Escuela Politécnica Nacional

Facultad de Ingeniería Eléctrica

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE MOTOR LINEAL TRIFASICO DE INDUCCION"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de

INGENIERO

En la especialización de

Sistemas Eléctrico de Potencia

Carlos Alfredo Del Pozo Barrezueta

Marzo — 1992

Quito — Ecuador

CERTIFICACION

Certifico que el Señor CARLOS ALFREDO DEL POZO BARREZUETA realizó el presente trabajo para la obtención del Título de INGENIERO ELECTRICO en la Especialización POTENCIA.

Ing. Luis Taco V.

DIRECTOR DE TESIS

INTRODUCCION

La historia de los Motores lineales de inducción se extiende tan atrás como el siglo XIX. A pesar de haber sido prácticamente olvidado durante los Últimos 30 o 40 años, parece que ha surgido un genuino interés en ellos debido a las potencialidades que presentan en su aplicación a la tracción eléctrica.

Actualmente se desarrollan proyectos de transporte de alta velocidad usando motores lineales, en países industrializados como USA, Japón, Francia, Canadá, Inglaterra, etc., y las aplicaciones en baja velocidad son numerosas y se siguen investigando.

La ventaja mas obvia del uso de estos motores es que no tienen engranajes y no requieren convertidores mecánicos lineal-rotativo, por lo que resultan más robustos y confiables. Son fáciles de construir, mantener y reparar y pueden ejercer un empuje en el secundario sin contactos mecánicos.

OBJETIVOS Y ALCANCE

Primeramente se trata de dar una vision de la teoría de funcionamiento de estas máquinas y sus posibilidades de accion en los diversos campos, como la transportacion terrestre, la propulsion de lanzaderas, el accionamiento de ciertas transportadoras, apertura y cierre de portones, aparatos para prueba de impactos, etc.

Como ya se mencionó, a partir de los años 60, investigadores de distintos países concluyeron que habia un terreno inexplorado de posibles aplicaciones, con sus correspondientes problemas de analisis teorico que era necesario investigar, y la E.P.N. no puede permanecer ajena a este avance tecnológico, por lo cual es importante conocer e investigar esta máquina.

En segundo lugar se pretende construir nuestro propio prototipo de la máquina, el cual serviria para adquirir experiencia y verificar sus facilidades de construccion, su solidéz y confiabilidad, y sus fenómenos particulares, así como proveer al laboratorio de máquinas de un motor lineal trifásico de inducción didáctico.

INDICE GENERAL

INTRODUCCION

CAPITULO I

TEORIA BASICA DEL MOTOR LINEAL DE INDUCCION

1.1 PRINCIPIOS GENERALES

1.1.1 Antecedentes

1.1.2 La acción electromagnética y el factor de bondad

1.2 CARACTERISTICAS GENERALES

1.2.1 Concepción del motor lineal

1.2.2 Aspectos distintivos entre MIL y máquinas rotativas

1.2.3 Consideraciones topológicas

1.2.4 Clasificación de los motores lineales de inducción.

1.2.5 Efectos longitudinales de borde

1.2.6 Efectos transversales de borde

1.2.7 Naturaleza transiente de los campos viajeros.

1.2.7.1 Análisis transiente de los campos que trabajan.

1.2.7.1.1 Cerradura de interruptor para presentar el crecimiento del campo.

1.2.7.1.2 Análisis Transitorio

1.2.7.2 Crecimiento a partir de la proa del empuje de tracción.

1.2.8 Efecto piel y flujos de dispersión en el entrehierro

1.2.9 Cálculo de la fuerza de propulsión para un motor lineal de inducción de un solo lado

1.2.10 Modelo del circuito eléctrico equivalente

1.2.11 Aplicaciones de estas máquinas

CAPITULO II

DISEÑO DEL MOTOR LINEAL PROTOTIPO

2.1 GENERALIDADES

2.2 ALTERNATIVAS TECNICAS Y ECONOMICAS

2.2.1 Características propuestas para el diseño

2.2.2 Restricciones del diseño

2.2.3 Peculiaridades del bobinado

2.3 SELECCION DE PARAMETROS PARA EL MODELO

2.3.1 Longitud efectiva del núcleo

2.3.2 Especificaciones generales

2.3.3 Cálculo de los parámetros constructivos

2.3.4 Diseño de los devanados

2.3.4.1 Esfuerzos principales en un motor de inducción

2.3.4.2 Ecuaciones

2.3.4.3 Número de espiras y sección del conductor del devanado primario.

2.3.4.4 Area de ranura

2.3.4.5 Desarrollo del bobinado

2.4 DIMENSIONAMIENTO DE PRIMARIO Y SECUNDARIO

2.4.1 Primario.

2.4.2 Secundario.

2.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

2.5.1 Antecedentes

2.5.2 Diseño

CAPITULO III

CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

3.1 DESCRIPCION

3.2 PROCESO DE CONSTRUCCION

3.2.1 Primario

3.2.1.1 Núcleos

3.2.1.2 Bobinado de los núcleos

3.2.1.3 Construcción del vehículo

3.2.2 Secundario

3.2.2.1 Perfil de aluminio y respaldo ferromagnético.

3.2.2.2 Pista de toma de energía

3.2.3 Sistema de control del vehículo

3.2.4 Sistemas de ventilación

3.3 LISTA DE MATERIALES

3.3.1 Núcleos primarios

3.3.2 Pista de rodamiento y secundario

3.3.3 Toma de energía

3.3.4 Vehículo

3.3.5 Sistemas de escobillas

3.3.6 Sistema de ventilación

3.4 PLANOS DEL PROTOTIPO

3.5 DETALLES DEL PROTOTIPO

CAPITULO IV

PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.1 INSTRUMENTOS Y ELEMENTOS USADOS

4.2 PRUEBAS PRELIMINARES

4.2.1 Prueba de temperatura

4.2.2 Prueba de funcionamiento a otras frecuencias

4.2.3 Determinación de la corriente nominal

4.3 MEDICION DE PARAMETROS

4.3.1 Circuito eléctrico equivalente

4.3.2 Pruebas para determinar los parámetros del circuito equivalente

4.3.2.1 Prueba de vacio

4.3.2.2 Prueba de rotor bloqueado

4.3.3 Valores de la fuerza de empuje al variar el entrehierro y al variar el voltaje

4.3.4 Variación de la velocidad al variar el voltaje aplicado. (entrehierro fijo. 60 Hz)

4.3.5 Observación de las corrientes en el osciloscopio.

4.4 ANALISIS DEL RESULTADOS

4.4.1 Circuito equivalente.

4.4.2 Aplicación del circuito equivalente efectivo.

4.4.3 Análisis de las pruebas dinámicas

4.5 FORMULACION DE LOS PARAMETROS NOMINALES DEL PROTOTIPO

Aqui

CAPITULO I

TEORIA BASICA DEL MOTOR LINEAL DE INDUCCION

1.1 PRINCIPIOS GENERALES

1.1.1 Antecedentes

Siguiendo al descubrimiento de las leyes de inducción de Faraday en 1831, los Ingenieros no demoraron en explotar el fenómeno produciendo generadores AC y otras máquinas.

Un aspecto de este primer período que puso considerables restricciones a la innovación fue el énfasis dado a la EFICIENCIA. Sucede con frecuencia que los avances de la tecnología se han visto detenidos por la "TRADICION". A pesar de que los motores lineales datan de 1841, la profesión de Ingeniería como un todo, estaba tan convencida de lo "correcto" del movimiento rotativo y de las altas eficiencias obtenibles con máquinas cilíndricas con pequeños espacios entre estator y rotor, que pusieron de lado los motores lineales hasta hace poco. En este intermedio, todo el campo de la ingeniería económica había ido hacia una revisión, podría decirse hacia una revolución. Primero la relación potencia-peso y costo, y mas tarde la confiabilidad, el bajo mantenimiento y la ausencia de poluciones habían sobrepasado a la eficiencia y factor de potencia como criterio de calidad. El motor lineal, con su confiabilidad inherente, renació en 1946 y vino a quedarse.

Pasando al concepto mismo de estos motores, básicamente se puede construir dos tipos, como lo veremos mas adelante,

los planos y los tubulares. En cada uno ocurre una fuerza de propulsión que actúa entre el primario y el secundario del motor lineal. Un motor plano se puede obtener haciendo un corte a lo largo de una máquina rotativa normal y desenrrollándola. El segundo tipo se obtiene volviendo a enrrollar el primer tipo a lo largo de la otra abscisa.

En ambos casos el término PRIMARIO describe la parte de la máquina que lleva el devanado, usualmente polifásico y energizado desde una fuente exterior. Figura 1.1

El SECUNDARIO se refiere a la parte sólida, que no lleva devanado y que puede ser un riel de aluminio fijado en hierro.

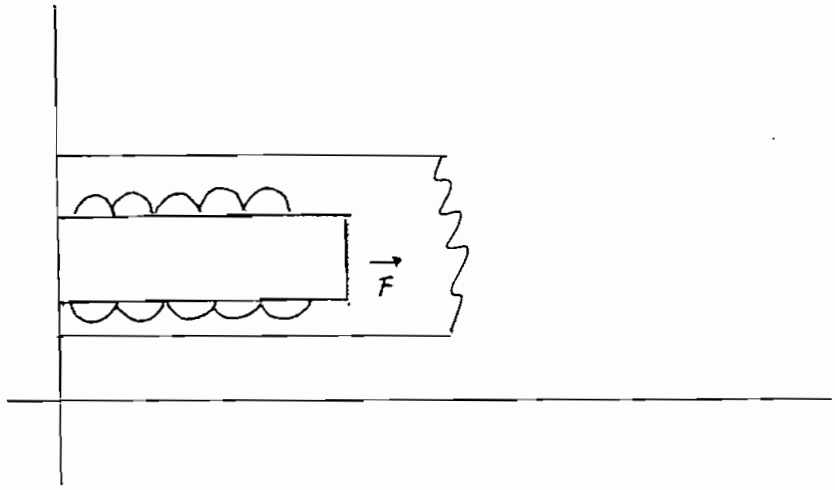


Fig. 1.1 NOMINACION DE PRIMARIO Y SECUNDARIO DE UN MIL

El principio de operación del motor lineal de inducción, básicamente es el mismo que el del motor rotativo, con la presencia de problemas adicionales que estudiaremos mas adelante.

1.1.2 La acción electromagnética y el factor de bondad

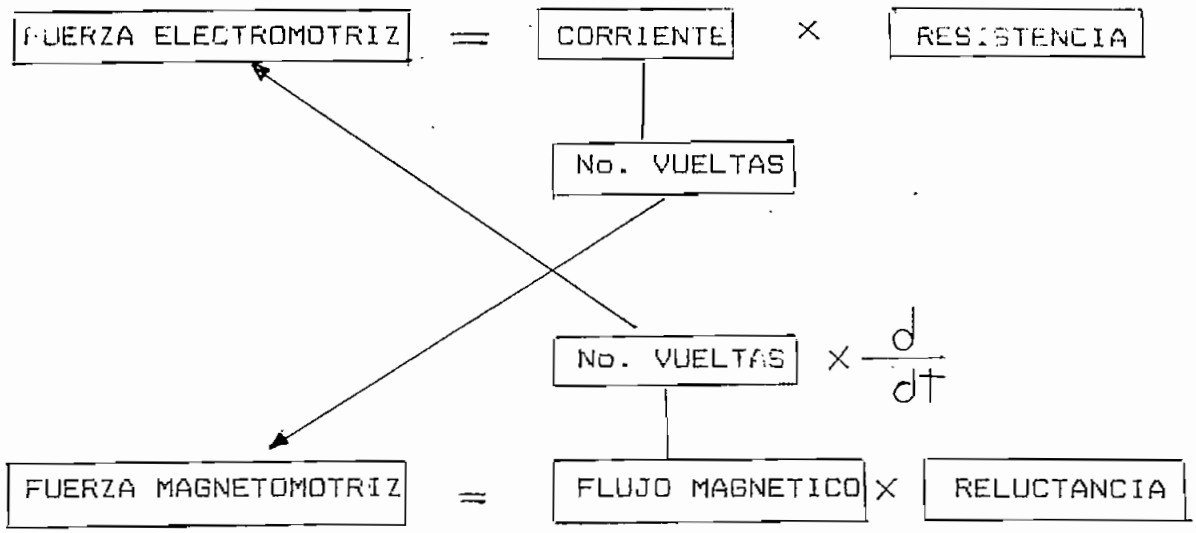


Fig. 1.2

En la figura 2 se muestra las interrelaciones entre los circuitos eléctrico y magnético de una máquina cualquiera, apreciándose que para obtener flujo y corriente se oponen la resistencia y la reluctancia. En otras palabras, el inverso de estos dos parámetros es proporcional a la buena calidad de la máquina, y a esto se llama "Factor de Bondad", dado por

$$G = (w\sigma\mu)\left(\frac{A_e\ A_m}{Le\ L_m}\right)$$

Donde w es la frecuencia de operación, μ es la permeabilidad, σ es la conductividad eléctrica, A_m y A_e son las áreas transversales de los circuitos, y L_m y L_e son las longitudes promedio de las líneas de campo respectivas de los circuitos.

