

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN VEHICULO CON TRACCION ELECTRICA

PALACIOS A. JOSE ING.
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

RESUMEN

Se presenta el diseño y construcción total de un vehículo con tracción eléctrica, has ta ponerlo en funcionamiento.

Todos los componentes fueron especialmente diseñados para este vehículo experimental de tal forma de conocer los problemas específicos de cada uno de ellos y del conjunto.

Sin lugar a dudas se han logrado los reque rimientos de este trabajo, ya que el proto tipo terminado es un vehículo silencioso, sin vibraciones y con una excelente marca y aceleración; que deja ver claramente las ventajas de este tipo de propulsión así co mo sus posibles mejoras y optimización.

El objetivo inicial es un transporte para personal de vigilancia y mantenimiento en industrias de áreas extensas, puertos y aero puertos.

INTRODUCCION

Es importante tomar conciencia de la inge rencia directa que tiene en el desarrollo de nuestro país el que sus técnicos y pro fesionales se enfrenten a problemas tecnó lógicos muy particulares y específicos, que permitan desarrollar la experiencia que el poco ascendente tecnológico que poseemos no nos puede dar.

El proyecto de diseñar y construir un pro totipo de investigación de un vehículo con propulsión eléctrica permitirá enfrentarnos a tecnologías que a nivel internacional es tan desarrolladas y aplicadas desde hace algún tiempo; el funcionamiento de todas estas técnicas en conjunto pertenecen a quienes las investigaron y en general no están disponibles.

La primera parte tiene como objetivo el re diseño y construcción del motor eléctrico disponible, analizando todos los detalles que harán de este un motor adecuado para la tracción. Se tomo muy en cuenta, en esta parte, el conocer la calidad del hierro del motor, debido a que no sería aceptable el adoptar curvas normales de excitación para este tipo de motores. Además se presentan las pruebas finales del motor en el labora torio.

La segunda parte analiza el escogitamiento de los acumuladores a utilizarse.

La tercera parte resuelve el problema del control de velocidad del motor.

Y la cuarta parte detalla el diseño y cons trucción del vehículo en lo que se refiere a su carrocería y aspecto mecánico.

Además existe una quinta parte en la que se presentan las pruebas y resultados defi nitivos del vehículo. Constando también un análisis de lo que podría ser la optimiza ción del vehículo.

LA PROPULSION ELECTRICA CONTAMINACION

Es necesario mencionar que desde muchos as pectos la máquina de tracción ideal para ve hículos es, sin duda alguna, el motor eléct rico. Sus ventajas en comparación con el motor de explosión son las siguientes:

- a) Eliminación total de los gases de esca pe nocivos.
- b) El motor eléctrico no precisa marcha en vacío.
- c) Ruido prácticamente nulo.
- d) La energía de frenado puede recuperarse.
- e) La curva de potencia es casi ideal.
- f) Supresión del embrague y caja de cambios.
- g) Supresión de los cientos de partes móvi les en el motor de explosión a una sola (rotor) en el motor eléctrico.
- h) Puede suprimirse el diferencial.
- i) Arranque y marcha sin trepidaciones.
- j) Manejo muy sencillo.

Los únicos inconvenientes en este tipo de propulsión residen principalmente en el a provisionamiento de energía, ya que el ve hículo transporta su propia energía en for ma de acumuladores.

El problema es el gran peso y la poca den sidad de energía de las baterías, que limi tan la autonomía de estos vehículos.

Naturalmente que se están logrando grandes avances en este campo y es de interés de la industria adelantarse a estos acontecimientos para estar preparados con tecnología pro pia.

Por otro lado el agotamiento de las reser vas de petróleo pondrá disyuntivas serias en cuanto al transporte interno dentro de las ciudades.

La abundancia de los recursos hidroeléctri cos en nuestro país permite preveer que de esas fuentes abremos de hechar mano para so lucionar también el transporte, de allí la importancia de los vehículos eléctricos.

No menos importantes son los problemas de contaminación del aire y del ruido, los cua les se eliminan con la tracción eléctrica.

Parte uno:

Polos : 6
Velocidad : 2500 RPM.

REDISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MOTOR ELECTRICO DISPONIBLE

1.1. MOTOR SERIE PARA LA TRACCION.-

En un motor serie la velocidad decrece rápidamente cuando aumenta el par motor por lo que se constituye en un motor con cambio automático de velocidad. Este motor se emplea cuando se precisa un torque de arranque grande, cuando la carga esta sujeta a variaciones grandes y se desea una velocidad reducida para compensar el gran par, siempre que no exista la posibilidad de que la máquina pueda llegar a trabajar en vacío (en este caso se descarta esta posibilidad ya que el motor esta conectado directa y permanentemente al diferencial y sistema de tracción mecánico, sin embrague ni caja de cambios).

El motor serie se decelera con la carga y su par aumenta más rápidamente que la velocidad. Para un mismo aumento de par, la demanda de corriente es menor que para un motor "shunt", la cual constituye una evidente ventaja del motor serie soportando bien las sobrecargas.

La marcha del motor serie esta menos influida que la del motor shunt por las variaciones bruscas de tensión. Efectivamente en el motor shunt la inductancia del arrollamiento de excitación no le permite seguir instantáneamente la variación de la tensión, de forma que su fuerza electromotriz E permanece constante, lo cual provoca un salto brusco de corriente. Por el contrario, en un motor serie, un aumento de la tensión provoca un inmediato aumento de la corriente de carga I (que es también la corriente de excitación) y por tanto de la fuerza contraelectromotriz E. Por lo tanto el motor serie es mucho menos sensible a las variaciones bruscas de la tensión de alimentación.

TIPO DE MOTOR DISPONIBLE.-

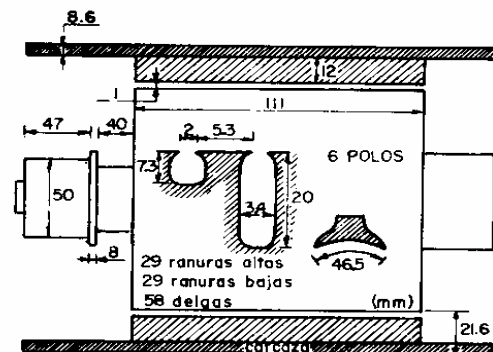
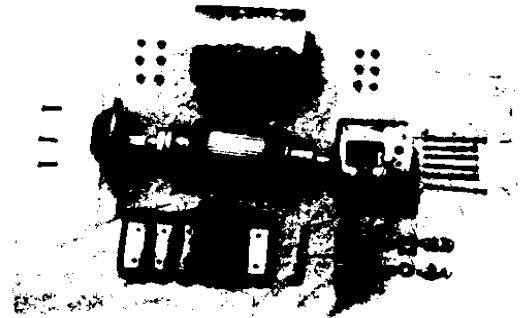
La carcasa y masa rotórica a utilizarse pertenecen a un motor de arranque con las siguientes características:

Conexión: compound (predominio campo serie).
Voltaje: 24 V.
Corriente: 300 Amp.
Polos: 6
Motor para funcionamiento durante pequeños intervalos de tiempo.

REESTRUCTURACION.-

Se reconstruye su armadura y campo para que funcione con las siguientes características:

Conexión : serie
Voltaje : 96 V.



1.2. DATOS DE PARTIDA.-

POTENCIA: La potencia del motor por razones de consumo de energía y de la no muy alta prestación que se requiere del vehículo, además, tomando en cuenta la masa del motor disponible y la velocidad de diseño se estima en 4 Kw.

