

DISEÑO DE UN ALTERNADOR PARA AUTOMÓVIL

LEON, EDUARDO ING.
ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL

RESUMEN

El presente trabajo consistió en el diseño de un alternador trifásico para automóvil a un costo mínimo.

Para el estudio se crea una función de costo compuesta por los términos de costo de materiales, que evalúa el costo de fierro del estator y del rotor de la máquina y el costo de cobre de los devanados del estator y de excitación; y los términos de penalización de las especificaciones técnicas.

La función de costo se la minimiza mediante correcciones constantes y decrecientes del vector de parámetros variables.

INTRODUCCION

Anteriormente la producción de la energía eléctrica en el automóvil se la realizaba con un generador de corriente continua. El incremento de la carga eléctrica en el automóvil requirió de un generador que cumpliera especificaciones más estrictas, y es así como se decidió diseñar un generador sincrónico trifásico, con un circuito rectificador de modo que en los terminales se tenga corriente continua.

En este sentido el trabajo versa sobre el diseño de un generador sincrónico trifásico que tenga un costo mínimo del fierro y el cobre de la máquina y que además cumpla con las especificaciones de voltaje de salida y temperatura máxima.

Para obtener el diseño óptimo es necesario crear una función de costo cuya magnitud se desea minimizar mediante iteraciones sucesivas.

La aplicación del método de optimización requiere de la elección del vector de parámetros variables que tengan la mayor influencia posible sobre el diseño de la máquina y cuyo valor es corregido en cada iteración con el objetivo de aproximarse al óptimo.

El cálculo del alternador se lo realiza utilizando las ecuaciones convencionales de diseño de los generadores de gran potencia, con las correcciones necesarias para poder ser aplicadas en este caso.

1. METODO DE DISEÑO

Para optimizar el diseño del alternador es necesario elegir el vector de parámetros variables que minimiza el costo de diseño de la máquina.

El vector de parámetros elegido como variable es aquel que tiene una mayor influencia sobre el costo y el funcionamiento de la máquina.

Los parámetros elegidos como variables son:

a) Las dimensiones geométricas, por su incidencia directa en el costo de la máquina. Solamente se considera el diámetro interno del estator, las otras dimensiones se las determina en función de los otros parámetros variables.

b) Las magnitudes del circuito magnético y las eléctricas de los circuitos del estator y excitación gobiernan el funcionamiento de la máquina.

Las magnitudes magnéticas elegidas son:

La densidad de flujo en el entrehierro, porque esta determina la densidad máxima en el hierro de los dientes.

Las densidades de flujo en el jugo y los dientes del estator, las mismas que determinan las pérdidas en el fierro del estator y por consiguiente influyen en el rendimiento de la máquina.

Las magnitudes eléctricas consideradas son:

La fuerza electromotriz tras la reactancia de dispersión y la corriente de excitación.

Para que el diseño tenga una influencia relevante de los parámetros elegidos como variables, se determina el resto de los parámetros de diseño con expresiones que son función en su mayor parte de los parámetros variables.

El método optimiza la función de costo de la máquina, cuya magnitud se desea que vaya decreciendo en cada iteración del programa, hasta llegar a un valor mínimo satisfactorio.

La función de costo está constituida por los términos que representan los costos del circuito magnético y los circuitos eléctricos de la máquina.

$$FC(\bar{X}) = C_F + C_C$$

Donde:

FC = Función de costo
C_F = Costo de fierro
C_C = Costo de cobre

El comportamiento del alternador en funcionamiento debe respetar las especificaciones definidas.

Por lo tanto el diseño óptimo para que sea factible debe cumplir las siguientes especificaciones: Voltaje de salida y temperatura.

Para el control del cumplimiento de las especificaciones se efectúa la comparación de voltaje de salida con la tensión de salida especificada, y la temperatura del alternador con la temperatura máxima admisible.

El método de la función penalidad se utiliza para que la función de costo cumpla con las especificaciones, en este sentido los términos de penalidad se tienen que adicionar a la función de costo de la siguiente manera:

$$FC(\bar{X}) = C_F + C_C + \sum_{i=1}^m P_i$$

El método de diseño comprende el diseño del estator y el rotor; y, el cálculo de las características del alternador.

