

# Capítulo III

## El sistema eléctrico del automóvil

### 3.1 Introducción

En el capítulo anterior se analizaron algunos convertidores de energía eléctrica trifásica. Estos circuitos presentan bajo factor de potencia, lo cual va en contra de los objetivos de la presente tesis. Cabe recordar que uno de los objetivos primordiales, es corregir el factor de potencia en las líneas del alternador. Esto genera que el consumo de combustible se reduzca considerablemente, lo cual se sustenta y explica con detalle en éste capítulo. Por lo tanto, medio ambiente no se ve tan afectado, ya que la emanación de gases carburantes, es uno de los principales contaminantes en el mundo. De ésta manera, los recursos no renovables como el petróleo, no se ven tan afectados y pueden utilizarse para otros fines.

Un segundo objetivo, es la generación de dos niveles de voltaje de CD distintos entre si. Dicho de otra forma, se obtiene una fuente asimétrica de CD. La construcción de ésta nueva fuente, es debido a que las necesidades y funciones de un automóvil han aumentado gradualmente y requieren de más energía que en el pasado. Dichas funciones son; vibraciones en los asientos, equipos de audio de mayor potencia, calefacción, vidrios eléctricos, etc.

Es por esto que se requiere estudiar el funcionamiento del sistema eléctrico del automóvil. La red eléctrica de un vehículo moderno se divide en siete partes fundamentales [13].

- ✓ El sistema de generación y carga de la batería
- ✓ El sistema de marcha
- ✓ El sistema de ignición o encendido
- ✓ El sistema de iluminación
- ✓ El sistema del claxon (*horn system*)
- ✓ Los aparatos eléctricos (cargas eléctricas)
- ✓ El tablero indicador electrónico

Estos sistemas están relacionados uno con otro. Deben funcionar correctamente, de no ser así, repercuten en los demás. Sin embargo, este capítulo se limita a dar una explicación de cómo se genera y distribuye la energía eléctrica en el automóvil, así como el mejoramiento de éste. Este sistema consta de tres dispositivos fundamentales; el alternador, la batería y el regulador.

### **3.2 El alternador automotriz**

Para que coexistan voltaje y corriente en la red eléctrica del automóvil, se requiere que el motor esté encendido. Ya que a partir de los movimientos mecánicos que genera el motor, se obtiene energía eléctrica. Anteriormente, un automóvil utilizaba generadores de CD. Actualmente, el alternador ha sustituido completamente al generador de CD, debido a que el primero es más eficiente para la producción de energía [1].

El alternador, también conocido como generador sincrónico (Figura 3.1), obtiene energía eléctrica a partir de movimientos mecánicos. Este dispositivo, constituye la base del sistema de generación de electricidad. Un alternador estándar está constituido por dos elementos principales: el estator (*stator*) y el rotor, los cuales se muestran en la figura 3.2.