VELOCIDAD: Esperando una velocidad máxima de aproximadamente 50 KPH y por la desmultiplicación de 4:1 del diferencial se ha fijado la velocidad de diseño en 2500 RPM.

VOLTAJE: El voltaje máximo aplicable será de 96 voltios ya que el vehículo transportará 8 baterías de 12 voltios.

1.3. ANALISIS MATEMATICO PRELIMINAR.-

Partiremos de valores de densidad de flujo en el entrehierro y de la corriente por centímetro en la superficie del rotor para una potencia de 4 Kw y un rendimiento del 80%.

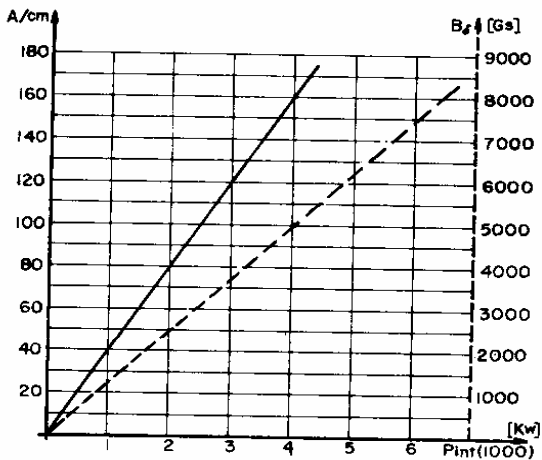
$P_{int}(1000)$ Potencia interna del motor a 1000 RPM.

B_{δ} densidad de flujo en el entrehierro.

A/cm Corriente por centímetro en la superficie del rotor (sumatorio de las corrientes que circulan por la ranura multiplicada por su ancho z).

DATOS BASES DE DISEÑO PARA 4 Kw DE $P_{int}(1000)$.

$B_{\delta} = 5000$ Gs
 $A = 160$ A/Cm.



Potencia de entrada $P = \frac{P_{sa1}}{0.8} = 6250$ Kw

$\Delta V = V_N - V_{inducido}$

$\Delta V \approx (\frac{1-n}{2})V = \frac{1-0.8}{2} 96 = 9.6$ V

$V_{ind} = V_N - \Delta V = 96 - 9.6 = 86.4$

$P_{int} = V_{ind} I$

$P_{int}(1000) = P_{int}(n) \frac{1000}{n}$

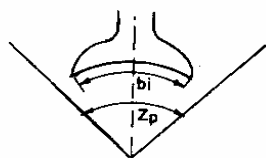
n = velocidad en RPM

Aplicaremos una fórmula básica utilizada en el diseño de motores para comprobar si estamos en un nivel de potencia permisible para el motor.

Diámetro del rotor = $\sqrt[3]{\frac{P_{int}(1000) 6 \times 10^8}{B_{\delta} \cdot A \cdot \alpha_f (\frac{1}{D})}}$

en donde:

$-\alpha_f = \frac{b_i}{z_p}$



Según tablas el valor de α_f debe estar entre 0.6 y 0.7. En este caso tenemos:

$z_p = \frac{13.5 \times \pi}{6} = 7.06$

$\alpha_f = \frac{4.55}{7.06} = 0.644$

B_{δ} : Densidad de flujo en el entrehierro.
A: corriente por cm. en la superficie del rotor.

L: Largo del rotor (placa) = 111 mm
D: diámetro del rotor = 135 mm.

Despejando de la ecuación del diámetro del rotor la $P_{int}(1000)$ tenemos:

$P_{int}(1000) = \frac{D^3 \times B_{\delta} \times A \times \alpha_f \times \frac{1}{D}}{6 \times 10^8}$

$P_{int}(1000) = \frac{13.5^3 \times 5000 \times 160 \times 0.644 \times 0.822}{6 \times 10^8}$

$P_{int}(1000) = 1.74$ Kw.

$P_{int}(2500) = P_{int}(1000) \frac{2500}{1000} =$

$P_{int}(2500) = 1.74 \times 2.5 = 4.35$ Kw

4.3 Kw que es la potencia que podemos sacar a este motor para una velocidad de diseño de 2500 RPM.

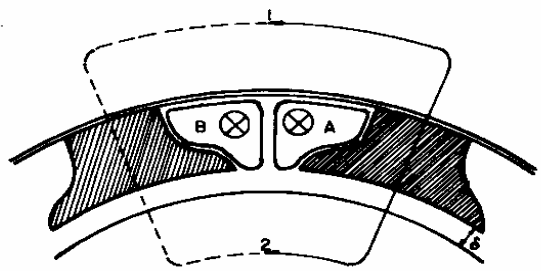
De aquí que la corriente nominal será:

$P_{int} = V_i \times I_N = 86.4 \times I_N = 4300$ watts.

$I_N = 50$ Amp.

1.4. DEVANADO DE EXCITACION

Se dispone de un entrehierro de 0.1 cm y de una densidad de flujo de 5000 GAUSS.



Integramos entre 1 y 2 debido a que consideramos únicamente la corriente que circula por el lado de bobina A.

$$\int_1^2 H dl = IN$$

En donde:

H : intensidad de campo magnético.
I : intensidad de corriente en el lado A.
N : número de espiras.

ahora la tensión magnética en el entrehierro ($V_{m\delta}$) es:

$$V_{m\delta} = H_{\delta} \cdot \delta$$

H_{δ} : intensidad de campo magnético en el entrehierro.
 δ : altura del entrehierro.

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0}$$

B_{δ} : densidad del flujo en el entrehierro
 μ_0 : permeabilidad (vacío)

$$H_{\delta} = \frac{5000 \times 10^{-8} \text{ V sec/cm}^2}{1.25 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \text{ sec/cm}} = 4000 \text{ A/cm.}$$

entonces

$$V_{m\delta}' = H_{\delta} \cdot \delta = 4000 \text{ A/cm} \times 0.1 \text{ cm} = 400 \text{ Av}$$

Pero aunque la reluctancia en el entrehierro del circuito magnético es predominante, las demás partes del circuito magnético, tampoco son conductores perfectos del flujo magnético, se estima que la excitación total necesaria será de un 25 a un 30 % mayor.

entonces:

$$V_{m\delta} = 1.3 V_{m\delta}' = 1.3 \times 400 = 520 \text{ A-v.}$$

$$V_{m\delta} = 520 \text{ A-v} = NI$$

Con una corriente nominal de $I_N = 50 \text{ Amp}$ (análisis matemático preliminar) tenemos:

$$NI = 520 \text{ A-v}$$

$$N' = \frac{520 \text{ A-v}}{50 \text{ A}} = 10.4 \text{ número de espiras por polo.}$$

Se toma una densidad de corriente en el polo de 5 Amp/mm^2 , superior a los valores recomendados ($2-3 \text{ Amp/mm}^2$) en base a que el motor tendrá períodos no muy largos de funcionamiento, además de que no todo el tiempo trabajará a plena carga y sobre todo debido a las limitaciones físicas en cuanto al espacio de ubicación

de las bobinas del motor disponible.

