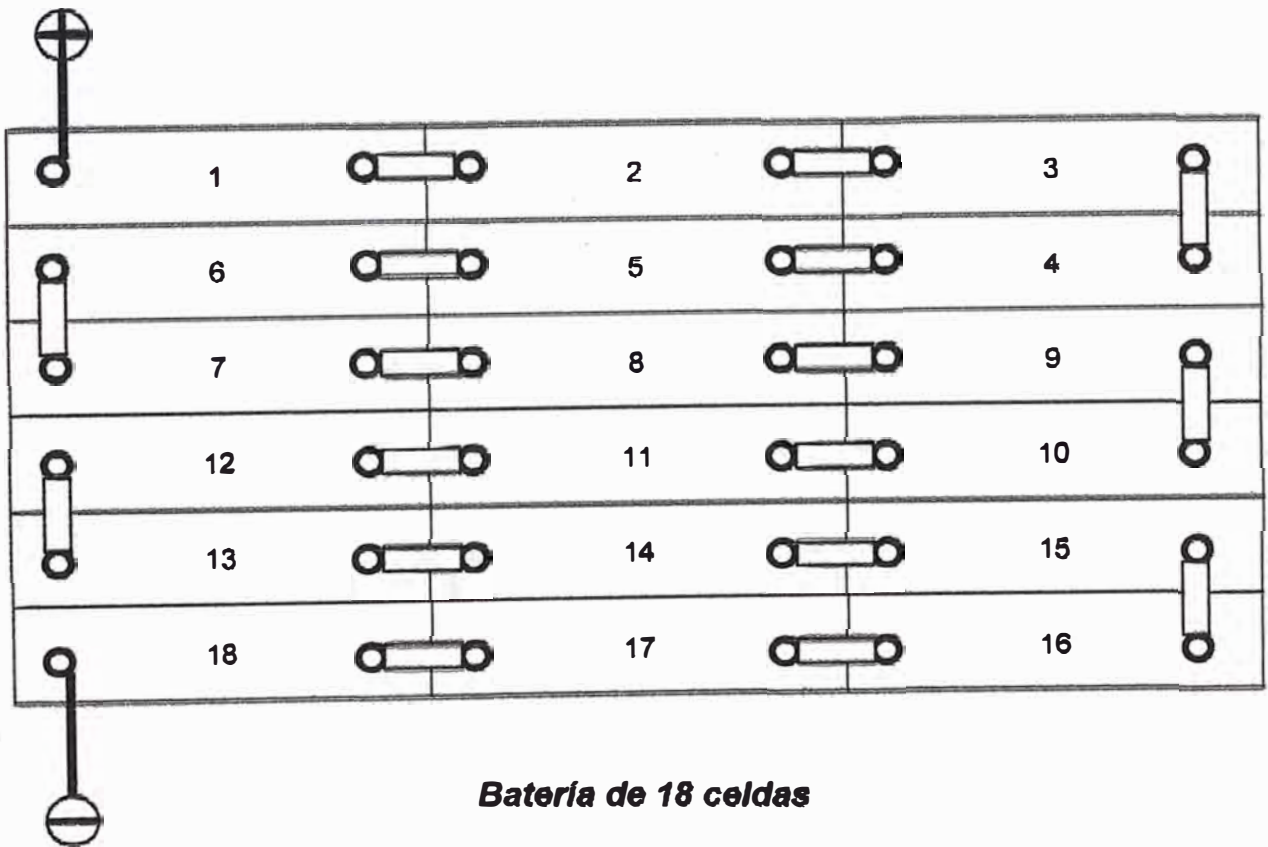
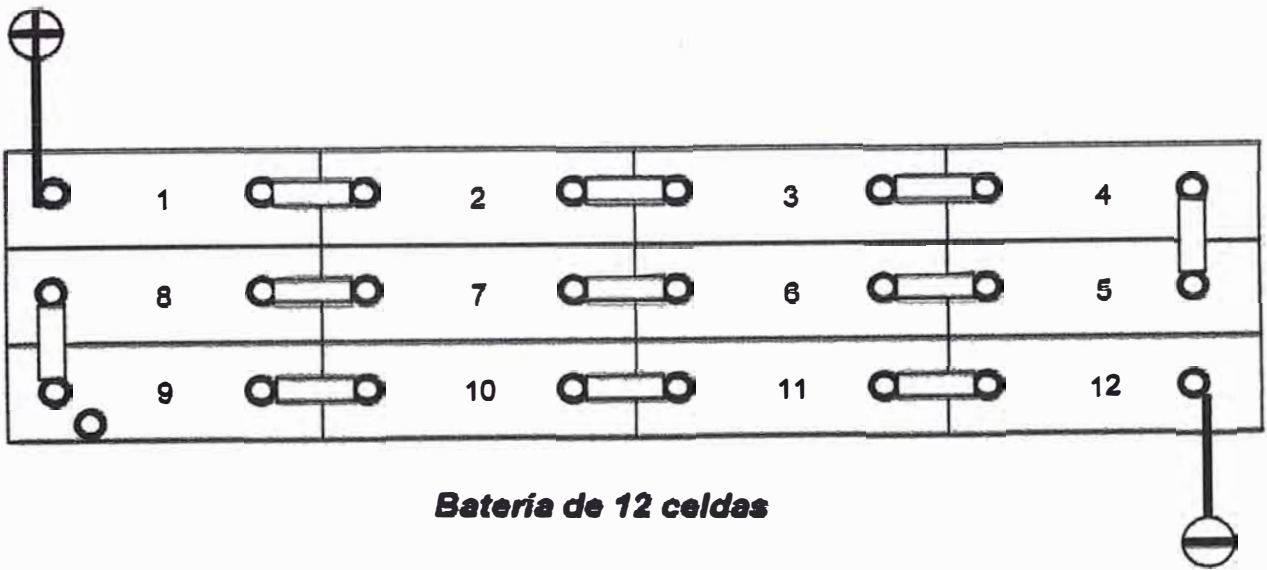
**Las celdas suelen ser numeradas típicamente en una secuencia consecutiva que empieza en la celda que contiene el poste positivo libre y termina en la que contiene el terminal negativo libre.**

**En la figura 2.4 se muestra dos formas clásicas de cómo se conectan y numeran baterías de 24 y 36 Voltios**

### **2.3 Principio de operación**

**Como ya a sido dicho en la sección anterior, los elementos fundamentales que componen el acumulador eléctrico de plomo ácido son:**

- Placas de aleación de plomo.**
- Solución de oxido de Plomo en las rejillas de las placas positivas.**



**Figura 2.4**  
**Forma de numeración y conexión de baterías de 24 y 36 voltios**

- Electrolito compuesto de ácido sulfúrico y agua destilada.

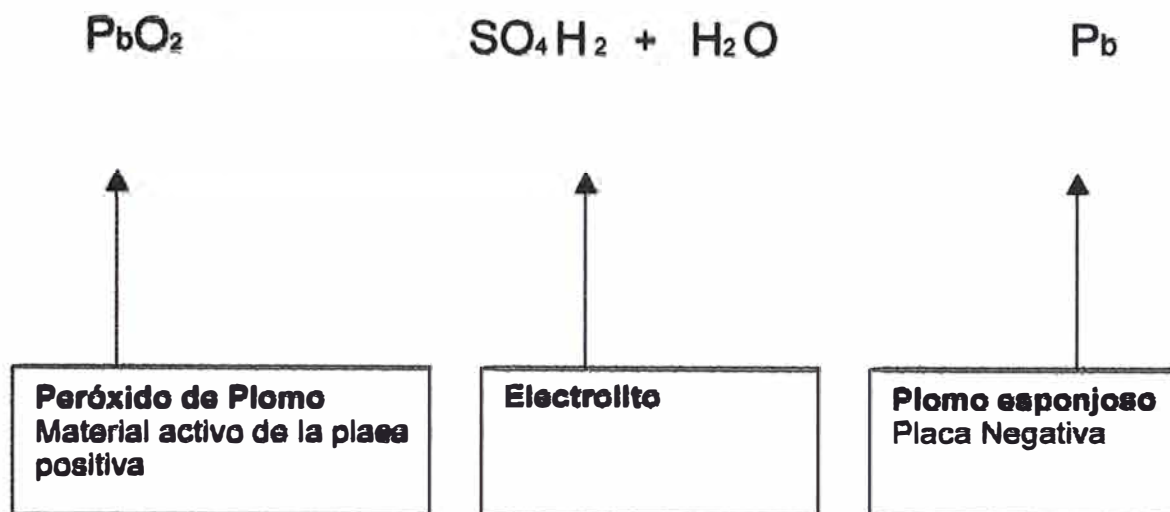
Sin embargo, desde el punto de vista químico disponemos dentro del acumulador de los siguientes elementos:

- Plomo
- Oxígeno contenido en el agua y en el ácido sulfúrico
- Hidrógeno igualmente contenido en el agua y en el ácido sulfúrico
- Azufre contenido en el ácido sulfúrico.

Las combinaciones químicas que adoptarán al unirse unos con otros a consecuencia del paso de la corriente eléctrica dará lugar a la formación de un conjunto de compuestos que al transformarse convertirán energía química en energía eléctrica y viceversa energía eléctrica en energía química produciéndose así el efecto de acumulación de energía. Estos compuestos son básicamente los siguientes:

- Plomo esponjoso o plomo puro ( $Pb$ )
- Peróxido de plomo ( $PbO_2$ ) formado por una parte de plomo y 2 de oxígeno
- Sulfato de plomo ( $SO_4 Pb$ )
- Ácido sulfúrico ( $SO_4 H_2$ )
- Agua pura ( $H_2O$ ).

La figura 2.5 detalla la composición inicial de elementos y compuestos:



**Figura 2.5**  
**Composición del estado inicial**

Suponiendo que la celda está cargada, al circular corriente de descarga, como consecuencia por ejemplo de conectar una resistencia entre los postes positivo y negativo, ocurrirá lo siguiente:

- El ácido sulfúrico se descompone y parte de su azufre y oxígeno se une al peróxido de plomo formando Sulfato de plomo  $SO_4 Pb$
- Otras partes de oxígeno y azufre se combinan también formando Sulfato de plomo
- El hidrógeno que queda libre y parte del oxígeno forman agua  $H_2O$

De esta forma se puede llegar a la conclusión de que una batería descargada en lo que se refiere a su proceso químico está conformada por los elementos detallados en la figura 2.6:

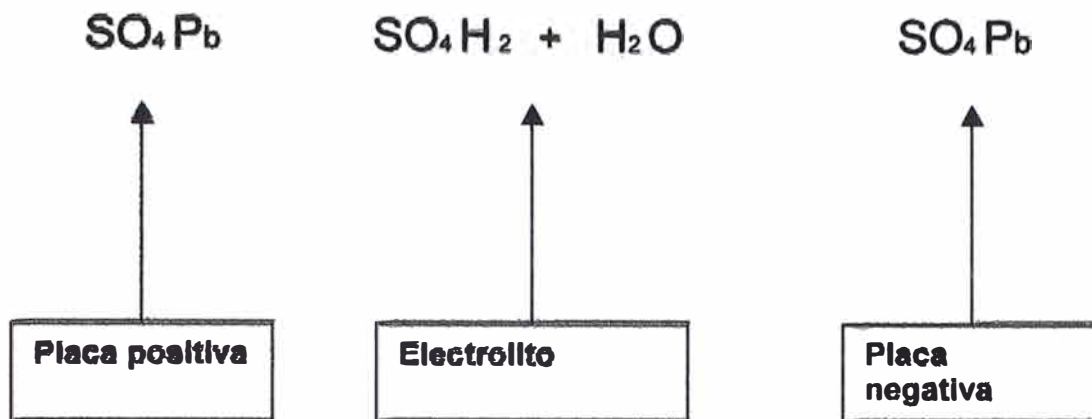


Figura 2.6  
Composición del estado final.

Es necesario aclarar aquí, que los procesos químicos involucrados en la carga y descarga de una batería se producen con bastante más complejidad de lo que hemos descrito hasta este momento. En realidad, los investigadores no han terminado de ponerse de acuerdo en la forma como se desarrollan en forma exacta las reacciones químicas y quedan muchas dudas que despejar. Por ejemplo, una descripción ampliamente difundida y aceptada es la llamada "Fórmula de Tribe & Gladstone" conocida también como la "Teoría de doble sulfatación" establecida de la siguiente manera:



Como hemos explicado líneas arriba, la fórmula reversible anterior, si bien es aceptada en términos generales, su desarrollo no es del todo respaldado por



algunos investigadores por que por ejemplo, según plantean, no explica la formación de algunas sustancias como el  $Pb_2O_3$  que afirman haber detectado, o la formación de  $PbO_3$  y como éste pasa a convertirse en sulfato de plomo. A pesar de todo aquello, para fines didácticos y para cálculos termodinámicos la teoría de la doble sulfatación es ampliamente admitida

En resumen:

Después del proceso de descarga:

- El electrolito queda más pobre en ácido
- Las placas positiva y negativa sufren un cambio parcial a sulfato de plomo

Después de la carga:

- El electrolito queda más fuerte en ácido
- La placa negativa vuelve a ser de plomo puro en la forma de plomo esponjoso
- El material activo de la placa positiva vuelve a ser peróxido de plomo

Como ya dijimos anteriormente, el electrolito es uno de los elementos fundamentales en el buen funcionamiento de la batería, y está compuesto por una solución de ácido sulfúrico y agua destilada que debe ser mezclada en proporciones adecuadas. El ácido sulfúrico que se vende comercialmente tiene una densidad específica (es decir densidad relativa respecto al agua que es tomada como la unidad) de entre 1.4000 y 1.835, generalmente se usa de 1.4000, inclusive algunos fabricantes recomiendan que el ácido de gravedad

específica 1.835 sea usado solo como último recurso y en condiciones muy especiales por los peligros que implican su manipulación inadecuada tanto para el equipo como para el operario. Es claro que es necesario agregar la cantidad de agua destilada suficiente hasta lograr la gravedad específica de utilización del electrolito, la cual varía entre 1.1 y 1.15 para 77°F.(25°C ).

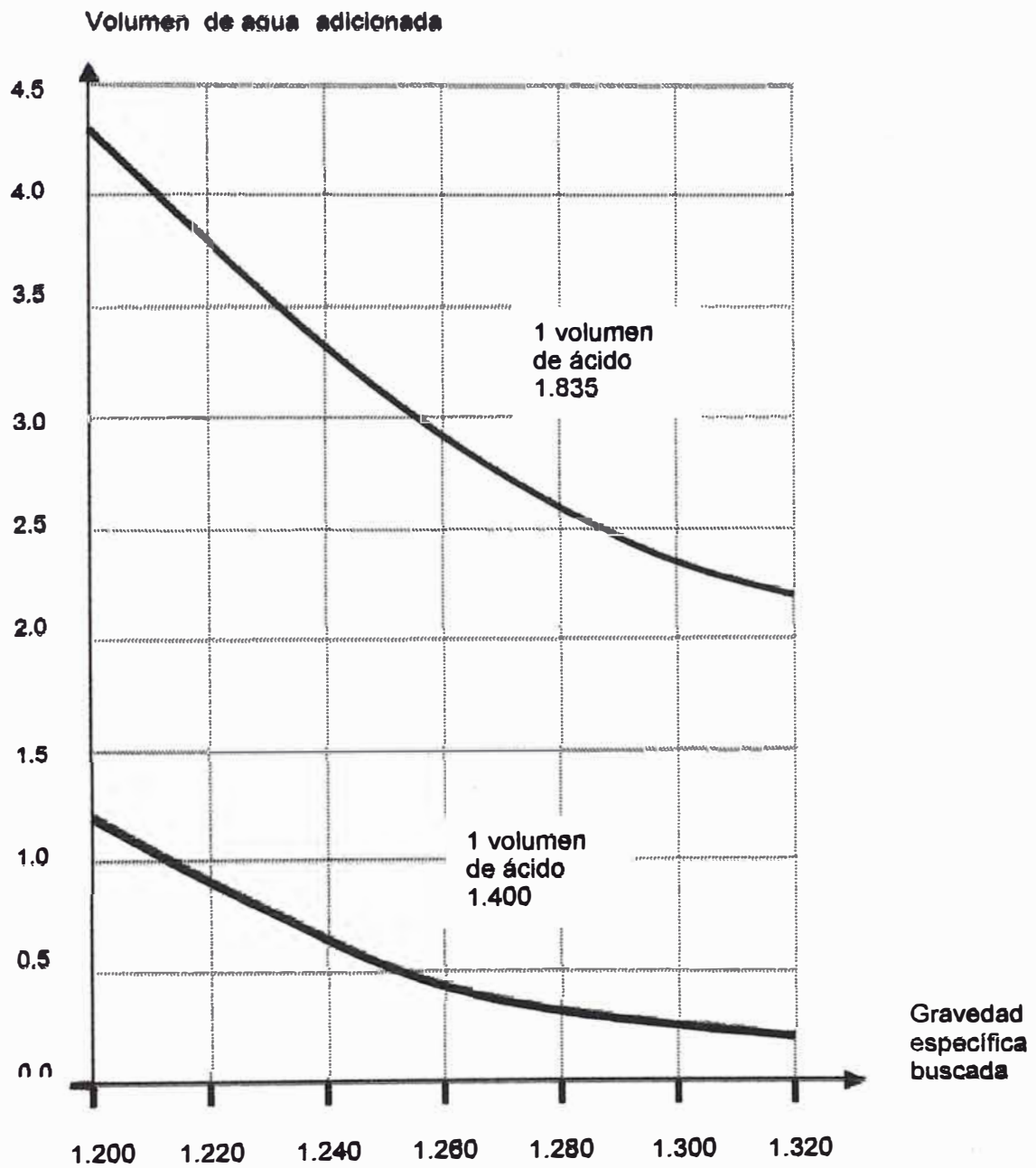
En la Figura 2.7 se muestran un conjunto de curvas que grafican la relación del volumen de agua respecto al volumen de ácido versus la gravedad específica del electrolito a fin de obtener la proporción de ambos componentes para un volumen determinado de solución. Por ejemplo si deseamos tener un electrolito con gravedad específica de 1.260 para lo cuál contamos con un ácido de gravedad específica 1.835 la gráfica nos indica que debemos mezclar aproximadamente 3 volúmenes de agua por cada volumen de ácido , es decir, para conseguir 4 litros de solución de gravedad específica 1.260 debemos mezclar 3 litros de agua destilada con 1 litro de ácido sulfúrico de 1.835 de gravedad específica. Cuando se efectúe la mezcla, nunca debe agregarse el agua al ácido por que podría producirse una explosión, sinó que por el contrario, debe echarse el ácido al agua.

Cuando se habla de la gravedad específica del electrolito hay que tener en cuenta su temperatura caso contrario podríamos hacernos una idea equivocada del estado de carga, la experiencia demuestra que por cada 10°F de incremento de la temperatura (5.5°C) por encima de los 77°F (25°C) la gravedad específica crece 3 puntos, y por cada decaimiento de 10°F por

debajo de los 77°F la gravedad específica decae 3 puntos, por lo tanto un factor de corrección debe ser aplicado a fin de obtener una mejor medida. La Tabla 2.3 nos presenta, el factor de corrección que hay que adicionar a la lectura de gravedad específica obtenida con un hidrómetro para conocer la gravedad específica equivalente a 77°F que correspondería al real estado de carga. Es decir, si bien la lectura de gravedad específica del Hidrómetro es correcta a la temperatura del electrolito en el momento de la lectura, la relación de los valores de esta lectura con el estado de carga no es posible conocerla. Por lo cual la corrección nos lleva a su valor equivalente a 77°F de temperatura en la que si conocemos la relación gravedad específica – carga.

Las excesivamente bajas temperaturas aparte de afectar al rendimiento de la batería afectan al electrolito pueden llegar a congelarlo dependiendo de su estado de carga.

En la Tabla 2.4 podemos observar el punto de congelamiento del electrolito para distintos valores de su gravedad específica equivalente 77°F. El hecho de reflejar las medidas de gravedad específica del electrolito a 77°F, como ya hemos dicho anteriormente se debe a que los fabricantes sobre todo en los E.E.U.U., Canadá, e Inglaterra, que son los más grandes fabricantes a nivel mundial en su gran mayoría proveen la información técnica al usuario referida a esa temperatura. Del mismo modo en Europa, la referencia es bastante similar, por ejemplo de acuerdo a la Norma DIN43 530 el valor a 30° C de la gravedad específica debe ser 1.290 gramos por centímetro cúbico.



**Figura 2.7**  
**Relación de volumen de agua versus volumen de ácido para conformar una batería de plomo ácido**

**Tabla 2.3**  
**Corrección de lectura de hidrómetro por variación de temperatura**

<b>Lectura del Hidrómetro</b>	<b>Temperatura en °F</b>	<b>Corrección a lectura</b>
1.268	117	+12
1.271	107	+9
1.274	97	+3
1.277	87	+6
1.28	77	0
1.283	67	-3
1.286	57	-6
1.289	47	-9
1.292	37	-12

**Tabla 2.4**  
**Temperaturas de congelamiento del electrolito para distintos valores de su gravedad específica relativa a 77°F (25°C)**

<b>Gravedad específica para 77°F</b>	<b>Temperatura de congelamiento en °F</b>	<b>Temperatura de congelamiento en °C</b>
1.000	+32	-0
1.100	+18	-7.8
1.150	+5	--15
1.200	-14	-26
1.220	-32	-36
1.240	-51	-46
1.260	-70	-57
1.280	-87	-66
1.300	-97	-72
1.400	-28	-33
1.500	-20	-29
1.600	-59	-50
1.700	+6	-14
1.800	+42	+6

## **2.4 Criterios para la selección de la batería**

Nominalmente, la capacidad de una batería se da en kilowatts-hora, o mucho más comúnmente en Ampere-hora entendiéndose este término como la corriente en régimen constante que puede entregar la batería por un determinado período de horas, obviamente su valor se obtiene de multiplicar la corriente nominal por el número de horas de operación. Resulta conveniente aclarar que la medida en Ampere-hora de una batería no tiene significado alguno cuando no se precisa el régimen de horas al que corresponde, por ejemplo, una batería de 600 AMP-hora a régimen de 6 horas nos indica que la batería puede operar entregando 100 Amperes durante 6 horas, sin embargo, eso no significa que la misma batería nos pueda entregar 300 Amperes durante 2 horas, dado que en tales circunstancias el calor generado al interior de la batería podría superar los niveles de disipación considerados en el diseño, terminando por causarse daños irreversibles. Por tal razón los fabricantes de acumuladores eléctricos industriales deberían indicar además de los Ampere-hora de sus baterías, el régimen de horas correspondiente para que se posibilite una adecuada utilización. Generalmente, y en la gran mayoría, de los casos, los Ampere-hora nominales de las baterías de uso en vehículos de tracción corresponden a regímenes de 6 u 8 horas según el fabricante del cual se trate, lo que a su vez suele corresponderse con el período de carga u operación. Algunos fabricantes de baterías en los E.E.U.U. han estandarizado la forma de

presentar la información de régimen que corresponde a sus baterías de una manera codificada , estampada en el plomo de su primer terminal negativo, en una placa de datos a uno de los lados del contenedor de la batería, a manera de ejemplo mostramos la codificación de una batería en particular que podría ser como la siguiente: 24T8511. En este caso la información contenida en este código nos indica que la batería será de 24 celdas por lo tanto su tensión nominal será 48 Voltios, La letra T nos indica un tipo de diseño de celda que corresponde al fabricante, 85 es el valor de los Ampere Hora por cada placa positiva y 11 el número total de placas, por lo tanto los Ampere hora de la batería serian  $5 \times 85 = 425$  Amp-hora, ya que como hemos indicado anteriormente el número de placas negativas siempre supera en una unidad al número de placas positivas, y al haber 11 placas, 6 serán negativas y 5 positivas. Es claro que cuando se requiere seleccionar una batería, en el caso de un vehículo de tracción hay que conocer la corriente de régimen constante que queremos obtener además del tiempo de operación continua que deseamos antes de que la batería tenga que ser recargada, también es importante tener en cuenta los requerimientos de corriente máxima y su duración, los cuales pueden ocurrir por ejemplo durante la aceleración o en las pendientes positivas, Pero además de lo ya señalado hay que tener en cuenta que una batería comercial no debe ser descargada a más del 80%, dicho de otra manera, su remanente de carga debe ser mayor del 20% principalmente por que cuando la batería está en este nivel o peor aún, debajo

de el, cualquier demanda de potencia reducirá el voltaje suficientemente como para posibilitar una inversión de la polaridad en una o más celdas lo cuál les podría ocasionar daños irreversibles, esto explica por que algunos fabricantes de locomotoras y montacargas instalan protectores de batería en sus circuitos de control que inhiben la operación de marcha de un vehículo cuando la batería alcanza los niveles de descarga descritos. Por esta razón luego de evaluarse los Ampere horas de acuerdo a las características de operación debe aumentarse el valor obtenido un 25% llamado factor por sobre descarga  $f_s$  con lo cuál se protege a la batería contra la excesiva descarga. Dado que, además de su vida útil el rendimiento de la batería también depende de su mantenimiento cuando no se tenga datos al respecto hay que aplicar a lo ya obtenido un factor de mantenimiento que suele ser 15% adicional con lo cuál se cubrirían las pérdidas por deficiencias de mantenimiento del vehículo en general y de la batería en particular. Este factor de mantenimiento  $f_m$  cubre obviamente todo aquello que por deficiencias de mantenimiento afecten a la capacidad de la batería, es decir tengan como consecuencia pérdidas en la capacidad. Esto generalmente se manifiesta a modo de una sulfatación anormal en las placas la cuál podría llegar a ser tan severa que la batería no pueda ser recargada mediante su régimen normal de carga. Las causas mas comunes de esta sulfatación son:

a).- Bajos niveles de recarga o carga de ecualización deficiente.



Las baterías de plomo ácido, cada que requieran ser recargadas, deben llegar a completar su régimen de carga, en caso contrario, las repetidas y recurrentes cargas parciales, es decir cargas incompletas terminan produciendo sulfatación en las placas ya que en tales circunstancias la reacción química no alcanza a todo el electrolito por lo cual la sulfatación se asienta fuertemente en las placas . A consecuencia de que es extremadamente difícil determinar en una batería que opera normalmente el momento en que comienza la sulfatación, solo mediante periódicas cargas de ecualización y comparando las gravedades específicas individuales del electrolito de cada celda, se puede prevenir tempranamente este problema

b).-Periodos de parada en condición de completa descarga o carga parcial

No es permisible mantener una batería almacenada o parada por más de 24 horas en estado de completa descarga por las mismas razones que lo arriba indicado, ya que la permanencia de los sulfatos endurece y cierra los poros de las placas

c).-Bajos niveles de electrolito

Cuando se permite que el electrolito permanezca por algún periodo en un nivel por debajo de la parte superior de las placas, las superficies expuestas sufren reacciones con el ambiente y se produce sulfatación

d).-Adición de ácido

Si a alguna celda se le adiciona ácido donde la sulfatación existe el problema se agrava

**e).-Altas temperaturas**

**Las temperaturas elevadas favorecen la sulfatación**

**f).-Almacenamiento por periodo largo de una batería nueva**

**Una batería nueva que se encuentra completamente cargada, con nivel y gravedad específica de electrolito adecuados. Si va a ser almacenada durante un periodo de tiempo, por ejemplo uno o dos meses antes de entrar en operación debe ser sometida a una carga profunda, de otro modo sufrirá sulfatación. Carga profunda significa someter a la batería a una carga adicional de unas pocas horas, usualmente dos o tres, esto propicia una buena mezcla del electrolito, previene sedimentaciones y deja las placas en condiciones adecuadas para su almacenamiento, obviamente, si el periodo de almacenamiento va a ser más prolongado, esta recarga profunda debe repetirse. Una batería limpia, seca y completamente cargada que no se utiliza sufre una descarga que en promedio llega a ser de 7% al 10% al mes a temperatura ambiente media (18 a 30 °C). Este efecto se conoce como auto descarga. Dicha auto descarga se acelera a mas altas temperaturas por lo cuál la batería debe ser almacenada en un ambiente fresco y ventilado.**

**Bajo condiciones normales las celdas de una batería de tracción de uso vehicular son diseñadas para operar a temperatura ambiente que oscilan entre los 50 y 90 grados Fahrenheit, Los fabricantes americanos dan las características de régimen nominal de sus celdas a un rango de descarga**

dado (6 horas por ejemplo) en función de una temperatura ambiente de 77 ° F, a temperaturas superiores la capacidad se incrementará, y por el contrario a temperaturas inferiores decrecerá. La figura 2.8 muestra el porcentaje de variación de la capacidad a un rango de descarga de 6 horas versus temperaturas del electrolito comprendidas entre - 50 y 110° F . Puede observarse que la capacidad comienza de cero cuando la temperatura alcanza los - 38°F. De modo tal que se justifica plenamente la aplicación de un factor de corrección por baja temperatura  $f_t$  de ser el caso, sin embargo hay que tener en cuenta que a temperaturas muy bajas puede no resultar económico la utilización de una batería convencional por el grado de sobre dimensionamiento que habría que aplicar sino mas bien considerar la utilización de baterías especiales para operar en esas condiciones.

Como ya se ha dicho, los fabricantes definen la capacidad de la batería en función de un régimen de descarga de 6 u 8 horas, Sin embargo la batería puede operar a un régimen distinto siempre y cuando se tome en cuenta que su capacidad no será la misma debiéndose aplicar un factor de corrección llamado factor de régimen  $f_r$ . La figura 2.9 grafica la capacidad vs. duración del régimen de descarga. En esta gráfica la capacidad está expresada en términos porcentuales del valor de la capacidad para régimen de 6 horas.

Es en base a esta curva que se toman los valores del factor de régimen.

Finalmente, a pesar que el tiempo de vida útil de una batería de tracción suele ser en promedio de 5 ó mas años dependiendo de su utilización, la experiencia

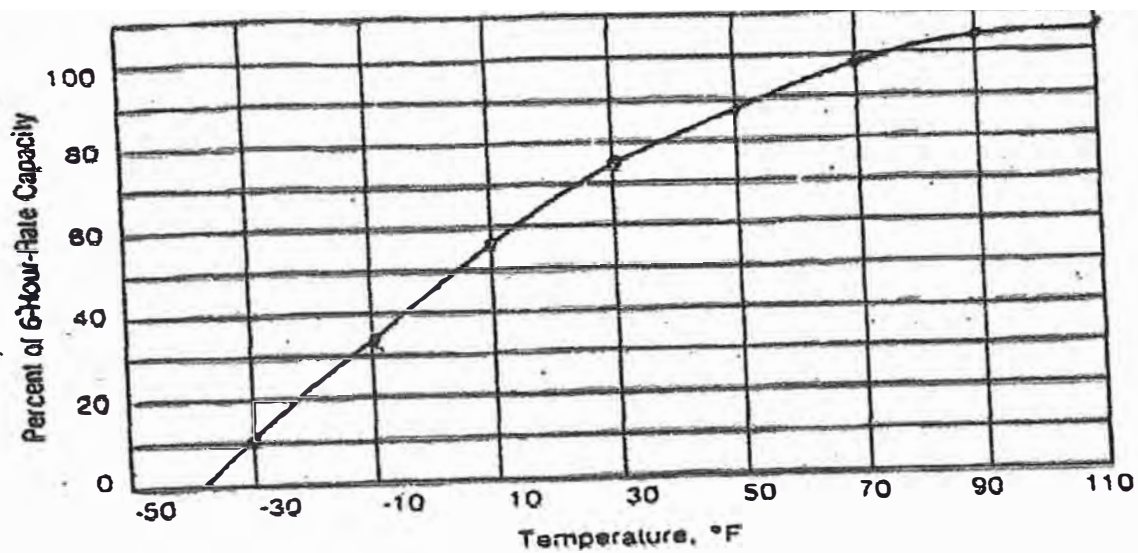


Figura 2.8

Variación de la capacidad para un rango de descarga de 6 horas versus la temperatura del electrolito

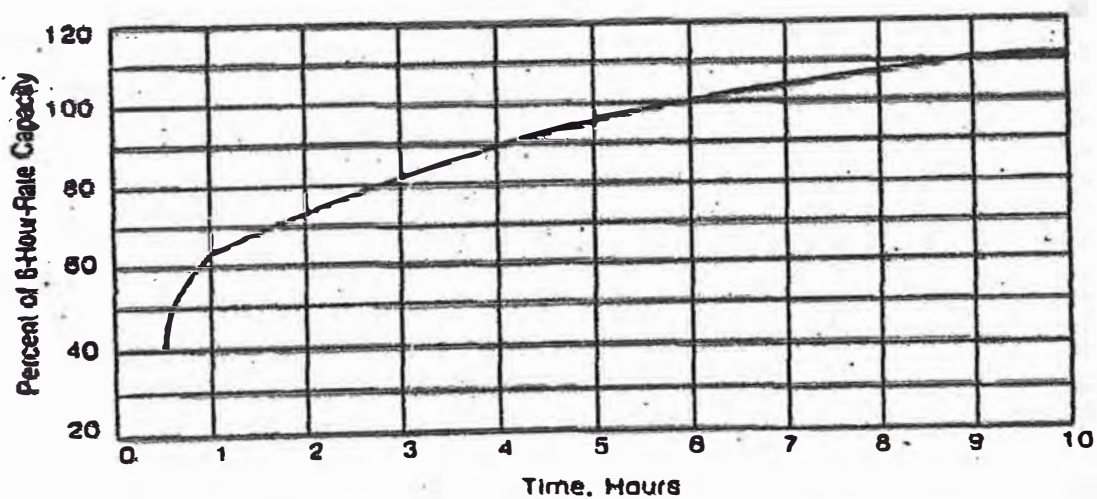


Figura 2.9

Capacidad versus variación del régimen de carga

demuestra que en los tramos finales de su vida, es decir por ejemplo en los últimos 2 años las baterías sufren tanto una reducción de su capacidad de carga que oscila entre 10 y 20% como un aumento de las pérdidas por efecto Joule que se produce durante la recarga que ocasiona que no se complete el ciclo de carga al utilizar buena parte de la energía que se suministra a la batería en cubrir las pérdidas sobre todo en el caso de los cargadores automáticos que son de uso prácticamente general, En tal razón puede ser recomendable, si los criterios previsibles de recambio o reemplazo en cada caso en particular son congruentes con ello, tener en cuenta un factor de envejecimiento  $f_e$  que sobredimensione entre el 10 y 20% la capacidad de la batería.

Cuando se usa para describir las características de consumo de la batería la corriente promedio hay que tener en cuenta el nivel de oscilación que puede alcanzar la máxima corriente respecto a este valor promedio, ya que las celdas de plomo ácido, como ya hemos dicho no siempre toleran sin consecuencias los picos o niveles altos de corriente aún que sean de corta duración.

Si las necesidades de operación imponen a la batería niveles altos de corriente de corta duración de una cierta regularidad puede ser conveniente sobredimensionar la batería a fin que pueda absorber estos sin sufrir daño. Este factor suele ser llamado coeficiente de fluctuación. Es necesario sin embargo mencionar aquí, respecto al referido coeficiente, que se debe tener cuidado al aplicarlo para no sobredimensionar excesivamente la batería puesto que las

fluctuaciones de la corriente podrían haber sido cubiertas ya por los otros coeficientes aplicados por consideraciones distintas, además que algunos fabricantes incluyen en el valor del coeficiente de fluctuación previsiones de sobre dimensionamiento por envejecimiento, descarga y mantenimiento.