Figura 3.1 Alternador automotriz

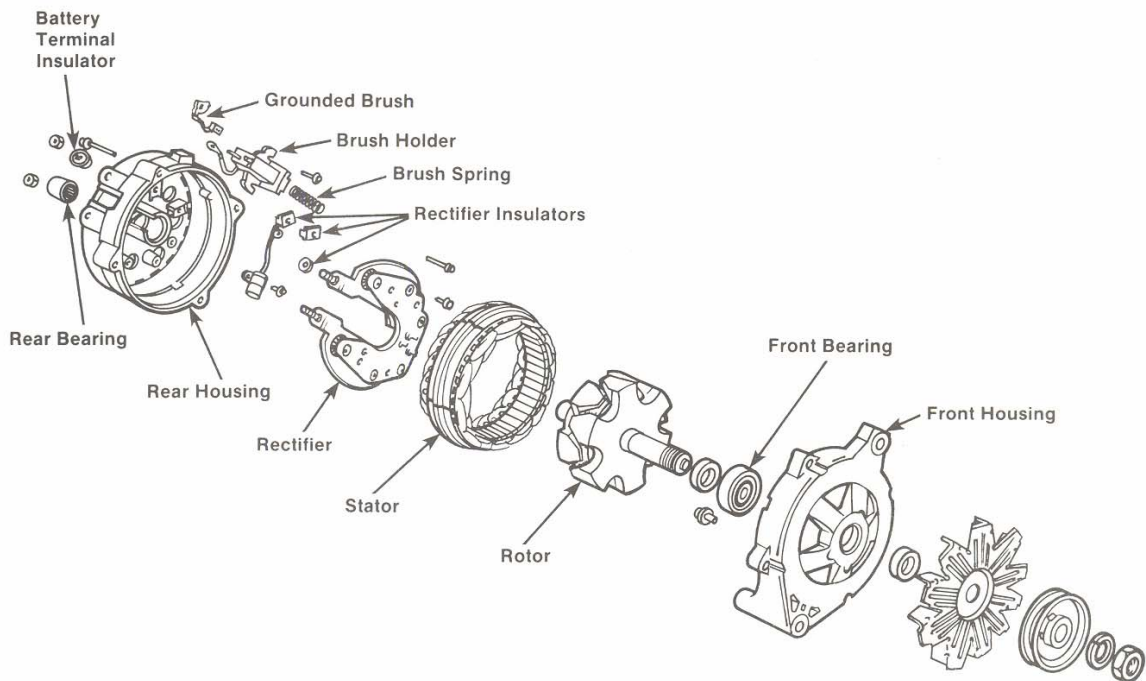


Figura 3.2 Vista de un alternador desmontado [11]

El rotor a su vez, está constituido por dos elementos principales: el devanado del rotor (*rotor coil*) y los polos magnéticos (*magnetic poles*).

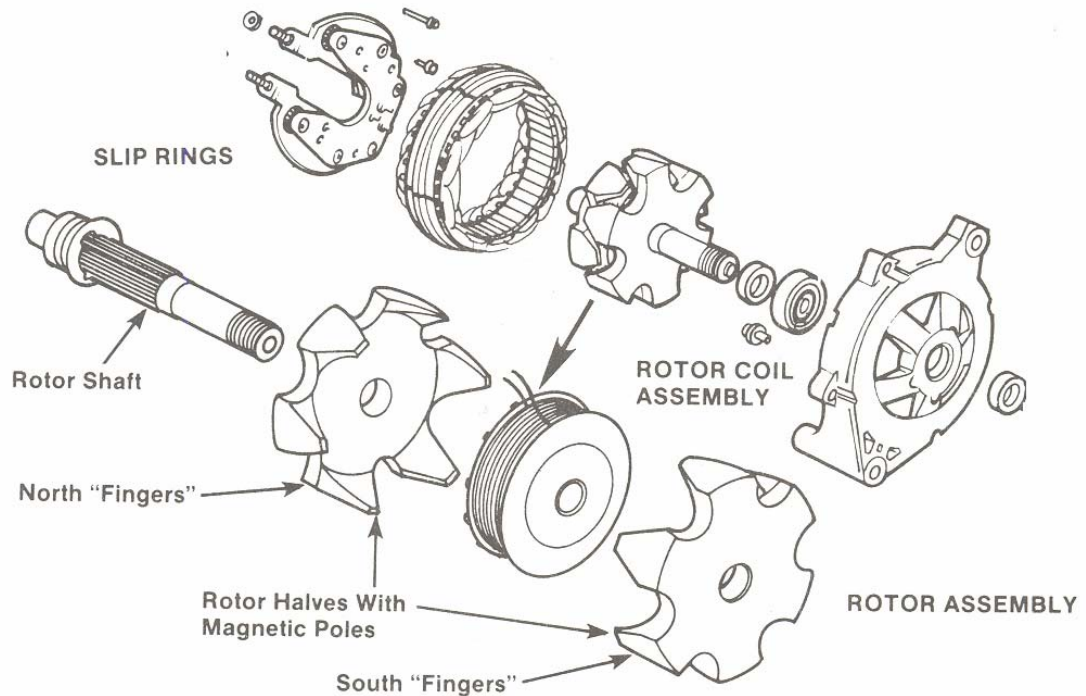


Figura 3.3 Ensamblaje del rotor [11]

El funcionamiento del rotor comienza cuando se aplica corriente directa al devanado del rotor, para que ésta corriente, junto con los polos magnéticos generen un campo magnético  $B$ . Subsiguientemente, la flecha del rotor (*rotor shaft*) gira con el propósito de que  $B$  sea rotacional. La magnitud de  $B$  es proporcional a la cantidad de corriente que circula por el devanado del rotor. La flecha gira por medio de una polea, la cual se adjunta al motor a través de la banda del alternador. Posteriormente,  $B$  induce cierto voltaje  $V_{ind}$  en el devanado del estator. La amplitud del voltaje inducido depende de la magnitud de  $B$ .

Los polos magnéticos que constituyen al rotor, pueden ser salientes o no salientes. Se utilizan salientes cuando existen tres o más pares de polos. Generalmente un alternador

automotriz posee en el rotor entre 6 y 8 pares de polos [14], por lo tanto éstos son salientes. El campo magnético fluye entre los pares de polos, generando que éste varíe con respecto al tiempo (sinusoidal). Por esta razón, el rotor se construye con láminas delgadas para evitar pérdidas por corrientes parásitas [1]. Por otro lado, se requiere de un dispositivo que proporcione corriente directa en el devanado del rotor, aún cuando éste se encuentre girando. Esto se logra mediante los aros deslizantes (slip rings). La corriente directa se obtiene a partir de la batería.