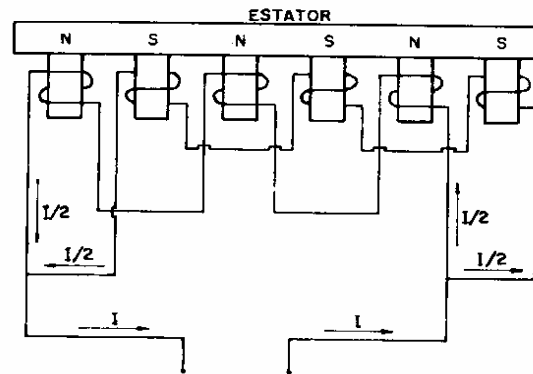
$$S = \frac{I}{A}$$

S: densidad de corriente en el polo.
I: corriente de excitación.
A: Area transversal del conductor.

$$A' = \frac{I}{S} = \frac{50 \text{ Amp}}{5 \text{ Amp/mm}^2} = 10 \text{ mm}^2$$

Esta área total se logrará por medio de conductores redondos en paralelo.

Además por facilidades tecnológicas en la construcción de los devanados, esto es, para disminuir la sección de los conductores; se excitará el campo en dos grupos de tres polos en serie, y estos a su vez en paralelo como indica la figura siguiente:



Se toma en consideración el conectar los polos en serie alternadamente (como indica la figura anterior) de manera que el flujo resultante es el entrehierro sea uniforme.

Esto reduce a la mitad el área necesaria del conductor, ya que la corriente de excitación se dividirá en dos ramales, aumentando al doble el número de espiras necesario (de tal manera de no alterar la densidad de flujo requerida en el entrehierro).

Entonces:

El número de espiras por polo es:

$$N = N' \times 2 = 10.4 \times 2 = 21 \text{ espiras.}$$

Area requerida:

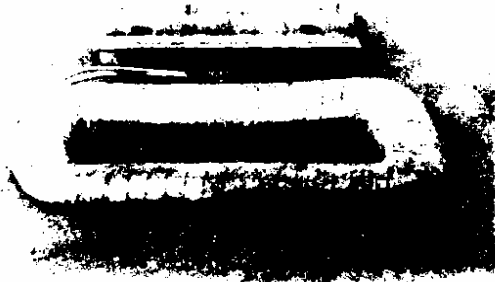
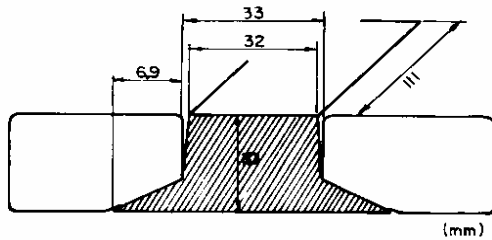
$$A = \frac{A'}{2} = \frac{10 \text{ mm}^2}{2} = 5 \text{ mm}^2$$

BOBINAS DEFINITIVAS.-

Número de espiras: 21
Diámetro de los conductores: 1.02 mm.
Area de los conductores: 1.04 mm² c/u

Número de alambres en paralelo: 5
 Área total en paralelo: 5.2 mm²
 Medidas exteriores: Largo : 157 mm
 ancho : 73 mm
 alto : 10 mm

Las bobinas se conformaron en base a un preciso molde de madera que permitirá aprovechar al máximo el espacio disponible



1.5. CIRCUITO MAGNETICO. CURVA DE MAGNETIZACION DEL MOTOR DISPONIBLE

Es de suma importancia conocer la relación en que se encuentra el flujo magnético en el entrehierro con respecto a la excitación en las bobinas del estator (Amper-vuelta), ya que la determinación de la calidad del hierro nos permitirá conocer realmente el motor en cuestión.

Se utilizará para el efecto un galvanómetro balístico cuya sensibilidad esta dada en Coulomb/milímetro.

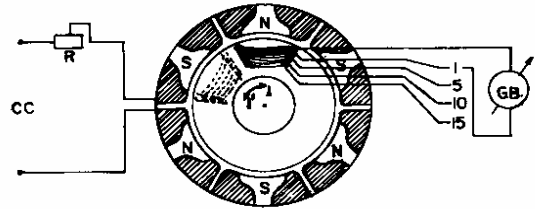
GALVANOMETRO:
 LEEDS & NORTHRUP Co.
 Philadelphia.

Sens. : 0.0019 $\mu\text{c}/\text{mm}$ (varía a: 0.0453 $\mu\text{c}/\text{div}$; ver Anexo 1).
 CDRX : 10000 Ω (critical Damping Resistance).
 PERIOD : 23.5 sec
 Cat. No. 2239 D
 Resist.: 1627 Ω

Mediante el galvanómetro balístico se captará la carga eléctrica que se induce en una bobina de prueba instalada en el rotor (figura siguiente) cuyo paso es igual al paso polar; esta bobina consta de 15

vueltas con terminales respectivos a las 1, 5, 10 y 15 espiras.

Bobinas de campo de 600 espiras de corriente nominal de 0.64 Amp. serán excitadas mediante una fuente de 110 V. de corriente continua y una resistencia adecuada en serie.



Una vez conectados en serie todos los devanados del estator y excitados, el flujo inducido en las bobinas del rotor se podrá conocer según la ecuación:

$$\Delta\lambda_2 = C_b(R_1 + R_{GB})\alpha \quad (\text{Según Anexo 1})$$

C_b = Sensibilidad del instrumento.
 R_1 = Resistencia en serie con el galvanómetro.
 R_{GB} = Resistencia interna del G.B.
 α = deflexión del instrumento.

La deflexión α del instrumento se logra al cambiar la dirección del flujo sobre la bobina del rotor hasta 60 grados geométricos, de la posición 1 a la 1' como indica la figura anterior.

La tabla siguiente (valores promedios de las pruebas) se obtuvo según el procedimiento anterior:

$I_{excit.}$	No. espiras	α	$I_{excit.}$	No. espiras	α
0.1	15	132	0.1	1	8.8
0.13	15	175.5	0.13	1	11.7
0.16	15	228.75	0.16	1	14.92
0.16	10	146	0.20	1	18.43
0.20	10	184.25	0.24	1	22.7
0.24	10	227	0.28	1	30
0.28	5	150	0.32	1	33.6
0.32	5	168	0.36	1	37.8
0.36	5	185	0.40	1	42.1
0.40	5	210.5	0.45	1	47.5
0.45	5	237.5	0.50	1	50
0.50	1	51	0.60	1	60.8
0.60	1	59.5	0.69	1	68
0.60	4	247.5	0.8	1	76
0.69	1	68	0.85	1	79.5
0.8	1	76	0.95	1	87.25
0.85	1	79.5			
0.95	1	87.25			

$$\Delta\lambda_2 = C_b(R_1 + R_{GB})$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta\lambda}{N_1} \rightarrow \Delta\phi = \Delta\lambda$$

$N_1 = 1$

ahora:

$$\Delta\lambda_2 = C_b (R_1 + R_{GB})\alpha$$

$$C_b = 0.04532 \mu\text{c/divisi3n} \quad |\text{volt.sec/div}|$$

según anexo 1

R_1 = resistencia de la bobina del estator = 0.10Ω (se desprecia)

$$R_{GB} = 1627\Omega$$

α = Según tabla anterior.