La ecuación anterior es una guía simplificada para el diseño de toda máquina eléctrica, pero especialmente en el

caso de máquinas lineales, debido a que indica la forma de un diseño exitoso de la máquina, la cual por la naturaleza de sus aplicaciones requiere de grandes entrehierros en su circuito magnético. La misma ecuación demuestra inmediatamente que las unidades electromagnéticas se hacen mas efectivas cuando son de mayor tamaño, debido a que el segundo paréntesis de la ecuación contiene las dimensiones físicas de la máquina, y una máquina que se incremente en tamaño por un factor de 2 en cada dimensión real debe incrementar su factor de bondad por 4. Las cantidades en el primer paréntesis de (1) tienen que ver con la naturaleza de los materiales de que está hecha la máquina ($\mu=\mu_o$ en máquinas lineales en las que el entrehierro domina la permeabilidad del circuito magnético) y con la frecuencia de la fuente. El segundo paréntesis contiene todos los posibles diseños y tamaños de máquinas y es por lo tanto dentro de este paréntesis que el diseñador debe poner su habilidad y el inventor su ingenio para tratar siempre de incrementar el valor de G.

El término "bondad" fue elegido deliberadamente de tal manera que no se confunda su uso con propiedades específicas de las máquinas tales como <u>eficiencia</u>, relación potencia-peso o factor de potencia, para las cuales todo diseñador sabe que una o mas de esta cantidades puede ser incrementada a voluntad a expensas de las otras.

Es instructivo, sin embargo, examinar el efecto de G en un cantidad particular. (Por ejemplo aquí escogemos la

eficiencia). Asumimos que no se hacen concesiones en ninguna otra propiedad de una máquina de potencias de entrada y salida dadas.

La figura 1.3 muestra el efecto y vemos que la región alrededor de G=1 parece ser muy notable. Máquinas en que G es mayor que, digamos, 3 son generalmente aceptables. Motores con G menor que 1/2 generalmente tienen pocas probabilidades de comercialización exitosa, excepto en casos muy especiales.

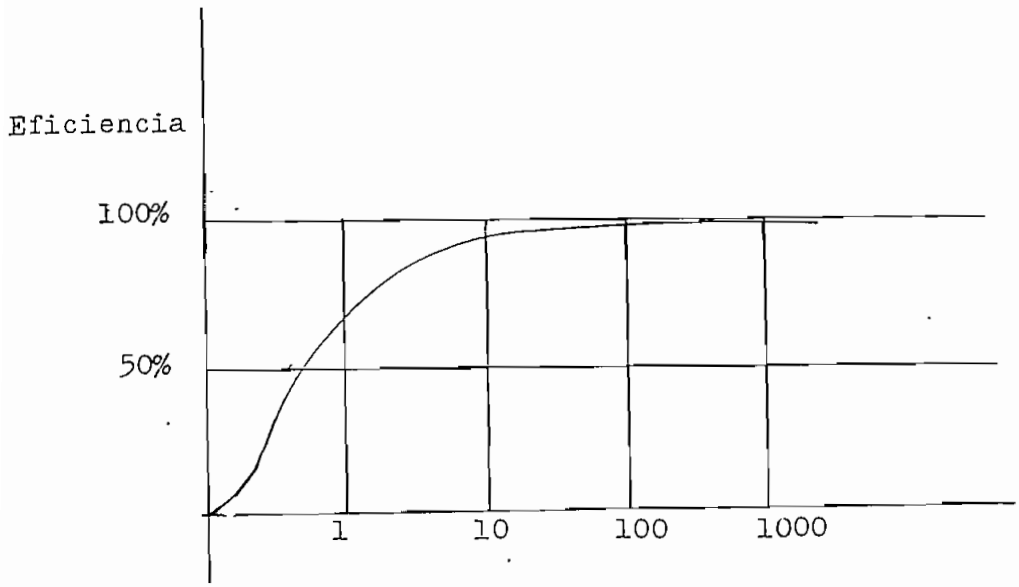


Fig. 1. 3

1.2 CARACTERISTICAS GENERALARES

1.2.1 Concepción del motor lineal

Si en un motor de inducción trifásico, de jaula de ardilla, aumentamos simultáneamente el número de pares de polos y el diámetro del entrehierro, manteniendo constante el paso polar (fig. 1.4) el campo magnético giratorio en el

entrehierro describirá órbitas circulares cada vez de menor curvatura, y en el límite, cuando el número de pares de polos sea infinito el campo magnético se desplazará a lo largo de un entrehierro rectilíneo con una velocidad lineal igual a la velocidad tangencial del campo primigenio, o sea

$$v_1 = w_1 R = \frac{2\pi n_1}{60} R = \frac{2p\tau_p n_1}{60} = 2\tau_p f_1$$

donde τ_p = Paso polar

f_1 = Frecuencia de la corriente de alimentación

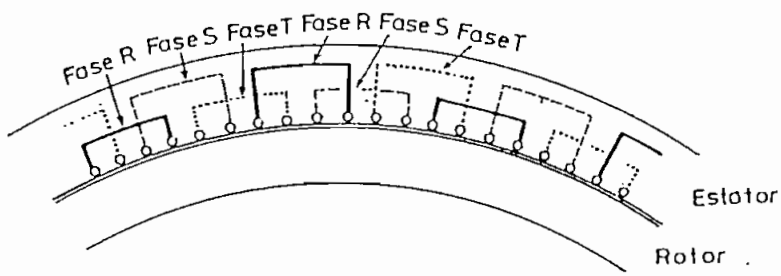


Fig. 1.4 Fracción del estator y del rotor de un motor asíncrono de elevado número de polos y de gran diámetro

En el límite se tendrá también, que tanto el estator como el rotor, con su jaula, serán de estructura lineal y el movimiento del rotor, debido a las fuerzas electromagnéticas creadas por la interacción entre el campo magnético y las corrientes inducidas será a su vez lineal. No es necesario un desarrollo ilimitado del motor para obtener un campo de movimiento rectilíneo. Basta tomar una porción finita del estator que comprenda un mínimo de 4 pares de polos para

obtener un campo magnético de distribución mas o menos senoidal y movimiento rectilíneo.

El número de ranuras del paquete estatórico será

$$K = 2pqm$$

donde m = número de fases del devanado

q = número de ranuras por polo y fase elegidos

p = número de pares de polos del campo en el entrehierro final

1.2.2 Aspectos distintivos entre MILS y máquinas rotativas

Una fuerza que produce movimiento lineal es llamada empuje, fuerza de tracción o fuerza de propulsión. (Por movimiento lineal queremos decir en la dirección horizontal). Por otro lado una fuerza en el plano perpendicular a la dirección del empuje es llamada <u>fuerza normal</u>. (1) La presencia de una fuerza normal en una máquina de movimiento rectilíneo es claramente uno de los aspectos que la distinguen de una máquina de movimiento rotativo (donde tal fuerza es considerada anormal).

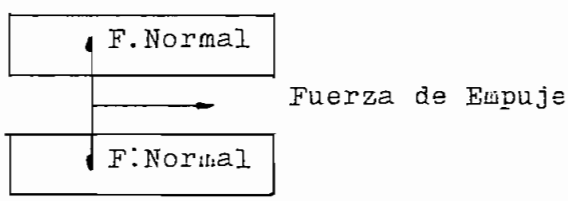


Fig. 1.5 FUERZAS EN UN MIL

Con el objeto de puntualizar ciertas diferencias entre

una máquina lineal y su contraparte rotativa, considerando un motor rotativo, polifásico de inducción. Por un proceso imaginario esta unidad puede transformarse en un MIL si el estator del MIR se lo corta en un plano radial y se lo desenrolla, y el rotor es reemplazado por un lámina conductiva como en la fig. 1. 6

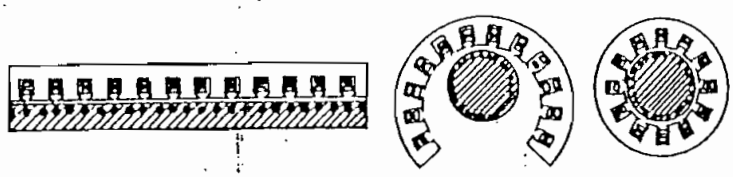


Fig. 1.6 Proceso imaginario de desenrollar un motor convencional para obtener un motor lineal de inducción

Designamos el "estator" como el primario y el "rotor" como el secundario. Notamos que el primario (núcleo y bobinas) tiene ahora una longitud finita llamada la <u>longitud activa</u> y tiene un PRINCIPIO y un FIN. La presencia de estos dos extremos lleva al fenómeno de (2) EFECTOS DE BORDE, que es único a los motores eléctricos lineales y no existe en

máquinas rotativas. Este fenómeno depende entre otras variables, de la velocidad, y tal fenómeno dependiente de la velocidad no tiene contraparte en una máquina de movimiento rotativo.

Generalmente se considera que una máquina rotativa es satisfactoria si tiene una alta eficiencia y un alto factor de potencia, Desde luego otros criterios también se usan para evaluar tales máquinas. Debido a los efectos de borde, sin embargo, el (3) criterio usual de eficiencia y factor de potencia no es aplicable a un MIL de la misma manera que se lo usa en su contraparte rotativa, y se prefiere utilizar en diseño el criterio del factor de bondad (G).

También se considera como diferencia principal la variación de los parámetros de magnetización X_m y r_m, que se analiza en 1.2.10.

1.2.3 Consideraciones topológicas

Es casi un principio general que cuando las características topológicas de una máquina eléctrica son modificadas, las condiciones de operación y los criterios de diseño de la nueva máquina cambian considerablemente. Como resultado de cambios topológicos en el circuito magnético de la máquina, se introducen nuevos fenómenos que no pueden ser totalmente explicados por teorías.

Así pues, una máquina lineal que consista en una copia

exacta del resultado de desarrollar un motor convencional solo puede ser usado en un número limitado de casos, pues la longitud activa de la forma original del motor lineal se reduce cuando toma lugar el movimiento, como se ve en la figura 1.7.

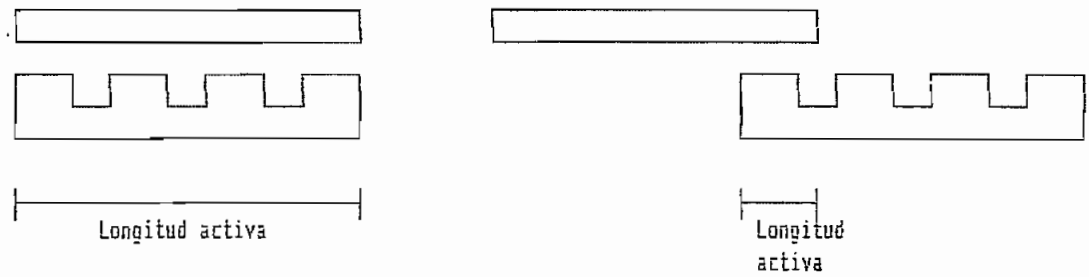


Fig. 1.7

Es claro que cuando se requiere movimiento sobre una distancia considerable, y con una limitada cantidad de potencia, EL PRIMARIO O EL SECUNDARIO DEBEN ELONGARSE. Tal elongación lleva inmediatamente a las dos principales clases de máquina lineal: "primario corto" y "secundario corto".