La otra pieza fundamental del alternador, es el estator. Este es un devanado en el cual se induce voltaje de CA, debido a que el campo magnético varía con respecto al tiempo. En un alternador automotriz, por lo general existen tres devanados estáticos separados entre sí 120° eléctricos, alrededor de la superficie de la máquina. Esto indica que se inducen tres voltajes, desfasados 120° entre sí (energía trifásica).

### **3.2.1 Relación entre frecuencia eléctrica y mecánica**

La relación que existe entre la frecuencia eléctrica de los voltajes inducidos ( $f_e$ ) y la velocidad de rotación de la máquina ( $f_m$ ) se encuentra mediante la siguiente fórmula:

$$f_e = \frac{P}{2} f_m \quad (3.1)$$

Donde  $P$  es el número de polos magnéticos, el cual siempre debe ser un número par. Ya que la frecuencia eléctrica está dada en Hz (ciclos por segundo), se requiere convertir la velocidad mecánica de rotación del alternador (revoluciones por minuto) en Hz. Esto se logra mediante la siguiente ecuación:

$$f_m = \frac{n_m}{60} \quad (3.2)$$

Donde  $n_m$  es la velocidad del campo magnético en revoluciones por minuto. Sustituyendo (3.2) en (3.1) se encuentra la relación correcta entre la frecuencia eléctrica y la velocidad de rotación del alternador:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (3.3)$$

### 3.2.2 Voltaje inducido en los devanados del estator

El voltaje inducido en los devanados estatóricos se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$V_{ind} = N_c \Phi w_m \sin(w_m t) \quad (3.4)$$

Donde  $N_c$  es el número de vueltas del devanado estatórico,  $\Phi$  es el flujo magnético en Webers ( $Wb$ ), que pasa a través del devanado y  $w_m$  es la velocidad angular de rotación de  $B$ . Tanto  $\Phi$  como  $w_m$  dependen de otras variables.

$$\begin{aligned} \Phi &= d l B_m \\ w_m &= \frac{2 w_e}{P} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde  $d$  es el diámetro del estator del alternador,  $l$  es la longitud del devanado en metros ( $m$ ),  $B_m$  es la densidad de flujo pico del campo magnético en Teslas ( $T$ ) y  $w_e$  es la frecuencia angular eléctrica en radianes por segundo  $Rad/S$ . Sustituyendo (3.5) en (3.4), se encuentra una nueva ecuación para el voltaje inducido.

$$V_{ind} = \frac{2 N_c d l B_m w_e}{P} \sin\left(\frac{2}{P} w_e t\right) \quad (3.6)$$

Donde  $w_e = 2\pi f_e$ . Como se puede observar, la frecuencia eléctrica de  $V_{ind}$  depende de la frecuencia mecánica del alternador. Por otro lado, la magnitud del voltaje inducido incrementa de acuerdo a lo siguiente [13]:

- 1)  $V_{ind}$  aumenta si la velocidad de rotación ( $w_m$ ) aumenta
- 2)  $V_{ind}$  aumenta si la densidad del flujo magnético ( $\Phi$ ) incrementa. Esta depende a su vez de los siguientes parámetros:
  - a) El número de vueltas ( $N_c$ ) y el tipo de alambre utilizado en el devanado del estator
  - b) El hueco de aire que existe entre los polos magnéticos del rotor y el estator
  - c) El voltaje aplicado al devanado del rotor que existe entre los aros deslizantes.

Dado que los alternadores automotrices generan energía trifásica, se requieren de tres devanados en el estator, separados  $120^\circ$  eléctricos entre si. La conexión de estos devanados puede ser mediante dos formas; delta o estrella.