En la figura 2.10 se dan valores para este coeficiente tomado de las tablas y ábacos de algunos fabricantes.

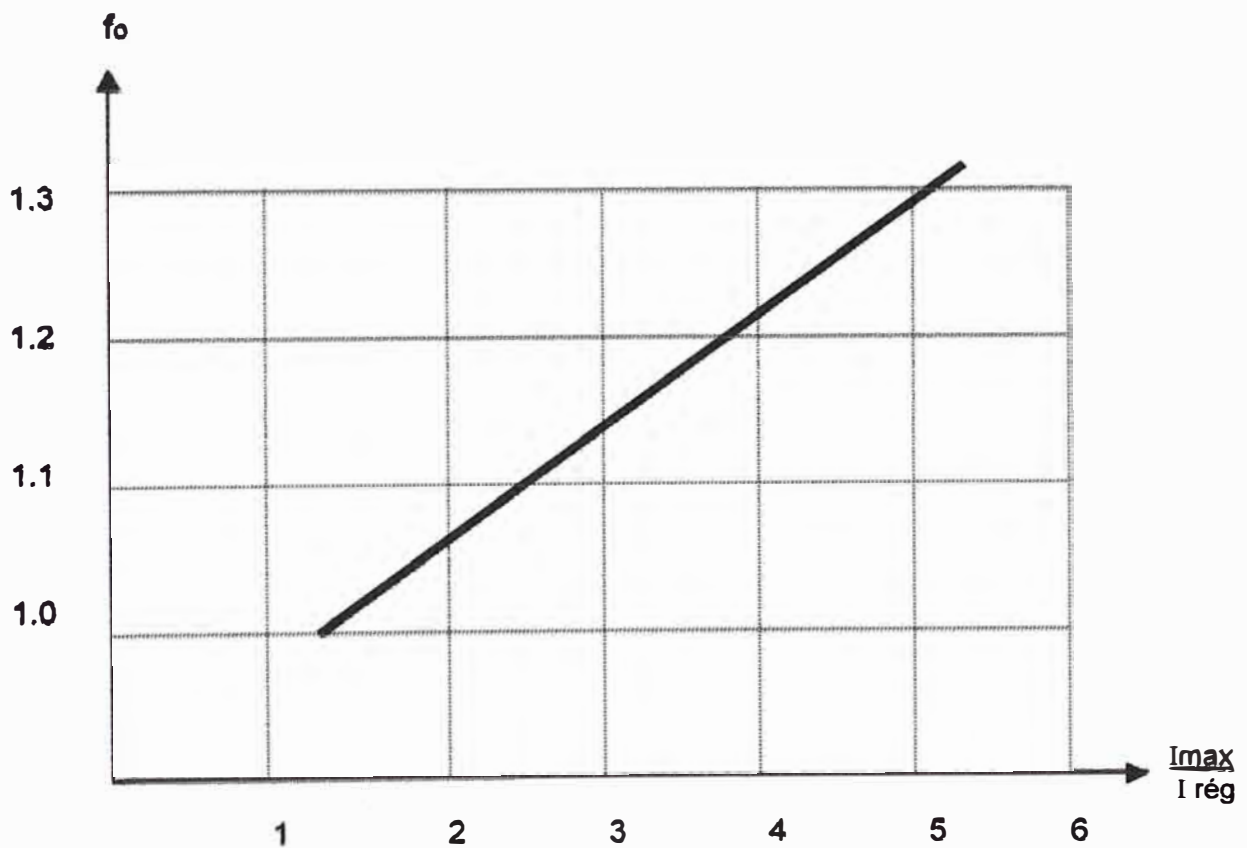


Figura 2.10  
Coeficientes de fluctuación versus la relación  $I_{max} / I_{régimen}$

En síntesis, para seleccionar adecuadamente la batería podemos aplicar la

siguiente fórmula:

$$AHT = f_s \times f_m \times f_t \times f_e \times f_o \times f_r \times AHC \quad (2.1)$$

Donde:

**AHT** ⇔ Ampere-hora Totales

**AHC** ⇔ Ampere-hora calculados

**f<sub>s</sub>** ⇔ Factor de sobrecarga

**f<sub>m</sub>** ⇔ Factor de mantenimiento

**f<sub>t</sub>** ⇔ Factor de baja temperatura

**f<sub>e</sub>** ⇔ Factor de envejecimiento

**f<sub>o</sub>** ⇔ Coeficiente de fluctuación

**f<sub>r</sub>** ⇔ Factor de régimen

## 2.5 Carga de la batería

Como sabemos la batería de plomo ácido de aplicación vehicular puede ser cargada y descargada cuantas veces su ciclo de vida útil lo permita. El proceso de carga en términos generales se inicia haciendo pasar corriente continua en sentido opuesto al sentido de circulación de la corriente de descarga conectando el polo positivo de la fuente de carga al terminal positivo y el negativo al correspondiente negativo del acumulador por un tiempo tal que se logre igualar los Ampere-hora de descarga además de una pequeña cantidad adicional destinada a cubrir las pérdidas que ocurren en el medio conductor

(en este caso el electrolito, los conductores, conectores, etc.) principalmente producidas por efecto Joule.

La cantidad de energía adicional necesaria para cubrir las pérdidas suele ser del orden del 5 al 20% dependiendo del estado de la carga en el momento de la conexión, rango de descarga, edad de la batería, y temperatura.

Cargar apropiadamente una batería significa simplemente suministrarle energía en una cantidad suficiente, sin provocar excesivo calentamiento, emisión de gases, ni sobrecarga. En general un régimen de carga es permisible si no produce excesiva emisión de gases y temperaturas que no excedan los 110 o 115°F.

Dadas las ventajas que a través de los años se hacían evidentes en muchas otras fuentes generadoras de energía eléctrica distintas de los acumuladores eléctricos, estos, a pesar de su temprano descubrimiento, fueron dejados de lado y muy poco se avanzó en su estudio y conocimiento durante largas décadas. Hasta hace pocos años, los equipos de recarga eran diseñados sin tener en cuenta para nada la complejidad de los procesos químicos al interior de una batería, lo cuál sin duda causó muchas dificultades en su aplicación además de sobrecargas, cargas incompletas, sobrecalentamiento, excesiva sulfatación y una vida corta. Como sabemos los acumuladores eléctricos son aparatos electroquímicos, y como tales, siguen las estrictas leyes de los procesos químicos los cuales no pueden ser alterados sin perjudicar su funcionamiento y en muchos casos causar daños permanentes.



Por razones que hemos expuesto anteriormente, sabemos que el proceso de carga de la batería produce la generación de calor dentro de las celdas. Es importante limitar este calor a niveles seguros en prevención de daños internos. Esto se logra limitando la corriente de carga.

La mayoría de fabricantes recomienda regímenes iniciales de corriente que no excedan los 0.225 Amp. por cada Ampere-hora de capacidad y 0.05 Amp. por cada Ampere-hora en las etapas finales de la carga. Por ejemplo, una batería de 1000 A-h debería empezar su carga, de acuerdo a lo dicho, con una corriente de  $1000 \times 0.225 = 225$  Amp y finalizar su carga con una corriente de alrededor de  $1000 \times 0.05 = 50$  Amp. Pueden considerarse valores típicos de corriente inicial los que oscilan entre 16 y 25 Amperes por cada 100 Amp-h de capacidad, y corrientes finales las que oscilan entre 2 y 5 Amperes por cada 100 Amp-h.

La figura 2.11 muestra las características de carga típicas de una celda de plomo ácido de 100 Amp - h que está siendo sometida a su régimen de carga nominal, graficando las curvas correspondientes a la corriente de carga en Amperes, los Amperes-hora, Voltios, Temperatura de la batería, y gravedad específica versus el tiempo en horas. La referida gráfica nos hace notar algunas cosas importantes como las que pasamos a describir:

La tensión varía desde alrededor de 2.1 V/celda a cero Amperes hora hasta aproximadamente 2.52 V /celda al 100% de los Amp - h de capacidad, esto querrá decir que la tensión que midamos durante la carga en

los bornes de por ejemplo una batería de 48 Voltios (24 celdas) variará desde los 50 hasta alrededor de 60 Voltios cuando se completa su ciclo de carga. Asimismo, la corriente suministrada por el cargador empieza en aproximadamente 19 Amperes al inicio de la carga y culmina en alrededor de 5 Amperes. Del mismo modo la gravedad específica va desde 1.120 hasta 1.280. También la temperatura a sufrido un incremento de más o menos 20°F (11.1°C). Observando bien la gráfica se puede notar un cambio radical en el trazado de las curvas cuando han transcurrido aproximadamente 5 horas de carga. Esto significa que para ese momento la celda está con 80% de carga. Cuando una batería alcanza ese nivel, empieza la emanación de gases, por lo cual el cargador que está sensando la tensión en bornes que en ese momento es de aproximadamente 2.37V/celda automáticamente pasa al régimen de carga final. La carga se completa a las 8 horas donde el cargador debe apagarse.

Las curvas y valores indicados líneas arriba han sido obtenidos por los fabricantes a partir de una ardua investigación y representan una forma optima de evaluar la idoneidad del cargador conectado a la batería dado que los cargadores que se alejan de las características graficadas, en la práctica terminan acortando severamente el tiempo de vida útil de las celdas y por ende de la batería.

## **2.6 Regímenes de carga**

- Carga inicial

Como ya mencionamos, es aquel régimen de carga a que se somete la batería descargada, sus valores típicos oscilan entre 16 y 25 Amp por Amp hora de capacidad de la batería.

- **Carga final**

Es el régimen de carga a que debe someterse a la batería luego que se ha alcanzado el 80% de la carga, esto sucede cuando la batería tiene una tensión en bornes de alrededor de 2.37 V/celda , y es el momento donde se inicia la emisión de gases, la corriente de carga debe ser de alrededor de 2 a 5 Amp por Ampere-hora de capacidad de la batería.

- **Carga ecualizadora**

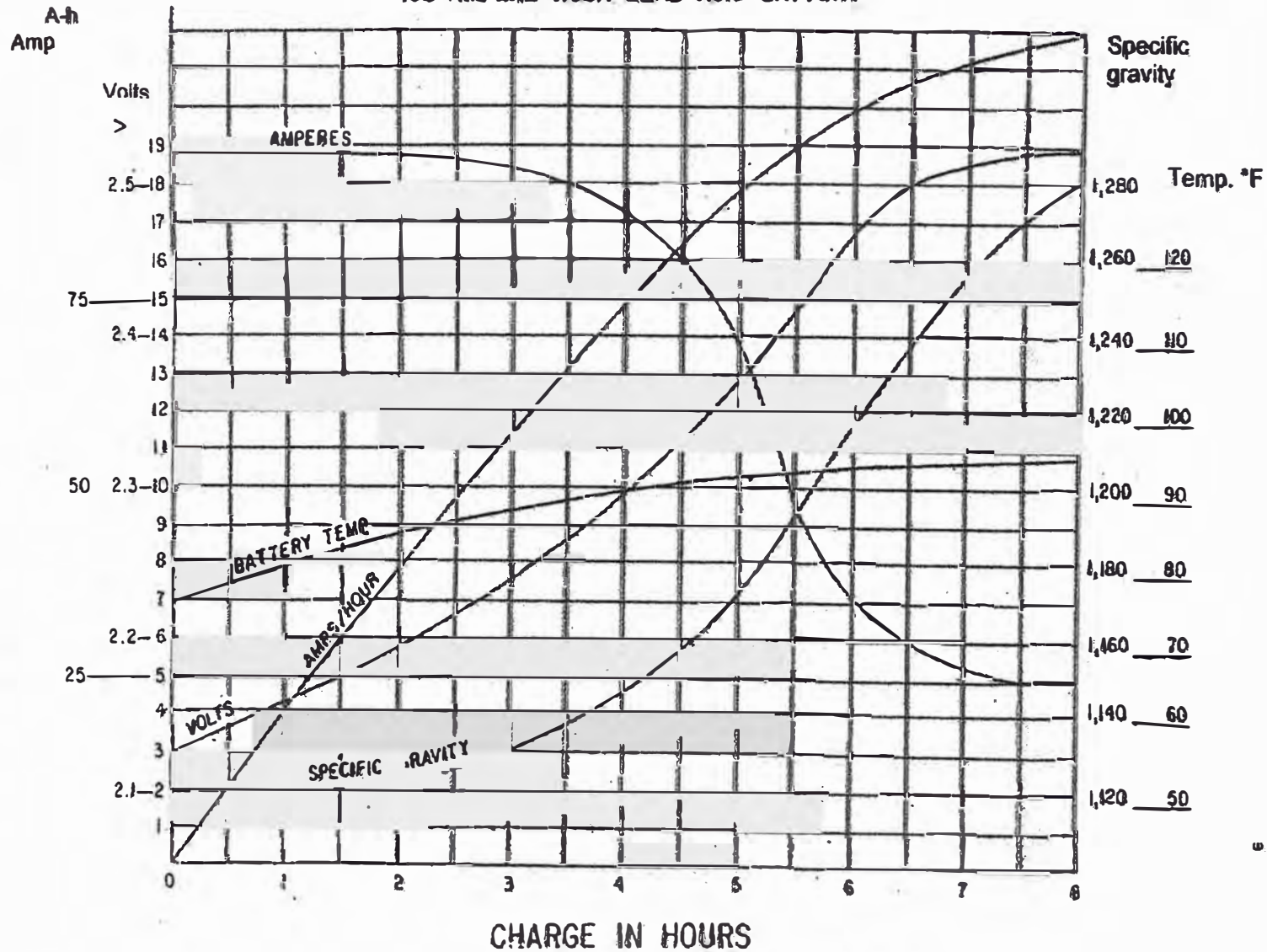
Es una carga a bajo régimen, que se aplica, según las características de la utilización, de una a dos veces al mes a la batería a fin de reestablecer todas y cada una de las celdas de la batería a la condición de carga completa. Si la batería opera en uso pesado y debe cargarse una o mas veces al día, la carga ecualizadora puede realizarse semanalmente. Esta carga usualmente se da como una continuación de la carga regular hasta que no haya indicación de crecimiento en la medida del voltaje o la gravedad específica, lo cuál ocurre aproximadamente a las 2 0 3 horas de haberse cumplido el ciclo de carga normal. En los cargadores automáticos la carga ecualizadora suele consistir únicamente en prolongar el tiempo de carga final en 3 horas luego de lo cual el equipo se apaga automáticamente.

- **Carga Profunda.**

**Este es un tipo no regular de carga, sino más bien se suele dar bajo ciertas circunstancias condicionantes, es esencialmente una carga suplementaria la cuál se usa para prevenir la sulfatación o sobre descarga.**

**La carga profunda (Boost charge en Inglés) es una carga a régimen de alta corriente durante un corto período de tiempo (2 o 3 horas). Se emplea, principalmente, cuando la batería va a ser almacenada por un largo período de tiempo como medida de emergencia cuando la capacidad de la batería resulta insuficiente para las necesidades del trabajo, o por problemas de rendimiento a causa del envejecimiento de una batería que está llegando al final de su vida útil. La carga profunda acorta la vida útil de la batería y solo se recomienda como hemos dicho cuando es absolutamente necesario.**

### CHARGING CHARACTERISTICS FOR A ONE CELL 100 AMPERE HOUR LEAD ACID BATTERY



Características de carga para una celda de 100 Amp-hora  
 de una batería de plomo ácido  
 Figura 2.4

## **CAPITULO III**

### **EL CARGADOR DE BATERÍAS**

#### **3.1 Criterios para la selección de un cargador**

Existen en el mercado muchos tipos de cargadores aplicables a las baterías de plomo ácido. Un buen cargador, como se ha dicho en el capítulo anterior, debe respetar las características particulares del proceso electroquímico que tiene lugar en las celdas. Dicho de otro modo, el cargador debe adecuarse a los requerimientos de la batería y no lo contrario, es decir someter a la batería a las particularidades del cargador. Por esta razón los cargadores comerciales para baterías de tracción se diseñan para cada capacidad e inclusive para cada modelo específico de batería y son por lo general automáticos, es decir no necesitan la supervisión de un operador para garantizar el cumplimiento de los requerimientos del proceso de carga. Los cargadores de plomo ácido para ser considerados adecuados deben cumplir principalmente con lo siguiente:

- Tener régimen de carga inicial dentro de los límites permisibles
- Cambiar a régimen de carga final al 80% de la carga completa
- Ser capaz de completar el ciclo de carga requerido

- **Tener posibilidad de carga de ecualización**

**Además, en segundo termino debe ser capaz de:**

- **Absorber las variaciones de la tensión del suministro de energía comercial, sin perjudicar el proceso de carga**
- **Evitar la sobrecarga de la batería**
- **Proporcionar posibilidad de carga profunda**

### **3.2 Métodos de carga**

Los métodos de carga que utilizan los cargadores de batería son básicamente dos: "Carga a tensión constante" y "Carga a corriente constante". La tecnología utilizada para el control de estos parámetros va desde el uso de un juego de resistencias que entran y conmutan de acuerdo a las necesidades de la carga hasta los que utilizan dispositivos electrónicos de estado sólido. Cualquiera de ellos que se utilice, con algunos matices, pueden considerarse variaciones de los métodos arriba mencionados. Los avances de la electrónica permiten un método de carga adicional llamado por algunos método de "Carga gradual" que es un sistema que sensa y controla tanto la tensión como la corriente y realiza ajustes de estos en una secuencia de carga gradual.

Los cargadores de baterías de uso vehicular que utilizan cualquiera de estos métodos de carga suelen ser denominados "cargadores estáticos" para indicar que la carga se realiza por medio de un equipo estático, a diferencia de la carga

de una batería automotriz que carga a través de un alternador instalado en el vehículo e impulsado por medio de poleas por el motor de explosión.

- **Carga a Tensión Constante**

En este método, una tensión fija es aplicada a los bornes de la batería, la corriente de carga es determinada en este caso por la diferencia entre la tensión que suministra el cargador y la tensión en los bornes de la batería, además de la resistencia del circuito entre ambas. Como la tensión en los bornes de la batería aumenta conforme avanza el proceso de carga la corriente de carga tiene una tendencia decreciente. A medida que la carga se aproxima al 80% de la carga completa la corriente se acerca al régimen final, Frecuentemente los cargadores que usan este método sensan el voltaje y cuando se alcanza la tensión de emisión gaseosa, usualmente alrededor de 2.37 a 2.39 Voltios por celda, la alimentación se ajusta abruptamente llevando la corriente a su valor de régimen de carga final. Hay muchas variantes de este método, uno de ellos por ejemplo es el llamado carga de "Voltaje constante modificado" en el cual la tensión de alimentación constante antes de llegar a los bornes de la batería pasa por un arreglo de resistencias de modo que al subir la tensión de la batería, debido al avance de la carga, la corriente decrecerá de modo que la caída de tensión en el resistor en serie con el conjunto decrecerá, y a la misma vez la caída de tensión de la resistencia en paralelo a los bornes de la batería se incrementará de



modo que se produce un incremento de la tensión en los bornes de la batería. Se entiende que en este método los valores de las resistencias debe ser cuidadosamente seleccionado para ajustarse convenientemente a los regímenes de carga, de otro modo, la carga será equivocada. Hay otras variantes como el denominado método de carga de "Dos rangos de carga" en el cuál se utilizan 2 valores de resistencia de modo tal que una de ellas trabaja durante el comienzo de la carga para conseguir la corriente inicial recomendada, y la otra entrará a operar a través de la acción de un relay que conecta la segunda resistencia al circuito en el momento que deba cambiarse la corriente a valores de régimen final. Hay que indicar que los métodos que utilizan resistencias para el control de las tensiones y corrientes, por su propia naturaleza, resultan ineficientes comparados con otros métodos más modernos.

- **Carga a corriente constante**

En este caso el equipo provee un valor de corriente de carga constante con un valor inicial acorde con lo recomendado por el régimen de carga inicial, y mantiene constante ese valor haciendo ajustes a la tensión que suministra el cargador de modo que no se afecte por el incremento de la tensión en los bornes de la batería. Posteriormente de igual modo que en el caso anterior, cuando se alcanza el 80% de la carga, la corriente se ajusta al nivel del valor de régimen de carga final. Este método es posible dado que hoy en día se pueden conseguir los ajustes

automáticos de los valores de la corriente a través de dispositivos electrónicos de estado sólido

- **Carga gradual**

Se usa dispositivos de estado sólido al igual que en el caso de la carga constante pero en este caso se realizan ajustes controlados y decrecientes de la corriente o de la tensión siguiendo una secuencia de ajustes de acuerdo a una curva esperada de crecimiento de la gravedad específica del electrolito. En este método e la curva de crecimiento de la tensión en bornes de la batería es aproximadamente igual a la curva de crecimiento de la gravedad específica y sigue una trayectoria casi paralela a ella.

En las figura 3.1 y figura 3.2 pueden verse algunas curvas típicas que grafican la evolución de los parámetros de carga correspondiente a los métodos que hemos descrito.

### **3.3 Tipos de cargadores estáticos**

Tomando en cuenta lo explicado líneas arriba nos podemos dar cuenta que existen una infinidad de tipos de cargadores que aplican a criterio de los fabricantes cualquiera de los distintos métodos de carga. Sin embargo vamos a dejar de lado todos aquellos que utilizan resistencias tanto para controlar la corriente como para la tensión dado que en cuanto a eficiencia y performance no tienen comparación con otros de diseños más recientes,

además que últimamente tampoco presentan ventajas significativas en cuanto al precio por lo cuál están deviniendo en obsoletos.

Actualmente la mayoría de fabricantes, o por lo menos los principales fabricantes a nivel mundial presentan en sus catálogos comerciales 2 tipos de cargadores para baterías de tracción de plomo ácido que se disputan entre sí las preferencias de los usuarios por su buen perfil de operación, eficiencia y confiabilidad. Estos 2 tipos de cargadores corresponden a métodos de carga y tecnologías completamente diferentes entre si y son los denominados "Cargadores Ferro-resonantes " y los "Cargadores de Estado Sólido"

#### **3.4 El cargador estático Ferro-resonante**

Los transformadores ferro-resonantes son conocidos y utilizados desde hace varias décadas en muchas y muy diversas aplicaciones. En los últimos años los avances tecnológicos en la fabricación de planchas de acero magnético con características de alta saturación han incrementado sus posibilidades de utilización al punto que es común hoy en día encontrar equipos que cuentan con ellos, principalmente como estabilizadores de tensión y transformadores de medida . En los cargadores de batería, los transformadores ferro-resonantes han encontrado una exitosa aplicación y han demostrado ser componentes bastante confiables eficientes y económicos, por lo cuál los así llamados "cargadores ferro resonantes" están ampliamente difundidos .

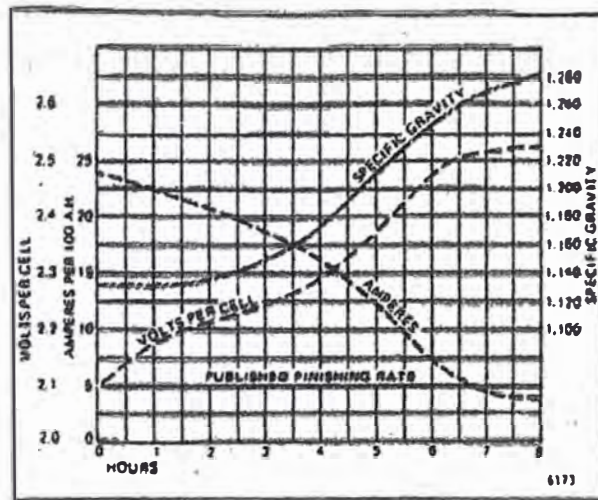
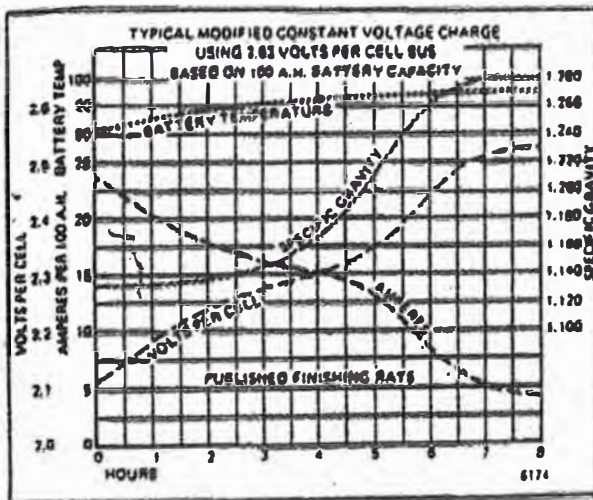
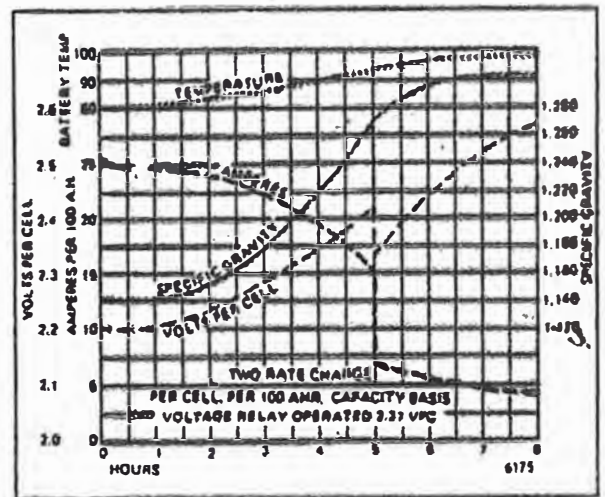


Figura 3.1  
Método de descarga gradual



Modified Constant  
Voltage Charger



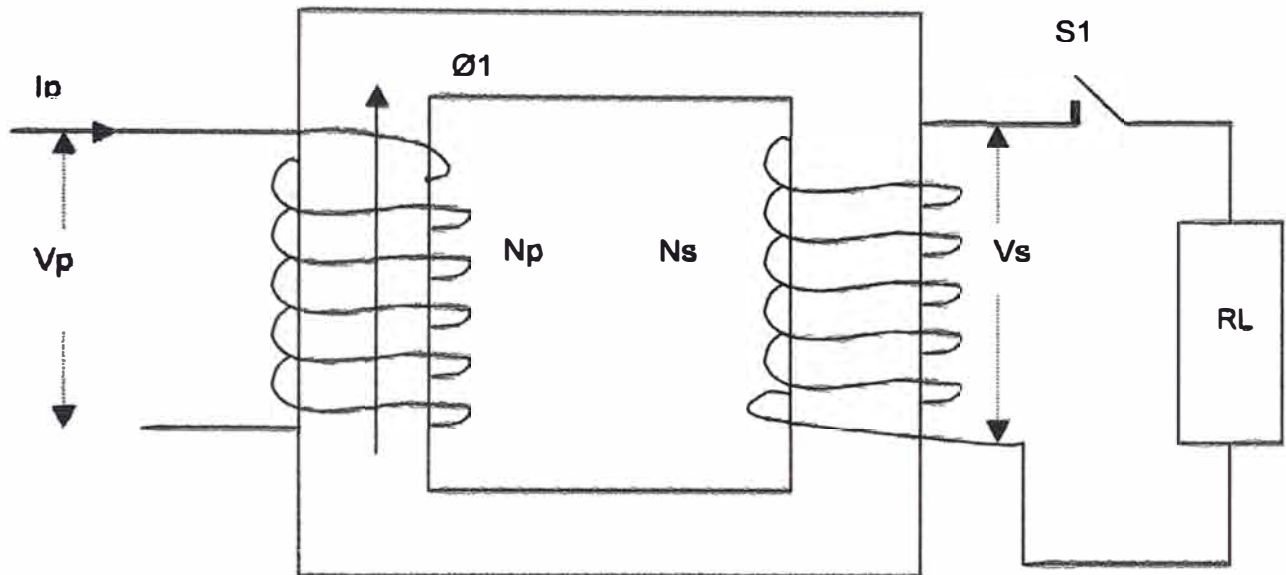
Two-Rate Charging Cycle

Figura 3.2  
Método de descarga modificado de voltaje constante y  
método de doble régimen de carga

A fin de comprender como es que opera un cargador de batería ferro resonante vamos revisar primeramente y en forma simplificada la operación del núcleo magnético de un transformador ordinario ideal.

Sabemos que, como vemos en la figura 3.3 , al conectar una tensión  $V_p$  en los bornes del bobinado primario de un transformador de  $N_p$  espiras circulará a través de él una corriente  $I_p$  estableciéndose una fuerza magnetomotriz proporcional al producto  $N_p I_p$  denominado Ampere-vuelta o fuerza magnetomotriz, cuya consecuencia es la formación del flujo magnético  $\Phi_1$  que circulará de acuerdo con nuestro esquema en el sentido de las agujas del reloj tal y como se muestra en la figura 3.3. Este flujo inducirá, como sabemos, una Tensión  $V_s$  en el bobinado secundario, en este caso de  $N_s$  espiras La magnitud de esta tensión es proporcional al número de espiras secundarias y al flujo magnético  $\Phi_1$  el cual , dejando de lado los flujos de dispersión, atraviesa completamente el bobinado secundario. Aquí hay que indicar que la simplificación del esquema del transformador ideal tal y como lo estamos presentando se sustenta en las siguientes suposiciones:

- El flujo  $\Phi_1$  es proporcional a la fuerza electromotriz que lo produce, dicho de otro modo el material que conforma el núcleo magnético no esta saturado y además la permeabilidad del circuito magnético es uniforme y constante
- No existen perdidas en el hierro ni por corrientes parásitas ni de histéresis.



**Figura 3.3**  
**Transformador ideal**

- **Todo el flujo establecido por la corriente del primario se encuentra dentro del núcleo magnético y por lo tanto atraviesa todas las espiras de ambos devanados, es decir, no hay flujo de dispersión.**
- **No hay pérdidas en el cobre, es decir la resistencia en el devanado primario es cero.**

**Considerando que la tensión aplicada  $V_p$  varía sinusoidalmente respecto al tiempo, la fuerza electromotriz (o con más propiedad contra electromotriz) también será una senoide y esto implicará que el flujo también lo sea. Por lo tanto, si representamos el flujo instantáneo por:**

$$\Phi_1 = \Phi_m \text{Sen } \omega t = \Phi_m \text{Sen} 2\pi f t \quad (3.1)$$

Donde:

$\Phi_m \Leftrightarrow$  Amplitud del flujo en Webers

Luego la correspondiente fuerza electromotriz:

$$E_1 = - N_p ( \delta \Phi_1 / \delta t ) \quad (3.2)$$

$$E_1 = - 2\pi f N_p \Phi_m \text{Cos } \omega t \quad (3.3)$$

$$E_1 = 2\pi f N_p \Phi_m \text{Sen}(\omega t - \pi/2) \quad (3.4)$$

Así pues vemos que el flujo sinusoidal induce una fuerza electromotriz sinusoidal desfasada  $90^\circ$  en atraso respecto al flujo. En la figura 3.4 vemos el diagrama fasorial que representa lo descrito.

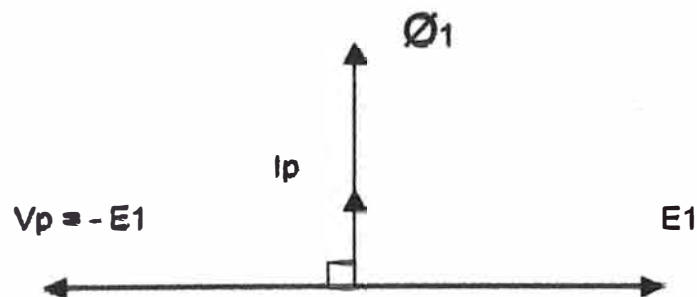


Figura 3.4  
Diagrama fasorial de un transformador ideal con el secundario en circuito abierto

En la practica una cierta cantidad de pérdidas en el hierro siempre estará presente, de modo que la corriente  $I_p$  no puede estar  $90^\circ$  desfasada respecto a la tensión  $V_p$  sino que debe adelantar al flujo en un pequeño ángulo de modo

que la corriente del primario, con el transformador operando en vacío estará determinada por dos componentes, una de las cuales  $I_0$  está en fase con el flujo y la otra  $I_h$   $90^\circ$  adelantada corresponde a un pequeño consumo de potencia para cubrir las pérdidas en el hierro. Ahora bien, si en el bobinado primario tomamos en cuenta su resistencia  $R_p$  y la dispersión del flujo magnético, considerándolo como una reactancia  $X_d$ , tendremos que la representación fasorial quedará como se indica en la Figura 3.5.

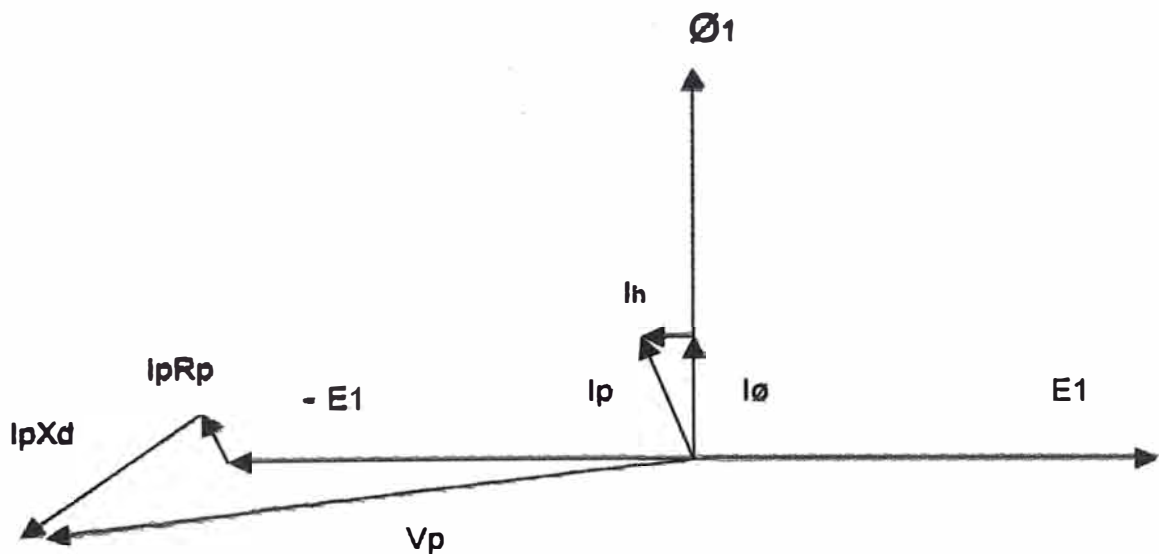


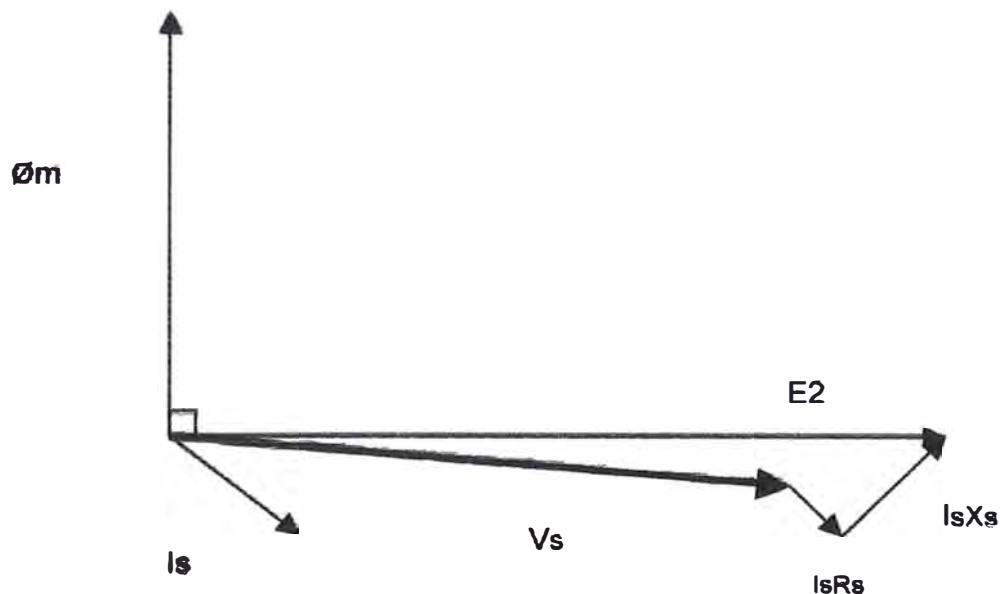
Figura 3.5  
Diagrama fasorial de un transformador en vacío considerando pérdidas



Al cerrar el interruptor S1 queda conectada una carga RL, en este caso resistiva, al circuito secundario del transformador estableciéndose en este una corriente secundaria  $I_s$  el que a su vez surca a través de las espiras secundarias estableciendo una fuerza magnetomotriz en función de los Ampere vuelta  $N_s I_s$  creando un flujo magnético  $\Phi_2$  cuya dirección y sentido serán tales que en concordancia con la ley de Lenz tiende a oponerse al flujo  $\Phi_1$  establecido en el núcleo del transformador por el bobinado primario. Es decir que el efecto de la corriente inducida en el secundario resulta ser "desmagnetizante" sin embargo lo que se observa en la realidad es que el flujo magnético  $\Phi_1$  permanece prácticamente invariable dentro de los límites de trabajo, de lo que se desprende que el efecto desmagnetizante queda compensado. Esto ocurre mediante un incremento automático de la corriente del primario a una magnitud  $I_1$  tal que la resultante de la fuerza magnetomotriz del primario y del secundario permanece prácticamente invariable.