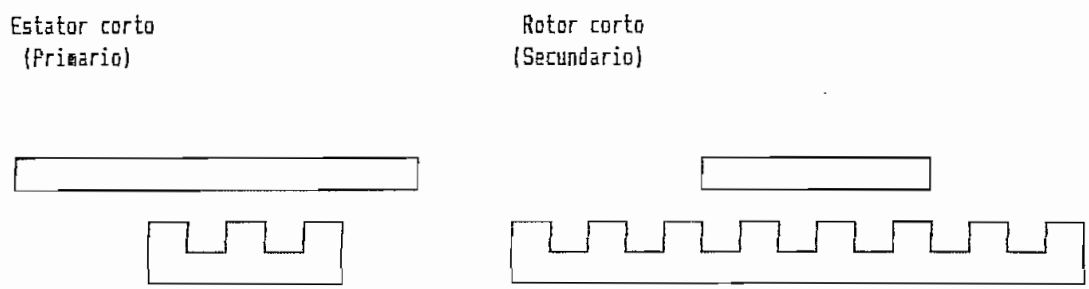


Fig. 1.8 CLASES DE MAQUINAS LINEALES

En general el primario corto es el modelo mas barato de construir y operar. El secundario puede ser simplificado en su forma, a menudo a una simple lámina de conductor, y todo

el sistema se alimenta solo por una pequeña extensión de su longitud. Sin embargo en ciertas situaciones, un compromiso de arreglo descrito asume que primario y secundario están formados por conductores en ranuras en un núcleo de acero laminado, que es el arreglo usual en una máquina rotativa, con tal estructura. Sin embargo existe, además del empuje electromagnético tangencial que la máquina ha sido diseñada para dar una fuerza puramente magnética entre las dos superficies opuestamente magnetizadas. De acuerdo con esto se ha desarrollado máquinas planas de doble lado en las cuales los conductores secundarios ya no van en ranuras pero operan en el entrehierro y el circuito magnético se cierra con un bloque de acero solo en la región que se energiza. Generalmente es ventajoso colocar en este segundo bloque otro bobinado primario, que ayude a conducir el flujo a través del secundario.

Aquí debemos tomar la precaución de que los campos magnéticos que cada bobinado determina individualmente, pulsen en el espacio en sincronismo.

Con esta ejecución logramos doblar a lo largo del entrehierro la fmm de excitación y <u>supuesto que la máquina no esté saturada</u>, cuadruplicar el entrehierro. Este punto es de extrema importancia en la aplicación de este tipo de motores en la que el entrehierro puede sufrir variaciones importantes.

El desarrollo del motor de doble lado se lo ilustra en

la figura 1.9.

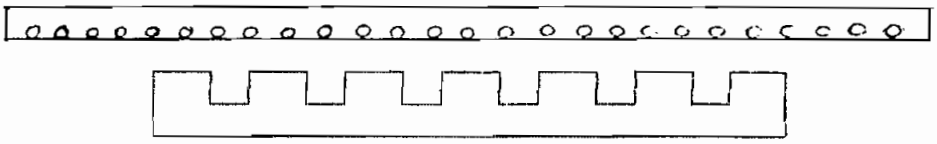
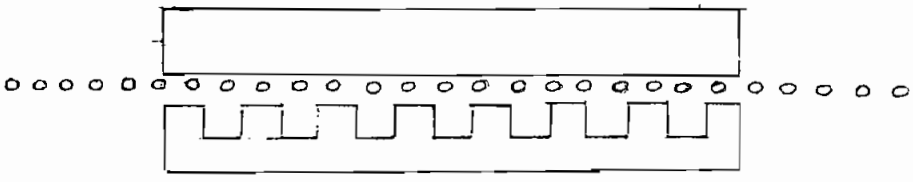


fig. 1.9 Motor lineal con secundario tipo jaula

ETAPA 1

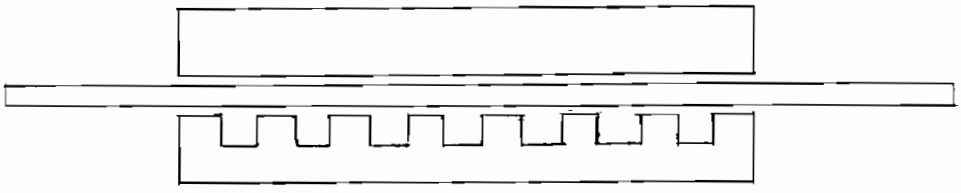
Remover de las ranuras los conductores del rotor.

Acortar el hierro del rotor.



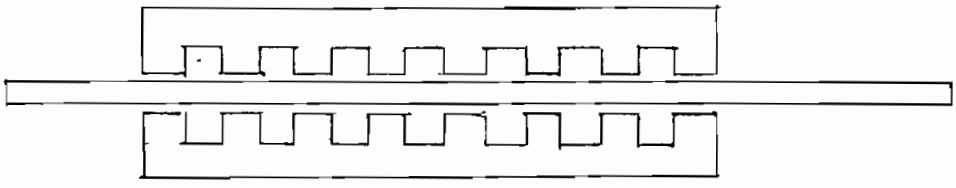
ETAPA 2

Convertimos los conductores del rotor en una sola lámina.



ETAPA 3

Añadimos un segundo bobinado primario



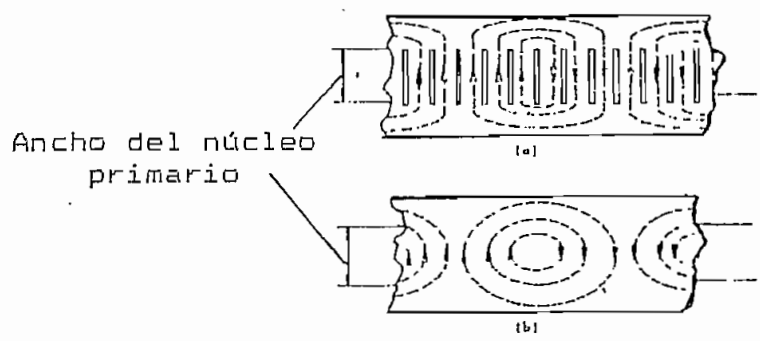
En la etapa final, el secundario se lo simplifica constructivamente hasta que consiste en una lámina sólida de conductor, pero aún este último cambio de forma sirve para modificar las condiciones de operación.

La figura 1.10(a) muestra un patrón típico de flujo de corriente en el caso de conductor secundario tipo escalera (el equivalente lineal de un rotor jaula de ardilla). Corrientes de barra solo pueden fluir por los conductores extremos, pero en el caso de una lámina sólida se obtienen patrones como los mostrados en la figura 1.10(b). El efecto de las corrientes longitudinales bajo la zona activa es un reaporte de flujo en el entrehierro de tal manera que exista una mayor densidad a lo largo de las regiones centrales de la máquina que a lo largo de cada lado.

Fig. 1.10

DISTRIBUCION DE CORRIENTE EN:

(a) PLACA SECUNDARIA RANURADA



(b) ROTOR LAMINA

1.2.4 Clasificación de los motores lineales de inducción

El mas común de los MIL es un moto polifásico. Como en

un motor de inducción polifásico rotativo, el campo magnético en el entrehierro es un campo viajero. Este, a diferencia de lo que sucede en un motor rotativo, a menudo tiene una componente hacia adelante, una componente hacia atrás y un componente pulsante correspondiente a las discontinuidades en el circuito magnético. Sin embargo la componente hacia adelante predomina y es responsable de la producción de la fuerza útil por interacción con las corrientes inducidas en el secundario. Otra vez, en contraste con su contraparte rotativa, un MIL tiene un primario móvil (con secundario fijo) o un secundario móvil (con un primario estacionario).

Dependiendo de las longitudes relativas del primario y secundario un MIL puede ser de primario corto Fig. 1.11(a) o de secundario corto Fig. 1.11(b). También un MIL puede tener dos primarios cara a cara para obtener un MIL de doble lado (DSLIM). Fig. 1.11(c) si el motor tiene un solo primario es llamado MIL de un solo lado (SLIM).

El secundario de un MIL puede consistir de una placa secundaria o lámina, algunas veces reforzada por un material ferromagnético o el secundario de tipo usual jaula. Un secundario con bobinas es mas bien poco usual.

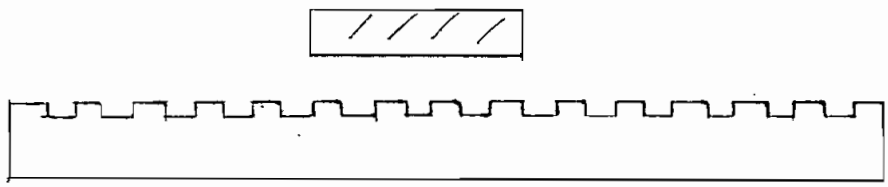
Como en un motor rotativo, un MIL puede tener tres fases o dos. Los primarios de todos estos MIL son esencialmente similares a las bobinas de una máquina rotativa, excepto que a menudo el primario de un MIL tiene las ranuras finales a medio llenar.

En discusiones anteriores hemos considerado los MIL como derivados de los motores de inducción rotativos, cortándolos y extendiéndolos. Tales motores son obviamente motores PLANOS. Si un motor plano es enrrollado alrededor de un eje en la dirección del movimiento del campo, tendremos un motor tubular o de FLUJO AXIAL en el que el campo viaja a través del agujero del primario. La estructura podría ser descrita

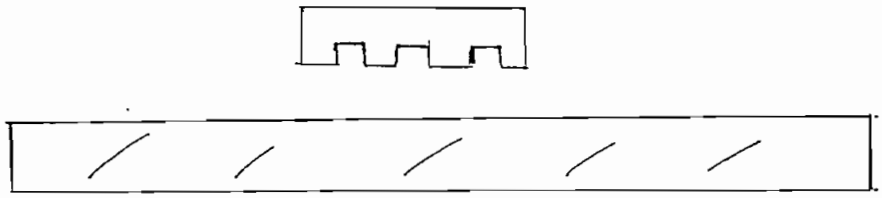
Fig. 1.11

CLASES DE MOTORES LINEALES

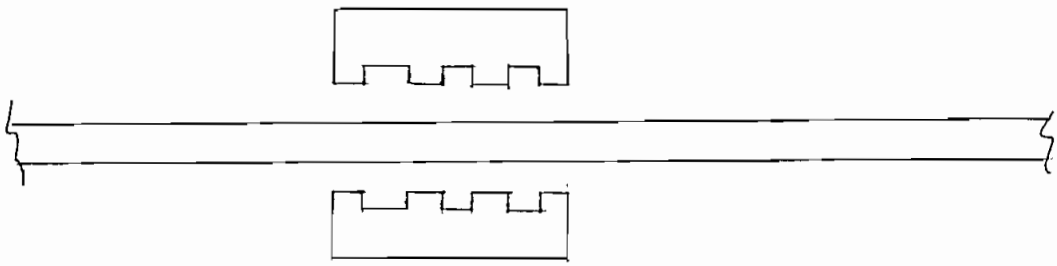
(a) MIL PRIMARIO CORTO DE UN SOLO LADO (SLIM)



(b) MIL DE SECUNDARIO CORTO



(c) MIL DE PRIMARIO CORTO BILATERAL (DSLIM)



como un cañón electromagnético. Fig. 1.12

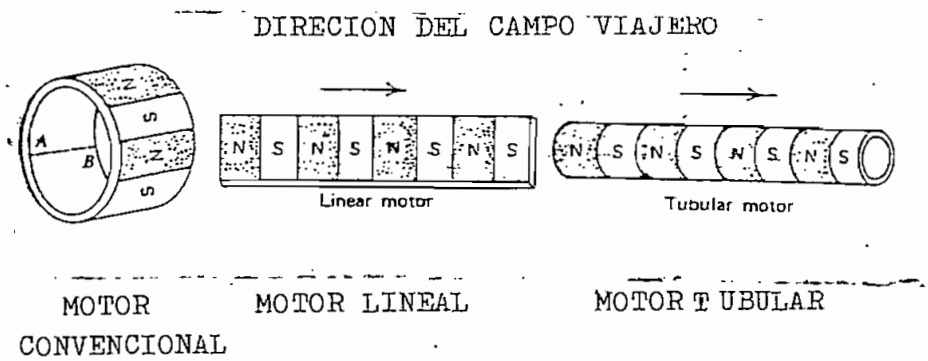


Fig. 1.12 DESARROLLO DE UN MOTOR TUBULAR

Una ventaja de este tipo de estructura es ilustrada en la figura 1.13. Las máquinas rotativas convencionales y las máquinas lineales planas llevan bobinas primarias que pueden decirse son útiles sólo donde pasan a través de las ranuras, los fines de bobina o cabezales son necesarios para conducir las corrientes de polo a polo, y aparte de que proveen área de enfriamiento, se desperdician. En los motores tubulares

las bobinas son enrolladas de tal manera que PQ cae sobre RS y el alambrado se puede ver que consiste de bobinas circulares en fila, simplificando considerablemente la estructura.