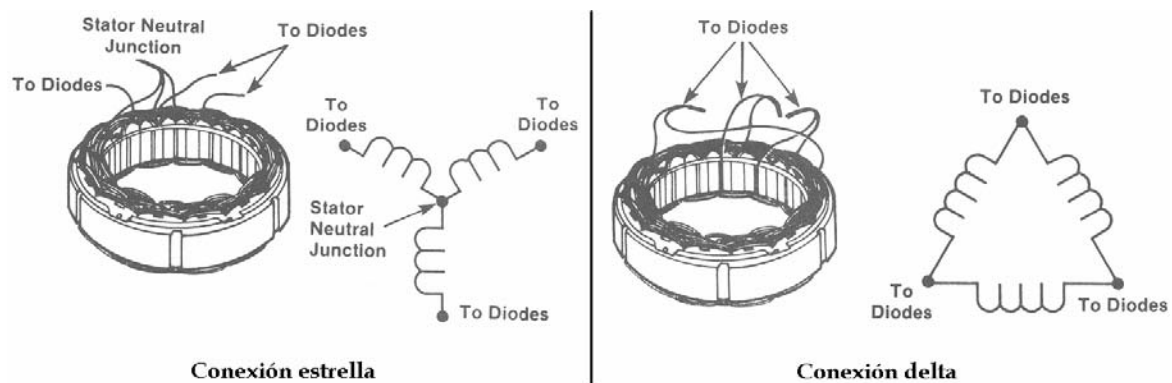


Figura 3.4 Conexiones de los devanados estatóricos [11]

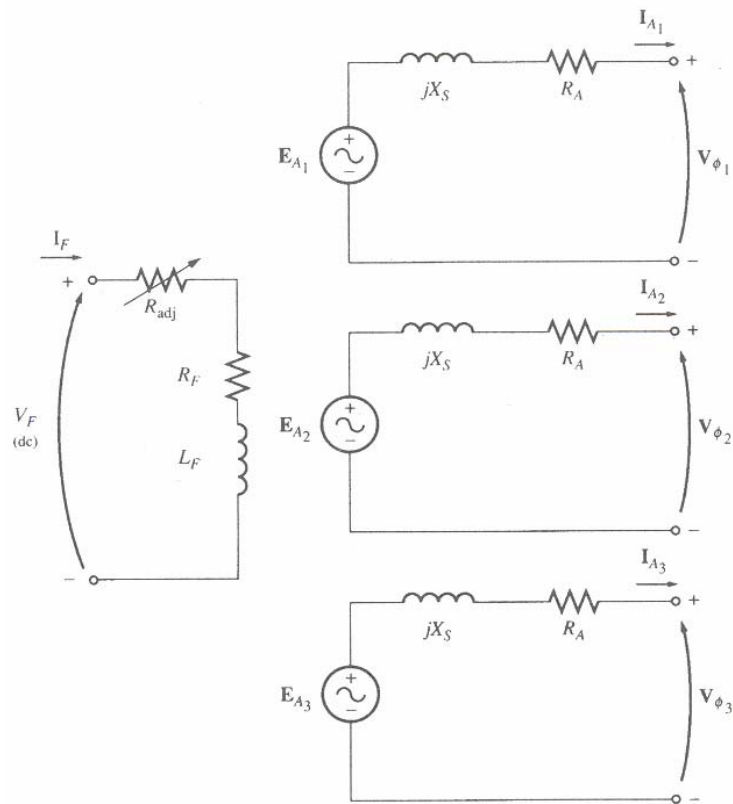
Normalmente, los devanados de los alternadores automotrices estándar se construyen en estrella. La conexión en delta se utiliza en alternadores de camiones, ya que éstos entregan

más potencia. Esto es debido a que la corriente de línea es  $\sqrt{3}$  veces la corriente de fase.

Por lo tanto, en un sistema trifásico, los voltajes de fase inducidos son:

$$\begin{aligned} V_{\phi a} &= \frac{2N_c dB_m w_e}{P} \sin\left(\frac{2}{P} w_e t\right) \\ V_{\phi b} &= \frac{2N_c dB_m w_e}{P} \sin\left(\frac{2}{P} w_e t - 120^\circ\right) \\ V_{\phi c} &= \frac{2N_c dB_m w_e}{P} \sin\left(\frac{2}{P} w_e t - 240^\circ\right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

El circuito eléctrico equivalente del alternador se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.5 Circuito equivalente del alternador [1]**