En la figura 3.6 se muestra el diagrama fasorial del circuito secundario con el interruptor S1 cerrado. El flujo resultante representado por  $\Phi_m$  induce en el devanado secundario la fuerza magnetomotriz  $E_2$  desfasada  $90^\circ$  en atraso respecto a este del mismo modo y por la misma razón (ecuación 3.3) que en el devanado primario. La corriente secundaria estará a su vez desfasada de  $E_2$  en un ángulo que dependerá de la impedancia del circuito secundario. De tal modo que teniendo en cuenta las pérdidas en el núcleo y en el cobre, el

diagrama fasorial queda configurado como se indica en la figura arriba mencionada.



**Figura 3.6**  
**Diagrama fasorial del circuito secundario del transformador**  
**Con una impedancia secundaria conectada a sus bornes**

En la **figura 3.7** la característica resaltante de la construcción fasorial es la suma geométrica de los fasores que representan las fuerzas magnetomotrices del primario y secundario de modo tal que su resultante, y por lo tanto la resultante del flujo magnético permanecerá siendo la misma sea con el secundario abierto o con el secundario cerrado.

Si al núcleo del transformador le insertamos un block de material magnético de

la forma en que se indica en la figura 3.8 a fin de dar un camino adicional al flujo magnético, la operación del transformador con el switch S1 abierto será esencialmente la misma como se ha descrito en la figura anterior. Sin embargo, cuando cerramos el interruptor S1, la corriente  $I_s$  crea igualmente una fuerza magnetomotriz y un flujo  $\Phi_2$  con sentido opuesto al flujo creado por el circuito

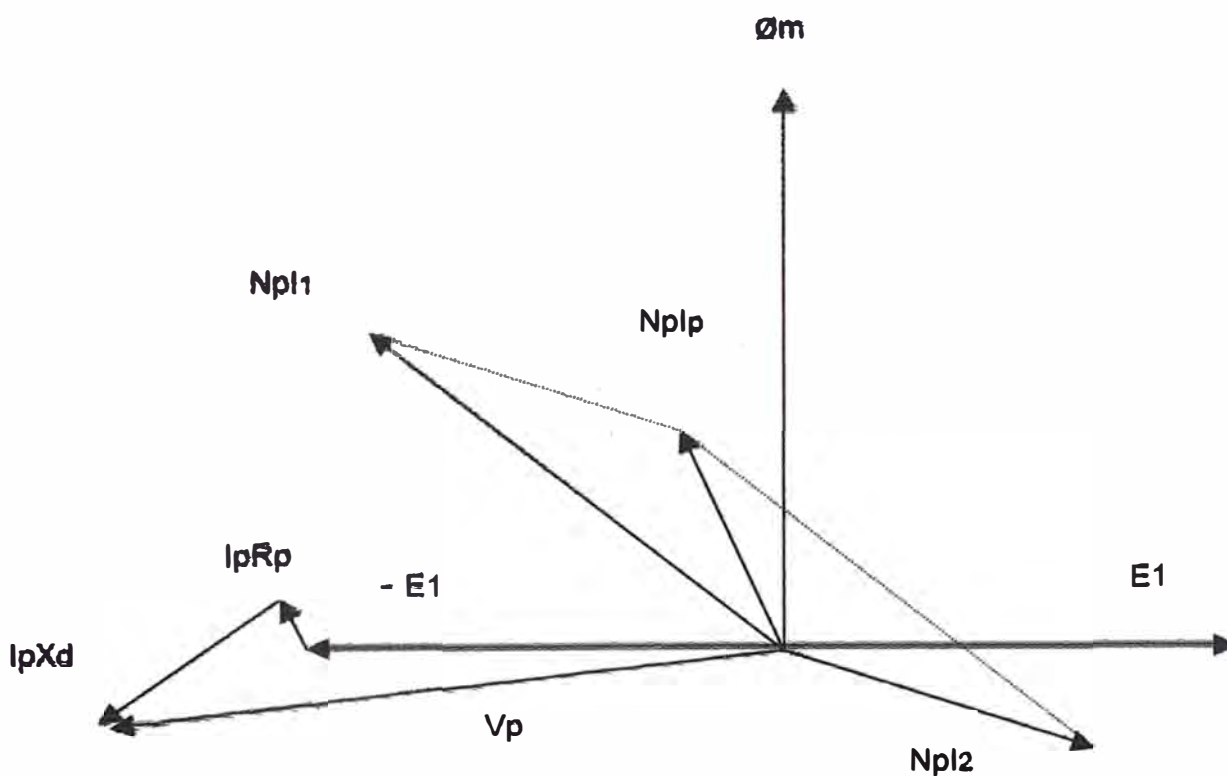


Figura 3.7

Diagrama fasorial de un transformador en condiciones de carga mostrando el efecto compensatorio de las fuerzas magnetomotrices

original primario, pero en este caso,  $\Phi_2$  puede fluir a través del block que llamaremos shunt magnético, la corriente  $I_p$  se incrementará tal como en el caso anterior creando una mayor fmm acrecentando los ampere vuelta del primario, pero el balance final de flujos será que el flujo magnético primario conservará su valor inicial en la mitad superior del núcleo, pero en la mitad restante tendrá un valor inferior resultante de  $\Phi_1 - \Phi_2$ , mientras que en el shunt magnético fluirá  $\Phi_2$ .

A causa de que el voltaje secundario es proporcional al flujo a través de la bobina secundaria, este voltaje será reducido de acuerdo a la relación  $(\Phi_1 - \Phi_2) / \Phi_1$  cuando el interruptor es cerrado. Naturalmente la figura 3.8 es solo un esquema ideal con fines didácticos, en la práctica se usan núcleos de 2 ventanas con la bobina secundaria montada sobre la columna central (caso monofásico), encima de esta y a lo largo se coloca el shunt de modo tal que obliga a  $\Phi_2$  a atravesarlo sin completar el circuito magnético por el resto del núcleo. Sobre este conjunto y con suficiente tamaño se monta el devanado primario de modo que el flujo  $\Phi_1$  no puede atravesar el shunt a causa de la gran reluctancia que le presenta el circuito. En caso de alimentaciones trifásicas suele conformarse el transformador colocando las bobinas en las columnas laterales en forma similar a la descrita para el caso monofásico pero constituyendo una conexión en delta abierto. Conforme variemos los valores de la resistencia de la carga a valores inferiores habrá una reducción más pronunciada en la tensión final de salida del bobinado secundario.

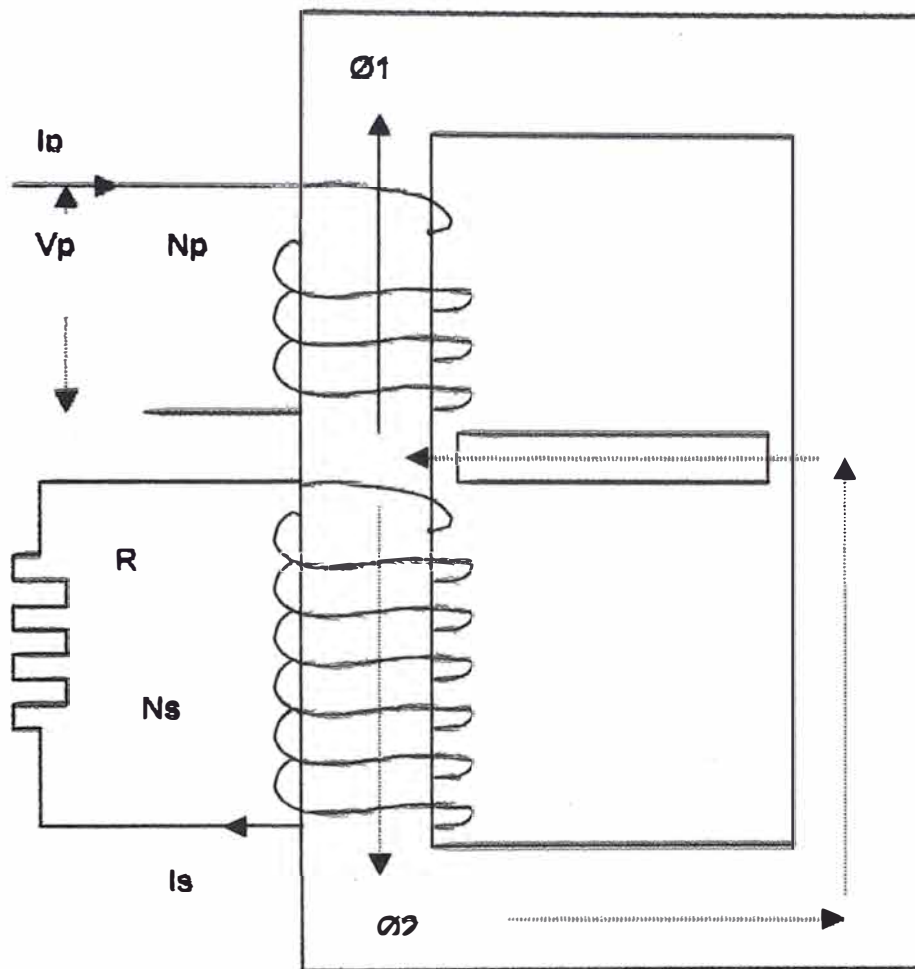


Figura 3.8  
Transformador ideal con un shunt magnético

La figura 3.9 nos muestra la forma en que variarán las curvas  $V_s$  versus  $I_s$  conforme variamos los valores de la resistencia de carga. Si el voltaje  $V_p$  es incrementado, se incrementará por supuesto  $I_p$  y también el flujo, por lo cual en este caso la performance será la misma que nos da la curva arriba indicada pero desplazada hacia la derecha como puede apreciarse en la misma figura.

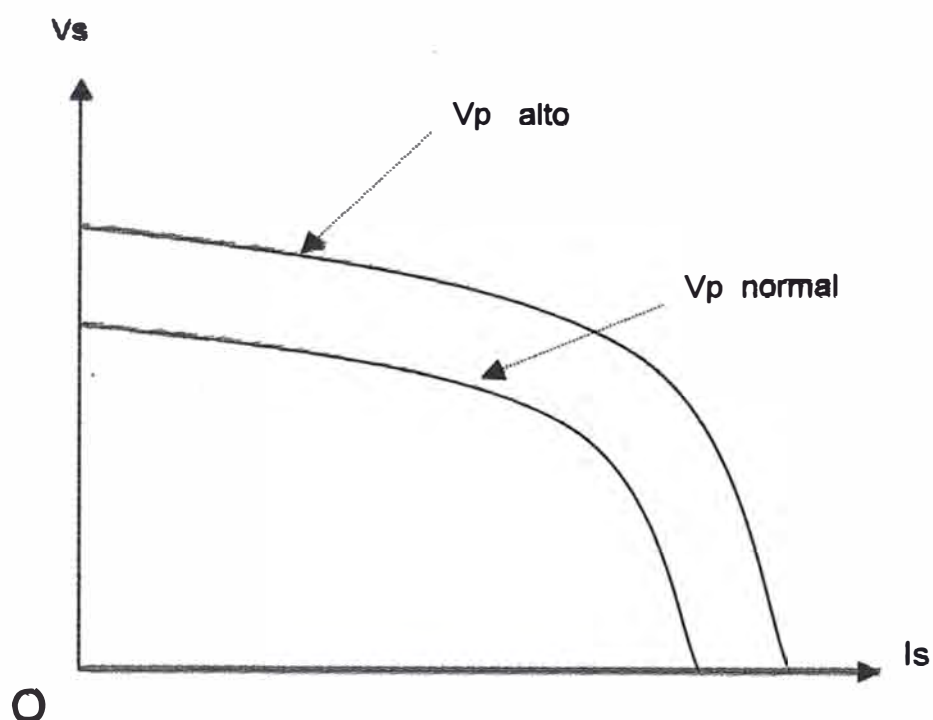


Figura 3.9  
Variaciones de la curva  $V_s = I_s$  cuando se incrementa  $V_p$

En la figura 3.10 tenemos el mismo transformador resonante del caso anterior pero le hemos agregado un devanado adicional el cuál llamaremos bobinado resonante. En la posición que se indica, este bobinado tiene conectado a sus terminales un condensador, la corriente que circule del condensador tendrá un defasaje en adelante de  $90^\circ$  respecto a la tensión inducida  $V_c$ . esto significará que el flujo establecido como consecuencia de la corriente en el condensador  $\phi_c$ , es decir que la corriente en el condensador tiene sentido opuesto a la corriente en la carga y por lo tanto el flujo  $\phi_c$  tendrá el mismo sentido que el flujo  $\phi_1$  de modo tal que se adicionan. Consecuentemente, el flujo resultante

en la mitad superior del núcleo magnético será  $\varnothing_1$  mientras que en la mitad inferior será  $\varnothing_c + \varnothing_1$ .

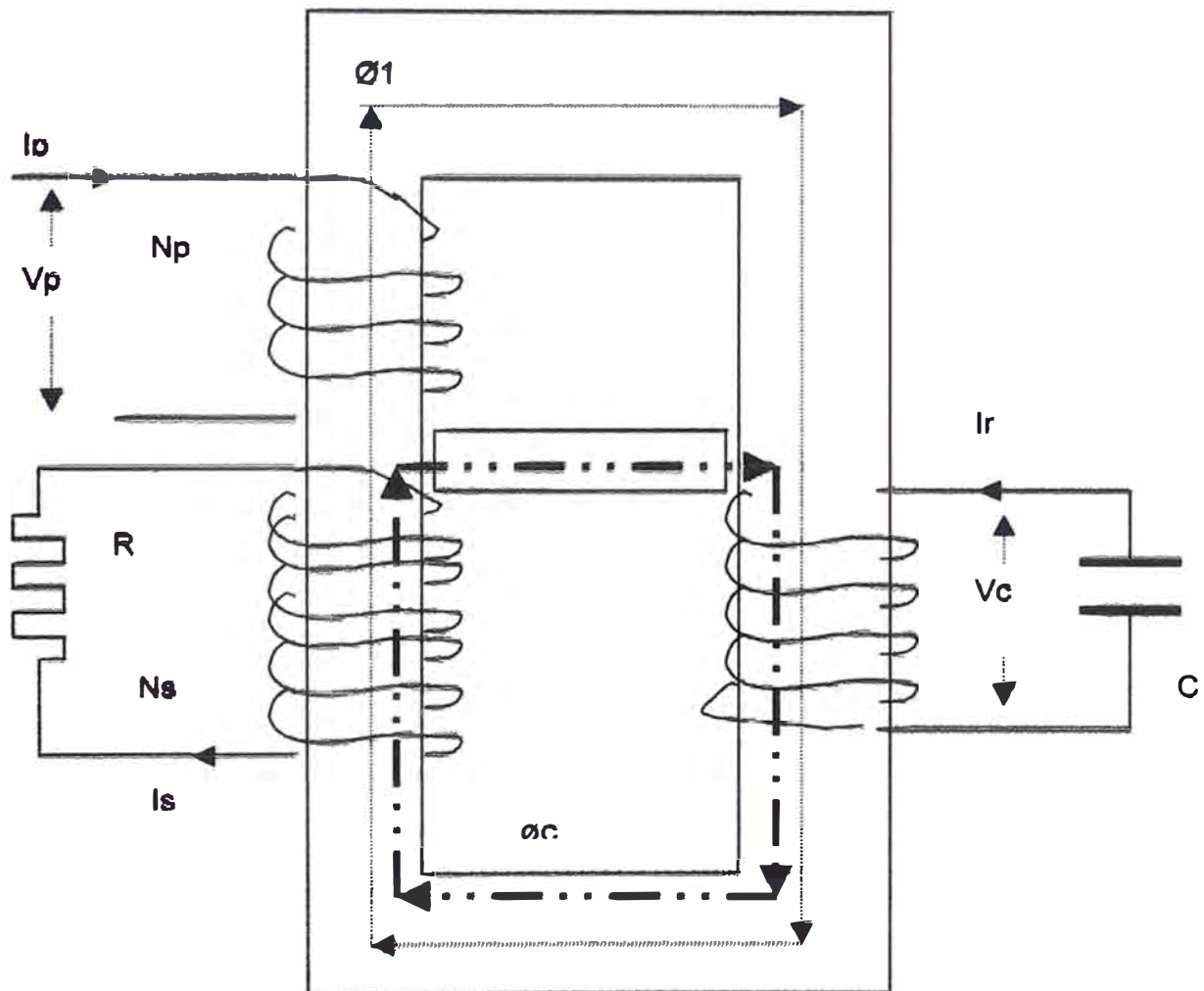


Figura 3.10  
Transformador ideal con un shunt magnético  
Devanado ferro resonante y condensador

En la figura 3.11 se representa el diagrama fasorial del circuito del condensador despreciando, a efectos de una mejor visualización, las pérdidas en el hierro y en el cobre. El flujo resultante  $\Phi_m$  induce una fuerza magnetomotriz  $E_c$  desfasada, al igual que en los casos anteriores,  $90^\circ$  en atraso, sin embargo en esta oportunidad, a causa de la capacitancia, la corriente estará desfasada  $90^\circ$  en adelanto.

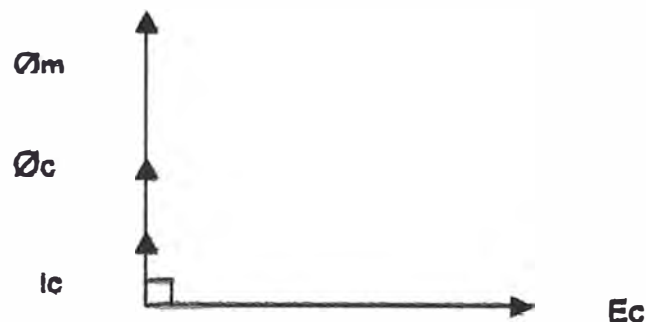


Figura 3.11  
Diagrama fasorial del circuito del devanado ferro resonante

Sabemos además que en un diseño apropiado del transformador, la inducción magnética  $B$ , la cuál se obtiene dividiendo el flujo magnético entre el área del núcleo, está justo debajo del codo de saturación tal y como podemos ver en la figura 3.12, en donde se ilustra la curva característica de los ampere-vuelta versus el flujo, como puede verse la curva sigue una trayectoria casi lineal hasta un codo a partir del cuál empieza la zona de saturación. Desde los valores de ampere vuelta cercanos al cero hasta el inicio del codo de saturación la relación flujo-amperevuelta es prácticamente proporcional. Pero a partir del codo de saturación la relación varía en forma tal que grandes cambios o incrementos



en los ampere-vuelta producen pequeños cambios en el flujo, dependiendo de que la pendiente de la curva en la zona de saturación sea menor (esto se consigue con núcleos de plancha magnética de alta saturación), menor será la variación del flujo, al punto tal que podríamos decir, dentro de ciertos límites que en esta zona el flujo es independiente de las variaciones de los ampere-vuelta, y es precisamente en esta zona donde debe estar ubicado el flujo resultante  $\Phi_c + \Phi_1$  y con ese criterio debe calcularse el bobinado resonante y las dimensiones y características del shunt magnético. Es decir que mientras la mitad superior del núcleo magnético trabaja en la zona lineal, la mitad inferior trabajará en la zona de saturación. En realidad cuando hablamos de mitad del núcleo magnético lo hacemos para simplificar la explicación, en la práctica, la porción del núcleo que opera en la zona saturada se dimensiona de acuerdo a los requerimientos de la aplicación y criterios del diseñador. En general esta porción suele ser mucho más pequeña que la que trabaja en la zona lineal. Como quiera que la tensión inducida es proporcional al flujo magnético, la forma de la curva representativa de la tensión inducida versus los ampere-vuelta o versus corriente de magnetización es la misma. En la figura 3.13, se aprecia la diferencia entre las respuestas de tensión secundaria en la zona lineal y en la zona saturada a las variaciones en la Fmm. Al operar el transformador con una carga determinada, la tensión en el secundario inducida por el flujo  $\Phi_c + \Phi_1$  se verá afectada en una magnitud pequeña con las variaciones de la tensión en el circuito primario, todo aquello dentro de las restricciones del diseño. Es esta

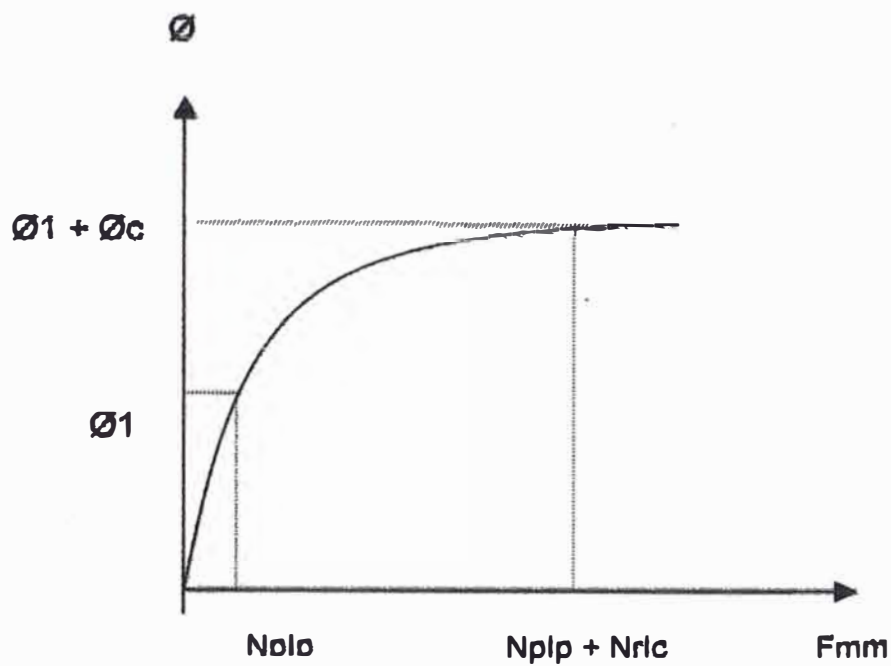


Figura 3.12  
Flujo versus  $F_{mm}$  con devanado resonante

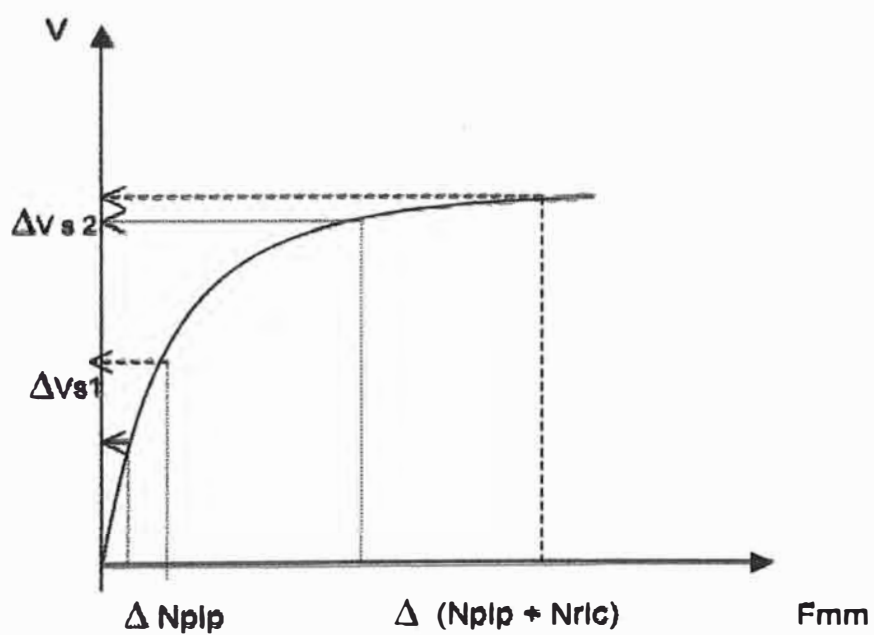


Figura 3.13  
Curva de saturación del transformador ferro resonante mostrando las variaciones de la salida cuando varía la tensión de entrada

cualidad la que se aprovecha en los transformadores ferro resonantes para producir tensiones secundarias poco sensibles a las variaciones del voltaje de la red que alimenta al primario lográndose así una tensión de salida prácticamente constante dentro de un determinado rango de operación. Esto explica su aplicación, entre otros, en los estabilizadores utilizados en los sistemas informáticos y en los cargadores de baterías de plomo ácido.

Dado que por más que se haya escogido un núcleo magnético adecuado para operar saturado, la estabilización solo se logra aceptablemente dentro de un cierto margen, esto suele ser de variaciones en la salida de  $\pm 1\%$  de la tensión de régimen para variaciones de  $\pm 8\%$  en la tensión nominal de entrada los transformadores ferro resonantes para uso en cargadores o estabilizadores cuentan mayoritariamente con taps en el primario para realizar ajustes a la tensión de alimentación a fin de adecuarse mejor a la real tensión de suministro que pueda haber en el punto de conexión.

En la figura 3.14 se muestra el diagrama principio de un circuito típico correspondiente a un cargador estático comercial de tipo ferro resonante para baterías de tracción de plomo ácido para alimentación monofásica. En la figura 3.15 vemos lo mismo pero para una alimentación trifásica.

Como puede observarse en los circuitos de las figuras previamente indicadas, estos cargadores ferro resonantes aparte del transformador cuenta con un puente de diodos rectificador, de onda completa de toma central para el caso monofásico, y de cuatro diodos para el caso trifásico dado que aunque queda a

criterio de cada fabricante y cada diseñador, los transformadores ferro resonantes trifásicos son por lo general de conexión delta abierto.

A continuación a manera de aclaración pasamos a describir la secuencia de operación de uno de estos equipos Se trata de un típico cargador estático ferro resonante trifásico fabricado por la compañía yale industrial trucks y que corresponde a la figura 3.15:

Los bornes de entrada trifásica L1, L2, y L3 se conectan a la línea de alimentación trifásica, en esta situación todos los elementos están des energizados y el equipo queda en "stand by" hasta que se conecte la batería mediante el conector de carga.

La batería descargada se conecta al cargador, y el relay electrónico de tensión VR sensa la tensión de la batería comprendida entre 1.7 y 2.13VDC/celda y cierra el contacto VR1 energizando un temporizador SI que espera unos 10 segundos para dar tiempo al operador de asegurar que el conector de batería este adecuadamente ajustado, luego de lo cual energiza la bobina del contactor LC por lo que el transformador queda energizado los taps del primario reciben la tensión de línea, los condensadores son energizados desde el bobinado resonante y causan la saturación de la porción del núcleo el cual esta separado del bobinado primario por el shunt magnético (no mostrado en el esquema), el flujo saturado determina la tensión inducida secundaria que por esta razón será influenciada más por el valor de este flujo que por la tensión de línea lográndose una tensión de salida relativamente independiente.

El conjunto de diodos que constituye un puente rectificador de toma central que suministrara la tensión continua para cargar la batería. La magnitud de la corriente de arranque es determinada por la tensión en bornes de la batería y las impedancias de transformador ferro resonante. Aquí hay que notar que el cargador deberá suministrar una corriente inicial de aproximadamente 20 Amp por cada 100 Amp-hora y cambiar en el momento oportuno al rango de carga final de entre 2 a 5 Amp-hora . Esta acción no dependerá en este equipo de ningún control externo sino que se ajusta enteramente como consecuencia del diseño del transformador, dimensionamiento de los condensadores y el rango de ajuste de los taps.

Cuando la tensión en bornes de la batería es de alrededor 2.37 Volts/celda el relay electrónico VR activa al temporizador S2. Nótese que hasta el momento no ha habido una temporización mas que de 10 segundos luego de lo cual la operación se realiza sin ningún control de tiempo y permanece así hasta que se activa S2. A partir de aquel momento, se mantendrá energizada la bobina del contactor durante 3 horas mas, llevando a la batería a completar su carga en régimen final. Pasadas 3 horas, el temporizado S2 abre el circuito de la bobina del contactor LC con lo cuál se separa el transformador de la línea de suministro de energía y el proceso de carga culmina.

Hay que indicar que este cargador tiene además opciones de carga ecualizadora, la cual consiste en adicionar 3 horas al proceso normal de carga.

El hecho de que el proceso de carga se ajuste debido únicamente al diseño del transformador y al dimensionamiento de los condensadores, le quita versatilidad al equipo y hace que este sea adecuado para cargar solamente un tipo, ó incluso, un solo modelo de batería, por esta razón es recomendable adquirirlo en conjunción con la batería, y si es posible, de un mismo fabricante. Hoy en día, los cargadores comerciales ferro resonantes tienen incorporados además de lo descrito, posibilidades de protección y monitoreo electrónico adicionales, por ejemplo, protección contra tensiones equivocadas, es decir, si la tensión de suministro o de carga no se corresponde con la tensión nominal de la batería el equipo no enciende, asimismo, protección contra sobrecarga o carga insuficiente mediante el monitoreo electrónico durante el régimen de carga final de las rampas de corriente y tensión ( $\delta V / \delta t$  y  $\delta I / \delta t$ ) de modo que la culminación del proceso de carga no depende de un temporizado sino que está determinada por los rampas de tensión y corriente. Sin embargo sus mayores virtudes están en su conformación simple y robusta y su diseño ajustado a determinada batería, logrando con un mínimo de mantenimiento desarrollar larga vida útil y pocas posibilidades de falla. Por tal motivo suelen contar con garantías de fábrica elevadas, por lo general de cuatro o cinco años.

### **3.5 Cargador Estático de estado Sólido**

Está diseñado para entregar una carga controlada a través dispositivos de potencia de estado sólido como tiristores, mosfet, transistores de potencia, etc.

Aunque, de momento, la mayoría de los equipos disponibles comercialmente, operan a través de SCR's, en versiones de suministro trifásico o monofásico. Principalmente, debido al buen comportamiento de tales dispositivos frente a elevadas corrientes estos equipos utilizan el método de carga de corriente constante, ejerciendo control y monitoreo de la tensión de carga, aunque también, los hay que se basan en el método de tensión constante. Están conformados por un transformador de tipo seco convencional normalmente delta –estrella cuando es trifásico con o sin taps de conexión en el primario, un puente rectificador de onda completa que puede estar compuesto exclusivamente de diodos de potencia en cuyo caso el control se realiza mediante un SCR conectado en serie con el circuito de la batería, o puede tener un puente rectificador de onda completa controlado conformado por diodos y tiristores de potencia. En sus versiones más modernas la duración del proceso de carga no se temporiza sino que se monitorea también la  $\delta V / \delta t$  y  $\delta I / \delta t$  y se da por finalizada la carga a valores predeterminados. Al igual que en el caso de los cargadores ferro resonantes deben de mantener un grado de independencia de la tensión de salida respecto a las fluctuaciones de la línea de alimentación, pero a diferencia de este lo hacen mediante un sistema de regulación que se realiza electrónicamente el cuál se considera apropiado cuando la tensión regulada en la salida es de  $\pm 1\%$  cuando la línea de suministro varía entre  $\pm 10\%$ . Son inherentemente más versátiles que los cargadores ferro resonantes en modo tal que pueden operar con una gama

más amplia de rangos, tipos, modelos o marcas de batería ya que sus regímenes inicial y final se pueden pre programar. Hoy en día suelen incluir las posibilidades de control que les permite la electrónica como incorporación de instrumentos digitales para la medición de las corrientes y tensiones de carga así como sistemas de autodiagnóstico de fallas, protección contra tensiones equivocadas, etc. En la figura 3.16 podemos ver el esquema de principio un tanto simplificado de uno de estos equipos fabricado por la compañía Yale industrial trucks. Al igual que en el caso anterior y a manera de aclaración vamos a describir brevemente a continuación la secuencia de operación de este equipo. Esta vez se trata de un típico cargador comercial estático de estado sólido para alimentación trifásica, correspondiente a la figura 3.16.

Los bornes de entrada trifásica L1, L2, y L3, se conectan a la línea de alimentación trifásica, en esta situación todos los elementos están desenergizados y el equipo queda en "stand by" hasta que se conecte la batería mediante el conector de carga.

La batería descargada se conecta al cargador, y el relay electrónico de tensión VR sensa la tensión de la batería comprendida entre 1.7 y 2.13 VDC/celda dependiendo del estado de la batería, y cierra el contacto VR1 energizando el temporizador S1 que espera unos 10 segundos y luego energiza la bobina del contactor LC permitiendo que cierren los contactos y la tensión de suministro llegue al transformador. ( En las versiones mas modernas, S1 es un retardador que puede ser pre-programado para iniciar la carga entre 5 segundos y varias



horas después de conectada la batería, para permitir, por ejemplo, que esta se enfríe o utilizar la energía eléctrica fuera de las horas punta). El transformador está conformado por un bobinado primario en conexión delta y un bobinado secundario en doble estrella que en conjunción con un arreglo de 6 diodos constituyen un puente rectificador hexafásico.