El método requiere del conocimiento de los datos de placa, los parámetros fijos, los valores de especificación y los valores iniciales de los parámetros variables.

Las expresiones de cálculo que se utilizan en el diseño se las deduce de tal manera que sean función en su mayor parte de los parámetros variables.

Los datos de placa de diseño son: potencia, voltaje, corriente, tensión de excitación y corriente de excitación.

Los parámetros fijos que se requiere conocer son: entrehierro, diámetro externo e interno del núcleo, espesor de cada lámina de hierro, curva de magnetización del hierro, número de fases, número de ranuras por polo y por fases, número de conductores por ranura, número de polos, conductividad del cobre, densidad del cobre y hierro, permitividad del aire, factores de utilización de las ranuras del estator y rotor, factor de devanado, relación entre las longitudes neta y bruta del estator, relación entre la longitud de una espira y la longitud bruta más el paso polar del estator, relación entre la proyección del devanado hacia el exterior y la longitud bruta más el paso polar del estator, factores de refrigeración del cobre del estator y el rotor, factor de refrigeración del hierro del estator, factor de pérdidas del hierro, factor de pérdidas óhmicas del estator, coeficientes de los flujos de fuga en las ranuras del estator, entrehierro y conexiones terminales del devanado del estator, relación entre el ancho de un diente y de una ranura del rotor y pérdidas rotacionales.

El diseño inicial del alternador debe ser factible para que esto sea efectivo tiene que satisfacer los valores de especificación prefijados. En este sentido se determina los valores iniciales de los parámetros variables mediante los valores de especificación.

El diseño del estator comprende el cálculo de las dimensiones del yugo, dientes, ranuras y devanados. Un parámetro que se considera con singular importancia es la densidad de corriente del devanado del estator para que no alcance valores muy elevados.

El devanado del estator es concentrado y de paso completo, no tiene circuitos en paralelo y su conexión es estrella con el neutro aislado.

El diseño del rotor comprende el cálculo de las dimensiones de los dientes, ranuras, núcleo y devanado.

En el cálculo del circuito magnético se determinan las fuerzas magnetomotrices total, de reacción de armadura y del rotor. Para esto se considera una curva típica de magnetización.

Las pérdidas de histéresis y de Eddy son calculadas en el jugo y dientes del estator con las respectivas densidades de flujo, y considerando velocidad y excitación nominales. Las pérdidas óhmicas de los devanados del estator y rotor son determinadas operando el alternador a potencia nominal.

Además, se calcula el peso de hierro del estator y rotor, y el peso de cobre de los devanados del estator y rotor.

En relación a las características del alternador, se determina: la tensión de salida y la regulación, la temperatura, la potencia de salida y el rendimiento.

2. ALGORITMO DE CALCULO

El algoritmo de cálculo utilizado para obtener el diseño óptimo del alternador consiste del método de optimización y el algoritmo de diseño.

El método de optimización calcula primero la función de costo inicial, $FC(\bar{X}_0)$.

A continuación se incrementa positivamente el primer parámetro variable.

$$X_{0K} = X_{0K} + \Delta X_{0K}$$

y se determina la función de costo

$$FC(\bar{X}_{0n-K}, X_{0K} + \Delta X_{0K})$$

y así sucesivamente para todo el vector de parámetros variables.

Luego se calcula la diferencia entre cada una de las funciones de costo incrementadas y la función de costo inicial.

$$DFC = FC_0(\bar{X}_{0n-K}, X_{0K} + \Delta X_{0K}) - FC_0(\bar{X}_0)$$

El signo de la diferencia indica en que sentido debe ser corregido el parámetro variable correspondiente.

La corrección de cada uno de los parámetros variables se la hace mediante incrementos o decrementos constantes y decrecientes en cada iteración.

La corrección a efectuar a cada parámetro variable es nula si la diferencia, DFC, entre la función de costo incrementada y la función de costo inicial es menor que un error especificado.

Una vez corregido el vector de parámetros variables se tiene el nuevo vector de parámetros variables

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_0 \pm \Delta \bar{C}$$

Se procede ahora a calcular el alternador con el nuevo vector de parámetros variables, \bar{X}_1 , obteniendo un nuevo diseño de un menor costo que el inicial.