$$\Delta\lambda_2 = 0.04532 \times 1627 \times 10^{-6} \frac{C.}{dV}$$

$$\Delta\lambda_2 = 73.735 \times 10^{-6} \text{ -----} > *$$

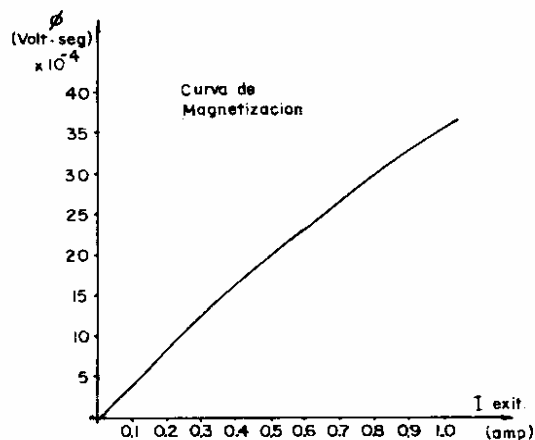
$$\Delta\phi = \frac{\Delta\lambda_2}{N}$$

1

I excitación (Amp)	α (div)	* $\Delta\lambda_2 \times 10^{-6}$ (V-seg)	** ϕ (volt-seg)
0.1	8.8	648.87	3.24×10^{-4}
0.13	11.7	862.7	4.32×10^{-4}
0.16	14.92	1100.13	5.50×10^{-4}
0.20	18.43	1358.57	6.79×10^{-4}
0.24	22.7	1673.79	8.37×10^{-4}
0.28	30	2212.07	11.06×10^{-4}
0.32	33.6	2477.52	12.39×10^{-4}
0.36	37.8	2787.21	13.94×10^{-4}
0.40	42.1	3104.27	15.52×10^{-4}
0.45	47.5	3502.44	17.51×10^{-4}
0.5	51	3760.52	18.80×10^{-4}
0.6	60.68	4474.28	22.37×10^{-4}
0.69	68	5014.02	25.07×10^{-4}
0.8	76	5603.91	28.02×10^{-4}
0.85	79.5	5861.98	29.31×10^{-4}
0.95	87.25	6433.53	32.17×10^{-4}

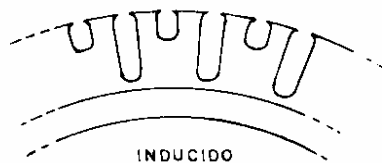
NOTA: El Flujo magnético así obtenido debe ser dividido por 2 ya que pasa la bobina de un polo norte a un polo sur y por tanto se ve afectada doblemente por este.

$$\phi = \frac{\Delta\lambda_2}{2} \text{ -----} > **$$



1.6. REDISEÑO Y CONSTRUCCION DEL DEVANADO INDUCIDO

Las ranuras del inducido del motor se muestran en la figura siguiente, en el plan de devanado se explicará como se afronta esta particularidad del motor en cuestión.



Densidad de flujo en el entrehierro

$$B_{\delta'} = 5000 \text{ Gs}$$

Flujo total por polo:

$$\phi_p = \text{Area polo} \times B_{\delta}$$

$$\phi_p' = 4.65 \times 10.9 \times 5000 = 253425 \text{ Maxwells}$$

ahora:

$$V_i = \frac{P}{a} \frac{n}{60} Z\phi$$

en donde:

P = # pares de polos

n = velocidad en RPM.

V_i = voltaje inducido.

ϕ = flujo total por polo.

a = # pasos en paralelo.

Z = # lados activos en la armadura.

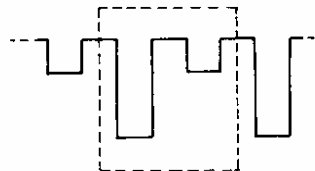
número conductores (devanado ondulado) en la armadura.

$$Z = \frac{V_i}{\frac{P}{a} \frac{n}{60} \phi}$$

$$Z = \frac{86.4}{\frac{3}{1} \frac{2500}{60} \phi \cdot 10^{-8}} = \frac{86.4}{\frac{3}{1} \frac{250}{6} \times 253425 \cdot 10^{-8}}$$

$$Z = 273.$$

Este número tiene que ser múltiplo de Z , número de ranuras $Z = 58$, y aún más múltiplo de 4.



Se consideran, para el cálculo, las dos ranuras de la figura anterior como una sola y debido a esto se debe optar por 4 o múltiplo de 4 conductores por ranura.

Considerando la particular forma de las ranuras, es conveniente optar por 4 conductores por ranura (ver plan de devanado).

Entonces:

$Z = 232$ # de conductores activos en la armadura.

Este valor de Z nos da otro valor de ϕ_p :

$$\phi_p = \phi_p' \frac{273}{232} = 253425 \frac{273}{232} = 298211 \text{ Mx.}$$

y,

$$B_\delta = B_\delta' \frac{298211}{253425} = 5000 \frac{298211}{253425} = 5884 \text{ Gs.}$$

Ahora calculamos el número de espiras por bobina: (N_b).

$$N_b = \frac{Z}{Zk} \quad k = \# \text{ delgas}$$

$$N_b = \frac{232}{2 \times 58} = 2$$

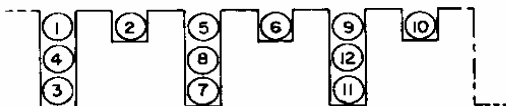
Valor promedio del voltaje entre delgas:

$$V_D = \frac{V_N \times 2P}{k} = \frac{96 \times 6}{58} = 9.9 \text{ volts.}$$

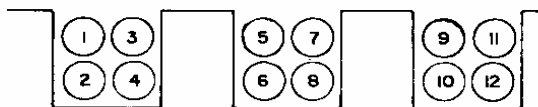
$V_D = 9.9$ voltios (límite máximo según normas: 15-16 volts).

PLAN DE DEVANADO:

Tipo de devanado rotórico



El cálculo lo hacemos tomando como que cada par de ranuras alta y baja son una sola, con cuatro lados activos de bobina.



Calculo:

$Z = 232$ # total de conductores activos.
 $S = 58$ # elementos.
 $P = 3$ pares de polos
 4 lados de elemento por ranura.

1.- # de lados de elementos: $2s \times 116$ (lados).

2.- # ranuras: $n_r = \frac{116}{4} = 29$

3.- numeración:

Se marcarán con números impares los principios de bobina (y estos irán arriba) y con número pares los finales.

4.- Paso polar:

$$\lambda = \frac{29}{6} = 4.8 \text{ ranuras por polo}$$

$$\lambda = \frac{116}{6} = 19.33 \text{ lados de elemento por polo.}$$

5.- Paso del Colector:

$$Y_c = \frac{58 \pm 1}{3} = 19 \text{ (regresivo)}$$

6.- Pasos del enrollamiento y pasos parciales:

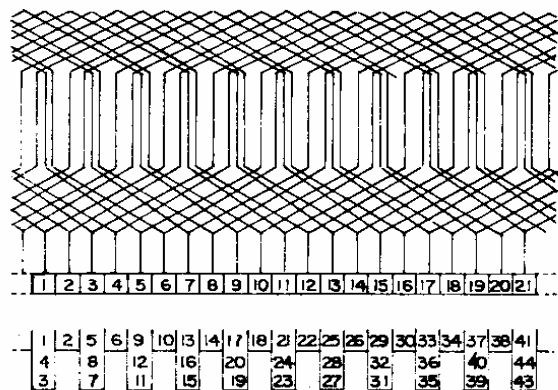
$$Y_e = Y_1 + Y_2 = 2 Y_c = 38$$

$$Y_1 = Y_2 = 19$$

NOTA: El paso Y , de la bobina debe ser lo más cercano al paso polar. Preferiblemente menor para mejorar la conmutación (chisporroteo, etc).