El circuito de disparo consiste de un diodo zener, un diodo en serie con un reóstato  $R_G$  y una resistencia  $R_B$ . Esta última, es una resistencia de carga, y permite al zener mantener una tensión constante ligeramente más elevada que la tensión en bornes de la batería, la diferencia entre la tensión del zener, la tensión de la batería y la calibración del potenciómetro determinan la corriente de compuerta del tiristor. Como sabemos, una batería descargada tiene un valor reducido de tensión en bornes por lo cual la tensión será suficientemente alta para disparar el tiristor.

Cuando el SCR conduce, la corriente de carga se constituye por la salida del rectificador de 6 fases, cada diodo y por consiguiente cada bobina del secundario conduce  $1/6$  de ciclo, despreciando los efectos de la conmutación.

La magnitud de la corriente de carga está determinada por  $(V_c - V_b) / Z$ . Donde  $V_c$  es la tensión suministrada por el cargador,  $V_b$  es la tensión en bornes de la batería y  $Z$  la impedancia total del circuito, la cual consiste principalmente de la reactancia del transformador además de alguna medida de resistencia de los cables de carga y la que presenta la propia batería.

Conforme la batería se carga su tensión en bornes se incrementa, reduciendo la diferencia de su tensión con la del cargador.

Cuando se llega al 80% de carga plena, La tensión en bornes de la batería alcanza el valor de aproximadamente 2.37VDC/celda por lo cuál el contacto VR1 cierra energizando el relay PR1 energizando el temporizador SI.

Cuando la tensión de la batería alcanza el valor de alrededor 2.43 VDC/celda la diferencia de tensión entre el Zener y la batería es suficiente como para que la corriente de compuerta esté por debajo del umbral de disparo, y como a su vez la corriente de conducción en el SCR es relativamente pequeña, El SCR conducirá intermitentemente por algunos minutos mas, luego de lo cual, pasará al estado de no conducción. Cuando esto ocurre las 3 bobinas del secundario conectadas al ánodo del SCR dejarán de contribuir a la corriente de carga quedando esta conformada únicamente por la contribución de las otras tres bobinas como se muestra en la figura 3.16 reduciéndose drásticamente la magnitud de la corriente de modo tal que el cargador quedara operando a régimen de carga final.

Luego de aproximadamente 3 horas de haber sido energizado el temporizador SI desconectará el contactor LC separando el primario del transformador de la línea de suministro de energía quedando concluido así el proceso de carga.

En el apéndice pueden verse las especificaciones y características que ofrecen, hoy en día, algunos de los más importantes fabricantes de cargadores estáticos d baterías de tracción de plomo ácido para aplicación vehicular.

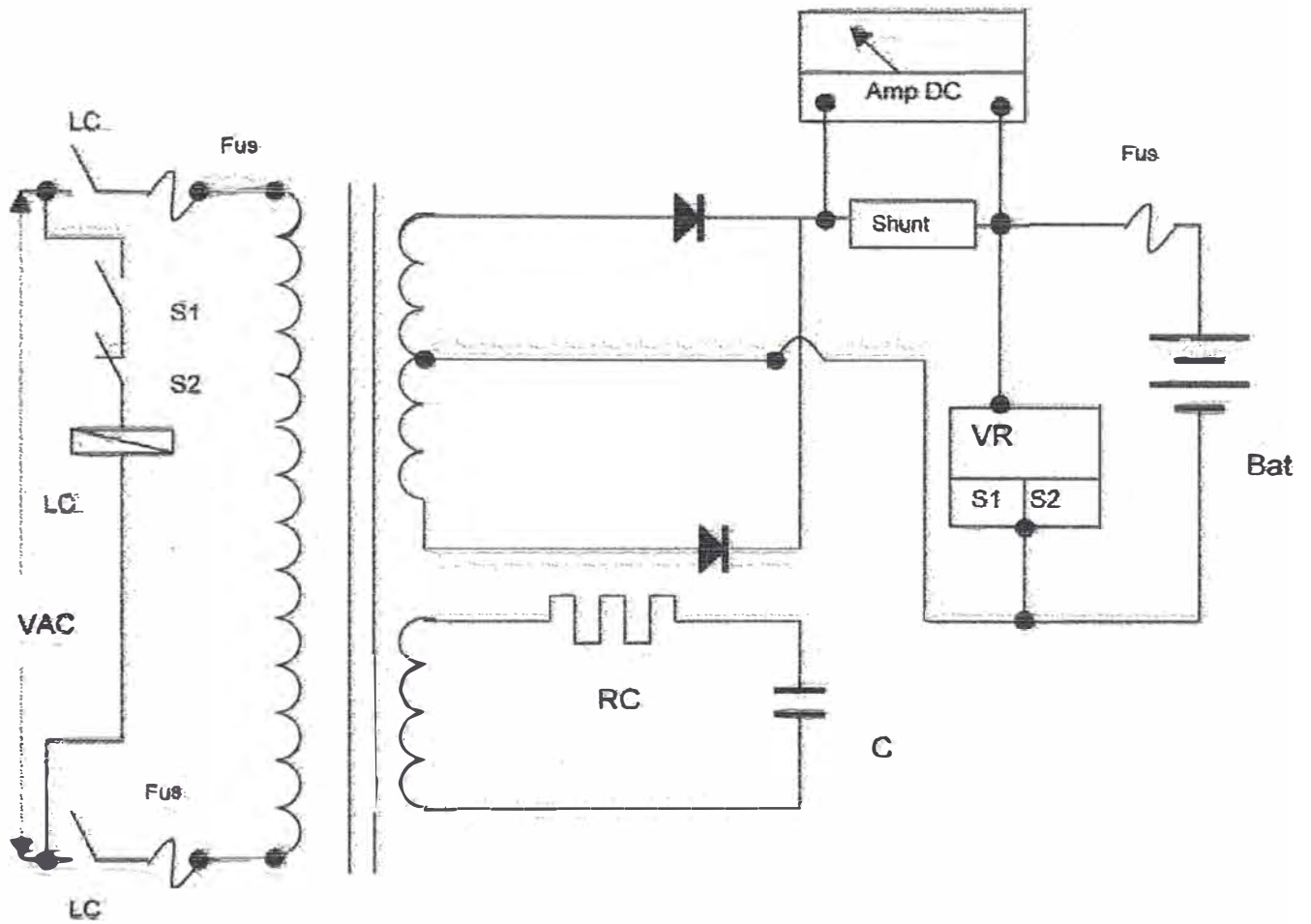


Figura 3.14  
Ejemplo de circuito de principio de cargador ferro resonante monofásico de uso comercial

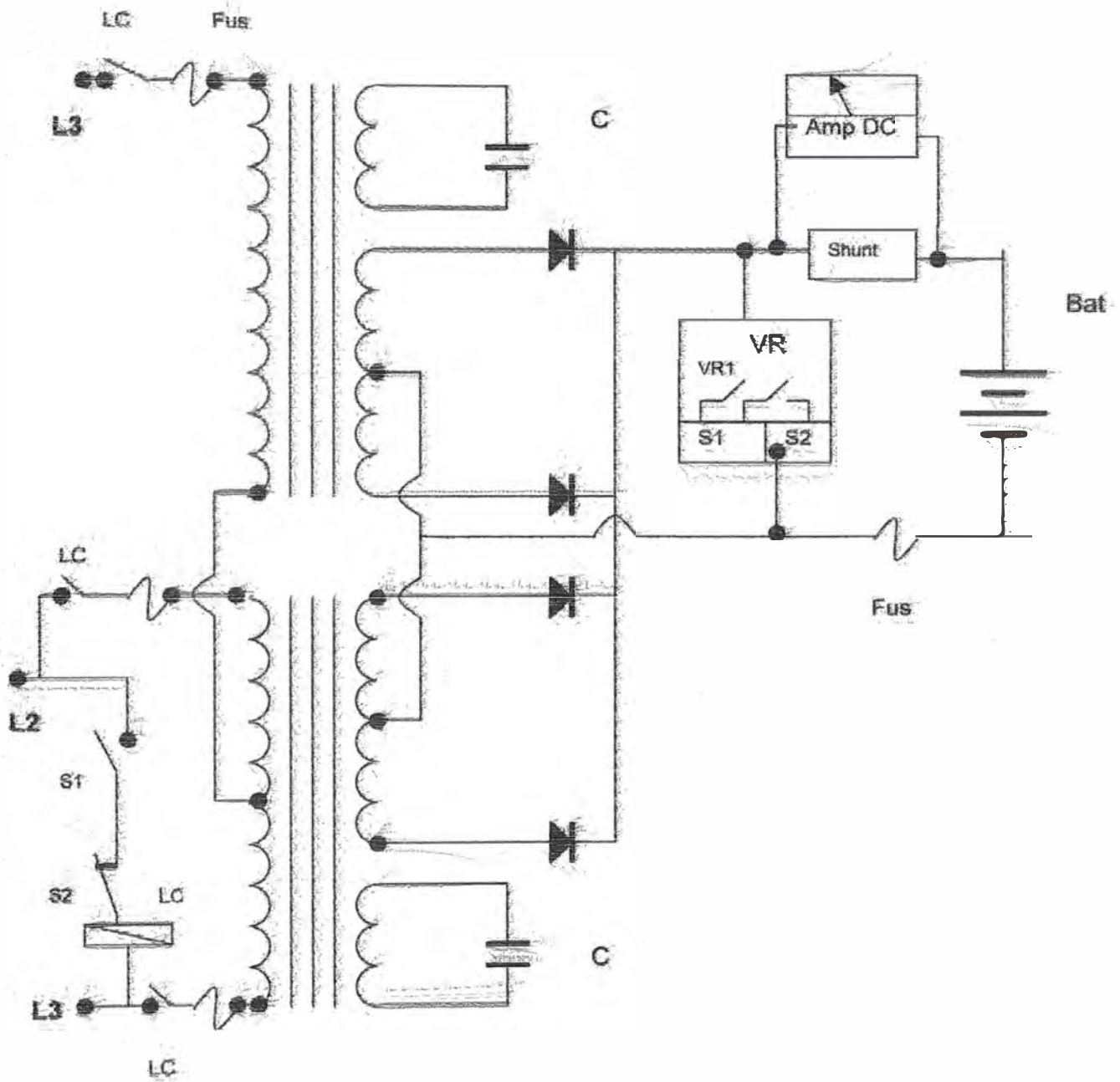


Figura 3.15  
Circuito de principio de cargador ferro resonante trifásico de tipo comercial

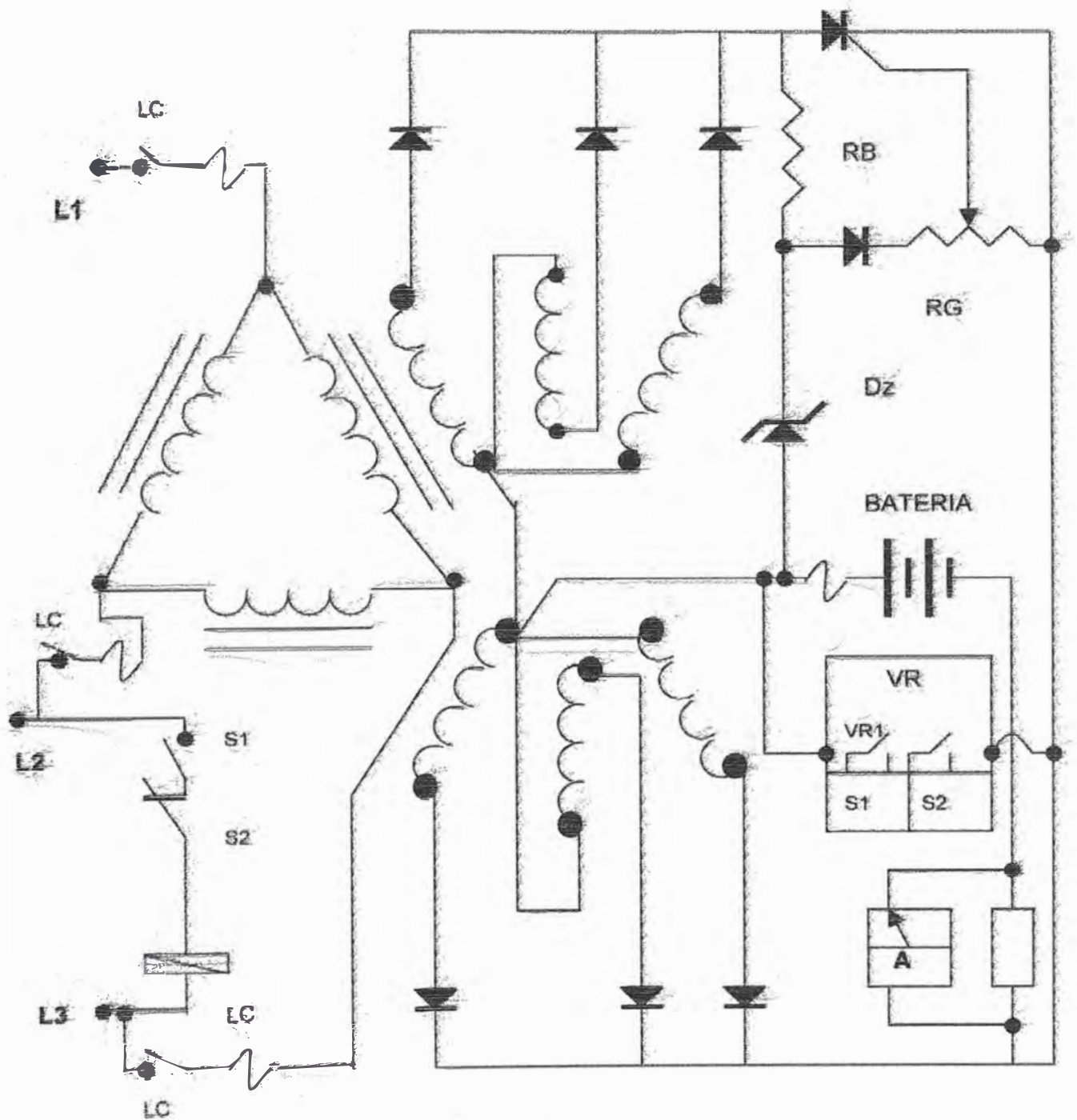


Figura 3.16  
Cargador de baterías de estado sólido con rectificador hexafásico

## **CAPITULO IV**

### **LOS EQUIPOS DE POTENCIA Y CONTROL**

#### **4.1 Alternativas de potencia y control**

En la actualidad, las tecnologías disponibles y los sistemas de potencia y control aplicados a vehículos eléctricos se presentan en una gama muy amplia y variada. La decisión de elegir entre alguno de ellos depende de las particularidades de cada aplicación, jugando roles muy importante los aspectos técnicos, económicos y la seguridad. De acuerdo al tipo de energía eléctrica con que operen los equipo de impulsión motriz, es bi stante claro que los sistemas pueden clasificarse en sistemas de corriente alterna y sistemas de corriente continua según sea el caso que se utilicen motores DC ó motores AC. Lo mismo ocurre desde el punto de vista de la fuente original de suministro de energía por ejemplo cuando esta corresponde a alimentación por medio de acumuladores eléctricos o cuando corresponde a la red de distribución comercial. Sin embargo cuando se habla de un sistema de corriente continua o un sistema de corriente alterna en general hay que ampliar la descripción al punto que quede claro lo que se está precisando. Por ejemplo un vehículo de corriente alterna podría ser impulsado a través de un inversor que convierta la

energía eléctrica continua de una batería en corriente alterna como es el caso de los modernos vehículos automotores híbridos diesel – eléctricos, En otros, como el caso de algunos diseños para ferrocarriles eléctricos de pasajeros la energía eléctrica es transportada por líneas de corriente alterna trifásica a alta tensión y convertida a continua y distribuida en una red de subestaciones distribuidoras en DC las cuales llevan la energía en corriente continua a las locomotoras a través de un tercer riel o una línea de suministro tendida con una trayectoria paralela al recorrido de los rieles. La energía se lleva al interior del tren mediante un sistema colector denominado trolley u otro de principio similar denominado pantógrafo, a tensiones que oscilan entre 600 y 2000VDC, (En locomotoras de carga de corto recorrido como por ejemplo las mineras de socavón se puede usar de 120 a 600VDC) utilizando uno de los rieles como polo negativo. Esta Tensión una vez al interior del tren es filtrada y suministrada a motores de tracción de corriente continua tipo serie, o mas recientemente de excitación independiente en cuyo caso la velocidad se controla mediante convertidores de estado sólido DC/DC a través de dos circuitos de control independientes, uno para la armadura, y otro para el bobinado de campo. También hay ferrocarriles cuya red de suministro es alterna monofásica ó bifásica con toma central a tensiones elevadas , usualmente entre 15 y 30KV, y hasta 60KV cuando se tiene toma central, luego es llevada así al interior del tren por medio de los sistemas colectores llamados pantógrafos, una vez allí es reducida a valores manejables mediante una subestación ubicada al interior

del tren y luego rectificada para suministrar energía a motores de tracción DC de bobinado serie o de excitación independiente , o como en los ferrocarriles más modernos vuelta a convertir en alterna pero ahora con salida trifásica por medio de un inversor para alimentar motores de tracción de inducción de tipo jaula de ardilla cuya velocidad es variada mediante el control de la frecuencia. La decisión de usar uno u otro sistema pasa entre otras cosas por un análisis técnico económico comparativo. Pero la tendencia última parece ser de fabricar, sobre todo en los grandes ferrocarriles de alta velocidad, sistemas con motores de tracción de AC de tipo jaula de ardilla. Aunque no es una regla, por lo general se usa AC para grandes recorridos y DC para trayectorias más bien cortas , Sí consideramos que en una red moderna de ferrocarriles de alta velocidad, la electrificación se viene realizando principalmente en corriente alterna monofásica. La línea está dividida en sectores eléctricamente independientes. Cada uno de estos toma energía de la red alterna trifásica de alta tensión a través de subestaciones de tracción, Siendo así, en caso de fallo de una subestación, la topología de la línea se modifica separándose la falla del resto de la red interconectándose la línea con los subsectores adyacentes. Desde el punto de vista de la transmisión de energía eléctrica para aplicaciones de tracción, Una línea en AC es mejor que una en DC, principalmente a causa de que puede llevarse a cabo la transmisión a niveles elevados de tensión (como ya dijimos entre 15 y 60KV, mientras que en continua se manejan valores de hasta 3KVDC) Además en DC se necesitan



mas frecuentes subestaciones alimentadoras, la relación suele ser de 8 a 1 aunque esta relación puede variar ampliamente de acuerdo a cada caso, Se ve claramente que para grandes distancias y elevadas potencias la tendencia a usar sistemas completamente en AC está plenamente justificado, Sin embargo para potencias y distancias medianas y pequeñas, aún donde hay suministros en AC , se sigue utilizando motores y controles en DC. Finalmente serán los estudios comparativos los instrumentos que definan la tecnología a aplicar en cada caso particular. Pero son los aspectos arriba referidos, entre otros que mencionamos más adelante, los que determinan la disponibilidad comercial de los equipos para potencias y distancias similares a la aplicación que nos ocupa. En el caso de vehículos eléctricos autopropulsados de pequeña potencia (usualmente de entre 1 a 30 HP ) como por ejemplo las locomotoras mineras de arrastre y montacargas, la gran mayoría de fabricantes utiliza todavía motores serie de corriente continua . Esto se debe, aparte de sus buenas características de torque, a los resultados satisfactorios, a la antigua y sólida experiencia que se ha desarrollado en la aplicación de estas máquinas, y a que la tecnología de variadores de frecuencia es relativamente nueva en aplicaciones de tracción. Podemos agregar también que en los pequeños recorridos, no se justifica la instalación de redes de alta tensión, ni más de una subestación. De modo que las marcadas ventajas mencionadas anteriormente del uso de equipos en AC respecto a los que operan con DC, no resultan del todo claras, sumando a esto la simpleza de los controles en DC y

la posibilidad de trabajar con estos mismos controles con acumuladores, y consecuentemente no necesitar tendido de líneas. Por otro lado, desde el punto de vista comercial, el número vehículos sobre rieles considerados como unidades vendidas, es relativamente pequeña comparada con otros sectores industriales donde se aplican controles de estado sólido, Esto explicaría por que el nivel de la inversión de capital en desarrollo de investigación sea relativamente bajo, y esto hace que los cambios sean lentos, o por lo menos que no sean radicales, de modo que el énfasis del desarrollo de los sistemas de control en este sector parece estar más en el mejoramiento de los equipos ya existentes, por ejemplo , mediante la utilización, en los nuevos modelos, de microprocesadores y microcontroladores para mejorar las opciones de los sistemas de autodiagnóstico y protocolos de comunicación con equipos accesorios, pero los sistemas de control son para motores de corriente continua y básicamente siguen siendo los mismos, aún teniendo en cuenta la utilización de tiristores GTO (de sus siglas en inglés "gate turn off) , FET ó Mosfet de potencia. Estas razones, en realidad, no derivan de una simple especulación. Respecto a este tema, por ejemplo, las publicaciones de la "Research Results Digest" de Noviembre del año 2001, del programa de investigación cooperativa de asuntos de tránsito de los E.E.U.U. organización patrocinada por Administración de transito Federal consideran como uno de los principales inconvenientes del desarrollo y estandarización de la industria de transito sobre rieles en general, a el bajo nivel de unidades vendidas, es decir el

bajo nivel de producción, para tener una idea en 1,999 en E.E.U.U. se vendieron casi 9'000,000 de unidades automotores de pasajeros, y 8.7 millones de camiones contra aproximadamente alrededor de 500 vehículos sobre rieles incluyendo aquí coches de transporte rápido, ligero, y grandes vehículo de transporte sobre rieles de alta velocidad. Y esto a pesar de que la industria de vehículos sobre rieles representa volúmenes de venta de alrededor de 1 billón de dólares al año. Es decir, pequeños volúmenes de producción, y elevados costos por unidad. Por lo tanto los prototipos suelen ser muy costosos. Atendiendo a lo expuesto, de algún modo se podría explicar la razón por la cuál en el mercado actual , y en aplicaciones como la presente, La utilización de motores de tracción en corriente continua con controles de estado sólido y aún con controles de resistencias y electromecánicos, sigue siendo más difundida, y aplicada, que posibles opciones equivalentes en AC. Por lo tanto el acceso comercial a la información y disponibilidad de los equipos sigue siendo mas sencilla que con las tecnologías alternativas de control de motores AC, las cuales, por otro lado, por ejemplo en la aplicación industrial, han prácticamente desplazado a los controles y motores de corriente continua

Los vehículos locomotores de tracción de pequeñas potencias pueden ser alimentados desde una línea de suministro en DC a través de un sistema colector de energía llamado trolley o desde un banco de baterías instalado en el mismo vehículo Inclusive, como podemos ver en algunas locomotoras mineras, se puede utilizar una combinación mixta de ambos sistemas, es

decir, acumuladores y trolley trabajando en forma alternada. Este sistema se usa para no tener que transportar un banco de acumuladores demasiado pesado. En el sistema mixto, la batería suministra energía durante las trayectorias en línea recta a velocidad constante, mientras que la energía para la aceleración se toma de la energía comercial que ha sido rectificada en una subestación rectificadora y transportada al vehículo desde un cable tendido a lo largo de la trayectoria o desde un tercer riel. La utilización de Inversores electrónicos de estado sólido en vehículos eléctricos autopropulsados que se alimenten a través de acumuladores eléctricos y conviertan la tensión continua en alterna es usual en los sistemas auxiliares de emergencia y de iluminación, pero es muy raro encontrarlos, al menos disponibles comercialmente, aplicados a los motores de tracción, salvo en los vehículos automotores híbridos denominados así por que utilizan motores de explosión para impulsan el sistema de tracción durante la marcha a velocidad constante y motores de jaula de ardilla alimentados desde una batería a través de un inversor para la tracción durante las aceleraciones donde suelen desarrollar potencias elevadas en cortos períodos de tiempo (por ejemplo 25Kw durante 15 segundos). La fabricación de inversores alimentados con acumuladores eléctricos aplicables a la tracción de por ejemplo locomotoras mineras y montacargas es todavía muy limitada y se suele restringir a modelos experimentales no comerciales. Algunos fabricantes sobretodo de controles de velocidad para grúas eléctricas o maquinas tractoras, incluyen en sus catálogos algunos modelos de

inversores alimentados con bateras de tracción de plomo ácido pero a una escala comercial todavía muy pequeña. En general, para casos similares al que nos ocupa, aunque están apareciendo en el mercado equipos impulsados con motores DC de bobinado independiente o inclusive shunt controlados por dispositivos de estado sólido la regla sigue siendo la utilización de motores de corriente continua de bobinado serie.

## **4.2 Motores de tracción en DC**

La literatura disponible sobre teorías de funcionamiento y construcción de motores eléctricos en DC es mucha y muy abundante, razón la cuál no queremos ahondar aquí en detalles que serían redundantes. Sino mas bien exponer principios básicos que son comunes a todos los motores de corriente continua y las mas resaltantes características de operación.

Las partes principales que conforman un motor DC son las siguientes:

- **Estructura de campo.**

Es el núcleo de acero magnético destinado a dar un camino de adecuada permeabilidad al flujo magnético, básicamente consiste de el yugo, los polos, las cara polares y algunas veces los interpolos. En algunos casos esta constituido por planchas de acero laminadas en otras el yugo es de acero sólido, debido a que los devanado de campo llevan corriente continúa no es eléctricamente necesario tener yugos laminados, los polos se construyen de acero laminado para facilitar su montaje. Solo

las caras polares por su proximidad a los devanados de armadura se construyen siempre de acero laminado, y van empernadas al yugo sólido

- Las bobinas de campo.
- La armadura

Es el elemento rotante el cual consiste de un núcleo de acero magnético laminado cuyo propósito es proveer un camino al flujo y llevar el bobinado de armadura para lo cual presenta un ranurado en donde se encajan en forma paralela los lados de bobina.

- Escobillas y conmutador.

Son elementos necesarios para llevar la corriente a la armadura. El conmutador está hecho de delgas de cobre estirado en frío y aisladas entre sí mediante una mica. Las escobillas son de carbón y sirven como terminales de conexión eléctrica. Las escobillas son seleccionadas para un diseño particular después de exhaustivas pruebas que por lo general duplican tan cercanamente como se pueda las condiciones reales de servicio por lo cual cuando se requiera su reemplazo es preferible obtener el repuesto original. Las escobillas de carbón se fabrican en gran número de grados que van de carbón duro de propiedades abrasivas hasta el grafito muy blando que tiene propiedades lubricantes. Las escobillas muy blandas tienen relativamente pocas partículas duras que sirvan de material conductor por lo cual la tendencia es a tener corrientes desigualmente distribuidas y por lo tanto las corrientes locales

generan temperaturas locales elevadas . Las escobillas duras tienden a distribuir mejor la corriente en la superficie por lo tanto cuanto mayor sea la densidad de corriente en la escobilla mayor será la dureza necesaria. Normalmente el oxígeno y la humedad del aire contribuyen a la formación en la superficie del colector de una delgada película compuesta de óxido de cobre y una delgada película cobertora de grafito. La experiencia ha demostrado que esta película tiene un efecto útil en la conmutación entre otras cosas por sus propiedades lubricantes. A altitudes mayores a los 1000 msnm el escaso contenido de oxígeno y vapor de agua reducen este efecto lubricante por lo cual el desgaste de la escobilla es mucho mayor, en tal sentido a grandes altitudes el excesivo desgaste se supera utilizando escobillas especiales impregnadas en ingredientes apropiados como por ejemplo Yoduro de plomo. Además de lo dicho, hay que indicar que en los motores de tracción es usual que los carbones tengan incorporados sensores de temperatura y de desgaste excesivo, de modo que, a través de los circuitos de control y protección pueda inhibirse la operación de motor en condiciones peligrosas y posibilitar que el defecto sea corregido.

- **Polos de conmutación**

También denominados interpolos, son pequeños polos auxiliares ubicados a mitad de camino entre dos polos principales y conectados en

serie con la armadura, el propósito de su utilización es mejorar la conmutación.

Los motores en DC de acuerdo al arreglo de sus devanados para la excitación del campo pueden construirse de los cuatro siguientes tipos: serie, shunt, compound y motor de excitación independiente, Además tenemos el motor de imanes permanentes que tiene devanado de armadura pero no devanado de campo, sino que este mas bien está constituido por magnetos.

- **Motor serie**

Es un motor que tiene los devanados de campo y armadura conectados en un circuito serie, este tipo de motor normalmente impulsa cargas que requieren alto torque, y una no muy precisa regulación de velocidad. Estas maquinas son ideales para aplicaciones de tracción que requieren acelerar cargas de alta inercia como por ejemplo, locomotoras, polipastos y grúas eléctricas, winches, arrancadores de automóviles, etc. El torque de arranque desarrollado por estos motores está entre el 300 y 375% de plena carga, pero puede ser de hasta 800% del torque nominal. Los incrementos de carga resultan en incrementos de las corrientes de campo y de armadura como resultado de esto el torque se incrementa con el cuadrado del incremento de la corriente.

La regulación de la velocidad es inherentemente menos precisa que por ejemplo la regulación en un motor shunt. Si la carga disminuye, la corriente que fluye a través de los devanados de campo y de armadura



también decrece, esto implica una elevación de la velocidad en proporciones mayores de lo que ocurre en el motor shunt. Si se remueve la carga mecánica del eje de un motor serie, tendremos como consecuencia un crecimiento indefinido de la velocidad del motor que puede terminar destruyendo los rodamientos. Generalmente, los motores serie pequeños suelen tener suficiente fricción interna para evitar que la velocidad llegue en estos casos a niveles destructivos pero los motores más grandes requieren equipos de protección externa para evitar esa posibilidad.

- **Motor shunt**

El motor shunt tiene el devanado de campo en paralelo con la armadura, esto origina que la corriente de campo sea independiente de la corriente de armadura, lo cual provee al motor la posibilidad de un excelente control de la velocidad. Los motores shunt proveen corrientes de arranque moderado que oscila entre el 125% y 200% del torque de plena carga, pero estos motores son capaces de proporcionar 300% de torque de plena carga en periodos cortos de tiempo. Algunas aplicaciones incluyen ventiladores, bombas centrífugas, elevadores, herramientas, etc.

- **Motor compound**

Emplea ambos tipos de bobinado de campo, es decir, tiene un bobinado en serie y un bobinado en paralelo con la armadura, su funcionamiento

tiene un perfil intermedio entre los motores shunt y serie con un relativamente alto torque de arranque y una suave regulación de la velocidad. Pero presenta como ventaja respecto al motor serie una inherentemente controlada velocidad de vacío. Lo cual hace a esta máquina mas segura en aplicaciones de por ejemplo grúas donde se puede perder la carga abruptamente.

- **Motor de excitación independiente**

Estos motores no tienen una conexión eléctrica entre los devanados de campo y de armadura sino que la corriente de campo proviene de una fuente de corriente externa. Su uso es muy popular como generador. Como motor su funcionamiento es muy parecido al motor shunt siempre y cuando el devanado de campo se halle conectado a una fuente de tensión constante

- **Motor de imanes permanentes.**

Como ya mencionamos líneas arriba, estos motores tienen un devanado de armadura convencional pero no presentan devanado de campo, sino que el campo está constituido por magnetos.

Este motor es adecuado cuando el tiempo de respuesta es un factor importante. Sus características de velocidad son similares a las producidas por los motores shunt. La corriente continua es suministrada únicamente a la armadura. Y desde que el campo permanece invariable todo el tiempo, su curva torque versus velocidad es lineal.

Los motores de imanes permanentes no son caros de operar teniendo en cuenta que no requieren suministro de energía para el campo, sin embargo los polos suelen, con el tiempo, perder sus propiedades magnéticas. Esto redundaría en una reducción del torque. Algunos modelos tienen bobinados en los polos destinados a re-magnetizarlos cuando este efecto tenga lugar.

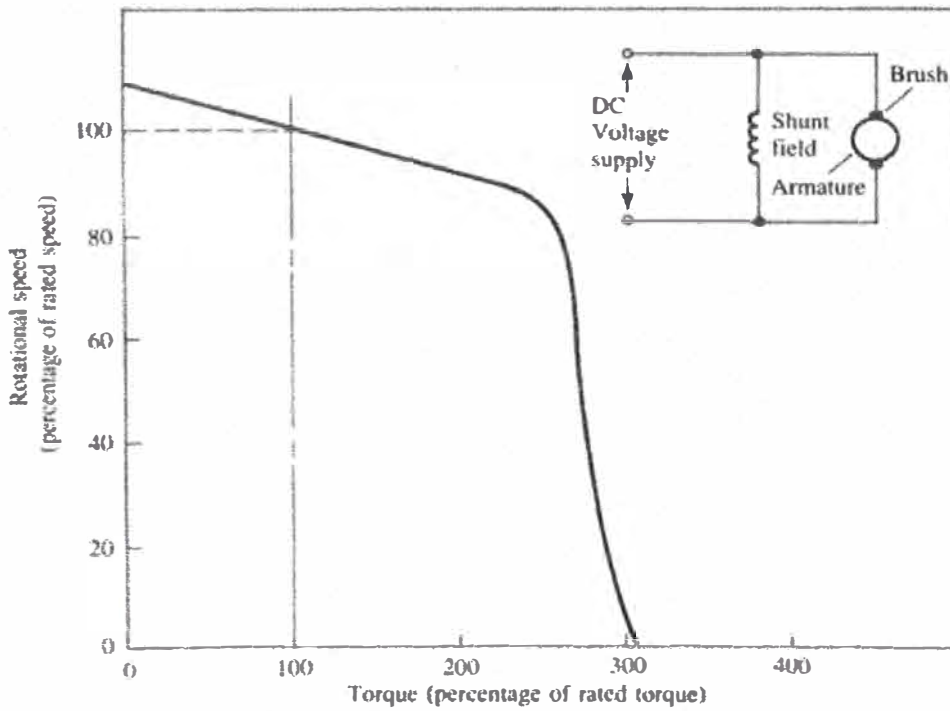
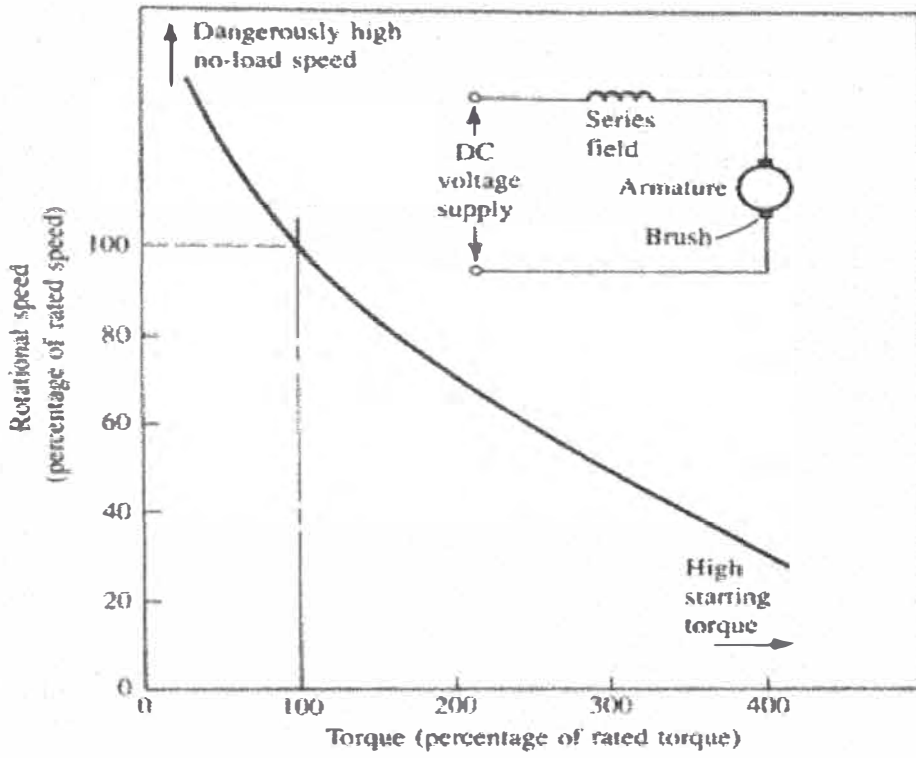
El uso de los motores de este tipo está bastante difundido por ejemplo en la industria automotriz, los motores que movilizan los parabrisas, ventanas y otros son de imanes permanentes.