El proceso de optimización continua hasta obtener el valor mínimo de la función de costo, de acuerdo al criterio de error especificado.

La función de costo en el óptimo tiene que cumplir todas las especificaciones impuestas.

El algoritmo de diseño dimensiona el alternador, en sus distintas partes y calcula los principales parámetros eléctricos y magnéticos de la máquina.

En el diseño del estator se limita la densidad de corriente de su devanado a un valor determinado, cuando el alternador opera a potencia nominal. En el caso de no cumplir la restricción impuesta, se aumenta la profundidad de la ranura para de esta manera poder incrementar el área de cada uno de los conductores.

El cálculo del circuito magnético fundamentalmente consiste en determinar la fuerza magnetomotriz de campo principal y la fuerza magnetomotriz de reacción de armadura.

Para determinar la temperatura de la máquina, el algoritmo calcula la totalidad de las pérdidas tanto en el cobre como en el hierro, y el área de las superficies que disipan el calor. Asumiendo que no hay transferencia de calor entre las distintas partes, se considera que la temperatura alcanzada por un componente del alternador es directamente proporcional a las pérdidas generadas por él e inversamente proporcional al área de disipación correspondiente. De esta manera se calcula la temperatura en el devanado y fierro del estator, y en el rotor.

El diagrama de flujo de la Fig. 1 ilustra la implementación del algoritmo de cálculo.

El diagrama de flujo de la Fig. 2 ilustra el algoritmo de diseño.