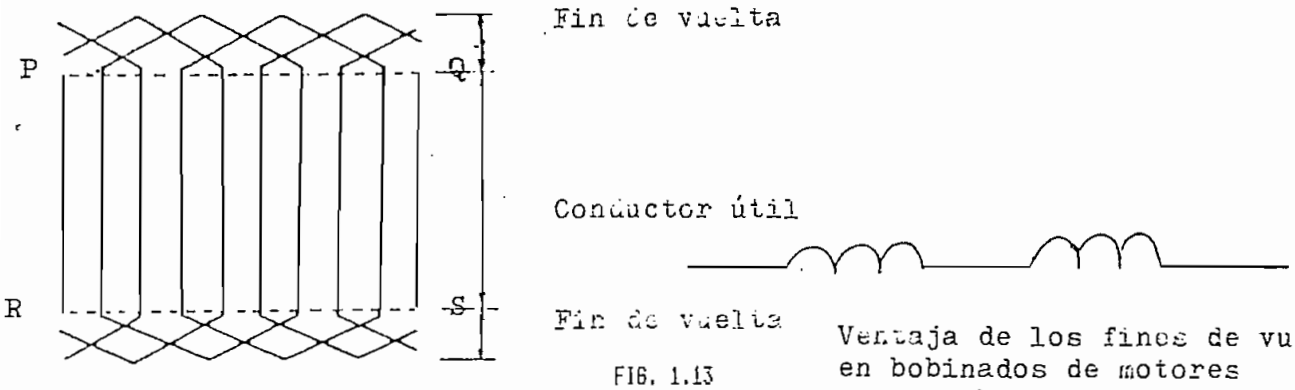
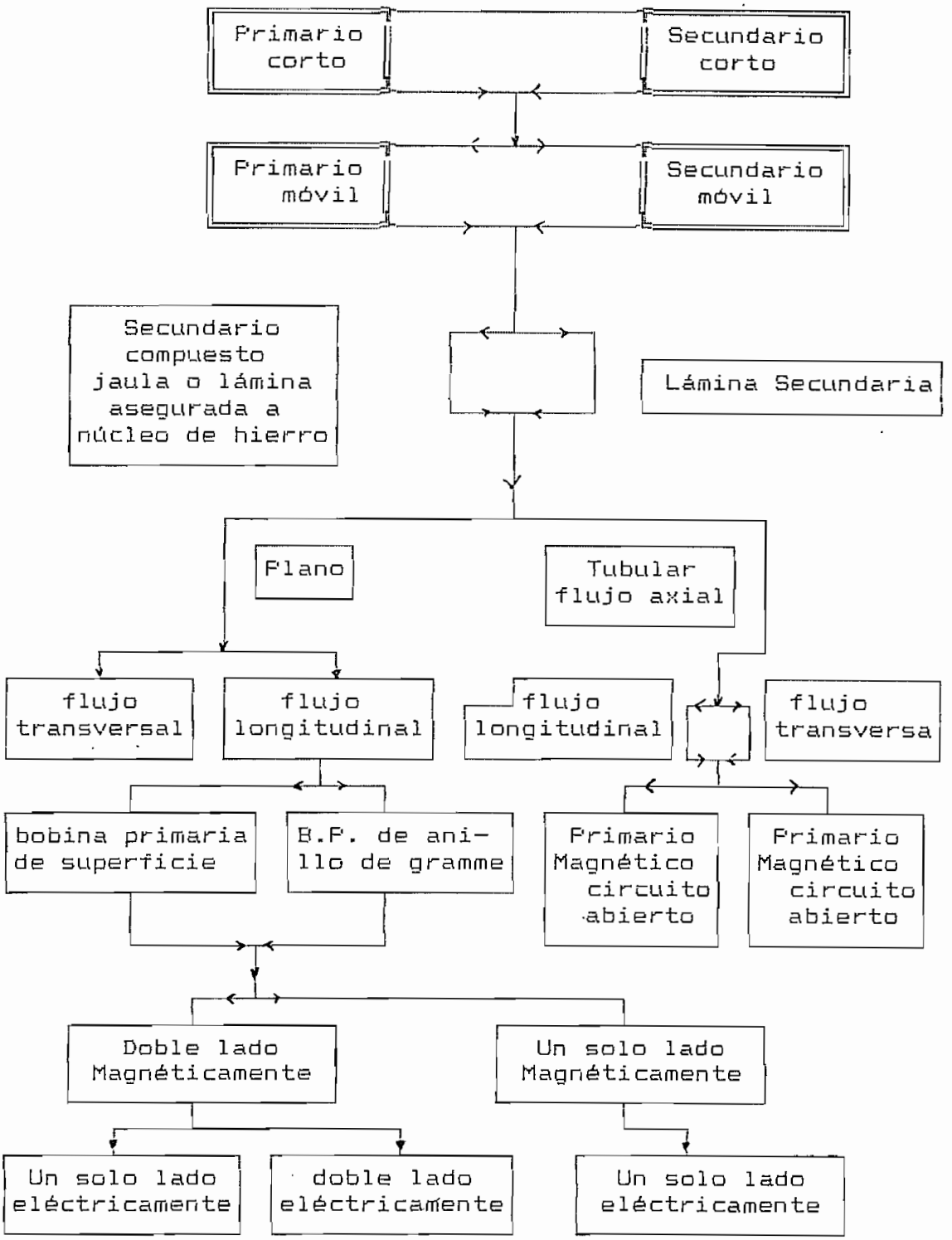


FIG. 1.13 Ventaja de los fines de vuelt en bobinados de motores tubulares

Las diferencias topológicas entre motores tubulares y máquinas planas no terminan, sin embargo, con los circuitos eléctricos. El motor tubular es un ejemplo particular de una clase completa de motores lineales que incluye las máquinas planas, en las que el campo viajero está en la dirección del movimiento. Tales máquinas son descritas como máquinas de flujo longitudinal. Los circuitos electromagnéticos pueden modificarse de tal manera que el camino del flujo esté en un plano perpendicular a la dirección del movimiento, resultando un motor de flujo transversal. Los efectos de borde en motores de flujo axial son diferentes de aquellos en máquinas planas. Mientras las bobinas de superficie de un máquina plana demandan que una corriente que pasa en una dirección a través de la máquina debe finalmente retornar por la otra, de tal modo que $\int J dx = 0$, una máquina de flujo axial puede imponer cualquier número de polos del sistema de excitación. Una representación de las clases en que se puede dividir las

Fig. 1.14

MOTOR LINEAL DE INDUCCION



1.2.5 Efectos longitudinales de borde

Debido a los bordes frontal y lateral del primario en los MIL, ocurren ciertos efectos que no se presentan en máquinas cilíndricas. En ambas clases de máquina la acción de estos bordes es producir ondas estacionarias en el núcleo magnético además de la componente viajera usual. Segundo, cuando ocurre movimiento relativo entre el primario y secundario, se establecen transientes eléctricos por los bordes. Estos efectos de borde de entrada y salida han sido analizados en detalle en publicaciones reciente y sólo un sumario de los resultados se incluye aqui.

En máquinas de primario corto los principales efectos son los siguiente:

1) La distribución de flujo a lo largo de la máquina es no uniforme. La distribución varía con la velocidad. EN GENERAL ES COMO SI EL MOVIMIENTO RELATIVO EMPUJARA TODO EL VOLUMEN DE FLUJO A LA PARTE POSTERIOR DE LA MAQUINA.

2) PERDIDAS EXTRAS, NO CALCULABLES POR LA TEORIA CONVENCIONAL DE MAQUINAS. Estas ocurren en el miembro secundario en el caso de una máquina conectada en serie, y en el primario en el caso de una conección en paralelo.

3) LA FUERZA NO ES CALCULABLE POR FORMULAS CONVENCIONALES, siendo en general un poco menor que para máquinas convencionales. Este efecto y el efecto previo, son notablemente afectados por el número de polos a lo largo del primario y por la velocidad: mientras mas baja es la velocidad en relación al sincronismo y mayor el número de polos, menores son los efectos.

Como consecuencia de (3), las máquinas no correrán ligero, como motores, a la velocidad sincrónica indicada. diferencia no es marcada, excepto en máquinas de menos de cuatro polos.

Los efectos longitudinales de borde se clasifican en DINAMICOS Y ESTATICOS. Los efectos dinámicos de borde son causados por el movimiento relativo entre un primario de longitud finita y un secundario infinitamente largo. Para apreciar las consecuencias de los efectos dinámicos de borde, asumimos que a una velocidad igual a la convencional sincrónica, un contorno C en el secundario ocupa las posiciones C_0, C_1,...,C_4 en los instantes t_0, t_1,...,t_4 como en la figura 4.3. Debido a que la velocidad secundaria es sincrónica, voltajes no convencionales inducidos cuando C está en C_2. También debido a que no existe flujo concatenado con el contorno no hay voltajes inducidos en C_0 y C_4. Pero en las posiciones C_1 y C_3, los flujos que concatenan los contornos cambian en el tiempo, y por tanto inducen voltajes y corrientes localmente en el secundario. Cuando C se mueve de la posición C_0 a C_4, a altas velocidades las corriente inducidas se atenúan mas bien lentamente de C_1 a C_3.

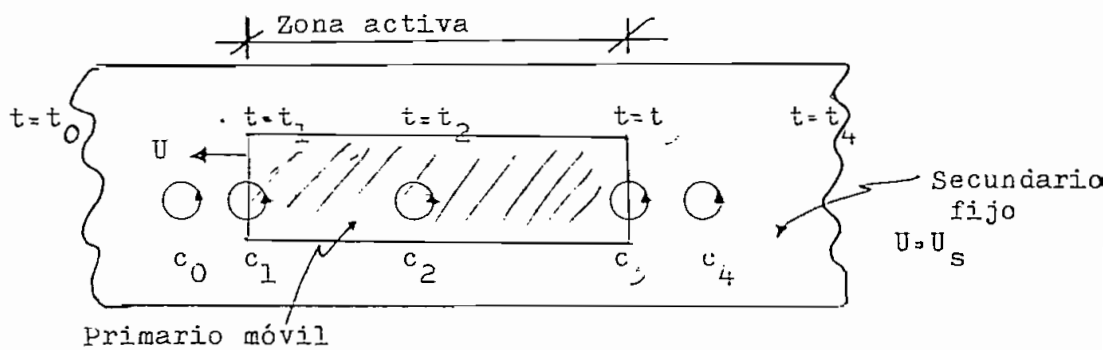


FIG. 1.15 EFECTO DE BORDE A LA VELOCIDAD SINCRONICA

Estas corrientes se las puede denominar corrientes de borde, y aún a la velocidad sincrónica estas producen pérdidas adicionales y fuerzas que se incrementan al incrementar la velocidad. Estas fuerzas adicionales en MIL son fuerzas de frenado en la región de bajo deslizamiento. Esto resultaría en una reducción en la eficiencia, factor de potencia y empuje de salida del MIL con relación a las que tendría si no hubiera efectos de borde.

Debido a la longitud finita del primario, la atenuación de las corrientes de efecto de borde fuera de la zona activa del entrehierro ($L \leq X \leq 0$) es más rápida que dentro de la zona activa.

Debido al inevitable desbalance en la impedancia de los bobinados trifásicos se introduce efectos de borde estáticos, por tanto corrientes desbalanceadas fluyen en las diferentes fases aun cuando se apliquen voltajes balanceados a los terminales. Los efectos de borde estáticos causan pérdidas adicionales y un reducción en el empuje de un MIL.