En los montacargas eléctricos se encuentran motores de imanes permanentes generalmente como impulsores de la bomba de dirección y en algunos casos en la bomba hidráulica. En estas aplicaciones el suministro de energía suele producirse a través de un acumulador, por lo que las tensiones nominales son por lo general de 12, 24, 36, ó 48 VDC.

La capacidad de los motores de imanes permanentes para producir altos torques a baja velocidad y su capacidad de auto frenado cuando se desconecta de la fuente de suministro de energía son sus principales ventajas.

La principal desventaja de los motores de imanes permanentes es que no toleran muy bien el trabajo continuo, y esto por la sencilla razón de que las altas temperaturas destruyen rápidamente las virtudes magnéticas de los polos.

En las figuras 4.1 y 4.2 se pueden ver las características torque velocidad de los motores descritos.



**Figura 4.1**  
**Características par velocidad de motor serie y motor shunt**

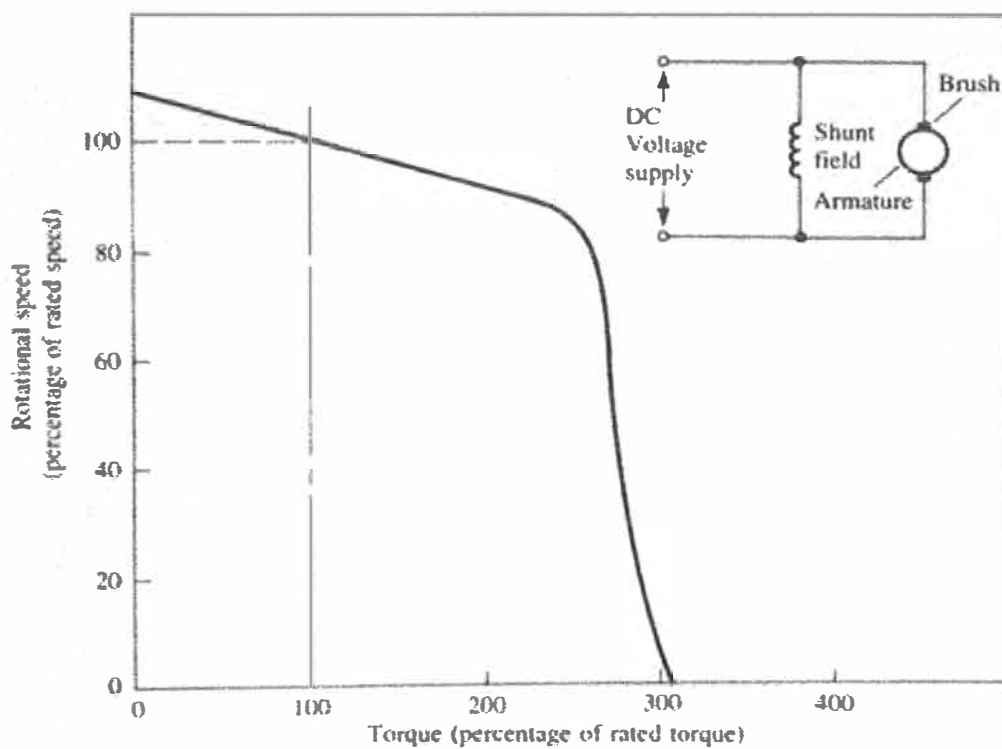
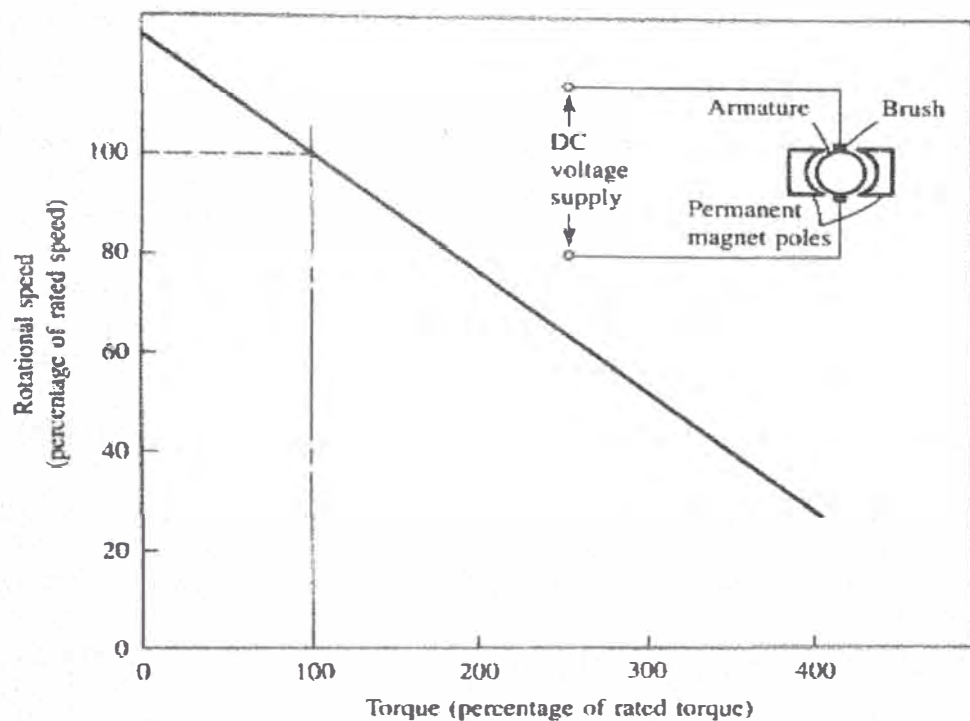


Figura 4.2

Característica Par-Velocidad de motor compound y de imán permanente

### 4.3 Principios básicos de operación

En la figura 4.3 representamos esquemáticamente un motor DC mostrando el devanado de armadura junto a las escobillas y el conmutador donde la corriente fluye en una misma dirección en todos los conductores en un lado de la armadura (entrando perpendicular al plano del diagrama) y en los conductores del otro lado de la armadura, la Corriente fluye en la dirección opuesta (saliendo perpendicular desde el plano del diagrama). El devanado de campo crea un flujo tal como se muestra en el esquema cuya dirección es perpendicular al flujo de la corriente en el devanado de armadura estableciéndose en tal razón una fuerza mecánica que actuará sobre dichos conductores, cuya dirección será ortogonal a la dirección del campo y del flujo de corriente y cuyo sentido será determinado por la regla de la mano derecha de modo que se desarrollara un torque en la armadura que la hará girar en este caso en el sentido de las agujas del reloj. Como consecuencia de la rotación, los conductores de la armadura, que a su vez transportan la corriente de armadura, cortan las líneas de fuerza del campo creándose tensiones inducidas en dichos conductores. De modo que se establecerá una fuerza contraelectromotriz que de acuerdo a la regla de la mano derecha (regla de Fleming) tendrá sentido opuesto al flujo de la corriente.

En cualquier tipo de motor de corriente continua, la rotación de la armadura induce tensión en los conductores de dicha armadura, cuyo sentido es opuesto al sentido del flujo de la corriente que causa dicha rotación. En tal razón la

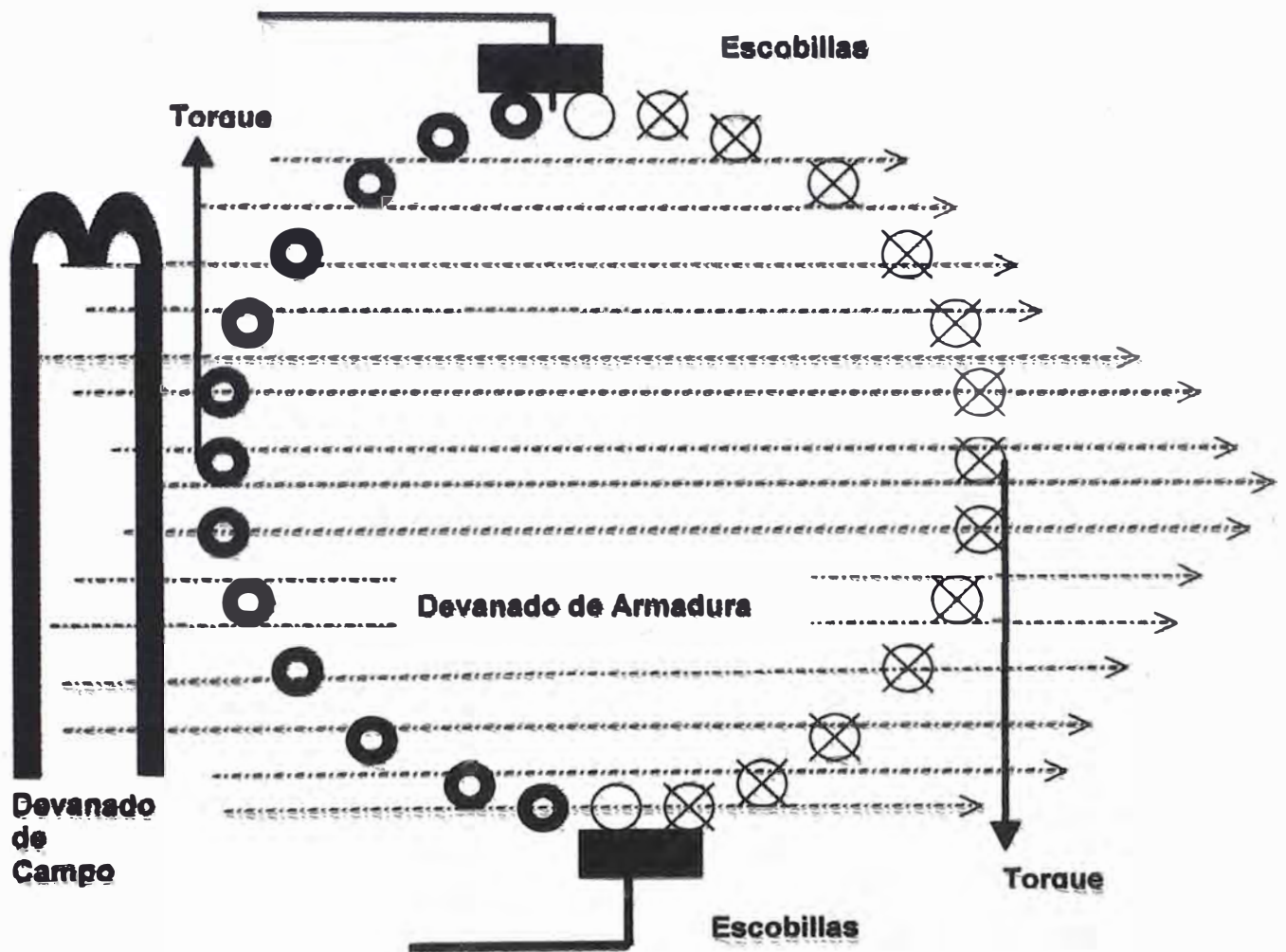


Figura 4.3  
Esquema simplificado de un motor DC

tensión inducida se opone a la tensión aplicada por eso se le denomina fuerza **contraelectromotriz**.

Si consideramos que el conductor gira a  $n$  rpm en un campo de  $p$  polos con un flujo  $\phi$  por polo, el flujo total cortado por el conductor en  $n$  revoluciones será

$p\phi n$  por lo tanto el flujo cortado por segundo proporcionado por la tensión inducida  $\mathcal{E}$  expresada en voltios será la siguiente:

$$\mathcal{E} = \frac{p\phi n}{60} \quad (4.1)$$

Para un total de  $Z$  conductores conectados en " $a$ " trayectorias en paralelo, el número efectivo de conductores en paralelo  $Z/a$ , inducirán una tensión total de  $E$  voltios en el devanado de armadura, por lo tanto la fuerza contraelectromotriz en el devanado de armadura se expresa:

$$E = \frac{Z p \phi n}{60a} \quad (4.2)$$

Si expresamos  $n$  en función de la velocidad angular  $\omega$  en radianes /segundo.

$$E = \frac{Z p \phi \omega}{2\pi a} \quad (4.3)$$

Donde  $\omega$  expresada en radianes por segundo:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad (4.4)$$

Si denominamos como una constante:

$$K_a = \frac{Z p}{2\pi a} \quad (4.5)$$

y además consideramos el circuito magnético lineal, es decir que el motor no está operando con su paquete magnético en la zona de saturación, podemos decir que el flujo es proporcional a la corriente de campo  $I_c$  y expresarlo como

$$\phi = K_c I_c \quad (4.6)$$



La ecuación (4.3) quedará expresada :

$$E = K_a K_c I_c \omega \quad (4.7)$$

De donde observamos que la tensión inducida es proporcional al flujo magnético o corriente de campo y a la velocidad de rotación.

Rescribiendo (4.7)

$$E = K_a \phi \omega \quad (4.8)$$

Vemos que la velocidad puede ser determinada desde la fuerza magnetomotriz y el flujo.

La potencia de acuerdo a la ecuación (1.4):

$$P = T \omega$$

Donde:

$T \Leftrightarrow$  Par electromecánico

$\omega \Leftrightarrow$  Velocidad angular en la armadura

En el devanado de armadura tendremos circulando la corriente de armadura  $I_a$  con una tensión inducida en sus bornes  $E$ . La potencia en la armadura será:  $E I_a$ ; entonces despreciando las pérdidas podemos hacer:

$$T \omega = E I_a \quad (4.9)$$

De (4.8) obtenemos la ecuación de torque expresada como

$$T = K_a \phi I_a \quad (4.10)$$

También:

$$T = K_a K_c I_c I_a \quad (4.11)$$

Por lo que vemos que el torque es proporcional al flujo y a la corriente de armadura.

La corriente de armadura, por ejemplo para una conexión serie con una tensión aplicada  $V$ , considerando la caída de tensión en la armadura  $I_a R$ :

$$E = V - I_a R \quad (4.12)$$

Despejando tendremos la corriente de armadura  $I_a$ :

$$I_a = \frac{(V - E)}{R}$$

De (4.7) la velocidad angular en radianes por segundo se puede expresar:

$$\omega = \frac{(V - I_a)}{K_a K_c I_c} \quad (4.13)$$

Si bien las ecuaciones arriba descritas se han determinado para valores instantáneos, también se aplican para el estado estable.

Un efecto que se produce en los motores de corriente continua merece ser mencionado aquí y es el conocido como reacción de armadura. Este efecto actúa sobre la distribución de flujo magnético del entrehierro entre los polos y la armadura y es producido por la corriente de armadura. Si volvemos a la figura 4.3 y observamos el sentido de las corrientes que circulan en los conductores de la armadura vemos que producirán un campo magnético a lo largo del eje que contiene a las escobillas defasado  $90^\circ$  respecto a la dirección del flujo producido por el bobinado de campo. Esto es lo que se conoce como reacción de armadura y tiene como resultado el desplazamiento del eje magnético principal girando en sentido contrario a la rotación de la armadura ya

que ahora el campo magnético es el resultante de la suma de dos campos magnéticos perpendiculares entre sí. Si denominamos eje "geométrico neutro" al eje que contiene las escobillas, y eje "magnético neutro" al eje por donde la resultante del eje principal no puede producir inducción por ser paralelo al plano que contiene a la superficie de la bobina. En vacío la corriente de armadura es pequeña y el flujo de armadura despreciable el eje magnético neutro y el eje geométrico neutro son prácticamente coincidentes. Como efecto de la reacción de armadura es mover el eje magnético neutro girándolo en la dirección opuesta a la rotación de la armadura, durante la carga el flujo magnético por reacción de armadura se incrementará conforme se incrementa la corriente entonces obviamente el ángulo de desplazamiento depende de la corriente de armadura o la carga (ver figura 4.4). La reacción de armadura tiene al menos dos efectos indeseables: uno es distorsionar la forma del campo principal debilitándolo en el proceso y el otro es causar tensiones inducidas en bobinas que están bajo conmutación con lo cual se incrementa la tendencia a formar arcos en las escobillas. Donde la máquina debe operar con características similares de velocidad en cualquier sentido de giro es usual establecer las escobillas sobre el eje magnético neutro, pero si la máquina es unidireccional la posición de las escobillas puede ser ajustada desplazándolas, si la construcción lo permite, contra rotación. Si la posición del portaescobillas no es modificable, el efecto de desplazamiento de escobillas puede ser obtenido desplazando las conexiones de las bobinas a el conmutador, pero este

procedimiento es aplicable solo si se conoce el sentido de giro antes de hacer las conexiones.

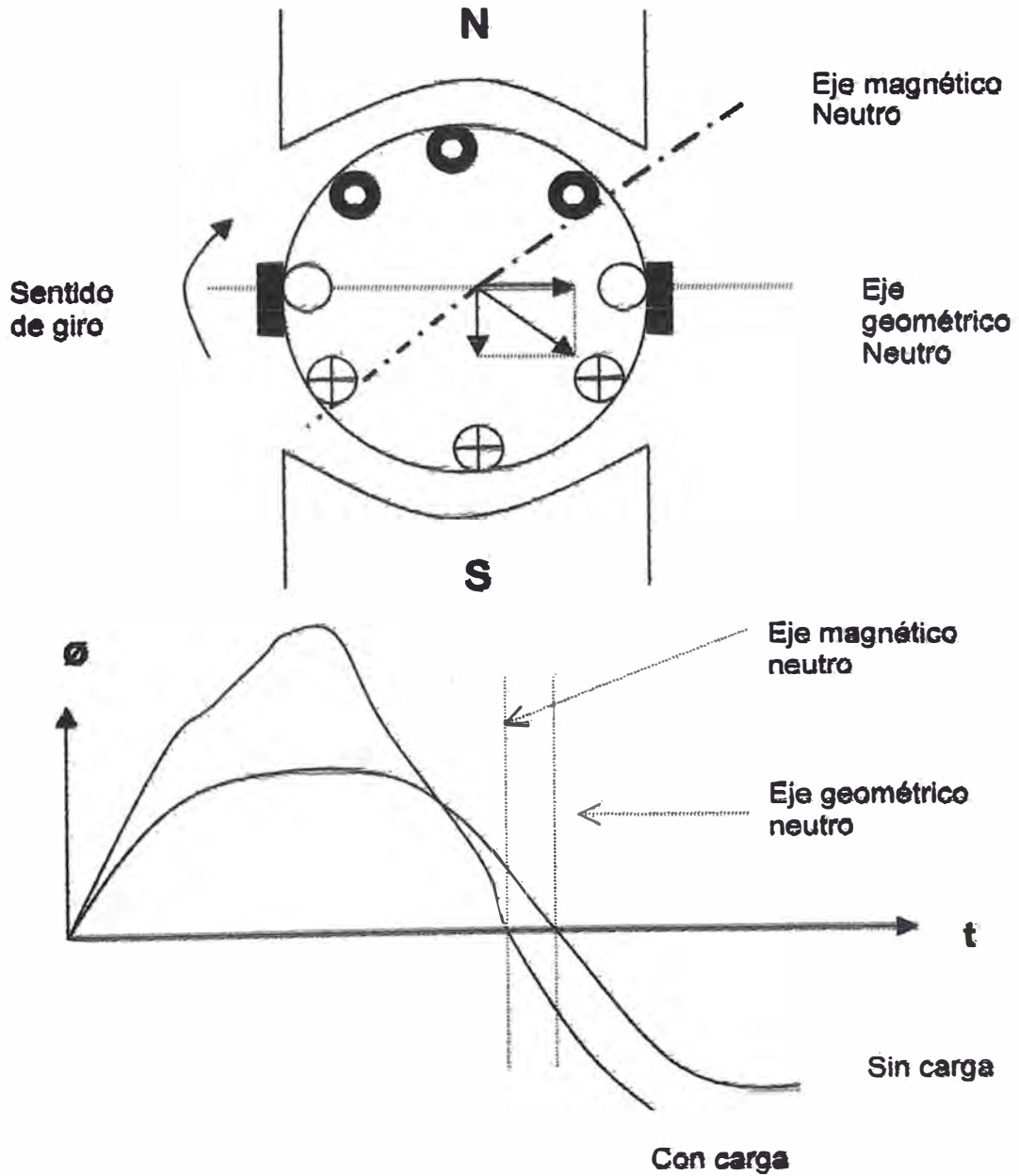


Figura 4.4  
Efecto de la reacción de armadura

Los efectos de la reacción de armadura también puede ser superados con el uso de polos de compensación. Estos polos auxiliares son fijados al yugo magnético frecuentemente en medio de dos polos principales consecutivos, por lo cual se les denomina también "interpolos". En un motor, el devanado de estos polos auxiliares debe ser hecho en modo tal que cualquier conductor de la armadura que pase bajo un determinado polo principal y luego pase por un interpolo debe encontrar que este es de la misma polaridad del polo principal. En el caso de un generador en cambio, el bobinado de los interpolos debe ser tal que cualquier conductor de la armadura que pase bajo un determinado polo principal y luego por un interpolo debe encontrar que este sea de polaridad contraria. De manera que si un motor va a ser convertido en un generador, o viceversa, un generador en un motor, manteniéndose el mismo sentido de rotación, es necesario primero cambiar las conexiones de las bobinas de los interpolos.

Los devanados auxiliares también reducen los efectos de arco durante la conmutación por que suprimen el efecto de autoinducción que se produce durante la conmutación en las bobinas que al paso de las escobillas invierten completamente el sentido de flujo de la corriente en un pequeñísimo intervalo de tiempo induciéndose en ellas tensiones relativamente elevadas que se oponen al crecimiento de la corriente. Dicho de otro modo, como una muy alta inversión de corriente debe llevarse a cabo para completar el ciclo de conmutación, una fuerza contraelectromotriz se establecerá por autoinducción

oponiéndose a la inversión de la corriente, Esta Tensión inducida producirá daños en las escobillas y el conmutador a no ser que sea compensada mediante los devanados auxiliares.

Vale la pena mencionar, que los motores de corriente continua adecuados para trabajar con fuentes de energía convencionales como por ejemplo un generador de corriente continua o un acumulador eléctrico pueden no serlo para trabajar con fuentes de energía controlada por componentes de estado sólido como por ejemplo un puente rectificador. Los efectos nocivos que producen suministros de este tipo pueden ser principalmente:

- Efectos sobre las pérdidas por efecto Joule  $I^2R$

Conociendo que la corriente promedio  $I_{av}$  es la responsable del torque y la corriente cuadrática media  $I_{rms}$  la principal productora de calor, podemos deducir que las pérdidas  $I^2R$  se incrementan a medida que la fuente de suministro aumenta la razón entre ambas corrientes según la relación  $(I_{rms} / I_{av})^2$  La cuál se denomina cuadrado del factor de forma. Este valor puede ser realmente considerable por ejemplo en la Tabla 4.1 vemos que el factor de forma de un puente rectificador monofásico es 1,111, las pérdidas se incrementarán entonces en un factor  $1.111^2 = 1.23$ . Con un rectificador controlado el asunto es mucho peor, por ejemplo, para un ángulo de disparo de  $60^\circ$  el factor de forma es 1.328 por lo tanto las pérdidas se incrementarán en un factor  $1.328^2 = 1.764$ .

Un filtro apropiado puede reducir el incremento de ~~estas~~ pérdidas pero no lo podrá eliminar.

- **Efectos en la conmutación**

El campo magnético principal se acopla inductivamente con las bobinas sometidas a conmutación, de manera que si el referido campo es pulsante como consecuencia de estar determinado por una tensión pulsante, aparecerán tensiones inducidas adicionales en las bobinas bajo conmutación por lo cual se incrementará el efecto de arco en el conmutador.

- **Corrientes parásitas**

La pulsación en el campo magnético principal producirá corrientes parásitas en el núcleo además de corrientes circulantes en los cojinetes

En razón de lo expuesto al adquirir un motor de corriente continua para una determinada aplicación, hay que asegurarse que su diseño es adecuado al tipo de suministro eléctrico con el cuál debe trabajar. Generalmente, el factor de forma figura entre los datos de placa, y las características nominales de operación tales como: la tensión de armadura, la tensión de campo, corriente nominal, potencia nominal están basadas en tal factor.

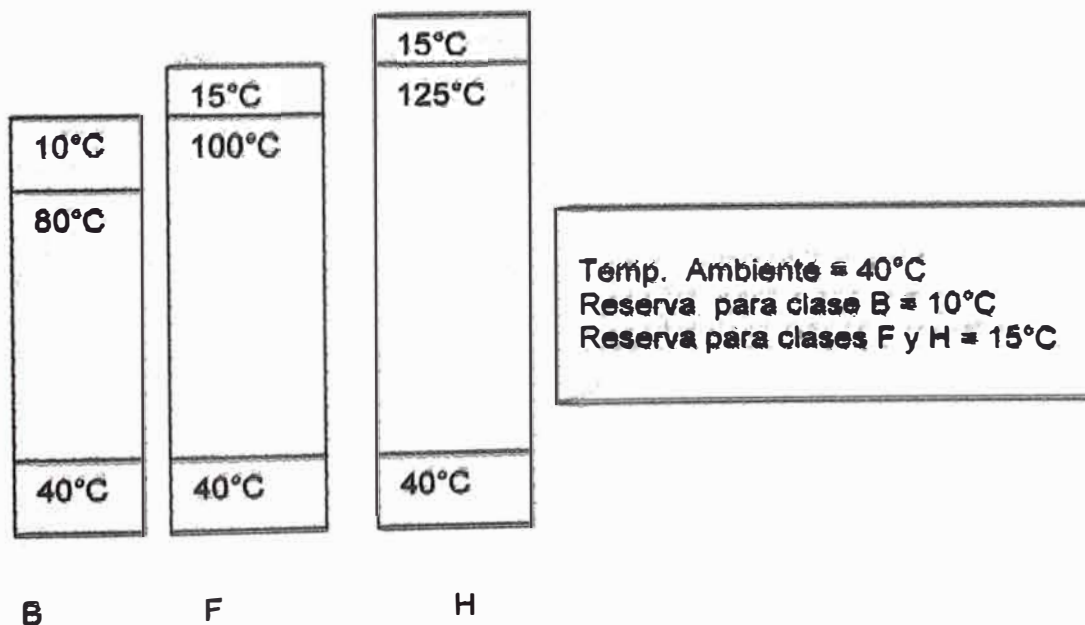
El principal factor que limita la potencia nominal de un motor es la temperatura. Si el motor se calienta demasiado, el aislamiento se deteriora y por lo tanto se acorta la vida útil del motor o en el peor de los caso se puede producir fallas a

tierra o cortocircuitos. Las mas altas temperaturas se logran superar hoy en día mejorando la clase de aislamiento (ver figura 4.5 ). El aislamiento de mejor performance es el de clase H que soporta una temperatura de 180°C sin embargo un motor los valores de régimen de un motor, llámese corrientes de operación o potencia no deben sobrepasarse por el hecho de que el motor lleve por ejemplo aislamiento clase H. Dado que si esta clase de aislamiento está señalada en su placa de características, salvo se indique lo contrario, lo único que significa es que los valores nominales han sido establecidos en base a tal clase de aislamiento, con lo cuál, posiblemente tendremos, un motor de paquete magnético reducido, y por lo tanto de menor peso, pero seguramente, con una temperatura de equilibrio elevada. En los motores de tracción la potencia nominal y corriente de régimen van asociadas a un tiempo de operación sin que se supere la temperatura de aislamiento. Estos tiempos suelen ser, por ejemplo para los estándares americanos, de 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 30 minutos, una hora y operación continua, En la placa de datos se suele indicar la Potencia horaria es decir la que desarrollará el motor si opera durante el lapso máximo de una hora, por ejemplo un motor 95B , aislamiento clase H , temperatura ambiente 40° C, puede desarrollar una corriente de 400 Amperios a régimen de 15 minutos y 160 Amperios a régimen continuo. Esto quiere decir que el motor puede soportar una corriente de carga de 400 Amperes durante 15 minutos o alternativamente una corriente de 160 Amperes en forma continua sin que su temperatura supere los 180°C cuando la



**Tabla 4.1**  
**Corrientes y Factores de forma para rectificadores controlados monofásicos**  
 (Las corrientes están expresadas como fracción del valor pico)

Ángulo de disparo	ONDA COMPLETA			MEDIA ONDA		
	I <sub>av</sub>	I <sub>rms</sub>	Factor de forma	I <sub>av</sub>	I <sub>rms</sub>	Factor de forma
0°	0.637	0.707	1.111	0.318	0.500	1.571
30°	0.594	0.697	1.173	0.298	0.493	1.659
60°	0.478	0.634	1.328	0.239	0.449	1.879
90°	0.318	0.500	1.571	0.159	0.354	2.222
120°	0.159	0.313	1.964	0.080	0.221	2.778
150°	0.043	0.120	2.815	0.021	0.085	



**Figura 4.5**  
**Sobre temperaturas admisibles según la clase de aislamiento de acuerdo a normas internacionales (IEC)**

temperatura ambiente es de 40°C como máximo.

En general los motores de tracción son diseñados en modo tal que soportan muy bien las vibraciones y golpes propias del uso vehicular suelen tener cojinetes de bolas, bocinas de aleación de bronce o de rodillos lubricados y aptos para duras condiciones de trabajo por lo cual suelen ser mas robustos y pesados que sus similares de aplicación industrial. En el mercado se encuentran disponibles además motores DC de tracción especialmente diseñados para operar con dispositivos de estado sólido y acumuladores por los cuales tienen tensiones nominales acordes a las normalizadas para baterías comerciales, usualmente, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 80, 90, 96, y 128 VDC hasta 240VDC que por ejemplo, operan con motores de tracción serie de corriente continua de 40 HP como es el caso de las locomotoras mineras Goodman de 15 Toneladas.

#### 4.4 El régimen de aceleración

Una determinada masa "m" que se desplaza con movimiento lineal uniforme "v" tiene una energía cinética almacenada "Ec" en Kg-m igual a:

$$E_c = \frac{1}{2} \int v^2 \delta m = \underline{v^2 m} \quad (4.14)$$

Cada diferencial de masa tiene la misma velocidad v. En el caso de las masas giratorias la velocidad de cada diferencial de masa depende de su distancia al eje de giro es decir de su radio "r". Expresando la velocidad v en función de la velocidad angular "ω"

$$E_c = \frac{1}{2} \omega^2 \int r^2 \delta m \quad (4.15)$$

Haciendo:

$$J = \int r^2 \delta m \quad (4.16)$$

Resulta que "J" es el momento de inercia que depende únicamente de la distribución y de la geometría de la masa giratoria.

A efectos prácticos, podemos considerar toda la masa giratoria distribuida uniformemente y concentrada al extremo de un diámetro "D" denominado diámetro de inercia rotacional como se ve en la figura 4.6 :

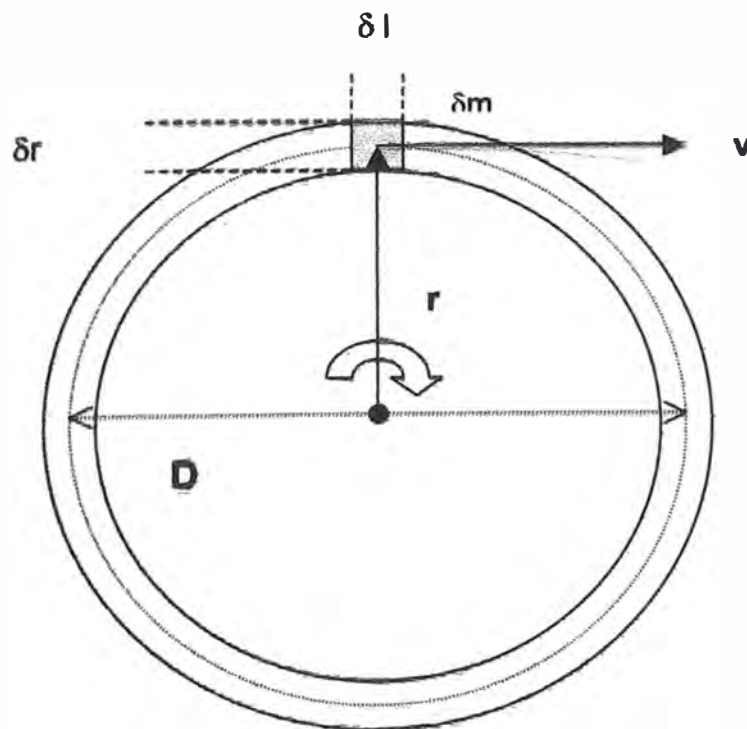


Figura 4.6  
Diámetro de inercia de giro

Despreciando el espesor podemos establecer:

$$\frac{m}{2\pi r} = \frac{\delta m}{\delta l}$$

De donde:

$$\delta m = \frac{m \delta l}{2\pi r}$$

Reemplazando en (4.16) e integrando obtendremos que:

$$J = \frac{PD^2}{4g} \quad (4.17)$$

Donde:

J ⇔ Momento de inercia en kg-m<sup>2</sup>

P ⇔ Peso en Kg

g ⇔ aceleración de la gravedad en m/seg<sup>2</sup>

D ⇔ Diámetro de inercia rotacional en m.