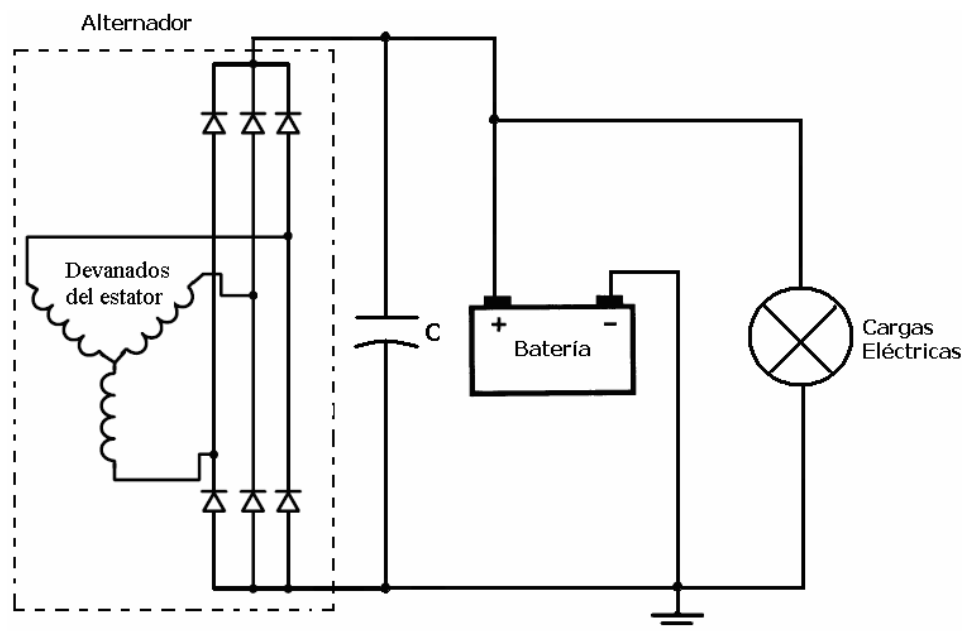
Donde  $V_f$ ,  $I_f$ ,  $R_f$  y  $L_f$  son el voltaje, corriente, resistencia e inductancia (devanado) del rotor.  $E_{A1}$ ,  $E_{A2}$  y  $E_{A3}$  son los voltajes de fase inducidos.  $R_A$  y  $jX_s$  son la resistencia e



inductancia del estator respectivamente. Tanto  $R_A$  como  $jX_S$  deben ser idénticos en las tres fases. De no ser así, las magnitudes de los voltajes de fase se ven afectadas.

### 3.3 El sistema de carga de la batería

La batería es un artefacto que genera corriente directa por medio de reacciones químicas. Este dispositivo se encarga de suministrar energía a todas las cargas eléctricas que se encuentran en el automóvil, siempre y cuando el motor no se encuentre encendido. Dicho de otra forma, funciona como un sustituto del alternador cuando éste no genera electricidad. Cuando la batería se encuentra totalmente cargada, genera un voltaje aproximado de 12.6V de CD [11]. Para lograr que la batería sea recargada por el alternador, se requiere un puente rectificador de diodos de onda completa (figura 2.8). Esto se logra siempre y cuando el motor se encuentre encendido. De esta manera, el alternador le inyecta corriente a la batería y a las demás cargas eléctricas distribuidas en el vehículo. El sistema de carga de la batería se muestra a continuación.



**Figura 3.6 Sistema de carga de la batería**

A diferencia del circuito rectificador de onda completa, descrito en la figura 2.11, éste contiene una batería y los distintos componentes electrónicos como cargas eléctricas. En el capítulo anterior, se analizó que un circuito rectificador trifásico de onda completa posee un factor de potencia de 95.5%. Esto se logra siempre y cuando existan cargas puramente resistivas. Esto no ocurre en el circuito anterior, ya que la batería, como la mayoría de los dispositivos electrónicos y el capacitor, no se comportan como cargas resistivas. Esto genera que el factor de potencia del sistema sea bajo. De ahí la importancia de la presente tesis; corregir el factor de potencia en las líneas del alternador.

Para recargar a la batería, debe de existir un voltaje entre sus terminales mayor a 12.6V y menor a 15.5V [11]. Por lo tanto, el voltaje promedio de carga ( $V_{cd}$ ), debe ser alrededor de 14V. En un rectificador de onda completa trifásico, el voltaje promedio de salida es el siguiente:

$$V_{cd} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m \cos(wt)d(wt) \quad (3.8)$$
$$V_{cd} = 1.654V_m$$

Al sustituir  $V_{cd}$  por 14V, se obtiene el voltaje pico (inducido) de fase:

$$V_m \approx 8.5V \quad (3.9)$$

De acuerdo a la ecuación anterior, la magnitud de (3.6) debe ser igual a 8.5V.

$$V_{ind} = \frac{2N_c dB_m w_e}{P} = 8.5V \quad (3.10)$$

Este es el valor que debe ser inducido para que la batería se suministre de energía correctamente. Ya que  $V_{ind}$  depende de dos parámetros variables ( $B_m$  y  $w_e$ ), se debe

regular la magnitud de éstos para que voltaje inducido no sobrepase los límites de operación.

En resumen, la batería cumple una doble función dentro del sistema eléctrico del automóvil. Cuando el alternador se desempeña como fuente, la batería se comporta como una carga. Por otro lado, la batería es la fuente de alimentación cuando el alternador no produce energía.