Los efectos de borde estáticos, que estarán presentes aun cuando el secundario esté en reposo y el efecto de borde dinámico esté ausente, son amplificados por el efecto de borde dinámico, que distorciona la distribución de densidad de flujo en el entrehierro causando mas desbalance en las concatenaciones de flujo.

1.2.6 Efectos transversales de borde

Sabemos que el primario y el secundario de un motor lineal de inducción tienen anchos finitos y que generalmente el secundario es más ancho que el primario (fig. 1.16) las consecuencias de este aspecto físico se llaman efectos transversales de borde. Despreciando los efectos longitudinales de borde por el momento, examinemos el patrón de corriente inducidas en el secundario. Estas corrientes (fig. 1.16) tienen densidades con una componente longitudinal J_x y una componente transversal J_z. La densidad de corriente J_x es la mayor fuente de efectos transversales de borde. Por tanto, <u>un MIL que tenga su primario y secundario el mismo ancho tendrá mayores efectos transversales de borde que un MIL en que el secundario es más ancho que el primario</u>, y para reducir los efectos sería una buena idea incrementar el ancho del secundario. Estos efectos no deben ser confundidos con los efectos causados por los caminos de retorno de corriente secundaria. La mayor influencia de los efectos transversales es <u>incrementar</u> la resistividad secundaria equivalente. Esto implica que para simular los efectos transversales debemos considerar un MIL que carezca de estos efectos pero que tenga un secundario cuya resistividad sea mayor que la resistividad real.

La figura 1.16 revela que en general los sobresalientes del secundario no pueden ser iguales, eso es $b \neq c$. Como resultado de efectos transversales de borde, hay una fuerza descentralizadora en el secundario que causa INESTABILIDAD LATERAL.

Finalmente, la densidad de corriente longitudinal tiende a ser una fuente de reacción de armadura que distorsiona los campos en el entrehierro llevando generalmente a una reducción en la salida del MIL.

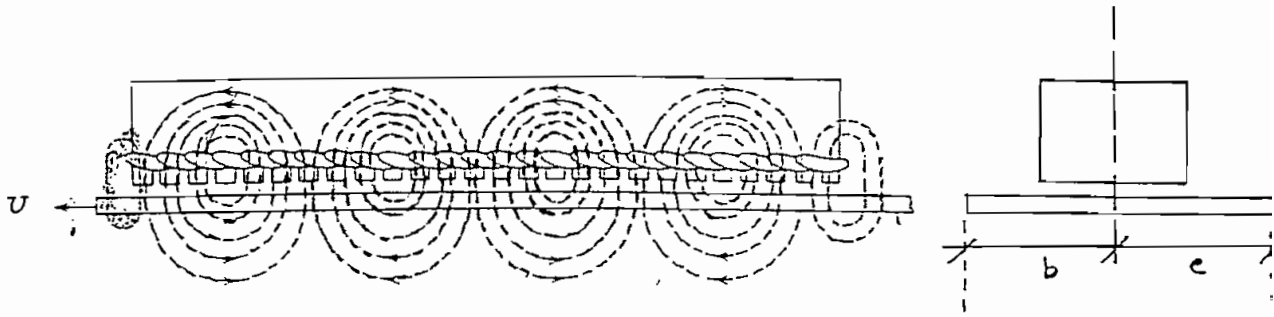


fig. 1.16

En resumen las principales consecuencias de este efecto son:

a) Un incremento en la resistividad secundaria

b) Tendencia a la inestabilidad lateral

c) Distorsión de campos en el entrehierro

d) Deterioro del comportamiento del MIL afectado por los anteriores factores.

1.2.7 Naturaleza transiente de los campos viajeros. {6}

En un motor de inducción lineal en movimiento, los campos magnéticos que viajan en el entrehierro crecen desde cero en el borde delantero de la unidad y decaen en el borde posterior. De esto sigue que, si se comparan con un motor de inducción rotativo que tenga el mismo número y tamaño de polos, y que trabaje con la misma densidad pico en el entrehierro, la capacidad de tracción es menor debido a la naturaleza transiente de los campos magnéticos. Específicamente, debido a la transiencia se encuentra que el

estator y la pista individualmente "perciben o "experimentan" diferentes valores de fuerzas de traccion; mientras mas pequeña es la fuerza en la pista, mayor es la fuerza de oposición en el estator. Hay una diferencia correspondiente entre pérdidas de conducción en una pista y una contribución del estator a, o su "percepción" de, esta pérdida a fin de examinar los campos viajeros en el entrehierro en cuanto a como crecen desde cero en la proa del estator y pasan a la popa, se escogerán puntos de vista fijos, o a la cara del núcleo del estator, o a la pista. Esto presenta campos en el entrehierro que sean monofásicos y aparte de las corrientes de estator, transiente; así, la proa del estator, la fuente de transiencia se la asocia con t=0.

Un modelo para presentar la transiencia de la proa que sugiere por si mismo, ahora compone un par 1,r/4 en paralelo, racionalmente excitado por una corriente monofásica. Como si lo fuera por el cierre de un interruptor cuando el ángulo de fase al que se cierra es a y t=0. En el marco del estator como referencia, tal corriente es expresada en términos de ϕ (wt) y en el marco de la pista, por $S\phi$.

Las ecuaciones 2,3 y 4, escritas en términos de $S\phi$ (y otras tres escritas en términos de estator, con ϕ) son soluciones describiendo el transiente racional de cerradura de interruptor, usando la transformada de Heavy-side, y muestran, respectivamente, corrientes de magnetización, corrientes de pista, y densidad en el entrehierro B como funciones de la "entrada" de paso (o cierre de interruptor)

en la fase a. Tres pasos siguen ahora:

a) Se selecciona un producto de cualquier par de soluciones que puedan ser de interés (el producto $i_z B$ o fuerza en la pista, de las ecuaciones 3 y 4 es dibujado en la fig. 6, mas tarde, para mostrar cambios cuando la "entrada de proa" o cerradura de interruptor la fase a se mueve entre 0 y π).

b) Integramos este producto entre 0 y π, con respecto a, y dividiendo para π como lo indica la ecuación 5.

c) Integramos el resultado de (b) respecto a ϕ (o $S\phi$), de 0 a pπ (o Spπ) como indica la ecuación 5, y asi damos un valor colectivo para los p o Sp polos de un entrehierro trabajando.

El análisis transiente es aplicado a su vez al estator. y a la pista, y lleva a diferentes versiones, por ejemplo, de potencia de tracción o pérdidas en la pista.

En la popa, los campos magnéticos que enlazan el conductor de la pista dejan el entrehierro, por su aumento en reluctancia, ganan energía a expensas de una disminución y una pérdida de energía resistívamente en la popa.

1.2.7.1 Análisis transiente de los campos que trabajan.

1.2.7.1.1 Cerradura de interruptor para presentar el crecimiento del campo.

La figura 1.17 representa 2 versiones de corrientes viajeras de estator, como se las ve desde la proa; nominalmente la versión monofásica de estator:

Isen(wt+a)

y la versión desde la pista a deslizamientos:

Isen(swt+a)

Ambas aparecen dibujadas en escala común de tiempo, cero en la proa.

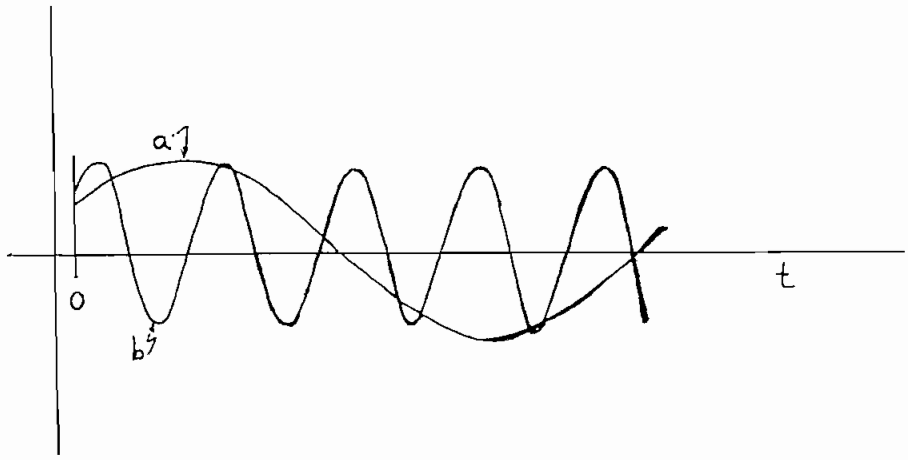


fig.1.17 Comparación en tiempo de las versiones de estator y pista de la corriente de estator.

a) Corriente de estator vista como I(sen swt+a) por un observador que "entre" al entrehierro a t=0.

b) Corriente de estator I(sen wt+a) como se la ve desde la proa del estator.

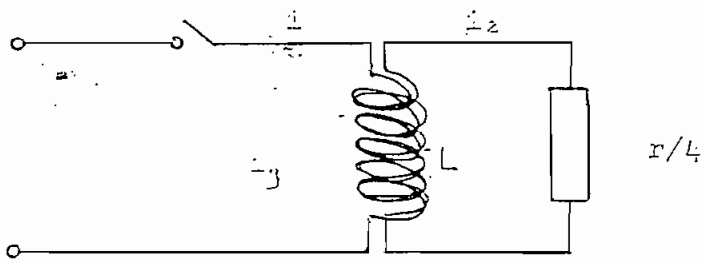


fig. 1.18 Cerradura de interruptor para presentar crecimiento desde la proa un campo viajero en el entrehierro.

La fig. 1.18 muestra un interruptor, cerrándose para pasar corriente de estator desde una fuente monofásica de alta impedancia a un circuito con L y P/4 en paralelo; esto modela un crecimiento unido de i_2 en la pista, y de i_g magnetizando el entrehierro.

La inductancia del campo mono polar L se muestra como un doble arrollamiento, debido a que corresponden a las entidades separadas de estator y pista, pero se asume completo acoplamiento.

Para valores en el marco de referencia de la pista, la fuente racional tiene frecuencia de deslizamiento.

1.2.7.1.2 Análisis transitorio.

En la fig. 1.18 una corriente inyectada $i=I\ sen(swt+a)$ y su corriente de magnetización de entrehierro i_g, se relacionan, usando el operador Heavyside-Laplace S, por:

$$LSi_g = r(i-i_g)/4 \ ; \ o \ (S+r/4L)i_g = ir/4L$$

escribiendo $r/4L = \alpha$, llegamos a una versión desde la pista de la corriente de magnetización de entrehierro.

$$(S+\alpha)i_g = \alpha i = I\alpha\ sen(Swt+a)$$

y esto tiene la solución transiente

$$i_g/I = \alpha\ exp.\ (-\alpha t)\int_0^t exp\ (\alpha t)\ sen(swt+a)dt$$

la cual se convierte

$$i_g/I = \{\alpha(\alpha^2+S^2w^2)\}\{\alpha\ sen(swt+a)-sw\ cos(swt+a)$$
$$- exp\ (-\alpha t)\ (\alpha\ sen\ a - sw\ cos\ a)\}$$

Es conveniente escribir $\alpha/w = h$ y $wt = \phi$, de tal manera

que en términos de la pista con deslizamientos, y entrada de popa o cerradura del interruptor fase a, las soluciones en el marco de referencia de la pista son expresadas por las 3 ecuaciones:

$$H(t) = i_g/I = \{h/(h^2+s^2)\}\{h.sen(s\phi+a) - s.cos(s\phi+a) - (h.sen(a) - s.cos(a)).exp(-h\phi)\} \quad (2)$$

haciendo $i_2 = i-i_g$ llegamos a

$$H_2(t) = i_2/I = \{s/((h^2+s^2)\}\{s.sen(s\phi+a)+h.cos(s\phi+a)+ (h.sen(a) - s.cos(a)).exp(-h\phi)\} \quad (3)$$

La densidad de flujo en el entrehierro $B_o = \mu_o I_g/2g$ y B retrasa i_g por $\pi/2$, luego

$$H_B(t) = B/I = \{\mu_o h/2g(h^2+s^2)\}\{s.sen(s\phi+a)+h.cos(s\phi+a) - (s.sen(a) + h.cos(a)).exp(-h\phi)\} \quad (4)$$

Para expresar estas ecuaciones en términos de estator, el ángulo $s\phi$ es reemplazado por ϕ.