La energía almacenada de una masa giratoria será entonces:

$$E_c = \frac{\omega^2 PD^2}{8} \quad (4.18)$$

El factor  $PD^2$  es llamado "módulo de inercia rotacional". Este factor debe ser siempre referido a la velocidad de rotación del eje de giro del motor y sumado al  $PD^2$  originado por la masa rotórica del propio motor. Para referir el módulo de inercia de una masa que gira a  $n_1$  revoluciones por minuto (rpm) a la velocidad  $n$  en rpm de un motor acoplado por ejemplo en una transmisión de engranajes como en la figura 4.7 tenemos en cuenta que la energía almacenada, depreciando las pérdidas, debe mantenerse invariable. Luego, de la ecuación (4.18) y expresando la velocidad angular en (rpm) podemos decir que:

$$E_c = 1.37 \left( \frac{n_1}{1000} \right)^2 PD_1^2 = 1.37 \left( \frac{n}{1000} \right)^2 PD^2$$

Si ahora tomamos en cuenta las pérdidas en la transmisión:

$$PD^2 = \frac{PD_1^2}{\eta} \left( \frac{n_1^2}{n^2} \right) \quad (4.19)$$

Donde:

$PD_1^2$  ⇔ Módulo de inercia de la masa rotatoria M1

$PD^2$  ⇔ Módulo de inercia del motor

$n_1$  ⇔ Velocidad angular de la masa M1 en rpm

$n$  ⇔ Velocidad angular del motor en rpm

$\eta$  ⇔ Eficiencia de la transmisión

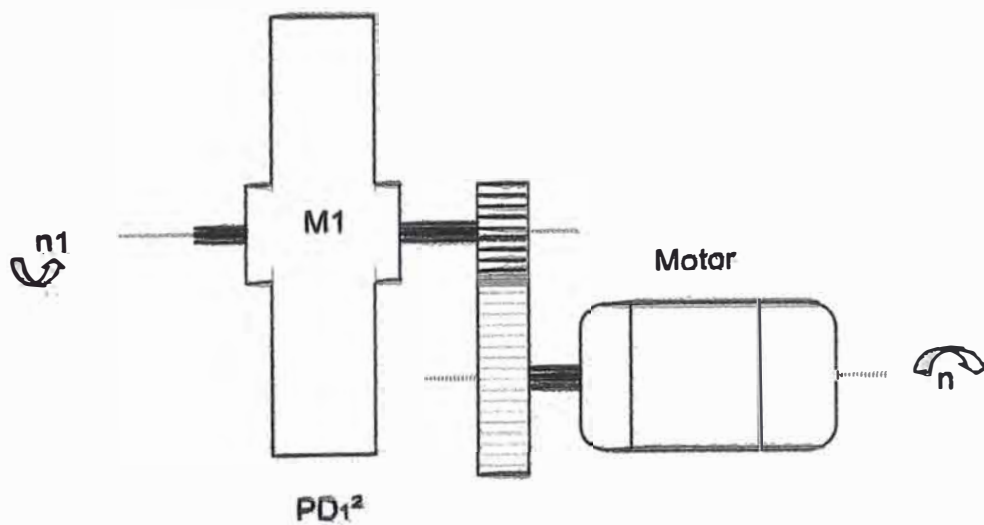


Figura 4.7

Conversión de un módulo de inercia de velocidad  $n_1$  para otra velocidad  $n$  en un eje acoplado por engranajes

Hay que recordar que el diámetro de inercia "D" no corresponde al diámetro exterior de la masa giratoria, ni aún en el caso de una rueda o una volante, por ejemplo en el caso de un disco giratorio de diámetro exterior "De", puede demostrarse a partir de las ecuaciones (4.15) y (4.18) que estos diámetros

guardan una relación:  $(De/D) = 0.707$ . Para la mayor parte de los otros sólidos de revolución la relación oscila entre 0,65 y 0,75.

De manera similar pueden tratarse masas acopladas que tengan otro tipo de movimiento como por ejemplo movimiento lineal, suponiendo un diámetro de inercia rotacional y haciendo la energía rotacional almacenada igual a la energía cinética lineal obtendremos:

$$PD^2 = 364P \left( \frac{v^2}{\eta n^2} \right) \quad (4.20)$$

Donde:

$PD^2 \Leftrightarrow$  Módulo de inercia del movimiento lineal referido al eje motor en  $\text{Kg-m}^2$

$v \Leftrightarrow$  Velocidad de traslación lineal en  $\text{m/seg}^2$

$n \Leftrightarrow$  Velocidad angular del motor en rpm

$\eta \Leftrightarrow$  Eficiencia de la transmisión

Al poner en marcha un motor, este desarrollará un par motor que además de superar el par resistente deberá acelerar las masas desde el estado de reposo hasta una velocidad final, la aceleración y por ende el tiempo en el cual se alcance la velocidad de régimen dependerá del par acelerador, es decir de la diferencia entre el par motor y el par resistente. Considerando el par acelerador constante, la aceleración será consecuentemente constante. Siendo "D" el diámetro inercial de rotación a cuyo extremo suponemos concentrada toda la masa, la fuerza "F" necesaria para acelerar dicha masa será:

$$F = \frac{Pa}{g}$$

Donde:

$P \Leftrightarrow$  Peso en Kg

$g \Leftrightarrow$  Aceleración de la gravedad equivalente a  $9.81 \text{ m/seg}^2$

$a \Leftrightarrow$  Aceleración en  $\text{m/seg}^2$

El par acelerador  $T_a$ :

$$T_a = \frac{FD}{2}$$

De estas dos ecuaciones se deduce la aceleración  $a$  en  $\text{m/seg}^2$ :

$$a = \frac{2T_ag}{PD}$$

Multiplicando y dividiendo por  $D$ :

$$a = \frac{2T_a D g}{PD^2} \quad (4.21)$$

La velocidad tangencial " $v$ " en  $\text{m/seg}$  aplicada al diámetro inercial en función de la velocidad angular " $\omega$ " en  $\text{rad/seg}$ :

$$v = \omega \frac{D}{2}$$

Además, de las ecuaciones de movimiento uniformemente acelerado.

$$V = at$$

Despejando el tiempo " $t$ " en seg. en estas dos ecuaciones y la ecuación (4.21)

$$t = \frac{\omega PD^2}{4T_ag}$$

Expresando la velocidad angular en rpm:

$$t = \frac{PD^2 n}{375T_a} \quad (4.22)$$

Donde:

$t$  ⇔ Tiempo de aceleración en seg

$PD^2$  ⇔ Modulo de inercia en Kg-m<sup>2</sup>

$n$  ⇔ Velocidad angular en rpm

$T_a$  ⇔ Torque acelerador en Kg-m.

Cuando se trata de vehículos de velocidad controlada puede conseguirse que el par acelerante promedio permanezca aproximadamente constante durante todo el período que dura la aceleración, así mismo, el par resistente puede tomarse como constante. En motores que solo tienen un escalón de arranque, por ejemplo si se usa un motor de jaula de ardilla en conexión directa, el par motor y por ende la aceleración dependerán marcadamente de las rpm, Sin embargo aún en este caso la relación entre el nivel medio del torque promedio y su valor pico alcanzado en un instante dado suele ser no menor a 0.75 (en los motores serie con control escalonado esta relación suele ser la misma). Esto se debe a que los motores de tracción de jaula de ardilla se diseñan con alto par de arranque de manera que su curva par velocidad es generalmente más suave que la que corresponde a un motor convencional.

A fin de visualizar mejor la forma en que se realiza el cálculo del tiempo de aceleración, en la figura 4.8 vemos las curvas par motor versus velocidad expresadas en porcentajes de los valores nominales de operación de un motor serie que trabaja en una configuración escalonada con resistencias de arranque.



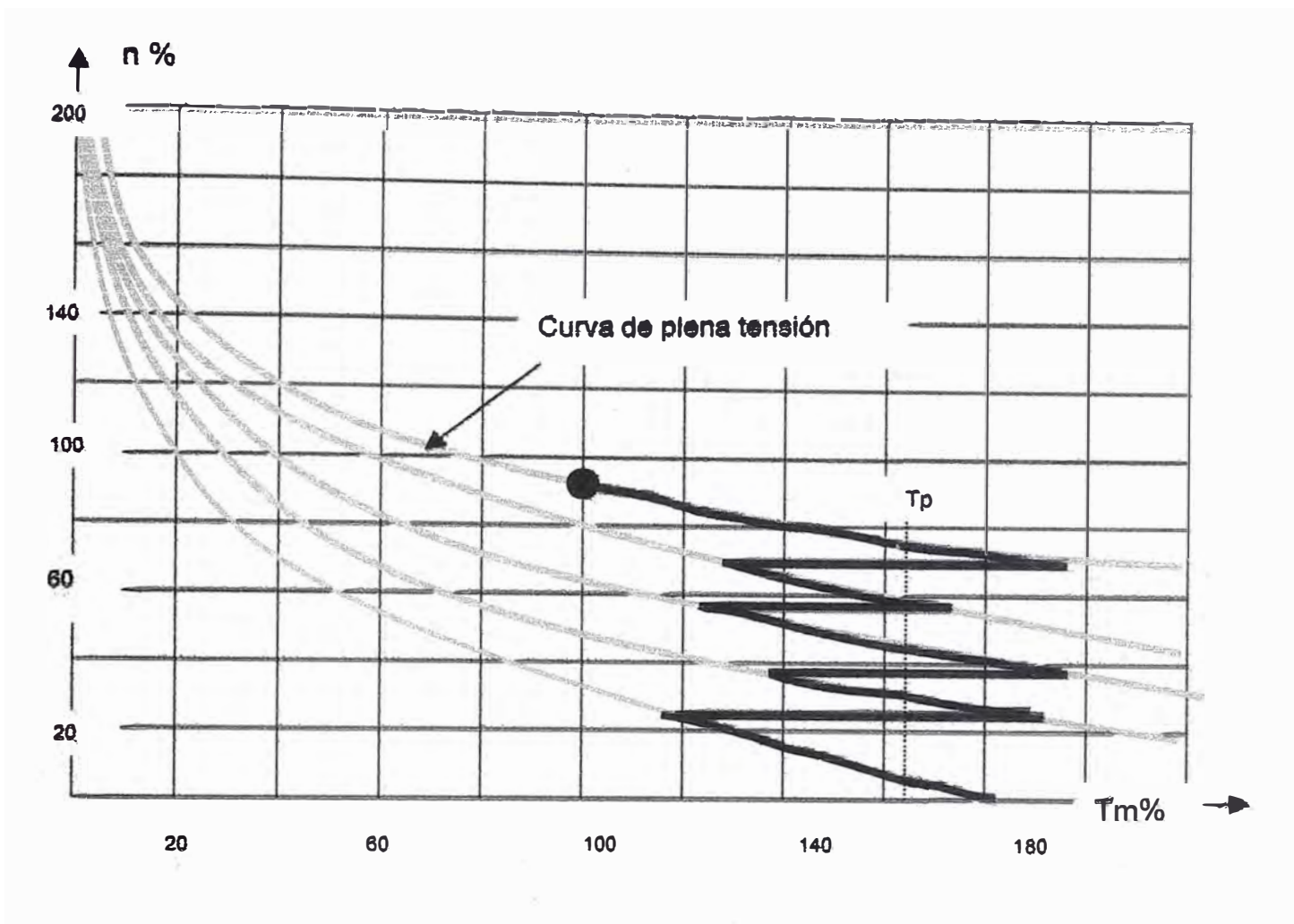


Figura 4.8

Curvas Par motor versus velocidad para arranque escalonado de un motor serie ( $T_p$  es el par promedio)

A cada cambio de contacto el número de revoluciones aumenta siguiendo una curva en zigzag. La curva depende del número de contactos del reóstato y de la pericia del operario sin embargo puede tomarse, a efectos de cálculo, durante todo el período de aceleración un par equivalente con valor promedio  $T_p$  que viene a ser aproximadamente igual a 1.65 veces el par motor nominal.

A partir de la figura 4.8 podemos graficar la curva promedio hasta su intersección con la curva de plena tensión es decir aquella en la cuál el reóstato ha sido eliminado y a partir de este punto trazar una serie de escalones como

se ve en la figura 4.9 de modo que nos aproximemos lo más posible a la curva de plena tensión hasta alcanzar el punto en que el par motor y el par resistente se igualan y por lo tanto cesa la aceleración. Los escalones se trazan de modo que los pequeños triángulos que quedan a uno y otro lado de la curva de plena carga sean aproximadamente equivalentes en superficie. El número de escalones depende de la exactitud requerida en los cálculos.

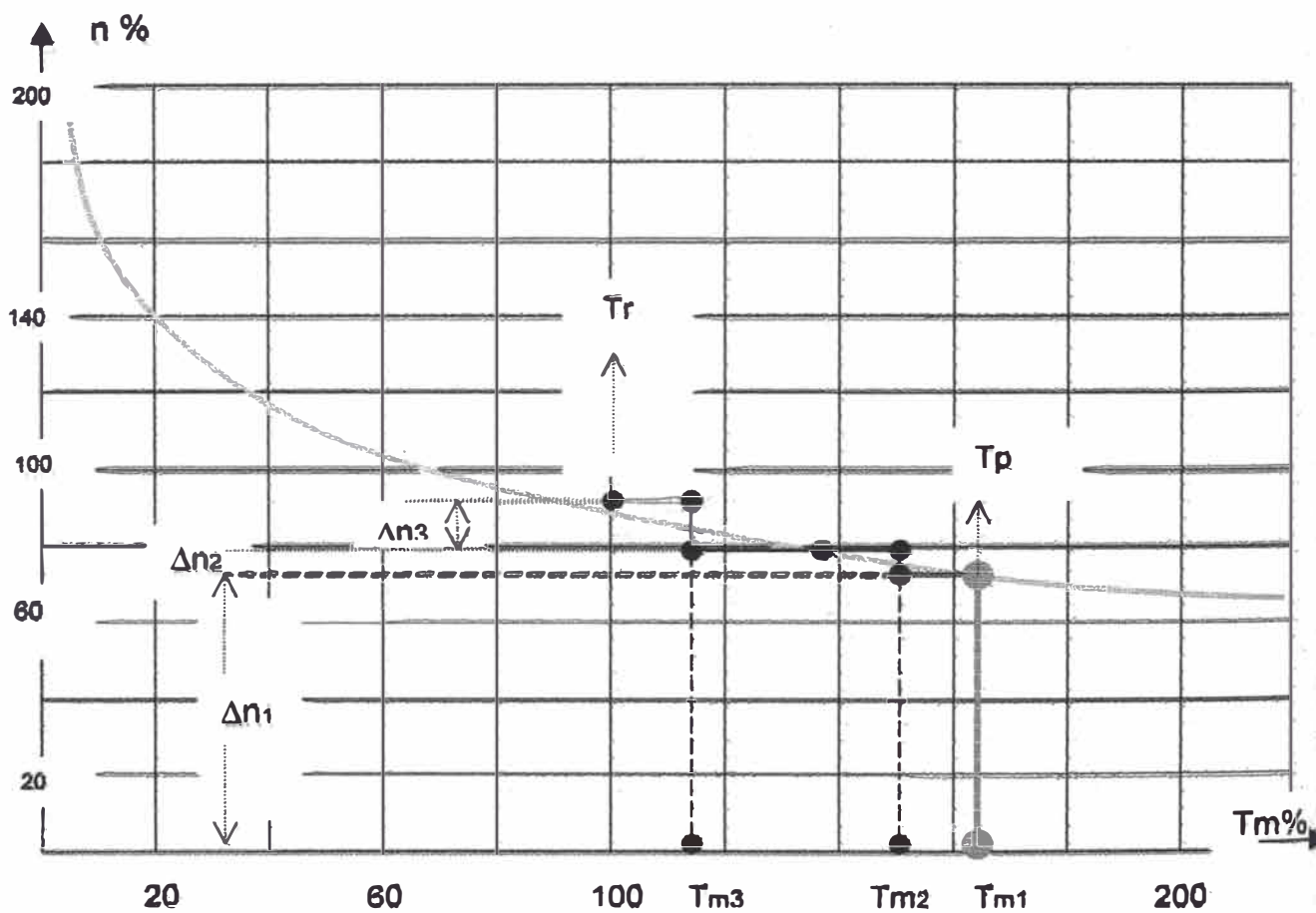


Figura 4.  
Gráfica para determinar el tiempo de aceleración total

Con la ecuación (4.22) podemos calcular el tiempo para cada escalón:

$$\Delta t = \frac{PD^2}{375} \frac{\Delta n}{(T_m - T_r)} \quad (4.23)$$

El tiempo total de aceleración en segundos será para la figura 4.9:

$$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = \frac{PD^2}{375} \left( \frac{\Delta n_1}{T_p - T_r} + \frac{\Delta n_2}{T_{m2} - T_r} + \frac{\Delta n_3}{T_{m3} - T_r} \right)$$

Es decir que :

$$t = \frac{PD^2}{375} \left( \sum \frac{\Delta n_i}{T_i - T_r} \right) \quad (4.24)$$

Donde el subíndice i es el orden de cada escalón.

En vehículos con arranque escalonado por resistencias, el tiempo de aceleración puede servir para dimensionar las resistencias de arranque. Sin embargo en equipos con velocidad regulada mediante controles electrónicos el operario gobernará la velocidad de acuerdo a su criterio y comodidad en un amplio rango de posibilidades por medio de un manubrio o pedal y cuyo mecanismo por lo general acciona un reóstato cuya posición comandará la señal de control. En este caso un cálculo detallado de la aceleración y tiempos de aceleración no tiene mucho significado. Lo que si puede ser importante es conocer el límite máximo de aceleración que puede imprimirse sin producir resbalamiento. Si tenemos un vehículo de tracción de peso total "P" kg, donde "nr" es el número total de ruedas y "nt" el número de ruedas con tracción como en la figura 4.10. El peso "P1r" soportado por cada rueda será:

$$P1r = \frac{P}{Nr}$$

Si llamamos "Ft" al esfuerzo de tracción total necesaria para imprimir al vehículo una aceleración "am" uniforme.

El esfuerzo de tracción "  $F_{1t}$  " ejercida por cada rueda tractora será:

$$F_{1t} = \frac{F_t}{n_t}$$

De la ecuación (1.25) el valor máximo de  $F_t$  que no produce resbalamiento:

$$F_t = \mu P$$

De las ecuaciones anteriores:

$$F_{1t} = \mu P_{1r} \left( \frac{n_t}{n_r} \right) \quad (4.25)$$

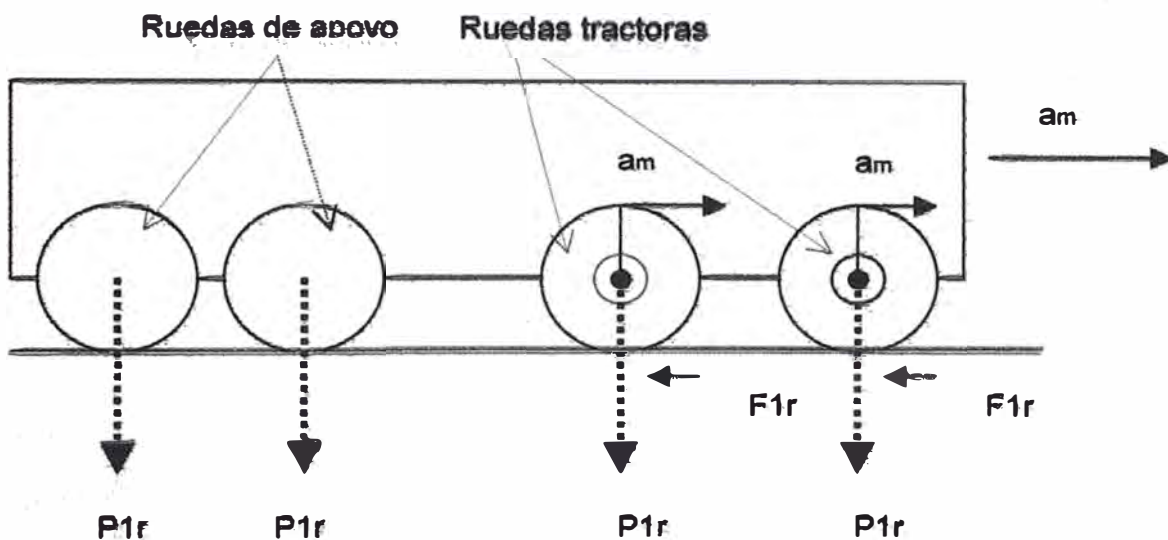


Figura 4.10

Vehículo soportado por  $n_r$  ruedas, de las cuales  $n_t$  tienen tracción

Los motores imprimen a cada rueda tractora una aceleración cuyo valor en el extremo del diámetro exterior es la misma con la cuál se desplaza el vehículo.

Podemos considerar que cada rueda de tracción arrastra linealmente un peso

$P_{1r}$  con una aceleración " $a_m$ ". Luego, de (4.25) podemos hacer:

$$F_{1r} = \frac{P_{1r}}{g} a_m = \mu_0 P_{1r} \left( \frac{n_t}{n_r} \right)$$

Luego:

$$a_m = \mu g \frac{n_t}{n_r} \quad (4.26)$$

Hay que tener en cuenta que  $a_m$  es proporcional al torque acelerador el cual no es necesariamente constante durante toda la aceleración de modo que tendremos que considerar el resultado de (4.26) como su valor pico aplicando un factor de corrección  $\varepsilon$  a la referida ecuación. De esta forma en ningún instante durante la aceleración se superará el límite máximo admisible. Como hemos mencionado anteriormente,  $\varepsilon$  puede considerarse como 0,75 para motores AC sin control de velocidad y motores DC con control escalonado.

Finalmente tendremos:

$$a_m = \mu g \varepsilon \frac{n_t}{n_r} \quad (4.27)$$

Donde:

$a_m$  ⇔ Máxima aceleración admisible que no produce resbalamiento en m/seg<sup>2</sup>

$g$  ⇔ aceleración de la gravedad 9.81 m/seg<sup>2</sup>

$n_t$  ⇔ Número de ruedas que ejercen tracción

$n_r$  ⇔ Número total de ruedas

$\varepsilon$  ⇔ Factor de corrección de 0.75 de valor aproximado

$\mu$  ⇔ Coeficiente de adherencia.

La tabla 4.2 corresponde a las prescripciones de la norma CMAA para los límites de aceleración admisibles sin producir resbalamiento, cuyos valores

resultan coherentes con la ecuación (4.27),

**Tabla 4.2**  
**Máxima aceleración para prevenir resbalamiento según CMAA**

Porcentaje de ruedas impulsoras	100	50	33.33	25	16.67
<b>Máxima aceleración en Pie/seg<sup>2</sup></b>					
<b>Rieles secos</b>	4.8	2.4	1.6	1.2	0.8
<b>Coefficiente de fricción (<math>\mu_0</math>) 0.2</b>					
<b>Máxima aceleración en Pie/seg<sup>2</sup></b>					
<b>Rieles húmedos</b>	2.9	1.5	1.0	0.7	0.5
<b>Coefficiente de fricción (<math>\mu_0</math>) 0.12</b>					

Para asegurar que no se produzca resbalamiento en cualquier condición de marcha, la aceleración promedio debe ser significativamente menor que la máxima admisible

#### 4.5 Control de frenado

En muchos países las regulaciones para vehículos eléctricos de tracción requieren el uso de al menos dos diferentes sistemas de frenado, uno de ellos para frenado usual, y otro para frenado de emergencia a fin de proveer de un control seguro a la máquina aún cuando se atravesare pendientes y se lleve altas velocidades. Existen sistemas de frenado de naturaleza muy diversa, como por ejemplo, frenados de tipo mecánico, hidráulico, neumático, dinámico eléctrico o combinación de ellos. Los sistemas convencionales para pequeños

vehículos siguen siendo sistemas actuados mecánicamente de zapatas generalmente de fierro fundido presionado contra las ruedas. Como los vehículos de tracción son de importante masa inercial debe proveerse además un freno de aparcamiento de modo que el vehículo quede enganchado evitándose un desplazamiento descontrolado por acción por ejemplo del viento o de una inclinación del terreno. Las normas americanas exigen que, donde se incorpore un freno de aparcamiento, este debe proveer un torque que no debe ser menor al 50% del torque desarrollado por el motor, además de lo cual este freno no debe sustituir al bloqueo eléctrico del sistema de control. El bloqueo eléctrico o cualquier otro tipo de bloqueo, por ejemplo magnético o neumático por lo general se acopla asociado al comúnmente conocido como "frenado de hombre muerto" de la denominación en inglés "dead man emergency control" que no es otra cosa que un mecanismo mediante el cual el equipo puede ser accionado solamente cuando hay un operario en la cabina de mando, o en la silla de mando, este puede actuar a través de un microswitch ubicado debajo de la plataforma donde se ubica el piloto de modo que acciona con el peso de este desbloqueando el circuito de control y liberando el freno, cuando por el motivo que fuere el piloto sale de su ubicación, el microswitch inhibe el sistema de control generalmente actuando sobre un contactor de emergencia que separa físicamente la fuente de energía del sistema y manda accionar un freno que puede ser de tipo electromagnético ó neumático. En la locomotoras eléctricas grandes, los frenos suelen ser de tipo dinámico eléctrico en primera instancia

para reducir la velocidad hasta un nivel tal que puedan accionarse los frenos de parada generalmente de tipo neumático.

Los vehículos más pequeños suelen tener frenos de zapata actuados mecánica ó hidráulicamente aparte de algún tipo de frenado eléctrico.

El esfuerzo o presión total con la cual deben actuar las zapatas de freno contra las ruedas es dada por la fórmula:

$$P_r = \frac{F_f}{\mu_f} \quad (4.28)$$

Donde:

$\mu_f \Leftrightarrow$  Coeficiente de fricción entre las zapatas y la rueda

$F_f \Leftrightarrow$  Esfuerzo total necesario para el frenado

En el caso de vehículos que marchan sobre rieles de acero, debe tenerse en cuenta que no puede aplicarse un esfuerzo de frenado cualquiera, pues podría rebasarse el esfuerzo de adherencia de las ruedas sobre los carriles, en cuyo caso se producirá el resbalamiento que aparte de quitar toda eficacia al frenado puede conducir a una situación peligrosa ya que el coeficiente de fricción es menor en deslizamiento que en el caso de rodamiento de las ruedas.

De la ecuación (1.25), podemos deducir que el esfuerzo máximo de adherencia para el caso de desaceleración será:

$$F_{md} \approx 1000 \mu P \quad (4.29)$$

De ser el esfuerzo de frenado mayor a este valor, ( lo cual puede fácilmente conseguirse ajustando simplemente la presión de las zapatas), se producirá el



resbalamiento.

Si consideramos "P" el peso del vehículo y "af" la desaceleración debida al frenado, podemos calcular un el esfuerzo específico de frenado de un modo similar a la fórmula establecida por la ecuación (1.18) para la aceleración:

$$F_d = 1000 \frac{P a_f \gamma}{g} \quad (4.30)$$

$F_d$  ⇔ Esfuerzo específico desacelerante en kg/TM

$a_f$  ⇔ desaceleración de frenado en m/seg<sup>2</sup>

$g$  ⇔ aceleración de la gravedad en m/seg<sup>2</sup>

$\gamma$  ⇔ Factor de inercia por masas giratorias usualmente 1.1

A este valor hay que deducirle el esfuerzo de marcha y el esfuerzo de pendientes positivas y por el contrario sumarle el esfuerzo por pendiente negativa. Por lo tanto el esfuerzo máximo de frenado necesario debe ser:

$$F_f = \gamma P \left( \frac{1000 a_f}{g} \pm h - r \right) \quad (4.31)$$

Donde:

$F_f$  ⇔ Esfuerzo total de frenado en TM

$a_f$  ⇔ desaceleración de frenado en m/seg<sup>2</sup>

$g$  ⇔ aceleración de la gravedad en m/seg<sup>2</sup>

$h$  ⇔ pendiente positiva(+) o negativa(-) expresada en por mil

$r$  ⇔ esfuerzo específico resistente en Kg/TM

$P$  ⇔ peso total a frenar en TM.

Algunas normas para vehículos de baja velocidad como las CMAA prescriben el uso de un dispositivo de frenado libre de deslizamiento de tipo mecánico capaz de detener el movimiento del equipo dentro de una distancia en pies igual al 10% de la velocidad de marcha es este caso en pies por minuto cuando se viaja a plena velocidad con carga nominal, por ejemplo si el vehículo marcha a una velocidad de 200 pies por minuto, el sistema de frenado deberá detenerlo dentro de una distancia no mayor de 20 pies.

#### **4.6 Frenado regenerativo**

Dado que un motor de corriente continua y un generador de corriente continua son virtualmente, desde el punto de vista constructivo, la misma máquina, Es posible hacer actuar al motor como generados consiguiéndose así un efecto de frenado, siempre y cuando exista en el sistema una forma de recabar la energía generada, La idea es que la energía recuperada pueda ser retornada a la fuente para que sea utilizada por otra carga o vehículo en caso d que la línea de alimentación sirva de suministro a otros vehículos como en el caso de los tranvías, u regrese a la fuente en forma de carga re usable en el caso de ser ésta un banco de acumuladores eléctricos. A través de los años muchos esquemas fueron intentados con variables resultados, pero no fue hasta la adopción de los modernos equipos electrónicos que sistemas confiables de este tipo están disponibles comercialmente, mas adelante se muestran algunos ejemplos.

#### **4.7 Frenado reostático**

El mayor inconveniente con el frenado regenerativo es que la fuente de alimentación no siempre es prevista para aprovechar la corriente regenerativa. En algunas estaciones de ferrocarril se establecieron grandes resistencias para aprovechar la energía recuperada, pero los sistemas regenerativos resultaron complejos y poco confiables. El siguiente paso lógico a que condujeron tales esfuerzos fue a establecerse sistemas de resistencias en cada tren con lo cual se creó el frenado reostático denominado también "frenado dinámico". Esto es dejar al motor actuar como generador insertándole por etapas resistencias en sus bornes de modo que con tal configuración, la energía generada se disipa en las resistencias constituyéndose una carga que hace perder velocidad al vehículo. En esta configuración el operario cuando requiere frenar al vehículo actúa sobre un mecanismo que quita la alimentación del motor quedando este ahora girando como consecuencia de la energía acumulada en la masa inercial, de modo que el motor tiende a generar tensión en sus terminales en los cuales se va conectando por etapas las resistencias de modo similar pero en secuencia inversa a la que se realiza en un arranque con banco de resistencias. De esta manera se logra reducir la velocidad a niveles en que puede aplicarse un frenado mecánico sin peligro de resbalamiento. En los vehículos alimentados con acumuladores, el frenado eléctrico utilizado, obviamente, es de tipo regenerativo aún sea que se tenga un sistema de control de velocidad por banco de resistencias.

#### 4.8 El control por resistencias en DC

Aún en la actualidad a pesar de las ventajas de los controles de tracción con dispositivos de estado sólido, los controles por configuraciones de conmutación y resistencias siguen siendo bastante usados, sobre todo en locomotoras mineras de bajas capacidades y pequeños vehículos eléctricos. Ello se debe entre otras razones a su total simpleza, bajo costo, y muy fácil mantenimiento y reposición.

Como sabemos en un motor de corriente continua de devanado serie, la interacción entre la tensión aplicada y la tensión inducida determinan el flujo de la corriente por los devanados de campo y de armadura. Si conectamos en serie con el motor un arreglo de resistencias conmutables por medio de contactores paralelos a ellas, tal como se aprecia en la figura 4.11. Cuando aplicamos la tensión de suministro en DC, la caída de tensión en las resistencias limitará la tensión efectiva aplicada a los bornes del motor y el vehículo acelerará suavemente hasta alcanzar la velocidad de equilibrio en el punto en que el esfuerzo resistente del vehículo y el torque producido por el motor se igualen.

Para acelerar al vehículo, una por una las demás resistencias son cortocircuitadas accionado el respectivo contactor de modo tal que en cada etapa, la tensión efectiva aplicada, y por ende la corriente y el torque se incrementan acelerando cada vez más al vehículo hasta que finalmente todas las resistencias eliminadas alcanzándose así el máximo torque de marcha y

por ende a la velocidad de régimen. Sin embargo se puede instalar un circuito adicional para aumentar aún más la velocidad del motor respecto a la alcanzada con todas las resistencias cortocircuitadas. Esto se logra colocando una resistencia en paralelo con el devanado de campo, como se aprecia en la figura 4.12 de modo tal que se suministra un nuevo camino a la corriente de armadura, aumentando su valor y debilitando al campo, teniendo como consecuencia el aumento de la velocidad. Este sistema se llama aceleración por "Debilitamiento del campo".

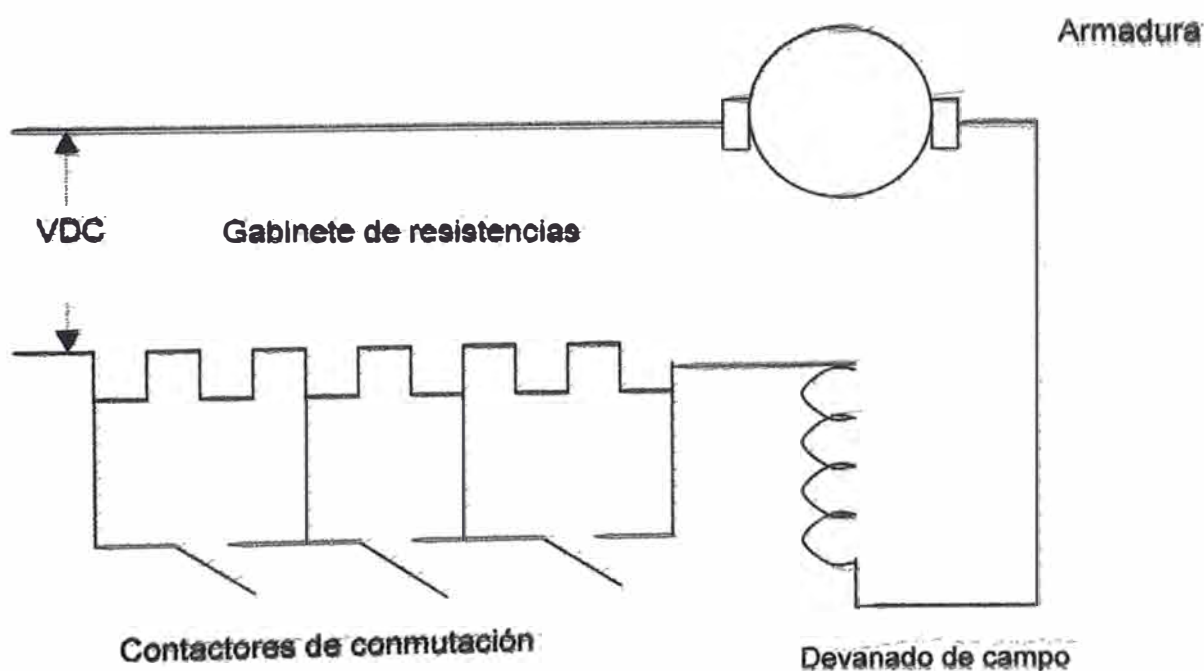


Figura 4.11  
Arreglo de resistencias conmutables

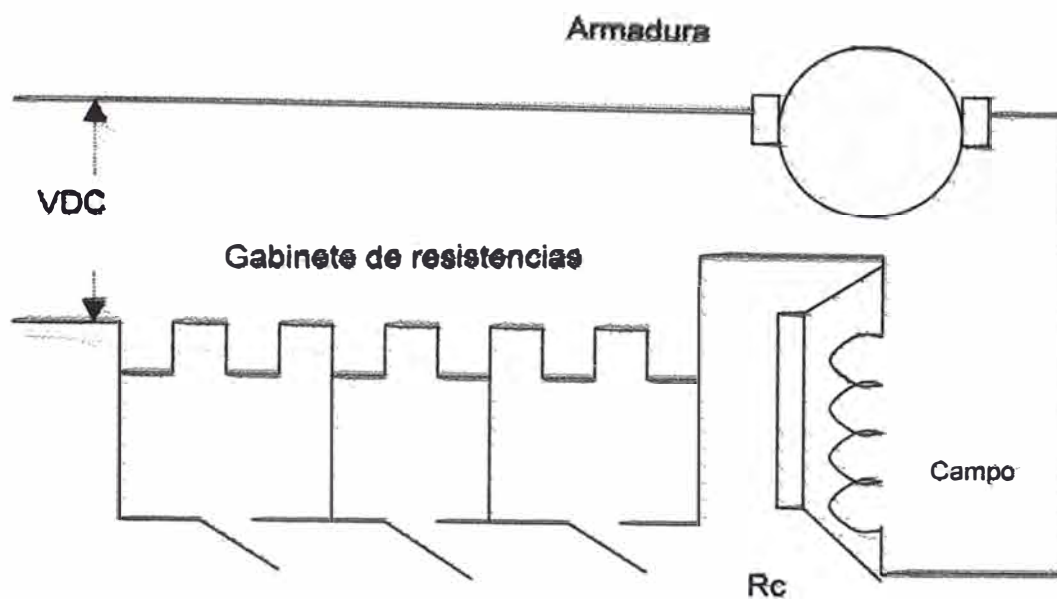


Figura 4.12  
Conexión de resistencia  $R_c$  debilitadora

traducción del inglés "Field weakening". De hecho muchos vehículos utilizan este principio, el cual también se puede aplicar por etapas, por ejemplo algunas locomotoras tienen hasta 6 etapas de debilitamiento del campo cada una de las cuales se va cumpliendo conectando en paralelo un shunt lográndose una aceleración gradual del vehículo mas allá de su posibilidad convencional.