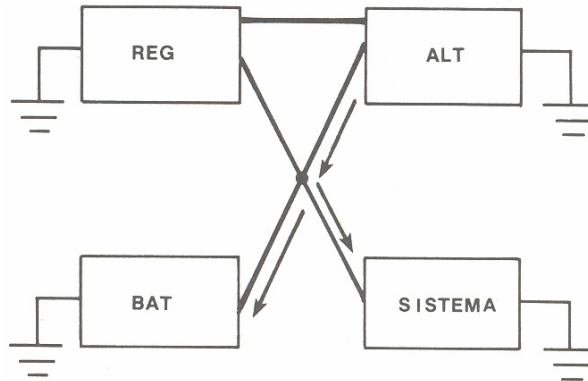


Figura 3.7 Batería como carga

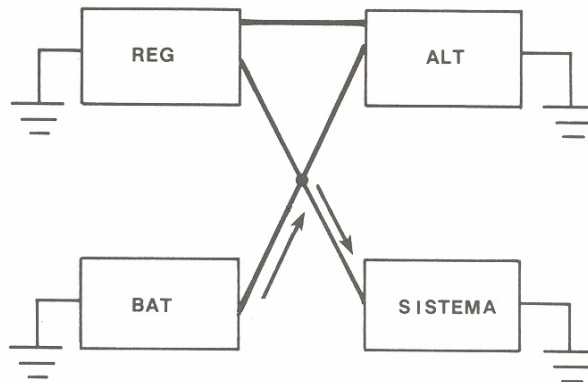


Figura 3.8 Batería como fuente

### 3.3.1 Regulación del voltaje inducido

Para que el sistema eléctrico no presente sobre voltajes, se requiere controlar la cantidad de voltaje inducido en los devanados estatóricos. Esto lo hace un dispositivo

llamado regulador. La regulación de voltaje tiene dos objetivos principales. El primero es controlar el voltaje nominal de la batería (12.6V). El segundo proteger a las cargas eléctricas distribuidas a lo largo y ancho del vehículo, debido a que éstas operan con el mismo voltaje de la batería.

La magnitud el voltaje inducido depende de la densidad máxima del campo magnético (ecuación 3.6), ésta densidad, a su vez es directamente proporcional a la intensidad de corriente que pasa a través del devanado del rotor. De ahí que el voltaje inducido se puede regular mediante la intensidad de corriente que pasa a través de la bobina del rotor.

Anteriormente, la regulación de voltaje era por medio de resistencias variables (potenciómetros), con el objetivo de controlar la corriente de campo del rotor. Los reguladores que se utilizan actualmente, por lo general son electrónicos y digitales.

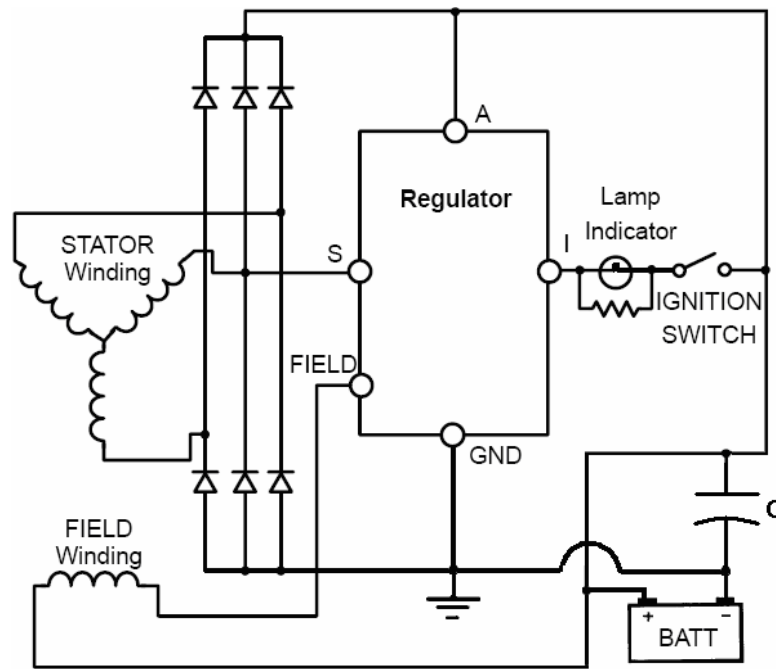


Figura 3.9 Sistema de carga regulado [15]

En la figura anterior se muestra un regulador electrónico conectado al sistema de carga del automóvil. Como se puede observar, el puente rectificador de diodos convierte CA, generada en los devanados del estator (*stator windings*), en CD. El ciclo de trabajo del regulador (*regulador*) depende del voltaje de CD, sentido por la terminal A. Si el voltaje sentido está bajo 12.6V, el ciclo de trabajo del regulador incrementa. Esto es con el propósito de inyectar más corriente al devanado del rotor (*field winding*) por medio de la terminal *Field*. Por el contrario, si el voltaje sentido es alto, el ciclo de trabajo disminuye. Por otro lado, la terminal S monitorea el voltaje del estator. Si no existe tal voltaje, indica en el tablero del automóvil que el motor está apagado por medio de la terminal I.