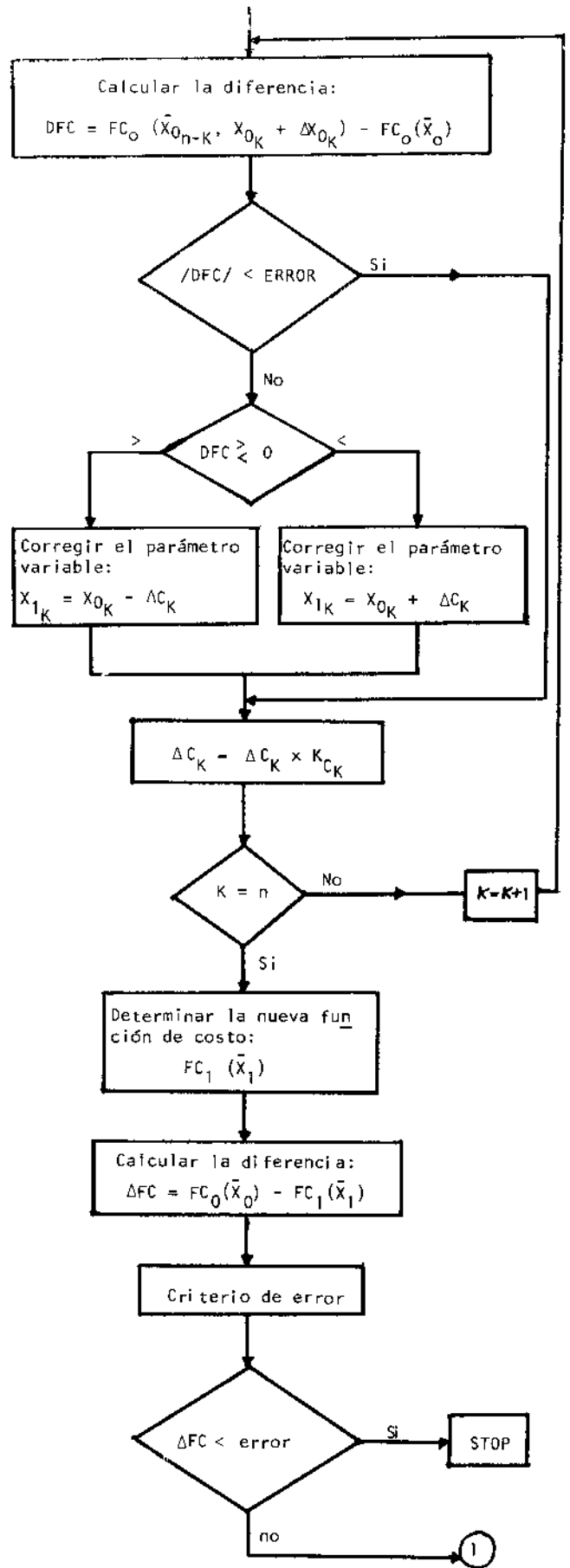
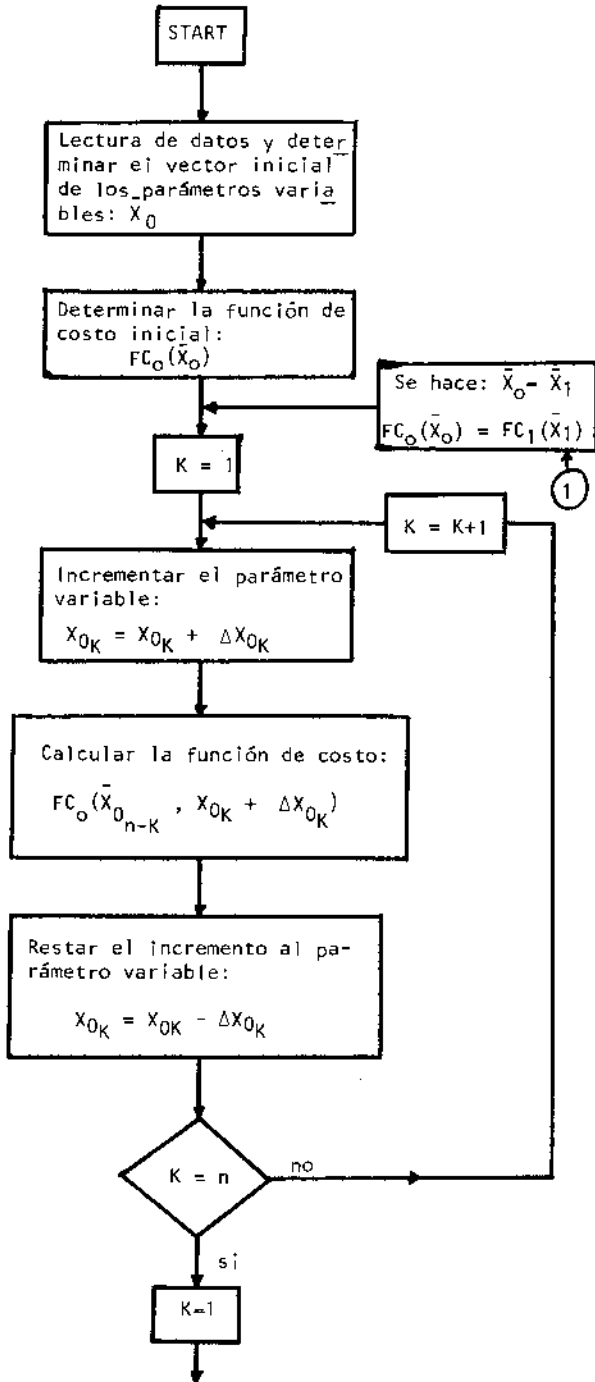


FIG. 1. Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo.