7.- Paso de ranura 4:

1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
1	2	3	4	5	6	7							



SECCION DEL CONDUCTOR:

$$I_N = 50 \text{ Amp.}$$

2a = 2 devanado ondulado (pasos en paralelo).

$$I_{\text{brazo}} = \frac{I_N}{2} = \frac{50}{2} = 25 \text{ Amp.}$$

SECCION NECESARIA:

$$S = \frac{I_{\text{brazo}}}{\psi}$$

Densidad de corriente admisible: (ψ)
 $\psi = 5 - 5.5 \text{ A/mm}$

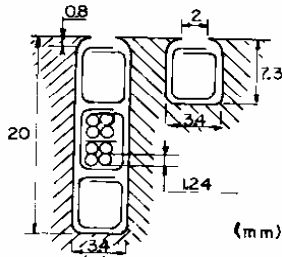
$$S = \frac{25}{5.2} = 4.81 \text{ mm}^2$$

$$d = 2.47 \text{ mm}$$

debido a la imposibilidad de pasar un solo conductor de $d = 2.47 \text{ mm}$ por la cabeza de la ranura se reemplazará este por cuatro conductores de diámetro mitad.

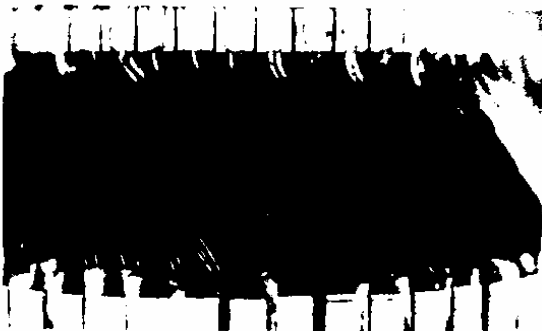
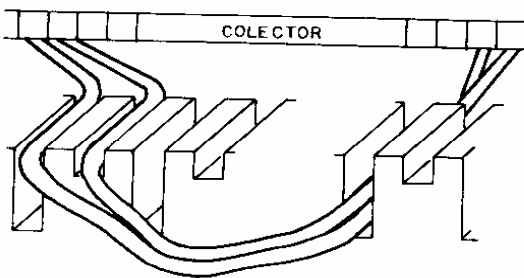
Esto es:

4 conductores de diámetro 1.24 mm
 Area 1.309 mm^2 # 16 AWG
 Area total: $4 \times 1.309 = 5.24 \text{ mm}^2$

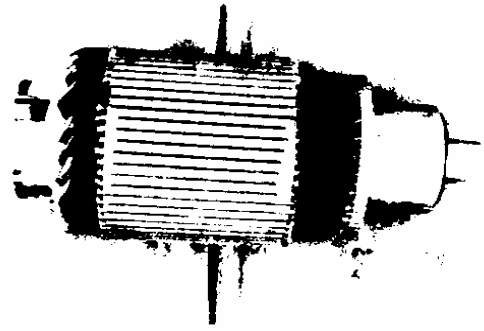


Una vez determinados el número de conductores y su sección, la corriente nominal y el espacio físico se procede a conformar las bobinas en sus dos dimensiones; introducirlas en las ranuras y soldar sus terminales a las delgas correspondientes (ver plan de devanado).

El aislamiento se lo realiza con "prespan" de 0.20 mm de espesor.

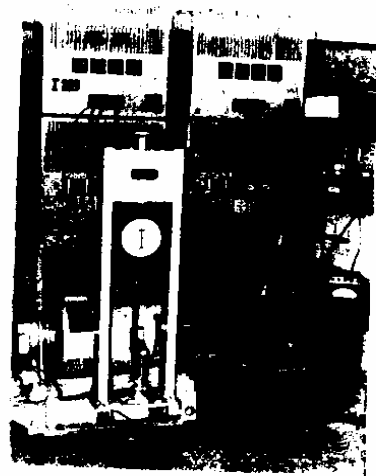


000000

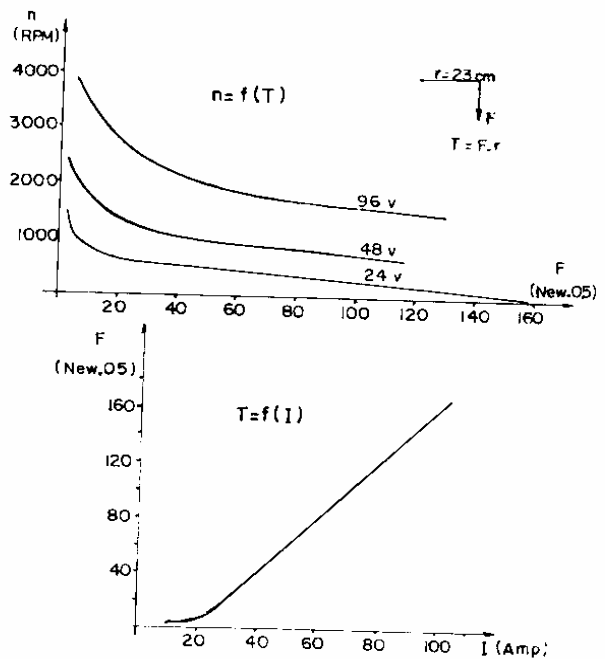


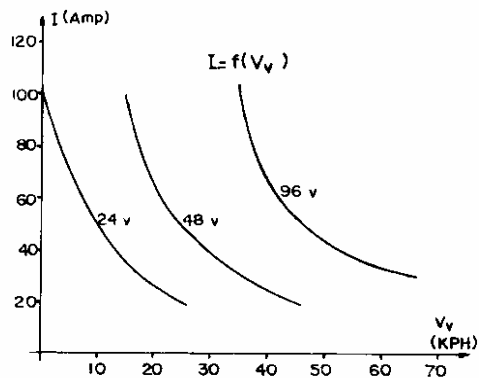
1.7. PRUEBAS DEL MOTOR EN EL LABORATORIO

El motor se acopla a un dinamómetro para obtener sus características en carga.



La característica siguiente $I = f(V_v)$ Se obtiene de las curvas: velocidad función del torque y torque función de la corriente. V_v = velocidad del vehículo.





En motor en carga se puso en funcionamiento mediante resistencias de arranque ya que la corriente era excesiva incluso con 24 voltios.

La resistencia interna del motor es de 0.14Ω , y con esto la solución ideal es arrancarlo con 12 voltios ya que la corriente sería:

$$I = \frac{12 \text{ V}}{0.14 \Omega} = 85.7 \text{ Amp}$$

Con lo cual se evita la resistencia de arranque ya que la corriente no excede el doble de la nominal.

Parte dos:

2.1. ACUMULADORES A UTILIZARSE.-

En los últimos años han surgido nuevas fuentes electroquímicas de energía, como por ejemplo las baterías de Sodio-Azufre, Litio-Cloro, Litio-Fluor, Zinc-Aire.

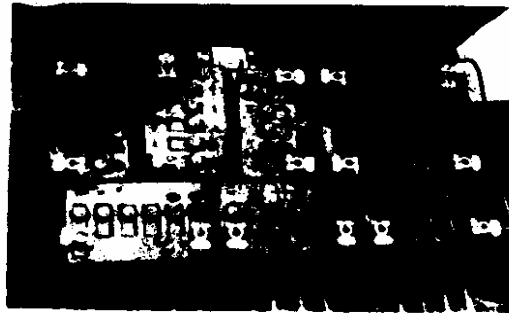
De todos los sistemas enumerados el único aplicable a vehículos eléctricos es el nombrado en último lugar. El desarrollo de las baterías de combustible (células electroquímicas) pese a todos los adelantos no ha alcanzado todavía la madurez necesaria para analizar su rendimiento.