### 3.4 Eficiencia y pérdidas de potencia

Como se ha mencionado antes, el alternador genera energía eléctrica a partir de movimientos mecánicos. La definición de eficiencia indica la capacidad de convertir una forma de energía, en otra. Dentro de esta conversión, se desea que las pérdidas de energía sean mínimas. La eficiencia en un alternador se mide por la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100\% \quad (3.11)$$

Donde  $P_{OUT}$  y  $P_{IN}$  son las potencias de salida y entrada respectivamente. La diferencia entre estas dos, corresponde a las pérdidas que ocurren en la conversión de energía:

$$P_{LOSS} = P_{IN} - P_{OUT} \quad (3.12)$$

Al despejar  $P_{OUT}$  y sustituirla en (3.11), se obtiene una nueva ecuación para la eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{IN} - P_{LOSS}}{P_{IN}} \times 100\% \quad (3.13)$$

Las pérdidas en el alternador, se dividen en cuatro categorías principales [1]:

- 1) Pérdidas eléctricas en el cobre
- 2) Pérdidas en el núcleo
- 3) Pérdidas mecánicas
- 4) Pérdidas adicionales

### **3.4.1 Pérdidas eléctricas**

Las pérdidas eléctricas son las que generalmente ocurren por sobrecalentamiento de cables; como pueden ser los devanados del rotor y los estáticos. Estas pérdidas se miden por los siguientes parámetros:

$$P_e = 3I_\phi^2 R_\phi \quad (3.14)$$

Donde  $I_\phi$  es la corriente que circula en los devanados y  $R_\phi$  es la resistencia del cable. El factor de 3 indica la presencia de las tres fases.

### **3.4.2 Pérdidas en el núcleo**

Son las pérdidas que ocurren por histéresis y corrientes parásitas en los laminados del alternador. Estas varían de acuerdo a la densidad del campo magnético y su velocidad de rotación.

### **3.4.3 Pérdidas mecánicas**

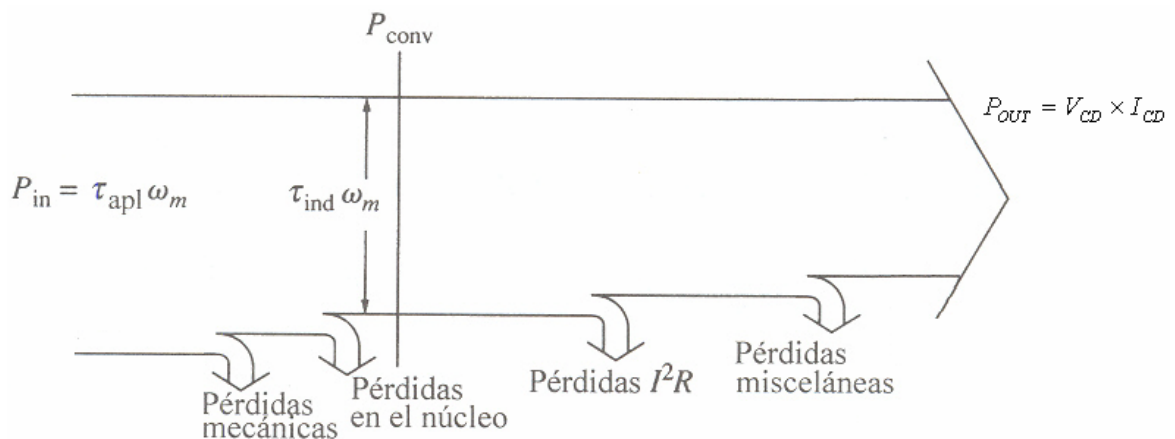
Son aquellas que se asocian a los movimientos mecánicos. Dentro de éstas, se encuentran las pérdidas por rozamiento mecánico y por rozamiento del aire. Estas generalmente son causadas por fricción entre partes móviles.