2.7.2 Crecimiento a partir de la proa del empuje de tracción

La fig. 1.19 muestra el crecimiento a partir de la proa de la fuerza de tracción i_2B cuando la fase a, a la cual la pista "entra" al entrehierro, procede en pasos de 30° desde cero hasta 150°.

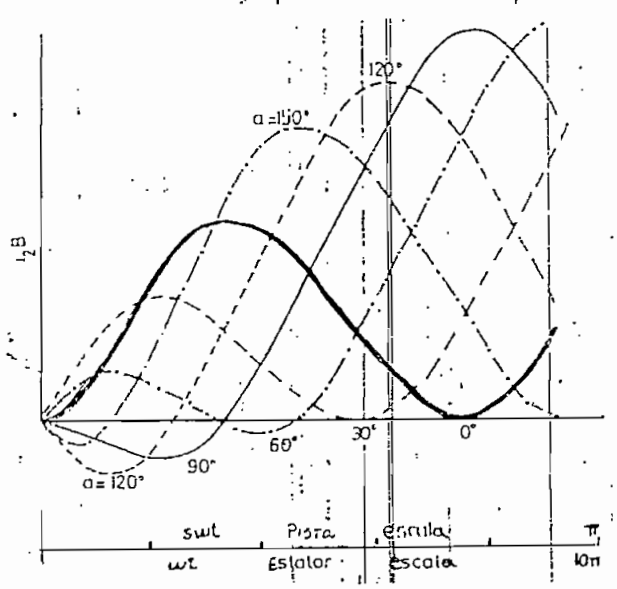


fig. 1.19 Mostrando el crecimiento en fuerza de tracción a diferentes ángulos de "entrada a la pista".

Las funciones de tiempo $H_1(t)$, $H_2(t)$ y $H_3(t)$ respectivamente , presentan crecimientos de la corriente de magnetización i_o en el estator, de la corriente de pista i_2, y de la densidad de flujo en el entrehierro B, cada uno en términos de la corriente aplicada de estator i.

Los valores medios de la fuerza de empuje de la pista se obtienen de 2 integraciones del producto $H_2H_3(t)$: primero una integración respecto a la fase de entrada a, e independiente de ϕ:

$$1/\pi \int_0^{\pi} H_2H_3(t)\ da = f(\phi)$$

entonces, para un estator con p pasos polares y ϕ variables

$$1/\pi \int_0^{p\pi} f(\phi)\ d\phi = f(p)$$

De este modo, el empuje en la pista, partiendo de un estator de p pasos polares se encuentra que es:

$$F_t = \{K_t b\mu_o I^2 hs/4y(h^2+\delta^2)\}(p-q)\ \text{[Newton]}$$

siendo $q = \{1-(\cos sp\pi + A\,\mathrm{sen}\,sp\pi)\exp(-hp\pi)\} * 2h/\pi(h^2+s^2)$

y $A = (h/2s)-s/2h$

que es el número de pasos polares de estator que en sentido de la tracción, son inefectivos debido al limitado crecimiento del campo.

1.2.8 Efecto piel y flujo de dispersión en el entrehierro

En motores lineales de alta velocidad restricciones mecánicas requieren una distancia relativamente grande entre los dos primarios de un MIL de doble lado (o entre el primario y el hierro posterior del secundario de un MIL de un

solo lado); esto es, hay una distancia apreciable entre el primario y el secundario. Por ejemplo, en un MIL de doble lado, grande y de alta velocidad, el espesor del secundario d puede ser del orden de 8 a 10 mm y la distancia entre los dos primarios g (conocida como el entrehierro), puede ser tal que g/d sea entre 3 y 6. La frecuencia de entrada puede ser tan grande como 100 Hz. Por tanto a un deslizamiento de 10% el efecto piel no es despreciable. Este efecto puede ser tomado en cuenta usando un factor de corrección adecuado.

Al ser muy grande el entrehierro, el flujo magnético producido en el primario no llega en su totalidad al secundario, produciéndose un gran flujo de dispersion. Por tanto tenemos altas corrientes de magnetización y <u>bajo factor de potencia</u>. Esta condición debe tomarse en cuenta para asegurar un análisis preciso de un motor de inducción lineal.

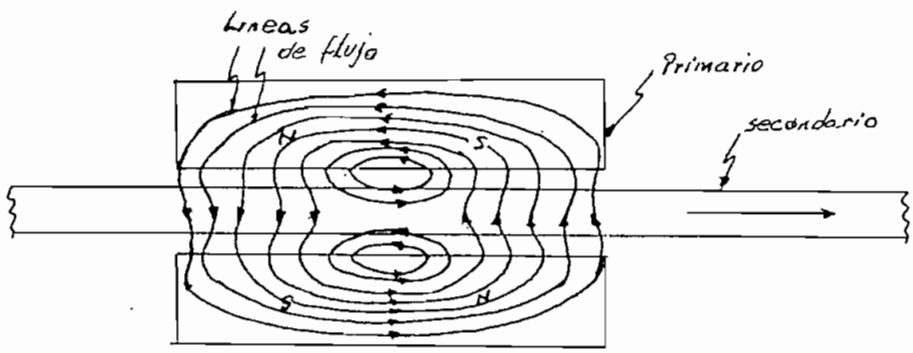


Fig. 1.20 FLUJO DE DISPERSION EN EL ENTREHIERRO

1.2.9 Cálculo de la fuerza de propulsión para un motor lineal de inducción de un solo lado. {15}

En la figura 1.21 se indica solo el secundario del motor. El sistema de coordenadas (X,Y,Z) es fijo en relación al primario; es este sistema, el campo magnético producido en

el entrehierro (Y=h+0) se expresa en forma compleja como

$$B_Y = B_m \, e^{j(wt-\beta x)} \qquad (1)$$

donde $\beta = 2\pi/ \quad = \pi/\tau$, siendo τ el paso polar (la distancia entre polos); w es la frecuencia angular de las corrientes primaria; y B_m (real) es la amplitud de la onda B en el entrehierro. Es conveniente llevar a cabo el análisis en un sistema de coordenadas (x,y,z) que sea fijo en relación al secundario; este sistema viaja con el secundario a la velocidad μ a lo largo del eje X. Transformando (1) obtenemos

$$B_Y = B_m \, e^{j(wt-\beta x)} \qquad (2)$$

como la expresión del campo del entrehierro (en y=h+0) en el sistema de coordenadas secundario.

$$s = \text{deslizamiento} = \frac{U_m - U}{U_m}$$

donde U_m = velocidad lineal síncrona = $\dfrac{w}{\beta}$

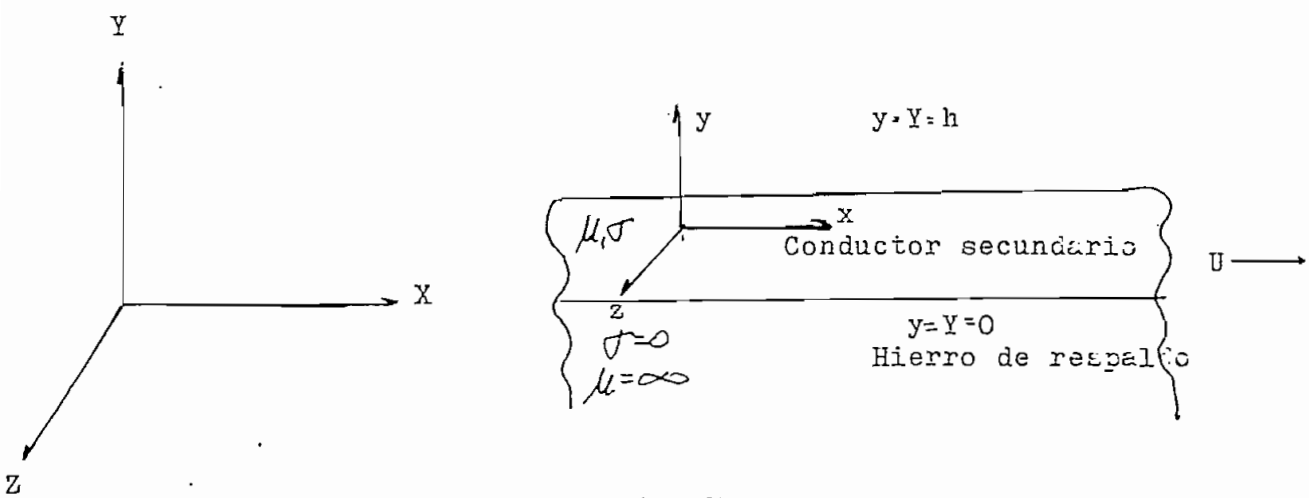


Fig. 1.21

El campo que se desplaza (2) induce corrientes, que se supone sean meramente en la dirección z en el secundario; de aquí que se produzca una fuerza en el cuerpo (o un empuje) del secundario, dada por

$$f = J \times B \ (N/m^3) \quad o \quad f_x = -J_z B_y \ (N/m^3) \qquad (3)$$

Para evaluar (3) notamos que $J_z = \sigma E_z$ (ley de Ohm). Además, E_z que es la única componente del campo eléctrico dentro del secundario, debe tener la forma

$$E_z = G(y)e^{j(wt-\beta x)} \qquad (4)$$

de modo que la ecuación de Maxwell $\nabla \times E = -\partial B/\partial t$ se convierte en la relación

$$E_z = -\frac{sw}{\beta} B_y \qquad (5)$$

Consecuentemente (3) se convierte en

$$f_x = (\sigma E_z)\left(\frac{\beta}{sw} E_z\right) \ (N/m^3)$$

de la cual el tiempo promedio tiene como valor

$$(f_x)_{prom} = \frac{\sigma\beta}{sw}\frac{1}{2} E_z E_z^* \ (N/m^3) \qquad (6)$$

El problema se reduce ahora a encontrar E_z, lo que significa determinar la función $G(y)$. Las ecuaciones de Maxwell pueden combinarse para dar

$$\nabla^2 E_z = \gamma^2 E_z \qquad (7)$$

que es equivalente a la siguiente ecuación diferencial ordinaria para $G(y)$:

$$\frac{d^2G}{d_y^2} = (\gamma^2 \pm \beta^2)G \qquad (8)$$

En (7) y (8) la constante γ^2 está dada por

$$\gamma^2 = j sw\mu\sigma\left(1 + \frac{sw\varepsilon}{\sigma}\right) \ (m^2)$$

Donde μ y ε son respectivamente la permeabilidad y permitividad del secundario. Ahora, para un buen conductor y

a frecuencias de potencia, $w\varepsilon/\sigma$ será muy pequeña (esto quiere decir que la corriente de desplazamiento $\partial D/\partial t$ será despreciable en comparación con la corriente de conducción J. Mas aún, β^2 será despreciable comparada con $sw\mu\sigma$. Por lo tanto, (8) pasa a ser

$$\frac{d^2G}{d_{y^2}} = (jsw\mu\sigma)G \qquad (9)$$

y las condiciones de frontera son:

$$G(h) = -\frac{sw}{\beta} B_m \quad \text{(de la continuidad de } B_y \text{ en } y=h)$$

$$G'(0) = 0 \quad \text{(de la continuidad de } H_x \text{ en } y=0)$$

La solución deseada es

$$G(y) = -\frac{swB_m \cosh\gamma y}{\beta \cosh\gamma h} \qquad \text{donde} \quad \gamma = \sqrt{sw\mu\sigma}\,\angle 45° \qquad (10)$$

y (6) se convierte en

$$(f_x)_{prom} = \frac{\sigma sw\, B_m{}^2 \cosh\gamma y \cosh\gamma^* y}{2\beta \quad \cosh\gamma h \cosh\gamma^* h} = \frac{\sigma sw}{2\beta} B_{m^2} \frac{\cosh ay + \cos ay}{\cosh ah + \cos ah}$$

donde $a = \sqrt{2sw\mu\sigma}$. Integrando esta expresión en todo el espesor h, del secundario, obtenemos para la fuerza en el tiempo promedio por unidad del área del secundario

$$F_x = \frac{\sigma sw}{2\beta a} B_m{}^2 \frac{\operatorname{senh} ah + \operatorname{sen} ah}{\cosh ah + \cos ah} \qquad (N/m^2) \qquad (11)$$

Se nota que para una máquina real ah es pequeño, de modo que senh ah y sen ah se aproximan a ah, y cosh ah y cos ah se aproximan a 1. Por lo tanto (11) queda simplificada:

$$F_x = \frac{\sigma sw}{2\beta} B_m{}^2 h = \frac{\sigma sU_m}{2} B_m{}^2 h \qquad (N/m^2) \qquad (12)$$

Finalmente, si el espesor (la dimensión z) del secundario es l (que corresponde a la longitud axial de la máquina giratoria sin "recortar"), entonces, la <u>fuerza total por polo</u> en el secundario se obtiene multiplicando (12) por $l\tau = l/2$

$$(F_x)_{por\ polo} = \frac{1}{4} B_m^2\, l\sigma h \tau s U_m \quad (N) \qquad (13)$$

El empuje dado por (13), así como el par en el motor giratorio es en la dirección del movimiento secundario para $U<U_m$ y desaparece para $U=U_m$. Evidentemente el secundario también experimenta una fuerza normal; pero esa no se calcula aquí.