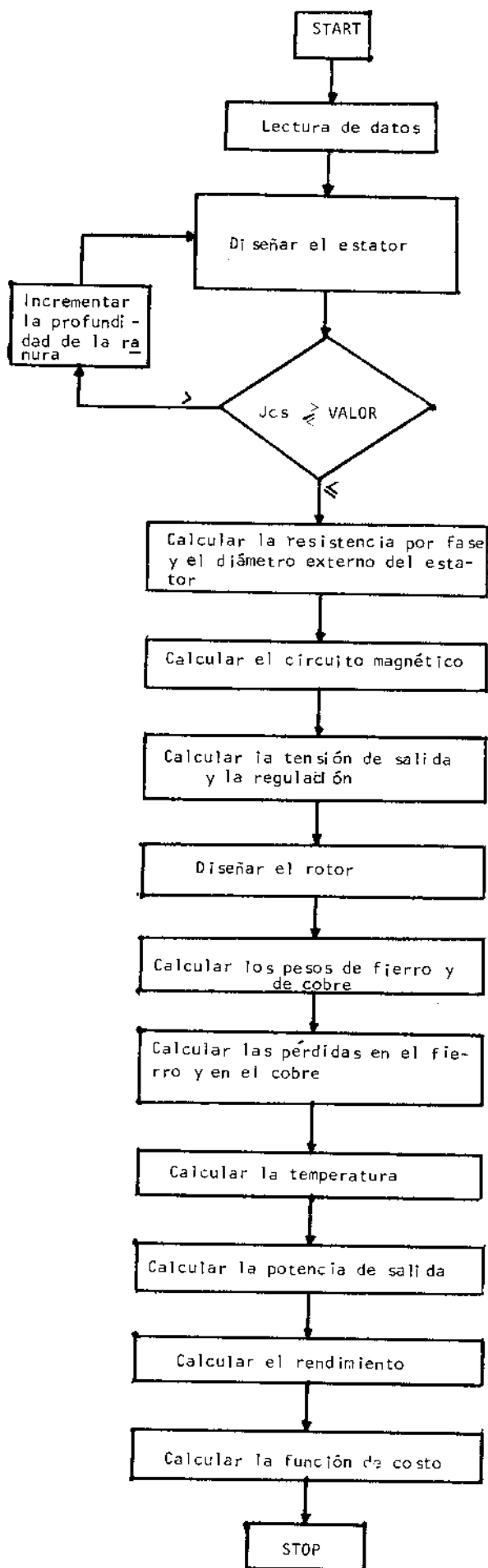


FIG. 2. Diagrama de flujo del algoritmo de diseño

3. RESULTADOS

El método propuesto se aplica en el diseño de un alternador para automóvil de los siguientes datos de placa:

Potencia: 532 W
 Voltaje: 14 V
 Voltaje de excitación: 14 V
 Corriente de excitación: 2,0 A
 Velocidad: 6,000 R.P.M.

El programa de computación entregó los siguientes resultados:

Número de iteraciones	Función de costo inicial	Función de costo final
32	80.000	6.000

La fig. 3 muestra la trayectoria de la función de costo durante el proceso de optimización.

Parámetros variables:

	Vector inicial	Vector final
Diámetro interno del estator.	0,12 mt.	0,116 mt
Densidad de flujo en el entrehierro.	0,34 Wb/mt ²	0,39 Wb/mt ²
Densidad de flujo en el yugo	0,50 Wb/mt ²	0,49 Wb/mt ²
Densidad de flujo en los dientes del estator.	0,75 Wb/mt ²	0,68 Wb/mt ²
Fuerza electromotriz tras la reactancia de dispersión.	22 V.	21,5 V.
Corriente de excitación.	2 A.	2 A'

Especificaciones:

	Valor inicial	Valor final
Voltaje de salida	14 V.	13,98 V
Temperatura del devanado del estator.	100°C	65,7°C
Temperatura del devanado del rotor	80°C	55,6°C
Temperatura del fierro del estator.	60°C	62,4°C

El método de optimización tiene una total convergencia, como lo demuestra el análisis de los valores de la función de costo durante el proceso.

Se observa que el valor de la función de costo inicial es bastante superior que el valor de la función de costo óptima, lo cual indica que las correcciones del vector de parámetros variables tiene una gran incidencia sobre la función de costo.

La función de costo decrece rápidamente en las 10 primeras iteraciones, luego empieza a oscilar para llegar al valor óptimo en la iteración 32. El número de iteraciones puede parecer alto, pero esto se debe a que se eligió los factores de corrección del vector de parámetros variables relativamente pequeños con la finalidad de cumplir a cabalidad las especificaciones.

El vector de parámetros variables tiene una alta incidencia en la función de costo en las primeras iteraciones, para luego ser su trascendencia menor a medida que el diseño se aproxima al óptimo. El cumplimiento de las especificaciones es total.