### **3.4.4 Pérdidas adicionales**

Son aquellas las cuales no se pueden catalogar dentro de las pérdidas anteriores. Dentro de éstas, se puede catalogar las pérdidas de conversión CA – CD. Cabe recordar que los

diodos en polarización directa, tienen una caída de voltaje entre 0.7V y 1V. Otra pérdida adicional, es la asociada al bajo factor de potencia de los rectificadores cuando no se presentan cargas resistivas. Las consecuencias de un bajo FP se analizaron en el capítulo I.

A continuación se muestra un diagrama de las distintas pérdidas que afectan la eficiencia del alternador.



**Figura 3.10 Pérdidas en el alternador**

Donde  $P_{IN}$  es igual al torque aplicado  $\tau_{apl}$  por la velocidad angular del rotor  $\omega_m$ . La potencia de salida del alternador está dada por el voltaje multiplicado por la corriente directa.

De los cuatro tipos de pérdidas asociadas al alternador, sólo una de éstas se puede controlar mediante la presente tesis; **las pérdidas adicionales o misceláneas**. Las demás dependen de los fabricantes de alternadores automotrices. El alternador de la figura 3.11 puede llegar a tener una eficiencia de 68% [16]. Esto es debido a que no presenta pérdidas significativas por rozamiento (*brushless alternator*).



Figura 3.11 Alternador de alta eficiencia Delco Remy 36SI

La siguiente figura muestra cómo la corriente de salida de este alternador ( $I_{CD}$ ) incrementa conforme aumenta la frecuencia mecánica.

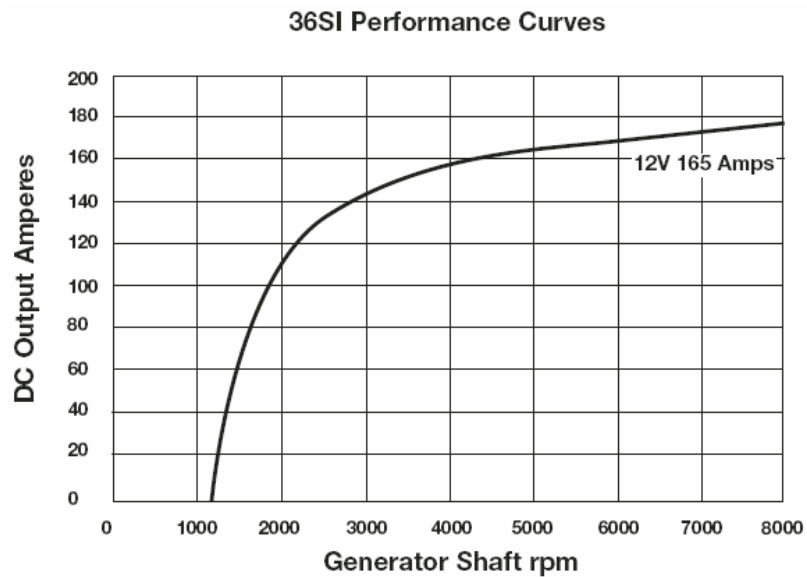


Figura 3.12 Curva de rendimiento del alternador Delco Remy 36SI



Cuando se encuentran encendidos los distintos aparatos electrónicos a la vez (carga eléctrica pesada), el alternador requiere de una potencia de entrada considerable. Esta potencia es generada por el motor. Por lo tanto, el alternador se comporta como una carga mecánica para el motor.

Suponer durante un instante, que dos de los 3 devanados del estator se encuentran en corto circuito (carga eléctrica pesada). Al tratar de mover manualmente la flecha del alternador, se encuentra que se requiere de una fuerza considerable (energía mecánica) para rotarlo. Lo mismo pasa con el motor; requiere de una energía considerable para poder mover al motor. Esto se ve reflejado en el **consumo de gasolina**.

Por lo tanto, con un alternador de alta eficiencia, se reduce el consumo de gasolina. Esto se debe a que genera la misma cantidad de energía eléctrica que un alternador de baja eficiencia. La diferencia radica en que se requiere menor cantidad de potencia mecánica (menor consumo de gasolina) para generar dicha energía eléctrica.

### **3.5 Conclusiones**

Cada vez son más los aparatos electrónicos que se encuentran a lo largo y ancho de la red eléctrica automotriz. Estos requieren de mayor energía para que funcionen correctamente. Por esta razón, se requiere que el alternador sea más eficiente. La primera opción para mejorar su eficiencia, es minimizar las pérdidas por rozamiento de sus distintos componentes mecánicos. Sin embargo, la presente tesis no abarca dichos temas. Otra forma de mejorar la eficiencia, es corregir el factor de potencia en sus líneas de tensión. Esto va a generar que toda, o la mayoría de la energía eléctrica generada en el alternador, sea consumida por los aparatos electrónicos.