τ = Paso polar (m)

λ = Longitud de onda de la corriente primaria (m)

w = Frecuencia angular de la corriente primaria (1/seg)

B = Campo magnético en el entrehierro (Tesla)=(Weber/m²)

l = ancho del motor lineal (m)

σ = Conductividad del secundario

h = Espesor del secundario (m)

s = Deslizamiento

U_m= Velocidad sincrónica (m/s)

J = Corriente por unidad de área (Amp/m²)

1.2.10 Modelo del circuito eléctrico equivalente. {12}

La principal diferencia entre motores rotativos y lineales consiste en que en los MIL, mientras el primario se mueve, el secundario es continuamente reemplazado por un

nuevo material. Este nuevo material tenderá a resistir un súbito incremento en penetración de flujo y sólo permitirá un aumento gradual de la densidad de flujo en el entrehierro. La entrada de nuevo material y su influencia en el flujo modificará el comportamiento del motor. Para obtener un circuito equivalente apropiado para el MIL, será necesario cuantificar la influencia de la entrada de nuevo material en la distribución de flujo en el entrehierro, y tomar en cuenta el efecto de borde. Este se puede hacer examinando la rama de magnetización del circuito equivalente.

El primario del MIL puede ser alimentado con corriente directa para producir una onda de flujo estacionaria en el espacio. Esta onda de flujo puede ser establecida con la hoja conductora secundaria retirada. Si el conductor secundario es reemplazado instantáneamente, el flujo tenderá a desaparecer al tiempo cero y luego subirá a su valor original al transcurrir el tiempo. Este mecanismo, se ilustra en la figura 1.24. El tiempo ha sido normalizado, cuando T_2 como base, de tal manera que $X = t / T_2$

Al tiempo cero, la corriente secundaria de eddy en la lámina crecerá muy rápidamente como espejo de las corrientes primarias, nulificando las FMM primarias y reduciendo el flujo a casi cero. El aumento de corrientes secundarias de Eddy es controlado por la constante de tiempo de concatenación de la lámina L21/R21. Esta constante es, sin embargo, pequeña (alrededor de 5%) comparada con la constante de tiempo de magnetización, de tal manera que para propósito

práctico puede despreciarse. Esto significa que la corriente de eddy al tiempo cero y referida al bobinado primario es casi igual a la corriente primaria de magnetización Im y decaerá exponencialmente con el tiempo. La constante de tiempo para este decaimiento será la constante de tiempo secundario total:

$$T2 = (Lm + L21)\ R21$$

La corriente secundaria de eddy se opone a la corriente de magnetización primaria Im. En el motor de inducción estas corrientes de eddy corresponden al flujo de la corriente secundaria que resiste al crecimiento del flujo en el entrehierro y está en oposición de fase a Im. La corriente secundaria de eddy referida al primario se la denomina la I2e y actuará a la corriente secundaria de deslizamiento I2i en cerca de 90 grados. Esta condición es similar a un motor rotativo en un constante transiente de arranque donde el motor resiste el crecimiento del flujo en el entrehierro.

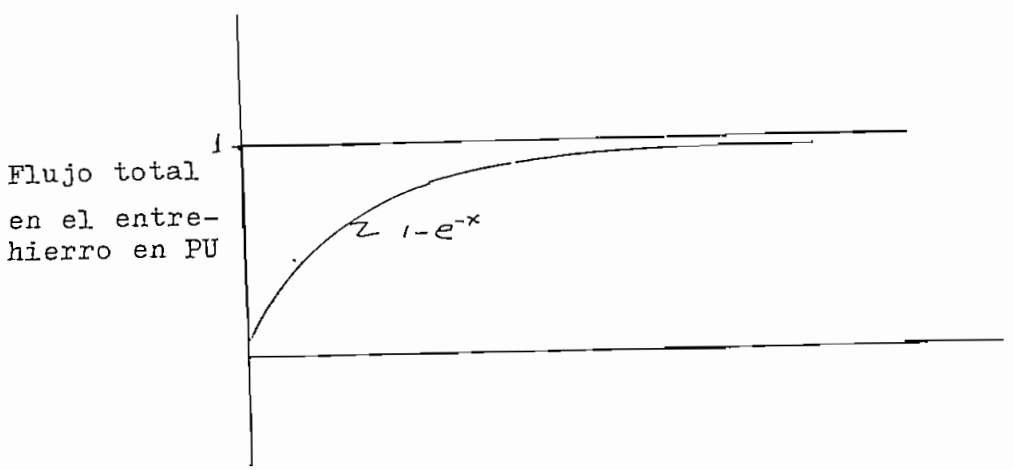


fig. 1.22.a Aumento de flujo total en el entrehierro

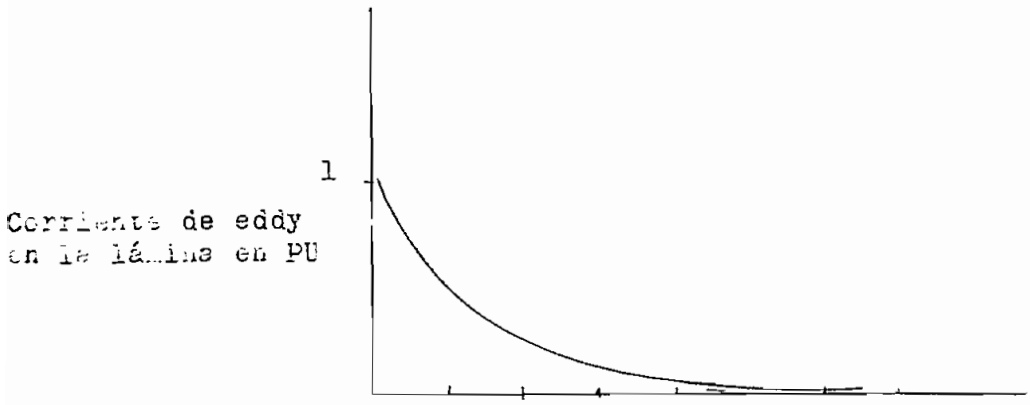


fig. 1.22.b Aumento de flujo total en el entrehierro

Con corrientes trifásicas aplicadas al primario, ambos la FMM por unidad de longitud y la densidad de flujo se distribuyen sinusoidalmente a lo largo de la longitud del motor y cambian de posición con el tiempo. Es conveniente y no afecta a la discusión, representar estas ondas como valores RMS o efectivos. Si se llenan todas las ranuras del núcleo primario esto provoca una FMM uniforme por unidad de longitud del motor y densidad de flujo sobre la longitud del primario. Como las vueltas por bobina del primario por unidad de longitud son fijas, la corriente de magnetización primaria Im puede ser usada para represertar la FMM por unidad de longitud del motor, el cual, a su vez da lugar al flujo en el entrehiero. Si no hay saturación presente, la corriente de magnetización, también representará la densidad del flujo.

Además podemos examinar el reemplazo gradual de la lámina secundaria considerando un pequeño elemento como si este entra y se mueve a través de este campo magnético uniforme. El pequeño elemento generará inicialmente máximas

corrientes de eddy y reducirá la densidad de flujo a cero en el borde delantero del motor, y permitirá entonces que la densidad de flujo crezca exponencialmente con una constante de tiempo T2, mientras las corrientes de eddy se desvanecen.

Cuando este elemento del riel pasa más allá del primario la FMM primaria vista por el riel desaparecerá y será reflejad por corrientes de eddy en la salida del riel que tratan de mantener el flujo del entrehierro. Estas corrientes de eddy en el riel decaerán muy rápidamente con una constante de tiempo. Estos cambios transcurren en los bordes de entrada y salida del motor, se muestran en la figura 1.23 en función de T2.

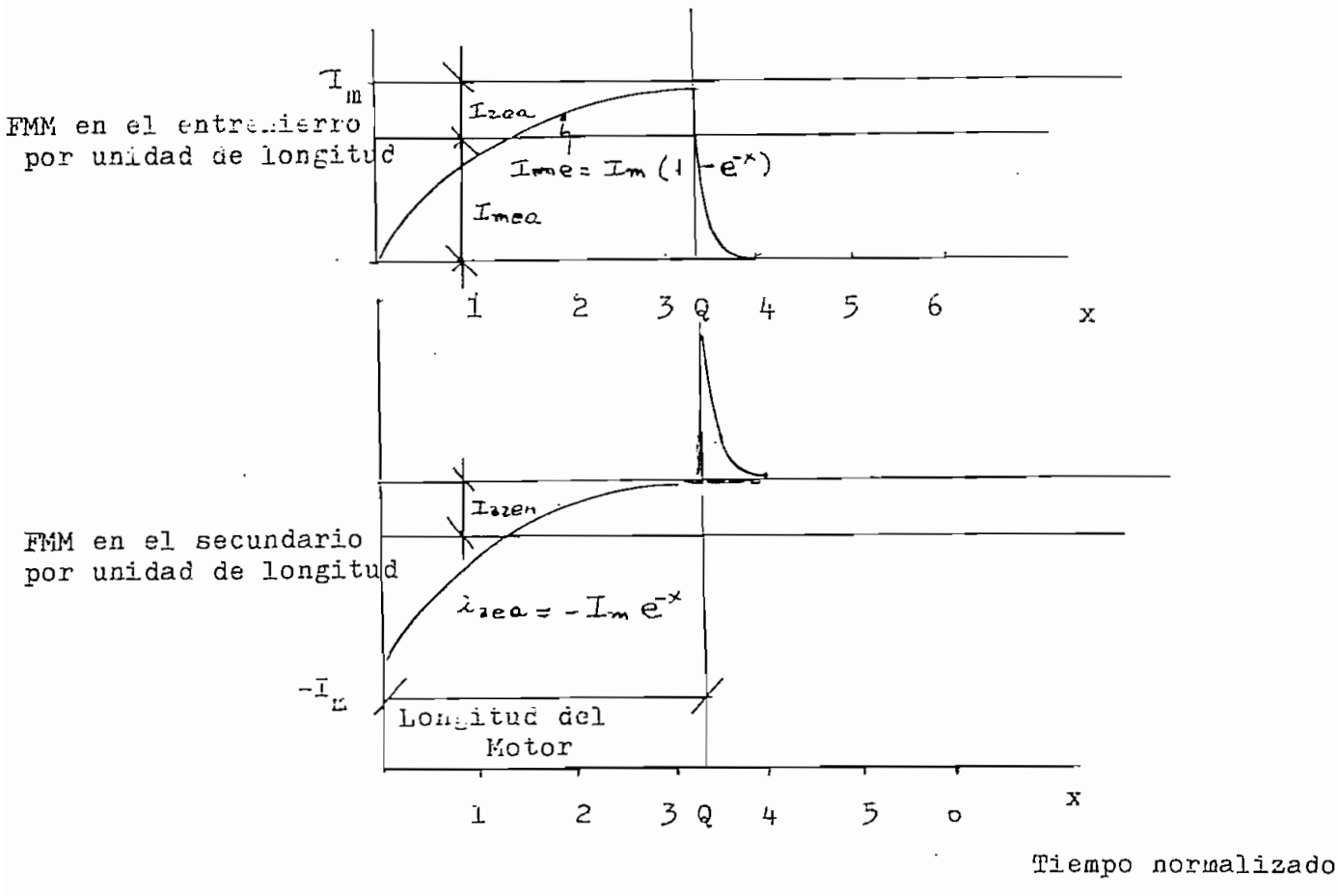


fig. 1.23 Distribución de FMM efectiva a velocidad > 0

Si esta explicacion intuitiva de la influencia de T2 es aceptada, puede entonces formar la base para la cuantificacion del efecto del borde. Se pueden hacer cambios del circuito equivalente clasico para formar en cuenta estos fenómenos. La distribución espacial de la densidad de flujo a lo largo de la longitud del motor dependerá, sin embargo, de la velocidad del primario relativa a la lámina secudaria. La distancia movida por el primario en una constante secundaria de tiempo VT2 donde V es la velocidad primaria.