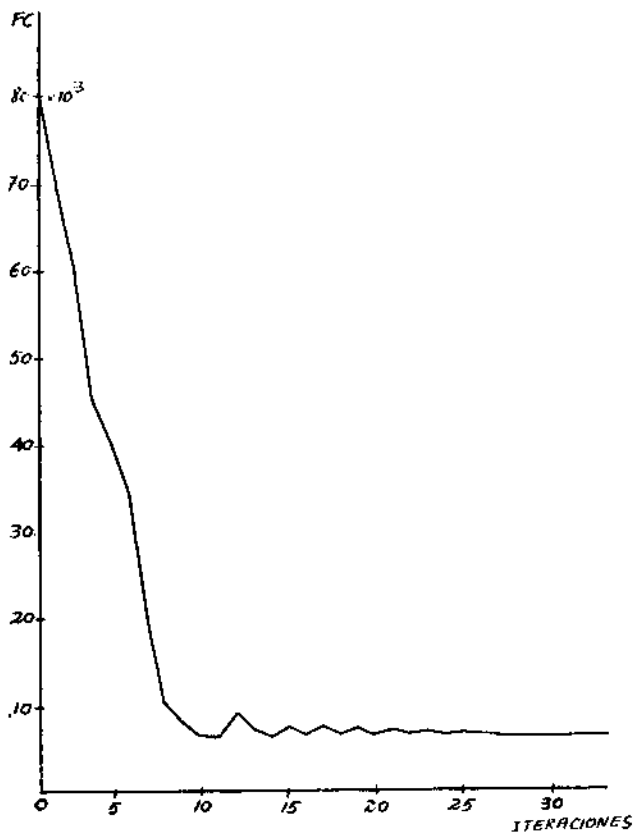


FIG. 3. Trayectoria de la función de costo

BIOGRAFIA

LEON, EDUARDO. El autor, profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ex-Asesor en Electrificación del Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, fue Director del Centro de Análisis de la Electrificación en el Ecuador (CAEE); realizó entrenamiento en el sector Eléctrico de Italia, "Ente Nazionale per L'Energia Elettrica", ENEL. Ha realizado estudios sobre Diseño y Control de Maquinaria Eléctrica, y Análisis de Sistemas de Potencia, en la Universidad de Chile (Magister, 1973). Laboró en el Departamento de Generación (El Salitral) de la Empresa Eléctrica del Ecuador, Inc.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se deduce la factibilidad de diseñar en forma global y económicamente un alternador para automóvil, mediante la utilización de un algoritmo de cálculo que optimiza el diseño inicial.

El diseño incluye solamente el estator y el rotor, y no estudia el dimensionamiento del resto de las partes que integran el alternador. Por lo tanto en una próxima etapa será necesario diseñar la carcasa, los cojines, el eje, el ventilador, los anillos terminales del devanado de excitación, los carbones, etc.

En una siguiente etapa de perfeccionamiento, se debe incluir en el algoritmo de cálculo lo siguiente:

El estudio minucioso de la aislación de los devanados del estator y el rotor, debido a la alta temperatura de trabajo normal; la determinación de la forma real de los dientes y las ranuras tanto del estator como del rotor; la consideración más detallada de los flujos de dispersión; la estimación más precisa de las pérdidas y la disipación de las mismas; la cuantificación más aproximada de los flujos de calor en el interior, para el cálculo de la temperatura en los puntos críticos de la máquina; la determinación de los esfuerzos mecánicos del rotor; y, la consideración de los problemas de vibración y ruido.

En la circunstancia que se desee montar una línea de fabricación de alternadores para automóvil, se tiene que construir el prototipo de la máquina diseñada optimamente y realizar las correcciones al algoritmo de cálculo hasta obtener los resultados experimentales satisfactorios.

En resumen se considera adecuado el método de diseño, el mismo que complementado con estudios experimentales y de proceso de fabricación permite disponer de la mayor parte del conocimiento tecnológico necesario para la fabricación en serie de alternadores para automóvil.

REFERENCIAS

1. Corrales Juan, Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas, Ediciones Técnicas DANAE, 1968.
2. Still Alfred y Siskind Charles, Elementos de Diseño de Máquinas Eléctricas, 1968.
3. Kuhlmann John, Diseño de Aparatos Eléctricos, 1959.
4. Konigslow A.V., Teoría, Cálculo y Construcción de las Máquinas de Corriente Alterna Sin crónicas, 1971.
5. Ramarathnam R. y Desai B.G., Optimizacion of Polyphase Induction Motor Design: A Nonlinear Programming Approach, IEE Trans., vol. Pas-90 Nº 2, March/April 1971.
6. Erlicki M.S. y Appelbaum J., Optimized Parameter Analysis of an Induction Machine, IEE Trans., Vol. Pas - 84, Nº 11, November 1965.