Sin embargo, la batería que mayores perspectivas y aplicación tiene en este campo es la de plomo-ácido debido a que ha sido la más desarrollada e investigada.

Además de que es la más comercializada y por lo tanto la más fácil de obtener sobre todo en nuestro medio.

2.2. BATERIAS:

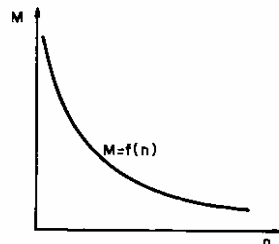
Tipo	: Plomo-ácido
Número	: 8
Voltaje	: 12 Volt. c/u
Capacidad	: 60 amperios-hora c/u
Peso	: 17 Kg c/u
Voltaje total	: 96 Volt.



Parte tres:

CONTROL DE VELOCIDAD

El motor serie tiene una curva de potencia casi ideal esto es que su velocidad disminuye y torque aumenta simultáneamente al aumentar la carga, como se indica en la figura siguiente:



Esto es, que este tipo de motor arrancará con el máximo torque disponible; y también con la máxima corriente ya que son directamente proporcionales.

El control regulará la velocidad desde los 12 voltios para que sin necesidad de resistencias la corriente de arranque no supere el doble de la nominal.

Iarranque = 86 Amp. a 12 voltios (rotor bloqueado)

Los pasos de voltaje serán aplicados al motor mediante el arrancador que se muestra a continuación.

Se aplicarán cuatro voltajes de 12, 24, 48 y 60 volt.

Se debe tener cuidado de alcanzar en cada nivel de voltaje una velocidad del vehículo adecuada, de tal manera de alcanzar un descenso considerable de la corriente para que se facilite la conmutación en el control (ver características $I = f(Vv)$ apartado 1.7).

0003:6

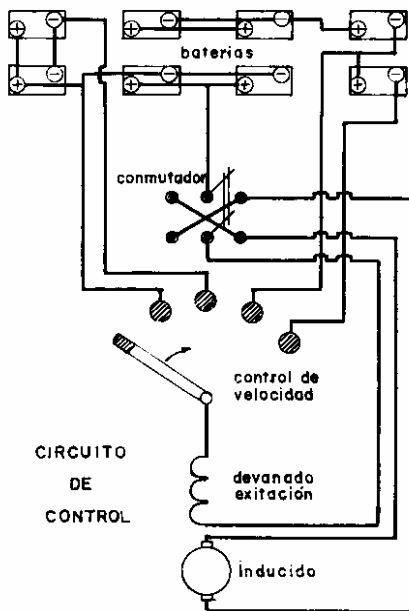


Debido a que la utilización del arrancador que se muestra en la figura, no es el método más adecuado para la regulación de velocidad por las altas corrientes que se deben conmutar; se ha debido limitar el voltaje máximo aplicable al motor a 60 voltios.

Por la imposibilidad de contar, como estaba previsto, con un regulador de velocidad a base de elementos de estado sólido (trozador de onda de voltaje) se ha implementado este sistema que si bien, como se dijo, no es el adecuado permite una regulación satisfactoria como se indica en las pruebas de pista (apartado 5.1).

Se ha dotado al motor de un conmutador - (doble polo, doble vía) que permite cambiar el sentido de la corriente en el inducido y de esta manera poner en reversa el vehículo.

El circuito completo de conexión de las baterías, control de marcha hacia adelante y atrás, control de velocidad y motor se muestra a continuación.



Parte Cuatro:

ASPECTO MECANICO

4.1. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL VEHICULO

La primera condición, siempre presente, fue la de mantener el peso del vehículo en un mínimo, por las restricciones en lo que se refiere al consumo de energía.

Se pensó en utilizar la carrocería de algún vehículo compacto pequeño para dotarlo de un motor eléctrico, pero se descartó esta aplicación principalmente porque el propósito de este trabajo es crear un prototipo, como base de investigación completa sobre el diseño y construcción de vehículos eléctricos.

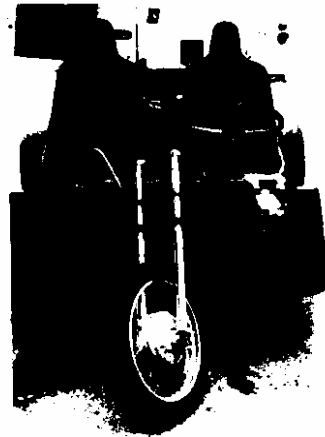
Se realizaron algunos diseños preliminares hasta llegar al modelo que a continuación se detalla.

4.2. DISEÑO FINAL:

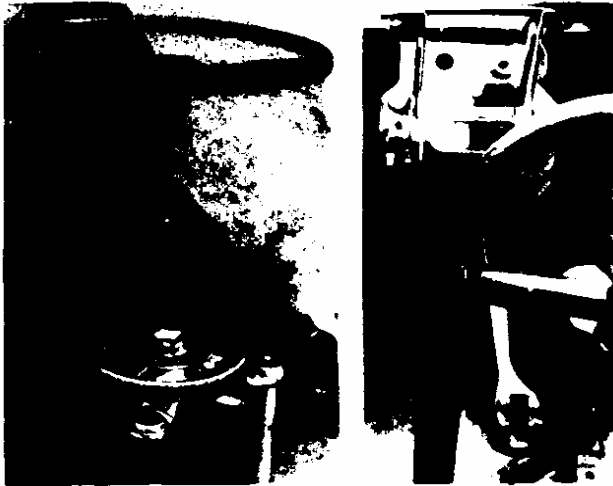
Luego de que se llegó a un diseño definitivo en cuanto a la forma, ensamblaje, dimensiones y espacio para los equipos, se define el vehículo como sigue:

Tiene capacidad para dos personas y un pequeño espacio para equipaje con el fin de reducir su peso total a un mínimo.

El chasis es tubular y su carrocería de fibra de vidrio. Esta dotado de tres ruedas: delantera, que está implementada con el tren y suspensión con amortiguadores telescópicos de una motocicleta; ruedas posteriores montadas en un eje rígido con diferencial y suspensión por ballesta y amortiguadores.



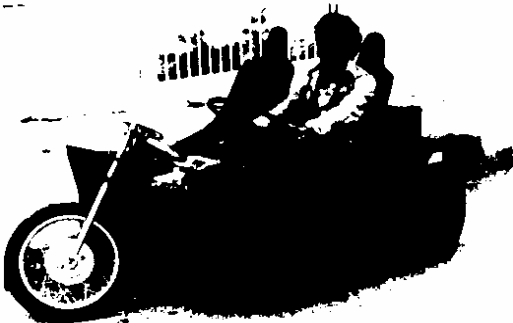
La dirección está comandada por cadena y ruedas dentadas para que el vehículo pueda ser guiado con mayor comodidad y desde uno de los dos asientos disponibles. El eje de la dirección es perpendicular al de la rueda delantera y la relación de desmultiplicación es de 4:1 para dar mayor comodidad en el viraje. Además de frenos hidráulicos aplicados a las ruedas posteriores.