#### 4.9 Control Serie paralelo

Como la mayoría de vehículos eléctricos usa más de un motor, uno o dos por cada eje de tracción, generalmente iguales entre si, Se puede disponer la alimentación aplicando una configuración de los motores de modo tal que en el arranque los motores se conectan en serie entre sí , y en serie con las resistencias de arranque, una vez que todas las resistencias han sido

gradualmente cortocircuitadas, quedan los dos motores conectados en serie, una vez que se alcanza la velocidad de equilibrio, los motores pasan a ser conectados en paralelo con las resistencias nuevamente habilitadas, e insertadas en serie con cada motor, las resistencias son cortocircuitadas gradualmente otra vez hasta que los motores quedan operando en paralelo recibiendo cada uno la tensión plena con todas las resistencias cortocircuitadas. Para pasar de la conexión serie a la conexión en paralelo pueden distinguirse dos maneras: una de ellas es interrumpir brevemente el circuito de corriente en los motores pero en algunos casos esto representa afrontar aunque en un lapso muy corto, arcos bastante fuertes, la otra manera es introduciendo una breve etapa de transición cortocircuitando uno de los circuitos de motor a través de una resistencia, para luego pasar a la etapa de paralelo tal como se indica en la figura 4.13. Estas operaciones se realizan generalmente en forma manual mediante un dispositivo de manivela, levas, y contactos al que se denomina "combinador." En la figura 4.14 pueden apreciarse algunos de estos equipos. Lógicamente, lo descrito aquí no es más que una descripción esquemática del circuito real a utilizar, ya que en este, deben tenerse en cuenta por ejemplo dispositivos de protección contra sobre corriente, circuitos de señalización, o en algunos casos relays de pérdida de tensión los cuales detectan la pérdida de suministro de energía y restauran el circuito de arranque. Como es obvio el método de control por resistencias resulta bastante ineficiente por la pérdida de importantes niveles de energía que se disipan en las resistencias y

terminan por ser a la larga costosos además de otros problemas que deben resolverse como la necesidad de aislar el calor generado de modo que no afecte a los equipos ni cause molestias al operador. A pesar de ello se siguen usando en algunas aplicaciones. Sin embargo, la simplificación en la utilización y la reducción de los precios de los controles electrónicos, está relegando estos sistemas a aplicaciones muy puntuales en las cuales los inconvenientes son admisibles, y la simplicidad y los bajos precios son lo determinante.

#### **4.10 El control electrónico de la velocidad**

Aún cuando podría haber muchas opciones, los controles electrónicos disponibles comercialmente para aplicaciones de tracción de pequeñas potencias que utilizan baterías como fuente de alimentación y motores serie como elementos de tracción, se configuran, por lo general con tiristores.

En los últimos años se vienen utilizando circuitos de control basados en transistores de efecto campo FET ó también MOSFET, aunque, siempre asociados a los modelos de vehículos de menor capacidad.

En realidad los controles electrónicos para motores de corriente continua se comportan como una especie de transformadores DC/DC que manteniéndose conectados a una fuente de alimentación de tensión continua constante, entregan en la salida una tensión promedio variable útil para propósitos de gobernar la velocidad del motor de aplicado a una carga determinada en un rango variable de velocidades.



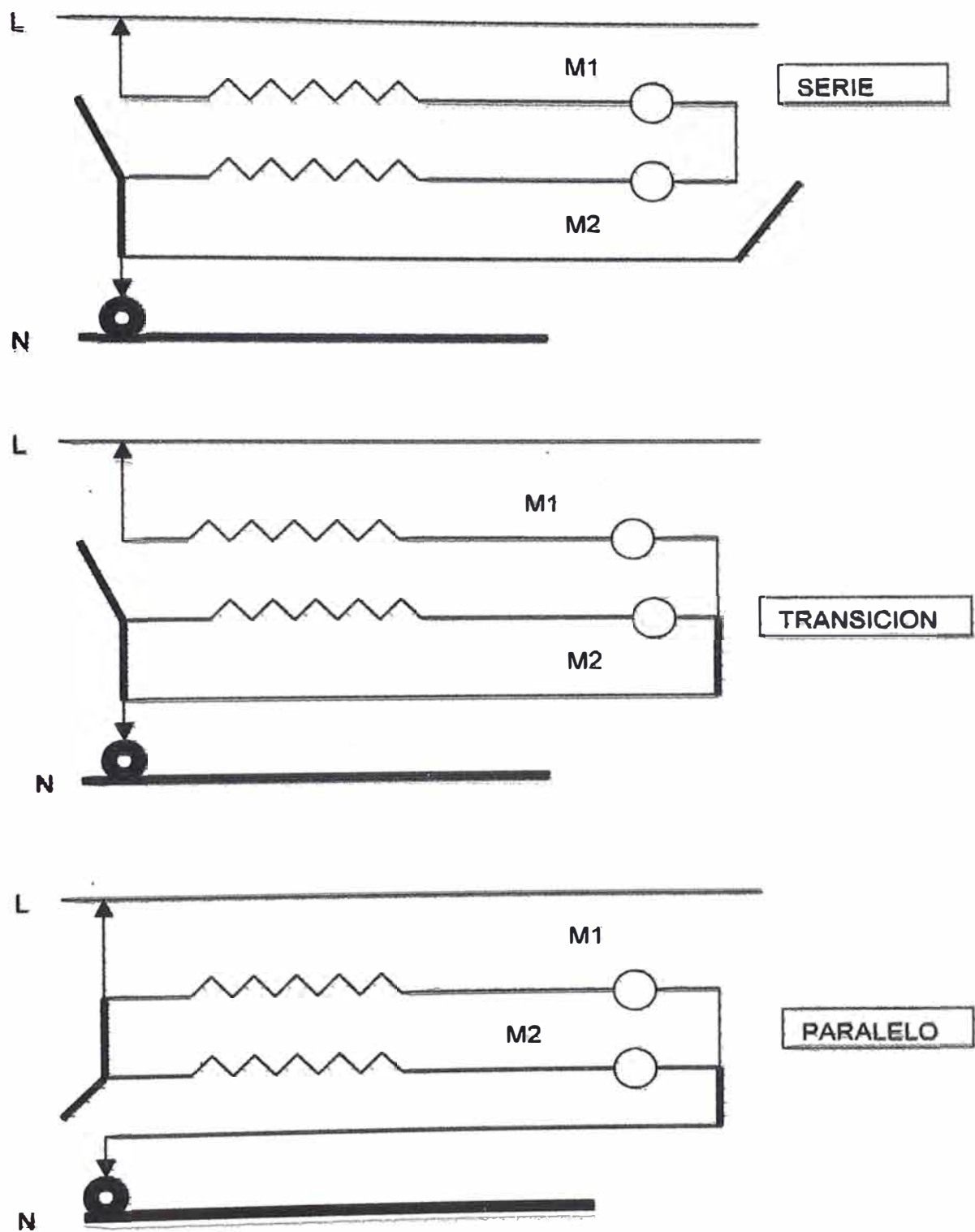


Figura 4.13  
Arreglo serie-paralelo mostrando las 3 etapas de conexión

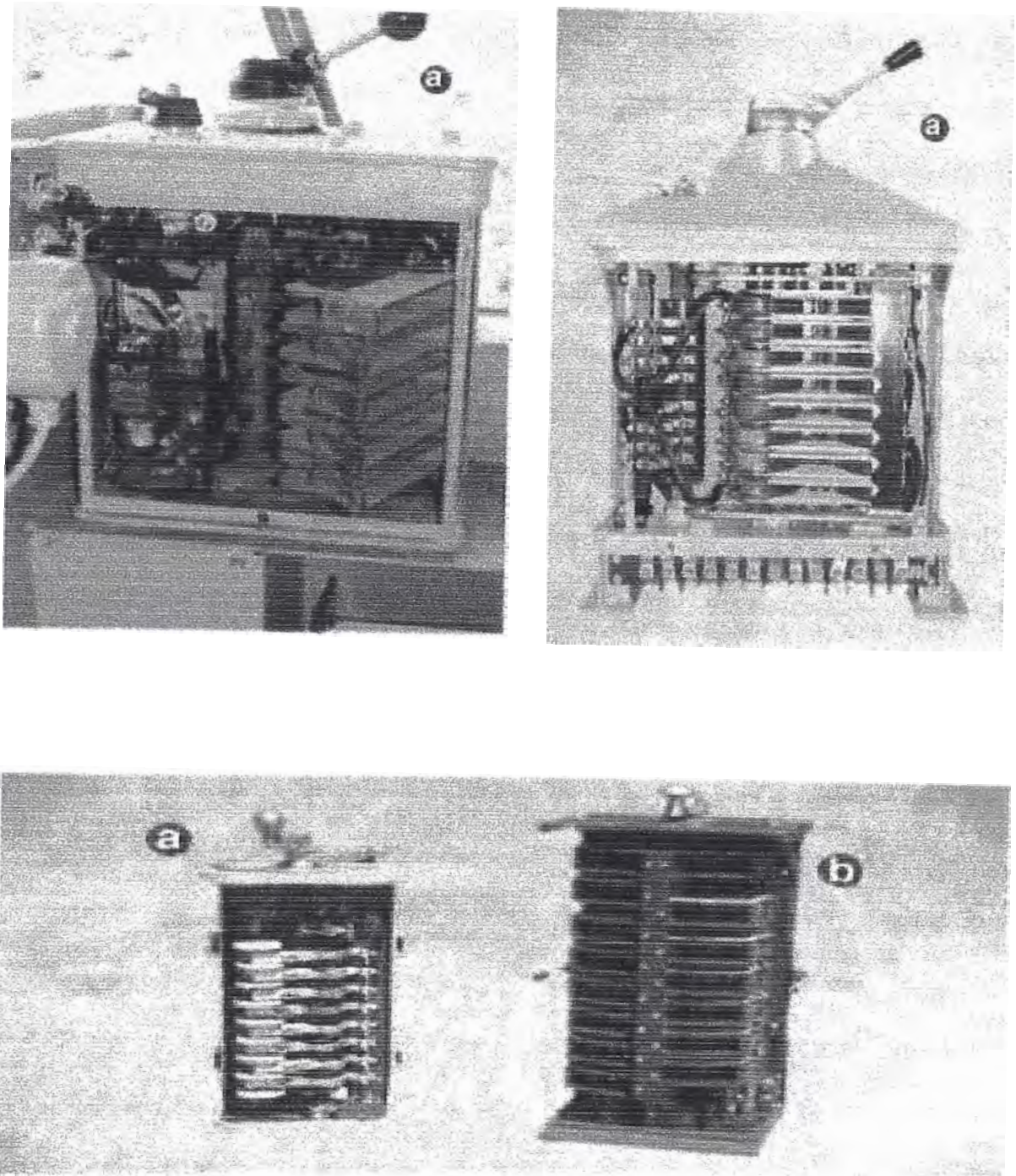


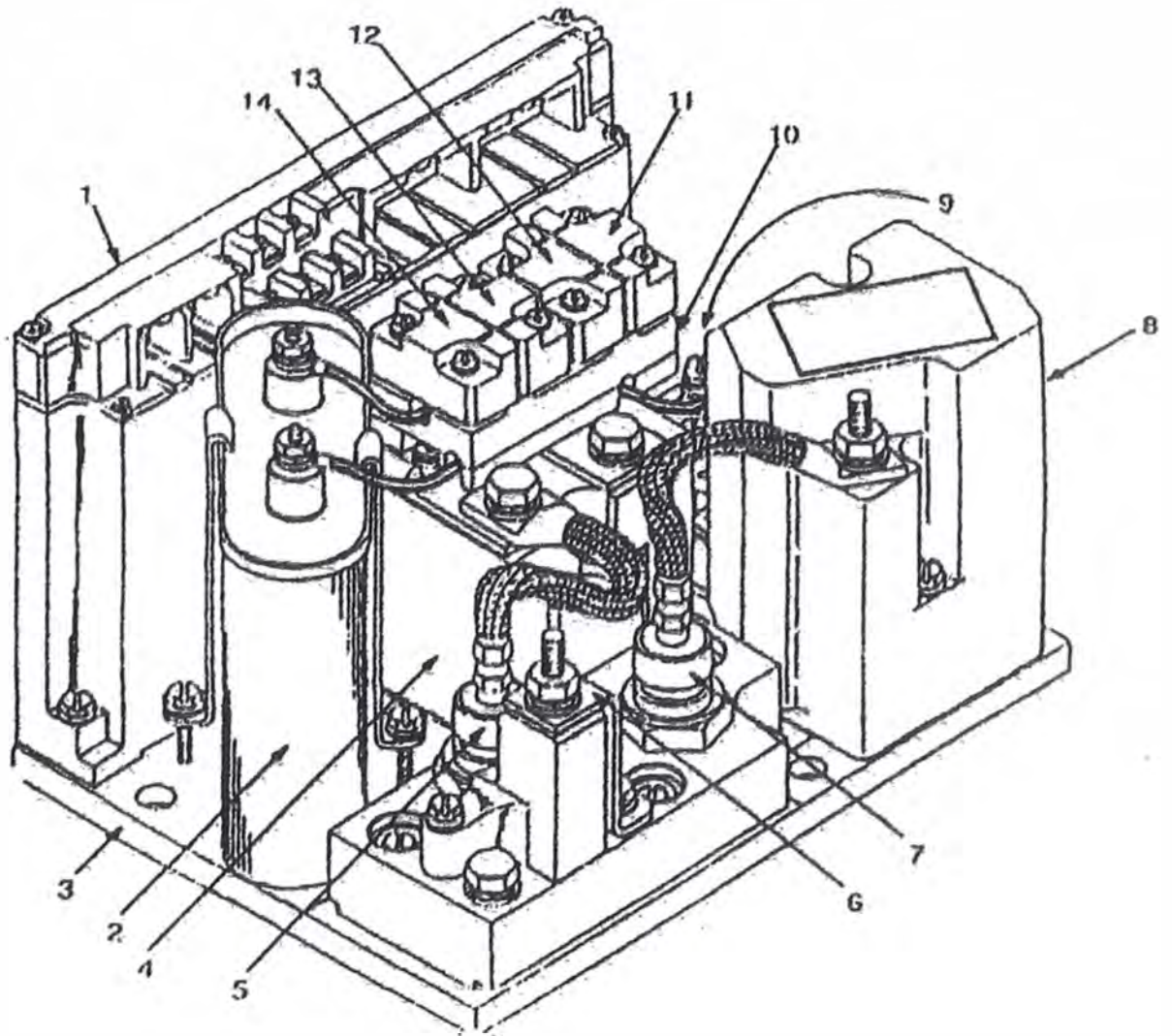
Figura 4.14  
Combinadores eléctricos

El tiristor o SCR ( de sus siglas en inglés silicon controllated rectifier) viene a ser un desarrollo a partir del diodo, y de hecho actúa como tal permitiendo que la corriente circule en un sentido y no en el otro, pero la diferencia con el diodo es que solo permite fluir la corriente cuando aparte de lógicamente estar correctamente polarizado recibe una pequeña corriente de compuerta superior a un valor mínimo de disparo, pasando el tiristor de estado de no conducción al estado de conducción. Sin ahondar en demasiados detalles, podemos decir que el tiristor se comporta como un muy rápido switch que conduce corriente directa en un determinado sentido y que podemos activar a voluntad mediante un suficiente pulso de corriente a uno de sus terminales denominado compuerta. El problema con el tiristor es que una vez activado para lograr un control efectivo de la corriente directa, debe ser apagado de algún modo y esto se logra invirtiendo el voltaje de polarización, es decir de sus terminales ánodo (+) y cátodo (-) hasta lograr que la corriente sea menor que la corriente mínima de sostenimiento, debajo de la cuál el SCR deja de conducir. Generalmente este apagado del tiristor, denominado también conmutación del tiristor, se efectúa mediante la adición de un circuito resonante conformado por una inductancia y un condensador que dado el momento lo polariza inversamente. En aplicaciones de tracción en DC , el tiristor troza la corriente suministrada al motor dejando pasar segmentos de ella consiguiendo reducir la tensión promedio aplicada de modo tal que el vehículo empieza a acelerar suavemente y conforme se va aumentando la proporción de estos trozos de corriente y por

ende de la tensión aplicada, incrementando en el SCR los tiempos del estado de conducción, se va acelerando hasta el nivel de velocidad deseado o, si quiere, al nivel de plena tensión, es por este modo de controlar la corriente de donde le viene el nombre de TROCEADOR a este sistema o CHOPPER en inglés, aunque algunos lo denominan Oscilador. Este sistema se empezó a aplicar en El Reino Unido en la década de los 80 generalizándose su utilización en vehículos de tracción con bastante éxito.

A manera de aclaración vamos a explicar el principio de funcionamiento de un esquema de este tipo utilizado en la fabricación de controles de velocidad para vehículos de tracción alimentados con acumuladores, puesto a disposición comercial por la corporación General electric Co. En sus versiones EV1, EV100, y EV200 que con algunas pequeñas variantes son esencialmente los mismos. En la figura 4.15 vemos los elementos que conforman este control y su disposición física típica.

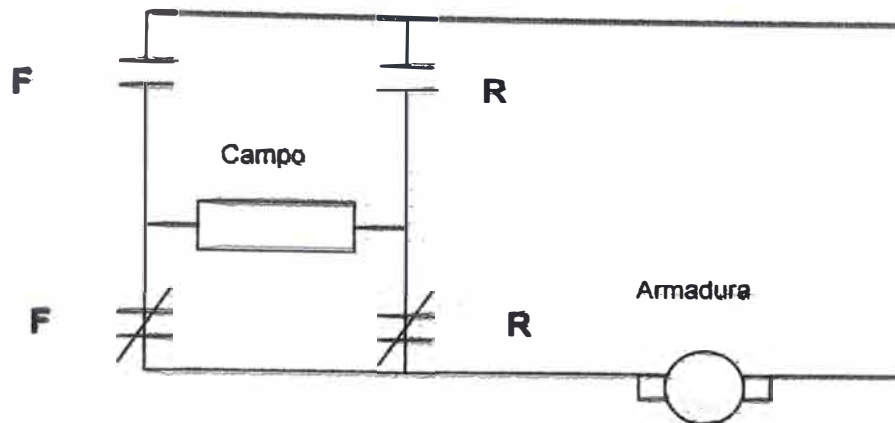
La inversión de sentido de giro se realiza mediante el contactor de inversión (Direction contactor) que está conformado por 2 módulos uno para marcha adelante y el otro para marcha en reversa, cada uno de los cuales tiene un contacto normalmente cerrado y otro normalmente abierto como se ve en la figura 4.16. Estos módulos son activados por 2 bobinas que actúan independientemente de acuerdo a la orden de marcha ejecutada desde la tarjeta de control que a su vez recibe la orden del operador a través de un par de microswitch.



- 1. Tarjeta de Control
- 2. Condensador C1
- 3. Base disipadora
- 4. SCR1
- 5. Diodo D3
- 6. Sensor de Corriente en el motor
- 7. Diodo D4

- 8. Reactor
- 9. SCR2 y SCR5
- 10. Conector
- 11. Supresor de SCR2
- 12. Supresor SCR5
- 13. Supresor D4
- 14. Supresor D3

Figura 4.15  
 Elementos constituyentes del controlador General electric EV100



**Figura 4.16**

**Esquema de principio con que opera el contactor de inversión de sentido de giro. Los contactos F operan para marcha adelante, y los contactos R para marcha en reversa**

Los contactos son platinas de cobre con pastillas especiales usualmente de una aleación de plata, Níquel y tungsteno que soportan sin soldarse las altas temperaturas generadas por los arcos que se forman con la interrupción de la corriente continua. La inversión del sentido de giro se realiza invirtiendo la dirección del flujo de la corriente en el bobinado de campo mientras se mantiene la misma dirección de la corriente original en el devanado de armadura. La tensión de la batería es aplicada al motor en pulsos. Estos pulsos de energía que se transmiten a través del SCR son muy rápidos, y lógicamente, el motor no puede seguirlos, pero el motor girará suavemente en función del valor promedio del voltaje aplicado. De modo que a medida que la frecuencia de los pulsos cambia el voltaje promedio aplicado al motor también cambia. Un bajo valor de la tensión promedio es el resultado de cortos tiempos

de conducción en el SCR. En la figura 4.17 se muestra el esquema de principio del controlador EV-100 de General Electric que resulta ser un convertidor DC/DC tipo pulsador de 3 tiristores uno de los cuales (El SCR1) es el tiristor principal que controla la tensión de salida al motor, y los otros dos (SCR2 y SCR5) junto con las reactancias y el condensador forman parte del sistema de conmutación. Puede verse en la misma figura que el circuito cuenta además con dos diodos de potencia uno de los cuales (D3) es el denominado diodo volante o en (Flyback diode en inglés) cuya función es retornar al motor la energía almacenada en sus bobinas en los momentos de no conducción proporcionando a esta un camino hacia los bobinados de campo y de armadura. El diodo D4 es el "Plugging" que se utiliza para evitar el frenado excesivamente brusco que podría ocurrir si el operador cambia abruptamente el sentido de la marcha causando que el motor se encuentre girando, en razón de la inercia, en sentido contrario al par motor. En tal caso, el diodo retoma al motor parte de la energía acumulada de frenado logrando un frenado más suave. A parte de lo descrito se puede observar que hay un circuito para frenado regenerativo, una resistencia debilitadora de campo, y un contactor "by pass" que conecta directamente los bornes de la batería al motor de modo tal que en marcha a máxima velocidad el controlador queda fuera de operación.

El mínimo pulso que puede dar este controlador es de un milisegundo en conducción y 45 milisegundos en no conducción. Cuando el oscilador de frecuencia entrega igual tiempo de conducción y de no conducción,

aproximadamente 1.7 milisegundos, se presenta la más alta frecuencia de pulsación que resulta ser de alrededor de 300 Hz y la tensión promedio que le llega al motor es del 50% del rango de la batería. Cuando el tiempo de conducción es bastante mas grande que el tiempo de no conducción, (la relación máxima es de 20 milisegundos contra 0.8) se presentan los niveles más altos de tensión de salida promedio y por lo tanto el más alto régimen de velocidad cuyo valor máximo resulta ser 96% de la tensión de la batería.

En el apéndice podemos apreciar un circuito de control que utiliza transistores de efecto campo para control de velocidad de motores DC que trabajan con baterías de tracción de pequeña potencia (usualmente inferiores a 3 HP) La ventaja de esta tecnología es que se elimina al necesidad del circuito de apagado que requiere el SCR y la conmutación responde automáticamente los pulsos de alimentación de compuerta, El control tiene un sistema oscilador y un modulador de ancho de pulso. El oscilador genera formas de onda de dientes de sierra a una frecuencia constante de 15000 kHz . El modulador usa estas señales para generar pulsos de salida que pueden ser suavemente transformados a estados de conducción - no conducción para gobernar la compuerta del transistor de acuerdo a los requerimiento de velocidad.

Los equipos de control de vehículos de tracción para motores serie DC alimentados por acumuladores eléctricos, en la actualidad se fabrican con tecnología de microprocesadores o microcontroladores de modo que se programan para una serie de opciones que facilitan su utilización, por ejemplo



funciones de señalización, memoria de estado y sistemas de autodiagnóstico, sin embargo para aplicaciones vehiculares los sistemas deben además ser capaces de tener las siguientes funciones:

- Opción de mando remoto para gobierno desde la Cabina
- Ajuste o calibración de rango de aceleración
- Ajuste de rampa de desaceleración
- Ajuste de máxima corriente de marcha
- Protección contra inversión brusca de la marcha
- Opción de frenado regenerativo
- Opción de marcha a máxima velocidad por debilitamiento de campo
- Protección contra sobre temperatura de los dispositivos de potencia
- Protección y bloqueo contra maniobras accidentales.
- Funciones de prueba y bloqueo por falla, por ejemplo de inhibición por soldadura de contactos
- Velocidades máxima y mínima programables
- Bloqueo o señalización por excesiva descarga de batería.

Además de las funciones descritas, el equipo debe ser adecuado para resistir sin sufrir daños ni disminución de su capacidad, las vibraciones y requerimientos mecánicos propios de un vehículo en marcha.

En la figura 4.18 se puede apreciar un esquema simplificado de conexión típico de estos sistemas

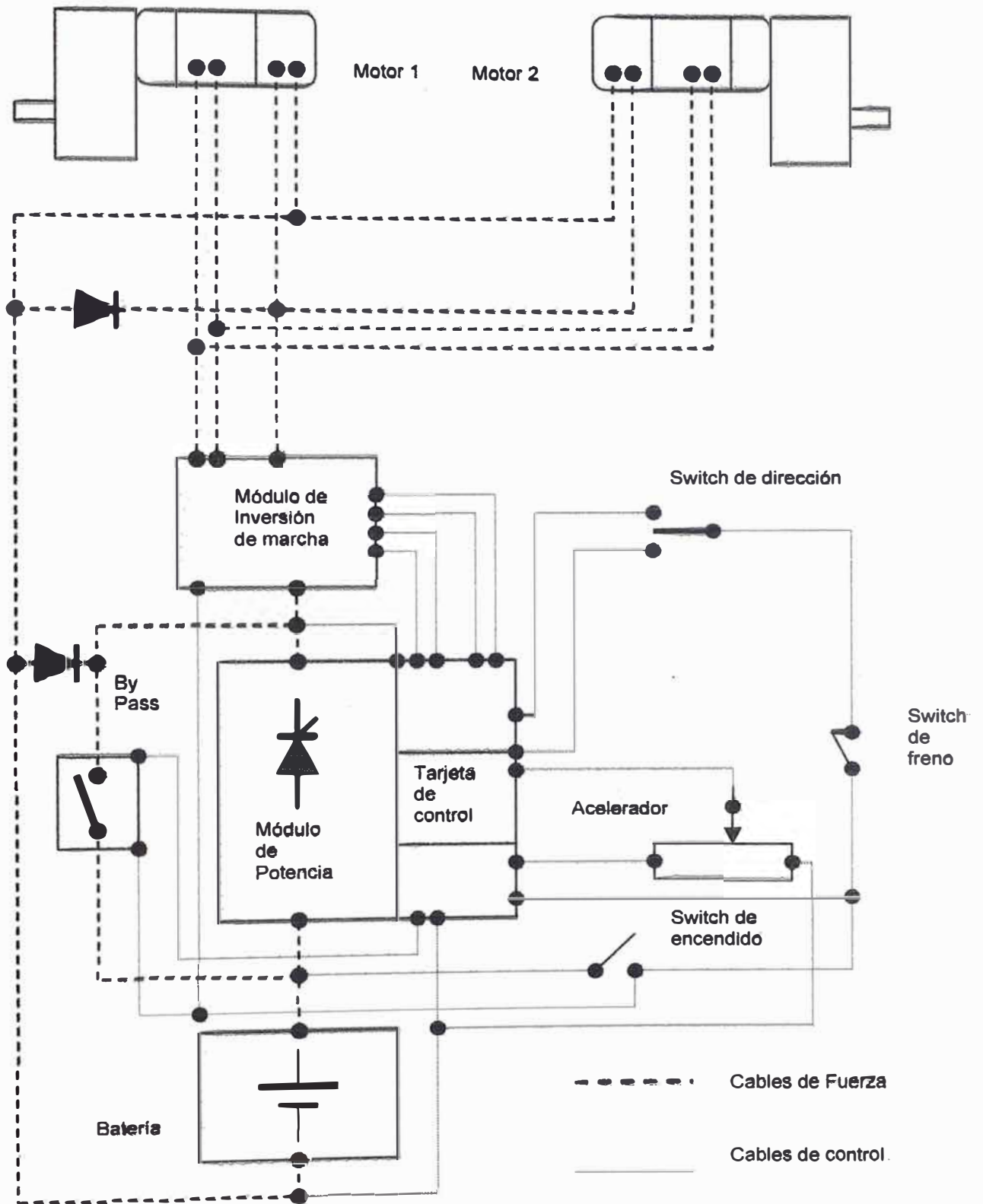


Figura 4.18  
Esquema típico de conexión de control EV-100

DIAGRAMS FOR THE EV-100/200 LX MOTOR CONTROLLER

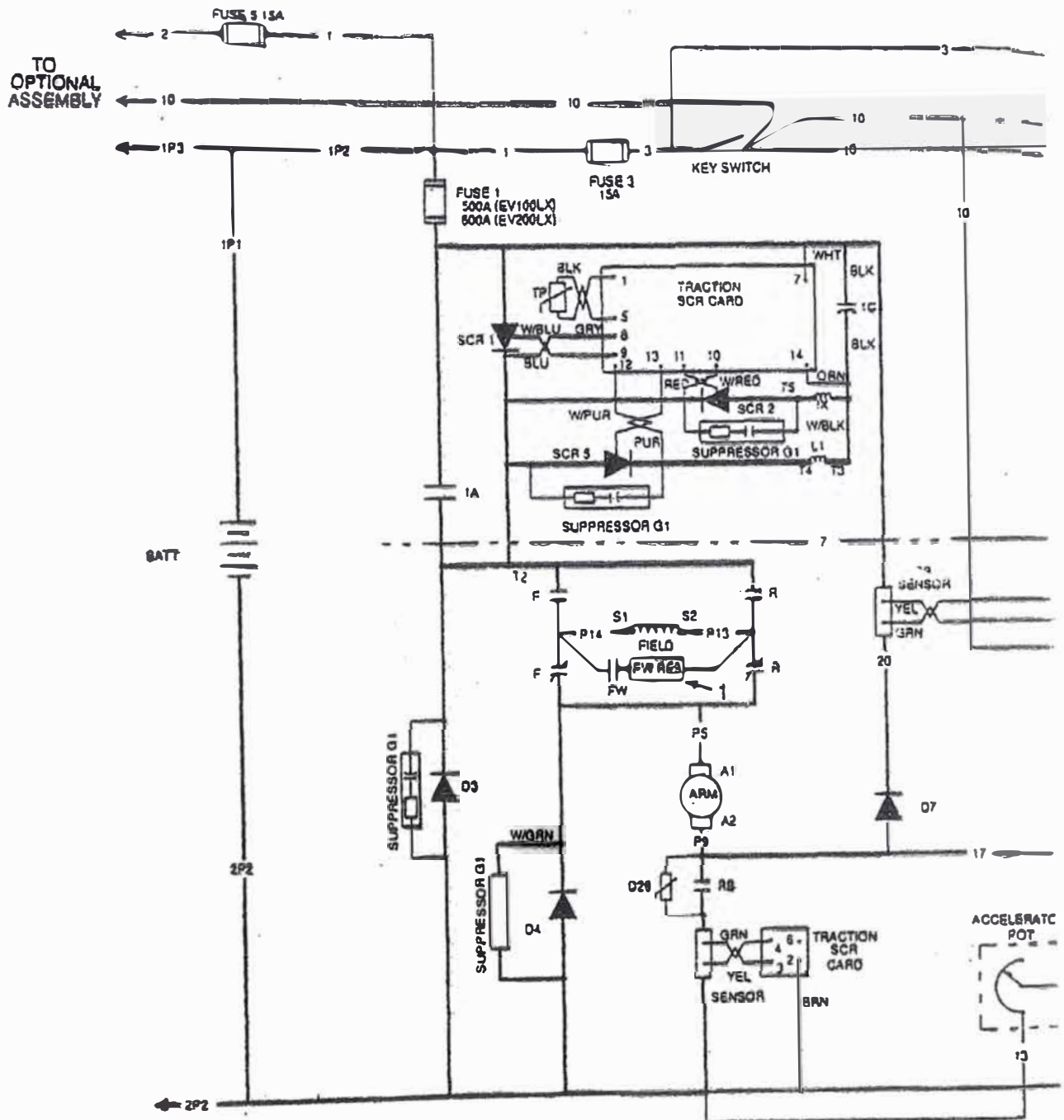


Figura 4.17  
 Diagrama de principio del controlador EV100 de General Electric

## **CAPITULO V**

### **DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS DE SELECCIÓN**

#### **5.1 Datos generales.**

<b>Carga muerta</b>	<b>: 5 TM</b>
<b>Carga útil</b>	<b>: 15 TM</b>
<b>Carga de diseño total</b>	<b>: 20 TM</b>

#### **Características del recorrido:**

- **Tramo 1: 408 m de longitud de recorrido y pendiente 0%**
- **Tramo 2: 72 m de longitud de recorrido y pendiente +2.08%**
- **Tramo 3: 216 m de longitud de recorrido y pendiente 0%**
- **Tramo 4: 72 m de longitud de recorrido y pendiente - 2.08%**
- **Tramo 5: 288 m de longitud de recorrido y pendiente 0%**
- **Tramo 6: 204 m de longitud de recorrido y pendiente +2.450%**

**Longitud efectiva total: 1,240 m (incluyendo 20 m para parqueo)**

**Tipo de riel : 115 Lbs/yarda**

Ancho de trocha	: 1.8 m.
Diámetro útil de las ruedas	: 12"
Número de ruedas	: 8
Ruedas con tracción	: 2
Medidas de la plataforma	: 4 x 10 x 0.2 m
Área frontal de carga	: 5.4 m <sup>2</sup>
Condiciones de Servicio	: Uso en exteriores a nivel del mar
Velocidad recomendada	: 3.6 km/h
Frecuencia de uso	: 2 viajes de ida y vuelta c/ 45 ó 60 días
Tensión disponible para cargador	: 220V/3 fases/60 Hz

Para mayor referencia se incluyen planos en Anexos.