El motor está acoplado al diferencial directamente a través de un eje con uniones cardánicas.



Finalmente el vehículo está terminado y luego de haber probado sus mecanismos en conjunto los resultados son favorables desde todo punto de vista.



El motor está ubicado en la parte delantera del vehículo y las ocho baterías de acumuladores estarán dispuestas detrás de los asientos; en lugares expresamente contruidos para el efecto.

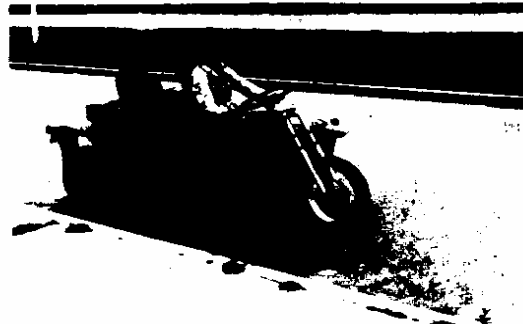


Parte Quinta:

5.1. PRUEBAS DE PISTA

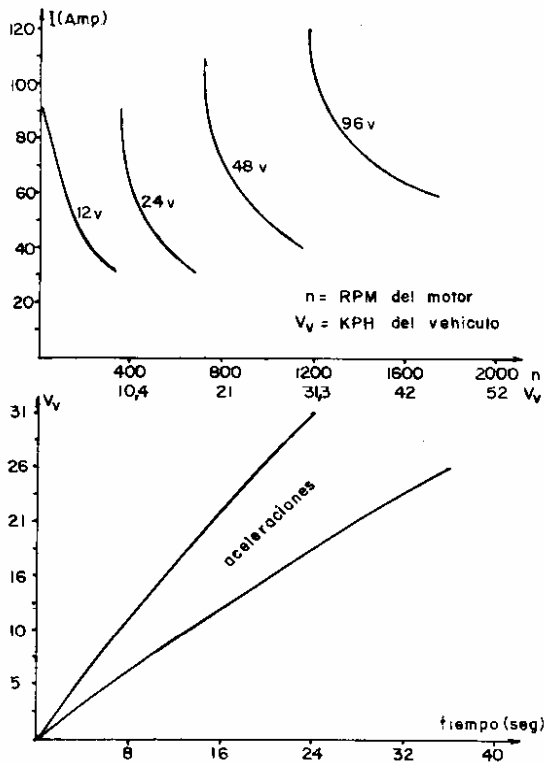
Son realmente óptimos los resultados de pista obtenidos. El prototipo ha respondido plenamente a lo que se esperaba de su diseño y construcción.

Consigue su velocidad máxima de 60 KPH en 24 segundos.



El motor eléctrico de 4 kw cumple su cometido eficazmente.

A continuación se presentan datos obtenidos en pista, que dejan ver la prestación que se ha obtenido del vehículo.



La eficiencia general del vehículo es muy buena. Los componentes mecánicos han res pondido plenamente.

El sistema de frenos hidráulicos en las ruedas posteriores es suficiente para de tener el ligero vehículo. Un sistema de dirección (experimental) dió también muy buenos resultados, ya que con su desmultiplicación de 4:1 permite una maniobra cómoda y eficaz.

La suspensión posterior soporta suficientemente el peso de las baterías, dando una buena estabilidad; además con la amortiguación con muelles telescópicos en la rueda delantera, permiten en conjunto obtener una marcha suave y segura.

El motor montado sobre bases de caucho a coplado al cardán mediante un eje estriado da como resultado que el sonido y vibraciones sean prácticamente nulos.

Los asientos y espacios para el conductor y pasajero permiten una posición cómoda para controlar la dirección, el pedal de freno y el control de velocidad.



5.2. PRESTANCIA PARA DETERMINADOS FINES

Realmente se tiene una gama de velocidades que permitiría que el vehículo sea aplicado a distintos usos:

A 12 y 24 voltios tiene un arranque y velocidad adecuados para aproximaciones y transporte lento.

Con 48 voltios se tiene una velocidad media de crucero y a 96 voltios un transporte muy rápido para este tipo de vehículos.

Ha sido probado también venciendo pequeños obstáculos y pendientes con resultados satisfactorios.

5.3. CONCLUSIONES.-

La finalidad de este trabajo fue el construirlo y desarrollarlo completamente para que se constituya en un vehículo piloto apto para la optimización futura; lo cual se ha logrado a satisfacción.

Los resultados obtenidos se constituyen en una base sólida para el desarrollo del país en el campo de la utilización de la energía eléctrica aplicada a los medios de transporte.

Más aún considerando que este vehículo experimental se ha logrado con limitaciones económicas y tecnológicas, se espera que superando estas condiciones se logre no solo experimentar sino producir vehículos eléctricos fabricados totalmente en el país (como el actual prototipo) que compitan con éxito ante cualquier similar extranjero.

5.4. RECOMENDACIONES PARA LA OPTIMIZACION FUTURA.

El principio básico de funcionamiento del motor no se puede alterar, pero se puede optimizar su funcionamiento para determinados fines; por ejemplo, dotando al motor serie de un pequeño campo shunt, se puede aumentar su velocidad media, especialmente en pendientes y caminos ondulados.

También el frenado electromagnético del motor es una gran ventaja ya que se podría incluso recuperar energía cuando el motor actúe como generador en descensos largos.

La implementación de un control de velocidad adecuado es el requerimiento más importante de este prototipo.

El cargador de baterías incorporado al vehículo permitirá una simple y rápida recarga de las baterías.

Por las experimentaciones realizadas se recomienda una mayor desmultiplicación mecánica entre el eje del motor y los ejes de las ruedas del vehículo.

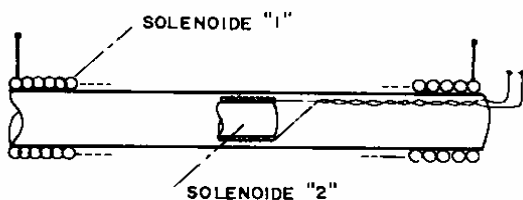
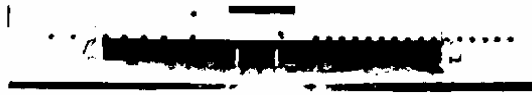
Las demás mejoras en cuanto a carrocería y partes mecánicas son realmente muchas y dependientes del uso y características que se le quieran dar al vehículo.

ANEXO I

CALIBRACION DEL GALVANOMETRO BALISTICO

Se debe encontrar una nueva sensibilidad del galvanómetro ya que fue reemplazado su hilo de torsión original.

Se construyó para aplicar este método dos solenoides que por sus características geométricas adecuadas tienen las siguientes características electromagnéticas:

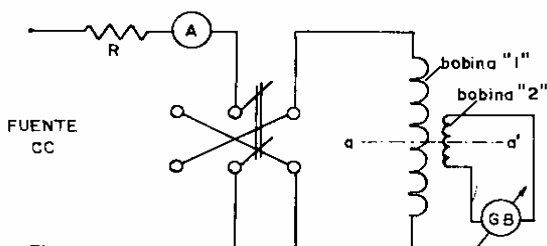


SOLENOIDE "1" : Construido sobre un tubo de cartón. El devanado tiene una longitud de 985 mm. Con 430 espiras de alambre N° 12 AWG.

SOLENOIDE "2" : Construido sobre un tubo de cartón de 57.13 mm. El devanado tiene una longitud de 10 mm. Con 173 vueltas de alambre N° 18 AWG.

Así dispuestas las bobinas concéntricas "1" y "2", se considera que la reluctancia o conductividad magnética en el exterior de la bobina es nula.

Siendo el área o camino magnético fuera de la bobina infinito, comparado con la pequeña área interior de la misma, se considera únicamente la longitud de la bobina (una vez) como el camino magnético del flujo y no el circuito cerrado como correspondería hacerlo.



Una vez construido el circuito anterior se puede calcular H y B en la sección central a-a' del solenoide de "1", suponiendo que el campo magnético es homogéneo alrededor de esta sección.

Ahora conociendo la sección y el número de espiras del solenoide "2" y suponiendo como se dijo anteriormente un campo homogéneo en sus alrededores, se puede calcular la concatenación del flujo total de este solenoide:

H y B en la sección central y a lo largo del solenoide "2" son:

$$H = \frac{N_1 I}{l_1}$$

$$B = 1.256 \times 10^{-6} \frac{N_1 I}{l_1}$$

La concatenación del solenoide "2" :

$$\lambda_2 = BA_2 N_2 = 1.256 \times 10^{-6} \frac{N_1 I}{l_1} A_2 N_2$$

Conmutando la corriente en "1" el cambio de λ_2 es:

$$\Delta \lambda_2 = 2 \lambda_2$$

Desde un principio el galvanómetro balístico mide carga eléctrica (sensibilidad en Coulomb) según la siguiente ecuación:

$$Q = C_b \alpha = \int_0^t i dt$$

Siendo C_b la constante del galvanómetro en coulomb/división y la deflexión del instrumento en las divisiones de la escala.

Durante el intervalo de tiempo en que se desarrolla la conmutación de la corriente i_1 se produce un voltaje inducido en "2" cuyo valor instantáneo es:

$$V_i = \frac{d\lambda_2}{dt}$$

Y la corriente que se produce en la bobina del galvanómetro balístico es:

$$i = \frac{V_i}{\epsilon R} = \frac{V_i}{R + R_{GB}} = \frac{d\lambda_2}{dt} \frac{1}{R_2 + R_{GB}}$$

Si todo el proceso de conmutación es bastante corto con relación al período de oscilación mecánica del galvanómetro balístico el instrumento funcionará integrando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} Q &= C_b \alpha = \int_0^{\Delta t} i dt = \int_0^{\Delta t} \frac{d\lambda_2}{dt} \frac{1}{R_2 + R_{GB}} dt = \frac{\Delta \lambda_2}{R_2 + R_{GB}} \\ &= \frac{2 \lambda_2}{R_2 + R_{GB}} = \frac{2 \times 1.256 \times 10^{-6} N_1 N_2 \Delta I}{I_1 (R_2 + R_{GB})} \end{aligned}$$

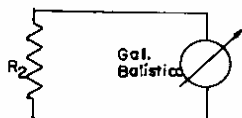
De aquí:

$$C_b = \frac{2 \times 1.256 \times 10^{-8} N_1 N_2 A_2 I}{\alpha I_1 (R_2 + R_{GB})} \left[\frac{\text{seg Amp cm}^2}{\text{cm cm } \Omega \text{ división}} \right]$$

$$\left[\frac{\text{coulomb}}{\text{división}} \right]$$

Se debe hacer notar que este valor de sensibilidad calculado es válido únicamente para estos valores de R_2 y R_{GB} :

En este caso:



$$R_2 \ll R_{GB}$$

$$R_2 \text{ se desprecia}$$

$$R_{GB} = 1627 \Omega$$

Conociendo C_b el instrumento podría utilizarse para medir concatenación de flujo:

$$C_b = \frac{\Delta \lambda_2}{R_1 + R_{GB}}$$

$$\Delta \lambda_2 = C_b (R_1 + R_{GB}) \alpha$$

$$\Delta \phi = \frac{\Delta \lambda}{N}$$

Ahora se procede a excitar la bobina "1" y medir la deflexión del aparato para según la ecuación (1) conocer la sensibilidad:

VALORES PROMEDIOS

I_1	α
5	33
7.5	50.6
10	65.75
15	98.5
20	130

Según la ecuación (1):

$$C_b = \frac{2 \times 1.256 \times 10^{-8} N_1 N_2 \Delta_2 I}{\alpha I_1 (R_2 + R_{GB})}$$

$$C_b = \frac{2 \times 1.256 \times 10^{-8} N_1 N_2 \Delta_2}{I_1 (R_2 + R_{GB})} \times \frac{I}{\alpha}$$

$$C_b = \frac{2 \times 1.256 \times 10^{-8} \times 430 \times 173 \times 2564}{98.5 \times 1627} \times \frac{I}{\alpha}$$

$$C_b = 29.897 \times 10^{-8} \times \frac{I}{\alpha}$$

Según los valores de la tabla anterior tenemos:

$$C_{b_1} = 29.897 \times 10^{-8} \times \frac{5}{33} = 4.5298 \times 10^{-8}$$

$$C_{b_2} = 29.897 \times 10^{-8} \times \frac{7.5}{50.6} = 4.4314 \times 10^{-8}$$

$$C_{b_3} = 29.897 \times 10^{-8} \times \frac{10}{65.75} = 4.5471 \times 10^{-8}$$

$$C_{b_4} = 29.897 \times 10^{-8} \times \frac{15}{98.5} = 4.5528 \times 10^{-8}$$

$$C_{b_5} = 29.897 \times 10^{-8} \times \frac{20}{130} = 5.5995 \times 10^{-8}$$

El promedio de los cinco valores anteriores de C_b es:

$$C_b = 4.5321 \times 10^{-8}$$

$$C_b = 0.04532 \text{ Coulomb/división}$$

Con lo cual la ecuación para medir la concatenación de flujo con el galvanómetro balístico queda determinada:

$$\Delta \lambda_2 = C_b (R_1 + R_{GB}) \alpha$$

ANEXO 2

MANUAL DE MANEJO

El vehículo está provisto de los siguientes elementos para el control:

- conmutador de parada, marcha adelante y retro.
- control de velocidad manual.
- Amperímetro.
- Freno hidráulico en el pie.

MODO DE CONDUCIR:

- 1.- Colocar el conmutador (ubicado entre los dos asientos) hacia adelante, en el centro o para atrás según se requiera que el vehículo de marcha adelante, paro o reversa.
- 2.- El control de velocidad es manual y se debe tener mucha precaución en dejar que el vehículo tome cierta velocidad en cada nivel de voltaje aplicado al motor (de manera de conmutar corrientes muy elevadas). En el amperímetro del vehículo se señala los límites de cambio de nivel de voltaje.

Entonces, de ninguna manera se debe cambiar los niveles de voltaje bruscamente, sino dejarlo en cada paso hasta que el amperímetro este en la señal indicada.

- 3.- Al aplicar los frenos se debe soltar el control de velocidad para que este regrese automáticamente a la posición de apagado.

REFERENCIAS

- "ENROLLAMIENTOS DE MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA" : Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo. Prof. Rubens G. Jordao.
- "MANUAL PARA LA CONSTRUCCION DE MAQUINAS ELECTRICAS" Facultad de Ingeniería Eléctrica Universidad de Budapest Asztalos Peter.
- "CALCULO INDUSTRIAL DE MAQUINAS ELECTRICAS" ; Juan Corrales Martín.
- Enciclopedia CEAC de Electricidad.