## 5.2 Determinación de la aceleración promedio lineal

De la ecuación (4,27):

$$a_m = \varepsilon \mu_o g \left( \frac{n_t}{n_r} \right)$$

$n_t \Leftrightarrow$  Número de ruedas tractoras = 2

$n_r \Leftrightarrow$  Número total de ruedas = 8

$g = 9.81 \text{ m/seg}^2$

$\varepsilon = 0.75$

A falta de antecedentes escogemos un factor de adherencia inicial conservador

$$\mu_0 = 0.2$$

Reemplazando datos , la aceleración máxima admisible resulta:

$$a_m = 0.367 \text{ m /seg}^2$$

En los controles electrónicos modernos la respuesta de aceleración es un parámetro programable en un amplio margen pero el rampa de aceleración se suele ajustar a valores seguros de modo que la aceleración en promedio resulta ser de entre la 3ra y 4ta parte de la máxima admisible. De modo que para efectos de cálculo podemos considerar la aceleración media como:

$$a = 0.09 \text{ m / seg}^2$$

El tiempo para alcanzar la velocidad de régimen desde cero, lo obtenemos de las conocidas formulas de movimiento lineal uniformemente acelerado :

$$V = at$$

Siendo:

$$V = 1 \text{ m/seg}$$

El tiempo de aceleración:

$$t = 11 \text{ seg}$$

Del mismo modo, el espacio en metros, recorrido durante ese tiempo:

$$E = at^2$$

De donde:

$$E = 5.4 \text{ m}$$

### 5.3 Determinación de la potencia impulsora

Debemos calcular primero las resistencias específicas.

La resistencia específica en recta horizontal la calculamos de la ecuación (1.10), pero sin considerar la influencia del viento, debido a que corresponde a maquinaria con características aerodinámicas que no se ajustan a la presente aplicación.

$$r_h = 0.65 + \frac{13.15}{p} + 0.00932 V$$

$$V = 3.6 \text{ Km/h}$$

$$P = \text{peso por eje en TM} = 20/4 = 5 \text{ TM}$$

reemplazando datos:

$$r_h = 3.31 \text{ kg/TM}$$

La resistencia específica debida al viento, la determinamos aplicando la Fórmula (1.15) que corresponde a equipos de área frontal más bien plana lo cual se asemeja a nuestro caso.

$$r_v = \frac{5A_w}{P E}$$

$A_w$  = Superficie efectiva expuesta al viento en  $\text{ft}^2$  (Ver figura 5.1)

$E$  = Factor de eficiencia mecánica. = 0.97 para cojinetes antifricción(CMAA)

$P$  = Peso total del vehículo en Ton (Toneladas cortas) = 22.

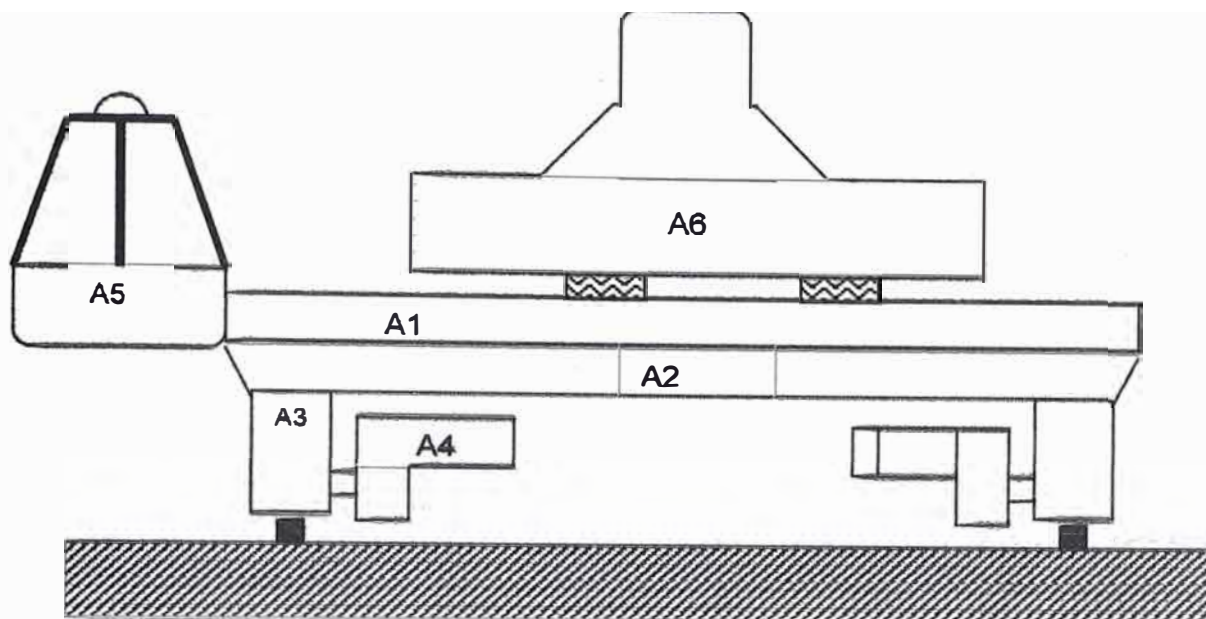


Figura 5.1  
Área frontal expuesta al viento

$$\begin{aligned} A1 &= 1.2 \text{ m}^2 \\ A2 &= 1.14 \text{ m}^2 \\ 2 \times A3 &= 0.3 \text{ m}^2 \\ 2 \times A4 &= 0.32 \text{ m}^2 \\ A5 &= 1.41 \text{ m}^2 \\ A6 &= 5.4 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

El área frontal total expuesta al viento :

$$A_t = 9.77 \text{ m}^2$$

Teniendo en cuenta el efecto de succión debemos multiplicar el área total por el factor 1.2 para determinar el área efectiva (CMAA)

$$A_w = 11.72 \text{ m}^2 \approx 126 \text{ Ft}^2$$

Reemplazando en (1.15) tendremos:

$$r_v = 29.5 \text{ kg/TM}$$

Según la fórmula (1.16) resistencia específica por pendiente:



$$r_p = h$$

Donde:

$h$  = elevación por 1000 m de trayectoria horizontal ,

Luego:

$$p_1 = 2.08\% \Leftrightarrow h_1 = 0.0208 \times 1000$$

$$p_2 = 2.45\% \Leftrightarrow h_2 = 0.0245 \times 1000$$

Luego:

$$r_{p1} = 20.8 \text{ Kg / TM}$$

$$r_{p2} = 24.5 \text{ Kg / TM}$$

La resistencia específica por aceleración, de acuerdo a fórmula (1.22)

$$r_{ac} = \frac{1000 a \beta}{g}$$

Donde:

$$a = 0.09 \text{ m/seg}^2$$

$$g = 9.81 \text{ m/seg}^2$$

$$\text{Eligiendo } \beta = 1.08$$

$$r_{ac} = 9.9 \text{ Kg / TM}$$

El esfuerzo de tracción en Kg de acuerdo a la ecuación (1.8):

$$F = r p$$

Donde:

$r$  = resistencia específica equivalente total en Kg / TM

$p$  = peso adherente en TM

Calculamos la potencia para cada tramo, aplicando las resistencias específicas correspondientes y la ecuación (1.6). Expresando la potencia en HP, el esfuerzo de tracción  $F$  en Kg, y la velocidad  $V$  del vehículo en m/seg

$$HP = 0.01315 F V \quad (5.1)$$

El primer tramo será ahora el espacio recorrido durante la aceleración desde el reposo hasta alcanzar la velocidad de régimen (1m/seg) en 11 seg. recorriendo una distancia de 6 m. A partir de allí, consideramos que el vehículo mantiene la velocidad constante. Con las ecuaciones de movimiento lineal uniforme, determinamos el tiempo "t" de recorrido para los distintos tramos. (Tabla 5.1)

Tabla 5.1  
Potencia requerida por cada tramo de recorrido

Tramo	r actuante	tiempo (min.)	Tiempo acumulado (min.)	r (Kg/TM)	F (Kg)	HP
1	rh+rv+rac	0.18	0.18	42.71	854	11.2
2	rh+rv	7.4	7.58	32.81	656	8.6
3	rh+rv+rp1	1.2	8.78	53.61	1072	14.1
4	rh + rv	3.6	12.38	32.81	656	8.6
5	rh+rv - rp1	1.2	13.58	12.01	240	3.1
6	rh+rv	4.8	18.38	32.81	656	8.6
7	rh+rv+rp2	3.4	21.78	57.31	1146	15

Ahora, podemos determinar una potencia eficaz equivalente de acuerdo a la siguiente expresión:

$$HP = \sqrt{\frac{HP_1^2 t_1 + HP_2^2 t_2 + HP_3^2 t_3 + HP_4^2 t_4 + HP_5^2 t_5 + HP_6^2 t_6 + HP_7^2 t_7}{T}} \quad (5.2)$$

Donde:

HP = Potencia eficaz equivalente en HP

$t_n$  = tiempo de duración del tramo n en minutos

HP<sub>n</sub> = Potencia del tramo n en HP

T = Tiempo total =  $\sum t_n$  en minutos

La potencia eficaz equivalente es una buena aproximación para la selección de la potencia y es recomendada por la mayoría de fabricantes de motores eléctricos tanto de AC como DC para cargas de comportamiento variado no uniforme. Esto se debe a que esta fórmula guarda una ajustada relación de proporcionalidad con la sobre temperatura, la cual, es la que finalmente limita la potencia que puede desarrollar el motor.

Sin embargo, el método de potencia eficaz equivalente no deja de ser una valoración de promedios, por lo tanto cuando se aplica, siempre debe verificarse que en ninguna etapa del ciclo de operación del motor, se superen las características de par ni los límites térmicos.

Reemplazando valores obtenemos:

HP = 10 HP

Como se trata de 2 ruedas de tracción, cada una tendrá que ser impulsada por un motor de 5 HP de régimen de 1 hora . Estos motores pueden desarrollar cada uno 9.5HP durante 5 minutos. Verificando en la tabla 5.1 y con los valores calculados vemos que superamos holgadamente las exigencias de limitación térmica

#### 5.4 Determinación del Máximo torque de operación

Debemos establecer primero la relación de reducción de la transmisión mecánica.

Sea:

$$G = \text{Relación de reducción} = \frac{(N1)}{N2}$$

Donde:

N1 = Velocidad angular nominal del motor en RPM

N2 = Velocidad angular a velocidad de régimen del vehículo en RPM

De la ecuación (1.5) despejamos la velocidad tangencial, y expresando la velocidad angular en RPM tendremos en la rueda:

$$V2 = \frac{2\pi N2R}{60}$$

Donde:

R = Radio de la rueda en m.

V2 = Velocidad de régimen del vehículo en m/seg

Como:

$$N_2 = N_1 / G$$

Despejando:

$$G = \frac{(2\pi N_1 R)}{60 V} \quad (5.3)$$

Si elegimos un motor DC de 3200 RPM a régimen nominal, reemplazando datos:

$$G = 51$$

Es decir que el reductor deberá tener una relación de reducción de 51: 1

El máximo torque  $T_m$ , exigido a cada motor, ocurre durante el mayor esfuerzo de tracción en la rueda:

$$T_m = F R = \frac{(1146)}{2} \times 0.1524 \text{ kg-m}$$

$$T_m = 87.3 \text{ kg-m}$$

En cada motor, considerando la relación de reducción:

$$T_m = 87.3 / 51 = 1.71 \text{ Kg.-m}$$

El torque nominal  $T_n$  del motor en Kg.-m lo calculamos a través de la ecuación (1.4) expresando la potencia en HP y la velocidad angular en RPM en sus valores nominales:

$$T_n = 726 \left( \frac{HP_n}{RPM_n} \right) \quad (5.3)$$

Resulta :

$$T_n = 1.13 \text{ kg-m}$$

La relación de torque máximo a torque nominal:

$$\frac{T_m}{T_n} = 1.51 < 1.65$$

En síntesis, se usarán dos motores de tracción de devanado serie de 5 HP en régimen horario, 36VDC, y 3,200 RPM nominales, acoplados a moto reductores helicoidales de ejes paralelos con relación de reducción 51:1. Además los motores deben cumplir con lo siguiente:

- Adecuados a uso vehicular
- Hermeticidad contra lluvia y polvo y adecuado para uso en exteriores (ejemplo: NEMA 3 ó IP54)
- Autoventilado
- Forma constructiva para montaje horizontal sin patas, con doble brida. En lado de acoplamiento para montaje de reductor (ejemplo: B5 o B14), y lado opuesto al acoplamiento para montaje de freno
- Doble eje de salida
- Adecuado para uso con ondas recortadas
- 

### 5.5 Determinación del esfuerzo de frenado

De la ecuación (4.29): El esfuerzo de frenado máximo  $F_{md}$  en Kg:

$$F_{md} = 1000 \mu p$$

Donde:

$\mu$  = Es adherencia a la velocidad de marcha

$p$  = Peso total adherente en TM

Como:

$$\mu_0 = 0.2$$

de la gráfica de la figura 1.5,

$$\mu / \mu_0 = 0.97$$

Entonces, la adherencia a la velocidad de 3.6 km/h con una adherencia inicial  $\mu_0$  de 0.2:

$$\mu = 0.194$$

Para no producir resbalamiento aplicando (4.27):

$$a_m = \frac{\mu g n r}{n r}$$

$$a_m = 0.357 \text{ m /seg}^2$$

Para tener un valor seguro consideramos la tercera parte

$$a_f = 0.119 \text{ m /seg}^2$$

Al igual que en el caso de la aceleración, calculamos el tiempo y la distancia recorrida con las fórmulas de movimiento acelerado uniforme obteniendo:

$$t_d = 8.4 \text{ segundos}$$

$$E = 4.2 \text{ m}$$

De acuerdo a CMAA,, el espacio de frenado recorrido para la velocidad 60 m/min debe ser inferior a 6m.

El esfuerzo de frenado  $F_f$  en Kg de acuerdo a la fórmula (4.31):

$$F_f = \frac{(1000 \cdot a_f \pm h - r) \rho \gamma}{g}$$

El caso más desfavorable sucederá bajando por la pendiente más inclinada,

Luego:

$$F_f = \left( \frac{1000 \times 0.119}{9.81} + 24.5 - 3.31 \right) \times 20 \times 1.1 = 733 \text{ Kg}$$

Este esfuerzo de frenado debemos aplicarlo a las ruedas. Como , en nuestro caso, el esfuerzo de frenado se ejercerá sobre el eje de cada uno de los 2 motores, tomando en cuenta el factor de reducción, tendremos:

$$F_f = \frac{733}{2 \times 51} = 7 \text{ Kg}$$

Este valor está dentro de los rangos de operación de un frenado hidráulico a palanca o pedal

## 5.6 Determinación de la capacidad de la batería

La capacidad de la batería la determinaremos de acuerdo a la fórmula (2.1):

$$AHT = f_s \times f_m \times f_t \times f_e \times f_o \times f_r \times AHC$$

Cada motor de 5HP, 36VDC, a régimen nominal, considerando una eficiencia de 0.82 consumirá una corriente de:

$$I_n = \frac{5 \times 746}{36 \times 0.82} = 126 \text{ Amp}$$

Para ambos motores será:

$$I = 252 \text{ Amp}$$



Como el recorrido se hace en aproximadamente 22 minutos  $\approx 0.367$  horas, los

Amperes-hora:

$$AH = 92.5 \text{ A-h}$$

En 2 viajes de ida y vuelta :

$$AHC = 92.5 \times 4 = 370 \text{ A-h}$$

El factor de sobre descarga  $f_s = 1.25$

El factor por bajas temperaturas  $f_t$  no se aplica

El factor de mantenimiento  $f_m = 1.15$

El factor de envejecimiento  $f_e$ , dada la baja frecuencia de uso no se aplica

El factor de régimen, según la figura 2.7 para un tiempo de  $0.367 \times 4 \approx 1.5$  horas, será de 70%, por lo cual:

$$f_r = 1 / 0.7 = 1.43$$

El factor de fluctuación solo es relevante para fluctuaciones mayores a 3 por lo cual, para el presente caso, no se aplica

Luego:

$$AHT = 1.25 \times 1.15 \times 1.43 \times 370$$

$$AHT \approx 760 \text{ A-h}$$

Debemos seleccionar una batería comercial de plomo ácido para tracción, que iguale ese valor en régimen de 6 horas. Y cuyas dimensiones se ajusten al espacio disponible.

## 5.7 Elección del cargador de batería

Debido a su robustez, inmunidad a las fluctuaciones de línea, escasa necesidad de mantenimiento y bajo costo, recomendamos un cargador estático ferro resonante monofásico de operación automática, con las siguientes características:

Capacidad 760 A-h, a régimen de carga de 6 horas

Tensión de alimentación = 220VAC/ 1 / 60Hz,

Tensión de salida = 36 VDC

Debe tener además:

- Autoencendido con retardo mínimo de 5 segundos
- Taps de ajuste para tensión hasta  $\pm 8\%$
- Salida regulada  $\pm 1\%$  para variaciones de entrada  $\pm 10\%$
- Capacidad de carga equalizadora
- Auto refrigeración
- Ajuste automático de régimen de carga inicial y final
- Apagado automático

## **5.8 Elección del control de la velocidad**

Control electrónico de uso vehicular, adecuado para operar con motores de tracción de devanado serie y de corriente continua alimentados con batería

Debe tener además las siguientes características

- Tensión de operación 36VDC
- Capacidad de suministro de potencia de 10 HP o superior

- Programación de rampa de aceleración
- Programación de rampa desacelerante
- Frenado regenerativo
- Protección contra sobre temperatura
- Limitación de Máxima corriente
- Calibración de torque de arranque
- Calibración de torque mínimo
- Protección contra cambio brusco de dirección de marcha (plugging)
- Auto inhibición por malfuncionamiento o falla
- Funciones de inhibición por señal externa y soldadura de contactos

### **5.9 Costos de inversión**

En esta sección se presenta en forma tabulada (tabla 5.2) un costo de inversión referencial del equipamiento eléctrico puesto en almacenes de Lima, tomando en cuenta solamente los equipos esenciales para la operación del vehículo y en base a precios de lista actuales de algunas marcas, que a nuestro entender son representativas en el mercado internacional. No incluyen el impuesto general a las ventas. Debemos mencionar, que el valor venta de algunos equipos, puede diferir de los que aquí presentados, en función de las políticas comerciales de cada compañía y del momento de la transacción. Sin embargo, para los fines del presente trabajo, los costos aquí incluidos dan una buena aproximación. Algunos de los componentes que, aunque se incluyen,

no se detallan, pueden ser apreciados en forma gráfica en los anexos adjuntos.

Tabla 5.2  
Costos de inversión

Item	Descripción	cant	Costo unitario US \$	Costo total US\$
1	General electric EV-panel	1	2,150.00	2,150.00
2	Módulo acelerador	1	440.00	440.00
3	Kit de accionamiento de acelerador	1	1,050.00	1,050.00
4	Contactador de marcha Adelante-atrás 350 Amp, 36VDC	1	640.00	640.00
5	Contactador principal 350 Amp 36 VDC	1	205.00	205.00
6	Switch direccional	1	360.00	360.00
7	Motores impulsores 5 HP-hora, 36 VDC, 3200RPM	2	3,100.00	6,200.00
8	Kit de frenado hidráulico	1	1,570.00	1,570.00
9	Reductor helicoidal, 5HP, 51:1, ejes paralelos	2	2,360.00	4,720.00
10	Batería 760 A.H, 36V	1	4800.00	4,800.00
11	Cargador Ferrorresonante monofásico, 760 A-h 36VDC, 220VAC, 60hz	1	2,800.00	2,800.00
12	Fusibles y potafusibles 350 Amp, 120VDC	1	80.00	80.00
<b>PRECIO TOTAL PUESTO EN ALMACEN - LIMA</b>				<b>25,015.00</b>

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

- 1. Las aplicaciones de motores de corriente continua con control de velocidad, a pesar de los avances tecnológicos y las ventajas que pueden ofrecer los motores de corriente alterna, a la fecha siguen siendo una alternativa viable a tener en cuenta, sobre todo en aplicaciones de tracción para vehículos eléctricos y en rangos similares al caso presente.**
- 2. El estudio de las baterías de plomo ácido en particular y de los acumuladores eléctricos en general, así como el conocimiento de los métodos para su dimensionamiento y selección puede ser una útil herramienta para el ingeniero proyectista o constructor de maquinarias y equipos que deban tener algún tipo de autonomía respecto a las fuentes de suministro de energía convencionales**
- 3. La utilización de motores serie de corriente continua en la presente aplicación, responde, aparte de su confiabilidad y buena performance, a la disponibilidad comercial actual de estos, así como de los controles de velocidad que operan en conjunción a ellos, sin embargo esto no quiere decir que no pueda utilizarse otras alternativas, por ejemplo motores de corriente alterna con controles de velocidad que inviertan la tensión continua**

en alterna. Siempre y cuando sean adecuados para aplicaciones de tracción de vehículos en movimiento. Los cálculos presentados aquí para el dimensionamiento de la potencia impulsora así como de la capacidad de la batería y otros, son igualmente válidos para este caso.

4. La baja fricción en la marcha de vehículos sobre rieles de acero, hace que se pueda utilizar motores de relativamente pequeñas potencias para poner en movimiento grandes masas, por ejemplo una locomotora minera provista de un motor de 5HP dependiendo de su peso adherente, puede arrastrar una carga de 40 TM, Por esa razón, equipar maquinaria de este equipo con accionamiento eléctrico resulta relativamente económico. Mas que la fricción son las pendientes las que exigen mayores suministros de potencia, por lo cual en la medida de lo posible deben evitarse.

### **Recomendaciones**

1. El estudio y análisis de los acumuladores eléctricos merecen una mayor atención en los programas curriculares de estudios superiores a nivel de ingeniería electromecánica eléctrica y electrónica pues constituyen una fuente de suministro de energía y una tecnología que viene desarrollando avances y presentando importantes logros de manera sostenida desde hace algunas décadas, y son hoy en día motivo de mucha investigación y expectativa futura.

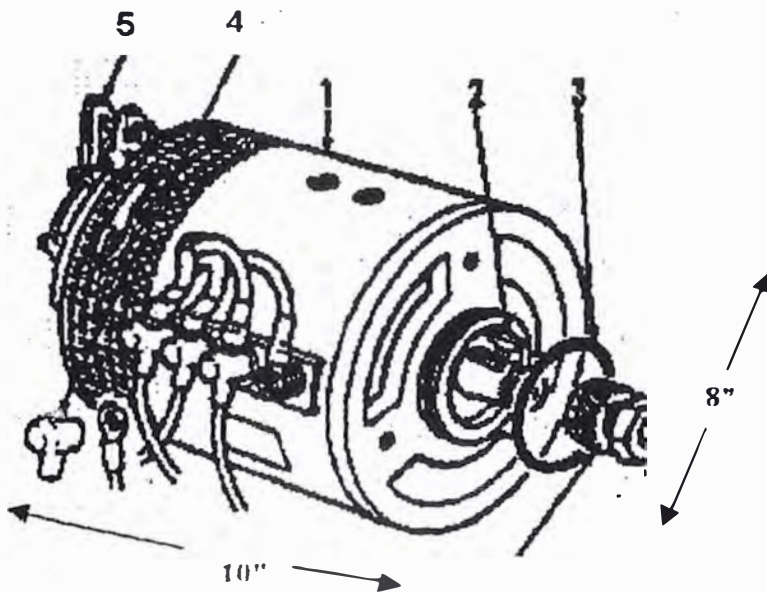
2. **Resulta recomendable el estudio de la tracción eléctrica en los programas curriculares de los estudiantes de mecánica y de electricidad por ejemplo en la Universidad Nacional de Ingeniería, puesto que en la actualidad en un mercado cada vez mas competitivo, el ingeniero o diseñador debe tener un conocimiento mejor integrado de los aspectos esenciales que inciden en el cálculo y dimensionamiento de un sistema conformado por elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos. No siempre es posible, competitivo, ni necesario tener que contar con un especialista para cada campo, Como en el caso presente, el hecho de poder analizar con razonable rigurosidad los parámetros que inciden por ejemplo en la potencia mecánica necesaria en la aplicación, permiten seleccionar con un mayor margen de confiabilidad los motores, los controles electrónicos de velocidad y la Energía eléctrica suficiente para hacer el proyecto viable.**

## **ANEXOS**



## ANEXO A

### MOTOR SERIE DC



**Yale**

Electric Powered

- 1.- Carcaza estatorica
- 2.- Eje con canal chavetero
- 3.- Acoplamiento flexible
- 4.- Ventilación forzada
- 5.- Frenado de zapata

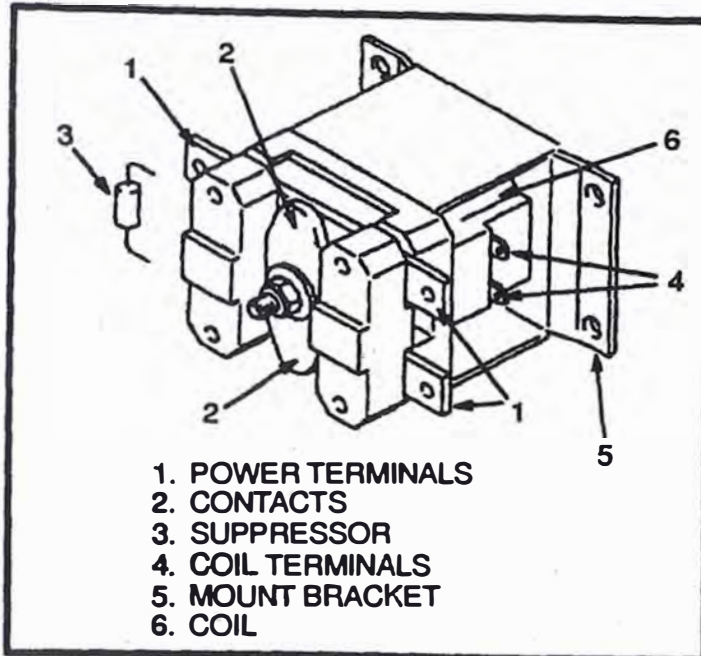
### Dual Drive Motors

**Motores de corriente continua diseñados y fabricados por Yale específicamente para el ERP-TF individualmente montados para un facil servicio cada motor de 8" de diametro es bobinado en serie para un alto torque y es diseñado para soportar altas temperaturas (aislamiento clase "H")**

**Cuatro bornes de salida para giro reversible**

## ANEXO B

### CONTACTORES EN DC PARA EQUIPO DE TRACCION



Typical Contactor Assembly

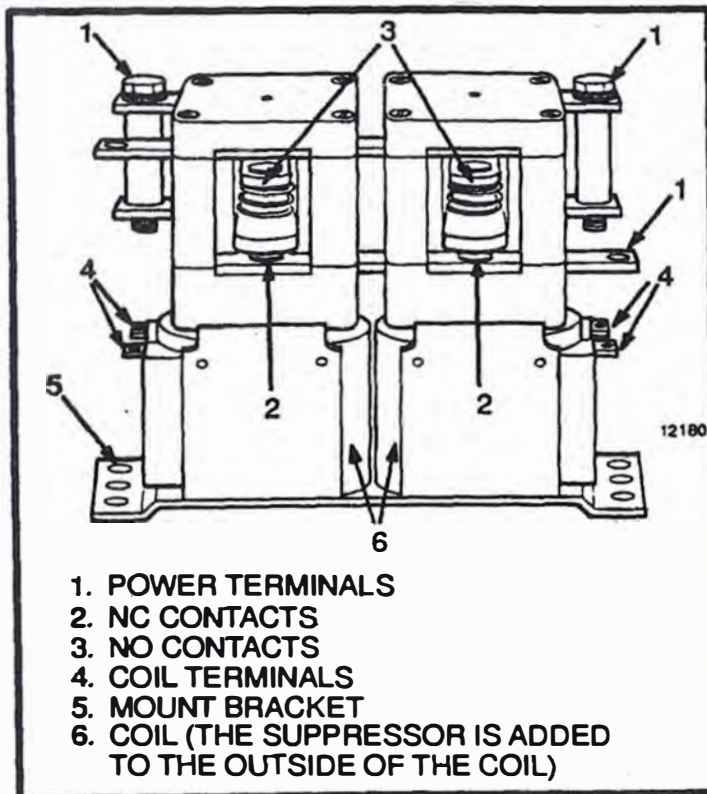


Figure 3-38. Direction Contactor

# ANEXO E

## TIPICO CARGADOR FERRORRESONANTE COMERCIAL

# G N B

## FER 100 CHARGER

**RATING:** Conservatively rated to recharge any 100% discharged battery in its ampere hour rating within eight hours.

**REGULATION:** Line and load regulated. Finish-rate voltage held within +/-1% with line voltage variations of +/-10%.

**WARRANTY:** 10 year limited warranty to original purchaser on power parts. 4 years on all other charger parts (including control boards), excluding fuses.

**SERVICE:** Available worldwide.

### CONTROL FEATURES:

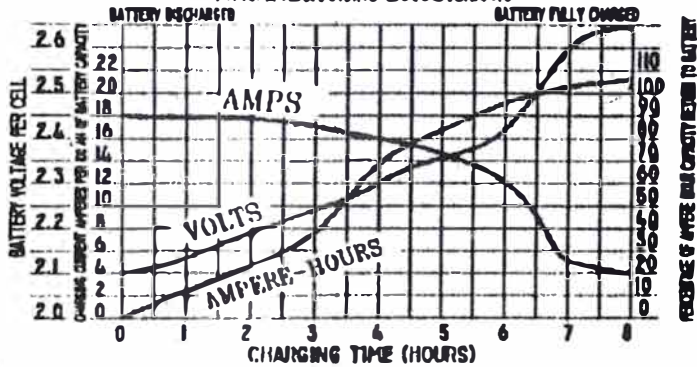
- HOURS DELAY AUTO START
- dV / dt - dI / dt TERMINATION
- EQUALIZE CHARGE SELECT
- BATTERY / CHARGER MIS-MATCH PROTECTION
- PUSH TO TEST LED
- AUTOMATIC REFRESH
- BACKUP TIMER PROTECTION
- DIGITAL AMMETER
- FAULT DIAGNOSTICS



### FER 100

#### FERRORRESONANT CHARGER

#### TYPICAL RECHARGING CHARACTERISTIC



The graph shown illustrates the typical recharge characteristics of the FER 100 Ferroresonant charger.

The starting current gradually tapers to a safe finish rate as the amp-hours returned to the battery increase. dV/dt - dI/dt termination is provided to prevent the charge being terminated prior to the battery being fully charged.

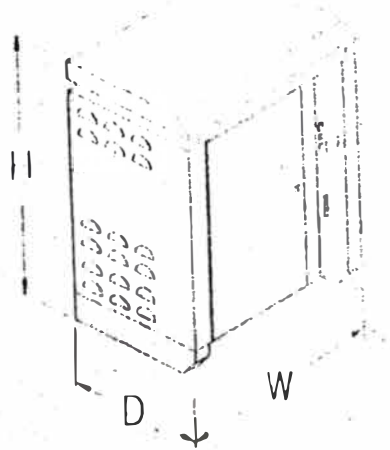
The battery itself determines its own charge cycle in relation to its own state-of-discharge, and therefore battery damage by overcharging is minimized with ferroresonant circuitry.

## CHARGER DIMENSIONS

CASE	DEPTH		HEIGHT		WIDTH	
	In	mm	In	mm	In	mm
A	12.50	318	20.50	521	15.00	381
B	18.65	474	26.00	660	22.63	575
C	22.00	559	26.00	660	32.00	813

All charger models have been engineered to provide easy access to internal connections and components.

All chargers have an efficient cabinet design and are stackable to conserve valuable floor space.



TIPICO CARGADOR COMERCIAL DE ESTADO SOLIDO

**GNB's SCR-100  
Silicon Controlled Rectifier  
Charger**



**Application**

Silicon Controlled Rectifier charger conservatively rated to recharge any fully discharged sealed or flooded battery, in its ampere-hour rating, within eight hours.

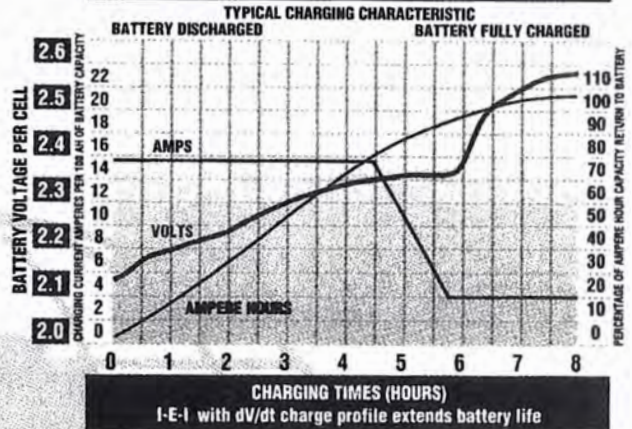
**Regulation**

Line and load regulated. Finish-rate voltage held within +/-1% with line voltage variations of +/- 10%.

**Warranty**

Chargers have a 10-year limited warranty to purchaser, including a 3-year full warranty on parts and labor on all components and 1 additional year on parts only (except fuses). For more specific information, see GNB's Warranty Statement GB-3654.

**THE GNB SCR-100  
SILICON CONTROLLED RECTIFIER CHARGERS**



**SCR-100  
Advanced Charge Profile**

**Prevents Under and Over Charging:**

GNB's SCR-100 chargers utilize an "I-E-I" (constant current-constant voltage-constant current) charge profile. Charging begins with a low 15.5 amps/100 AH start rate and a tightly controlled voltage level during the critical gassing phase of recharge.

Supplying precise electronic control over high and low rate charging currents, each charge cycle length is determined by battery voltage levels. This ensures your battery will receive the optimum charge regardless of input voltage fluctuations or variations in site conditions. Once the battery's voltage stabilizes, charge is terminated by dV/dt, in order to protect against over charging.

**Provides Higher Efficiency:**

The proven I-E-I profile used by GNB's SCR-100 charger is the fastest and most reliable recharge for your battery. By determining exactly what your battery needs, the SCR-100 provides electronic control over the voltage output, providing more efficient power usage.

**Extends the Life of Your Battery:**

The constant voltage phase of recharge features tightly controlled voltage during the critical gassing stage. For Champion® sealed maintenance-free batteries, this precise charge control is absolutely necessary to protect against battery damage. For conventional flooded batteries, this means less heat build-up and significantly less battery watering is required.

TECHNICAL DATA

## **Bibliografía**

1. **George MC Pherson, Introducción a las Máquinas eléctricas . Primera edición U.S.A.**
2. **Alexander S. Langsdorf, Principios de máquinas de corriente continua. Sexta edición. U.S.A,**
3. **Cyril G. Veinott, Fractional Horsepower electrical motors. Tercera edición U.S.A.**
4. **Ing. Guido León Clavijo, Vías Ferreas, Apuntes de la materia. Universidad Técnica de Oruro. Bolivia**
5. **Francisco Togno, Ferrocarriles, Primera edición México**
6. **D.H. Hinde y H.E. IngHam, Principles of direct current electric Traction segunda edición U.S.A.,**
7. **José Ramírez Vasquez., Acumuladores. Manual CEAC de electricidad. Segunda edición España**
8. **José Ramírez Vasquez, Pilas y acumuladores eléctricos. Manual CEAC de electricidad. Segunda edición España**
9. **Emilio Larrodé y Antonio Miravete, Grúas primera Edición España.**
10. **CMAA – Crane manufacturerers Asociation of América Inc, División of material Handling Industriy U.S.A.**
11. **Robert L. Mott, Machine Elements in Mechanicals design U.S.A.**

### **Catálogos:**

- **Yale Industrial Trucks –Yale Service Training Department U.S.A.**
- **GNV Technologies Inc. Batory and Chargers Bulletins U.S.A.**
- **General electric Inc. SCR Divicion Bulletins U.S.A.**
- **Investigaciones Mineras Metalúrgicas Web page - Perú**