Para una velocidad primaria la distancia pueda estar expresada en terminos de T2, la longitud del primario en esta escala de tiempo normalizada puede obtenerse como sigue: El tiempo que toma el motor para atravesar un punto en el riel es:

Tv = D/V donde D es la velocidad del motor.

Tv en términos de la constante de tiempo T2 es:

Q= Tv / T2.

Por lo tanto Q, sin dimensiones, <u>representa la longitud del motor en esta escala normalizada de tiempo</u>. Asi, a velocidad cero, la longitud del motor es infinitamente larga. En cuanto la velocidad aumenta la longitud del motor efectivamente encongerá. La curva de ime entre x=0 y x=Q representa la distribucion de la FMM por unidad de longitud a lo largo de la longitud del motor. Este concepto, entonces, provee un medio de describir la distribución de FMM efectiva a lo largo del motor a cualquier velocidad.

Ahora es claro que a una alta velocidad conducirá a una pérdida significativa de flujo en el borde delantero del motor. A velocidad cero, sin embargo, la pérdida del flujo será despreciable. La reducción de efectos de borde, entonces, requerirá un alto valor de Q. El valor de Q, por tanto, indica la habilidad del motor para resistir las pérdidas de salida debido a los efectos de borde. Desafortunadamente, esto significa usar un motor con baja velocidad, alta resistencia de circuito eléctrico R2 y alta reductancia magnética o bajo Lm. La relación Q usada antes es la inversa del "factor de bondad" y este hecho puede de alguna manera explicar el pobre comportamiento de los motores lineales. Se notará que Qv es una velocidad constante que depende de las dimensiones básicas del motor y el material secundario.

$$Qv = D\ R21\ /\ (\ Lm + L21\ )$$

Las corrientes primarias de magnetización ya han sido usadas para representar la FMM por unidad de longitud del motor. De la misma manera, las corrientes de contra fase o FMM negativa por unidad de longitud. El valor de las corrientes secundarias de eddy I2e varía a lo largo del motor. Sin embargo, cuando estas corrientes se reflejan en un bobinado primario arrollado, ellas aparecerán como corrientes promedio en contrafase a las corrientes de magnetización primarias. El valor promedio de las corrientes de eddy por unidad de longitud I2e es:

$$I2e\ prom = Im\ /\ Q \int_0^Q \exp(-x)\ dx = Im\ [1 - \exp\ (-Q)]\ /\ Q$$

El valor promedio de Ime, la corriente efectiva de magnetizacion pro unidad de longitud, es:

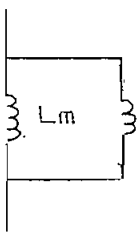
$$Ima\ prom = Im - I2ea = Im\ [1 - (1 - \exp(-x)\ )\ /\ Q]$$

El efecto desmagnetizante de la corriente secundaria de eddy I2ea puede ser representado por medio de una inductancia conectada en paralelo con Lm y llevando la corriente de eddy I2ea, como se ve en la figura 1.24.

Esta inductancia sin embargo, esta simplemente sacando corriente de la inductancia de magnetizacion Lm y no contribuye en nada a la excitación. El tamaño de esta inductancia debe elegirse de tal modo que produzca la misma pérdida de excitacion que la de la corriente promedio sobre la longitud del motor I2e. El valor requerido de la inductancia en paralelo es, entonces:

$$Lm\ Imea\ /\ I2ea = Lm\ \{Q\ /\ [\ 1 - \exp(-Q)\ ] - 1\}$$

Este circuito paralelo puede ser reemplazado por un circuito equivalente serie, mostrado en la fig. 1.24, cuya inductancia total seria:



$$Lm * \left[\frac{Q}{1-\exp(-Q)-1} \right]$$

$$Lm * \left[1 - \frac{1-\exp(-Q)}{Q} \right]$$

fig. 1.24 Elemento inductivo de la rama de magnetizacion de un MIL

y lleva una corriente de magnetizacion

$$Im = Imea + I2ea$$

Notamos que cuando la velocidad tiende a cero, o la longitud del motor tiende a infinito, la inductancia de la rama de magnetizacion se convierte en LM y el motor lineal se hace equivalente a un rotativo cuando los efectos de borde desaparecen.

PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY EN LA LAMINA

Hay otro aspecto de la corriente secundaria de eddy que se debe tomar en cuenta. Cuando esta circula en el secundario, asumirá la misma clase de camino que la que usó la corriente de deslizamiento I2, pero desplazada por casi la mitad de un polo. La resistencia de este circuito es R21, y las pérdidas térmicas serán producidas por las corrientes de eddy. Estas pérdidas pueden ser evaluadas por la determinacion del valor RMS I2e sobre la longitud del motor.

El valor RMS de I2e es:

$$I2er = \left[\frac{Im^2}{Q} \int_0^Q \exp(-2x)\, dx \right]^{0.5}$$

$$I2er = Im \left[\frac{1 - \exp(-2Q)}{2\,Q} \right]^{0.5}$$

Para la sección de la lámina bajo el primario:

Perdidas por corriente de Eddy =

$$Im^2 \; R21 \left[\frac{1 - \exp(-2Q)}{2Q} \right]$$

Como el motor pasa sobre la lámina, la FMM primaria de magnetización vista por la lámina desaparecerá y esto crea una fuerza MM equivalente reflejada y una corriente en la lámina la cual trata de mantener el flujo.

<u>La energía magnética en el punto de salida, se disipa en la resistencia de la lámina</u>. Estas pérdidas, sin embargo puede ser representadas como la variación de tiempo de cambio de energía magnética cuando sale del entrehierro.

La energía magnética en el entrehierro por unidad de longitud en el punto de salida está dado por:

$$\text{Energia Magnética} = 0.5(\,Lm + L21\,)\; Im(\,1-\exp(-Q))^2 \,/\, D$$

donde $Im\ (1-\exp(-Q))$ es la corriente de magnetización efectiva en el punto de salida.

Las pérdidas de potencia se pueden ahora obtener multiplicando la expresión de energía por la velocidad del motor v para dar: pérdidas de potencia a la salida

$$= 0.5\ (Lm + L21)\ Im^2\ \{\ 1-\exp(-Q)\ \}^2 \quad v/D$$

$$= Im^2\ R21\ \{\ 1-\exp(-Q)\ \}^2 \,/\, (2Q)$$

Añadiendo las 2 ultimas ecuaciones tenemos:

Pérdidas totales debido a las corrientes de eddy, en la lámina:

$$= Im^2 R21 \{ 1-\exp(-Q) \} / Q$$

Para tomar en cuenta estas pérdidas de potencia en el circuito equivalente es necesario añadir una resistencia a la rama de magnetización como se muestra el la figura 1.25

Esta adición es suficientemente exacta, siempre que el elemento inductivo domine la rama de inductancia de magnetización. El empuje debido a estas pérdidas, las cuales ocurren pasando el entrehiero, se obtiene dividiendo las pérdidas totales par la velocidad del motor:

Considerando la forma de las 3 fases:

Empuje del motor debido a las pérdidas por corrientes de eddy:

$$\frac{3\ Im^2\ R21\ \{ 1-\exp(-Q) \}}{v\ Q}$$

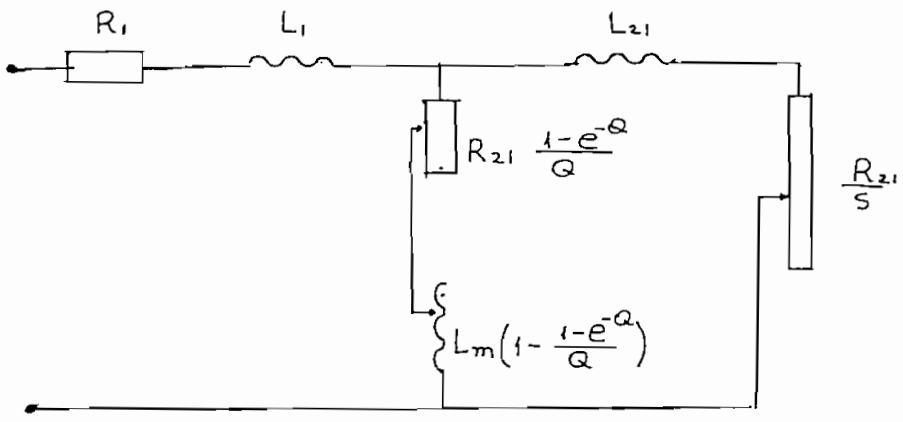


fig.1.25 Circuito equivalente del motor lineal de inducción

1.2.11 Aplicaciones de estas maquinas

La ventaja mas obvia del motor lineal es que no requiere convertidores mecánicos rotativo-lineal. Por tanto el motor lineal es robusto y mas confiable. Algunas otras ventajas que permiten aplicarlos donde se utilizan motores rotativos son las siguientes:

1. La propulsión es independiente de la fricción, se obtiene un menor uso de ruedas y pista especialmente con alta aceleración y desaceleración. Pistas grasosas o resbalosas no son problema.

2. La aceleración y desaceleración pueden ser mayores que cuando se aplica la propulsión a través de las ruedas. La conducción en fuertes gradientes es posible sin complicaciones.

3. Facilidad de mantenimiento, reparación y reemplazo de piezas.

4. Habilidad para ejercer un empuje en el secundario sin contactos mecánicos, así como conveniente control de empuje y velocidad.

5. Existencia de una fuerza normal que puede ser ventajosa en máquinas de levitación.

6. Construcción mas sencilla que los motores rotativos, asunto que justamente lo vamos a demostrar en esta tesis.

7. Como no hay acoplamiento mecánico del motor, la carga puede ser manipulada por esfuerzo manual en el evento de una falla de potencia, como el motor es de por si un embrague, un segundo motor puede ser incorporado como un equipo de reserva donde no se puede permitir una pérdida de tiempo.

8. El motor generalmente calza en forma conveniente y a

naturalmente adecuado para aplicaciones a los sistemas de transporte y ofrece ciertas ventajas sobre otros esquemas de transporte. La idea de usar un MIL para esta aplicación es antigua y algunos de los esquemas propuestos recientemente parecen basados en una patente americana de 1905. Entre este año y la mitad de la década de los 60 el único otro desarrollo del MIL para propulsión fue el "Electropult" de Westinghouse, un lanzador de aviones que se usó en 1946 que desarrollaba 10.000 hp y obtenía velocidades sobre las 225 mi/h, pero que se abandonó por su costo inicial. Sin embargo en los 50s, experimentos con MIL (en la Universidad de Mánchester, Inglaterra) revitalizaron el interés en el campo y desde entonces se ha hecho considerables progresos hacia aplicaciones de MIL'S para propulsión y transportación. Varias consideraciones indican que para propósitos de tracción es deseable montar el primario en el vehículo y dejar que la pista sirva como secundario.

Mientras un estudio del "US Dept. of transportation" propone el esquema (fig. 1.26) para pista, Laithwaite sugiere varias alternativas, entre ellas el esquema (fig.1.27) que es eléctricamente de un solo lado, pero magnéticamente de dos lados. Debe notarse que el esquema 1 es de doble lado tanto eléctrica como magnéticamente.

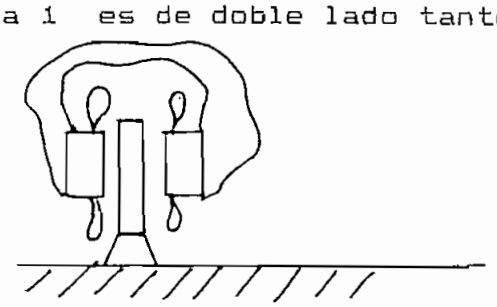


FIG. 1.26 MOTOR DE DOBLE LADO

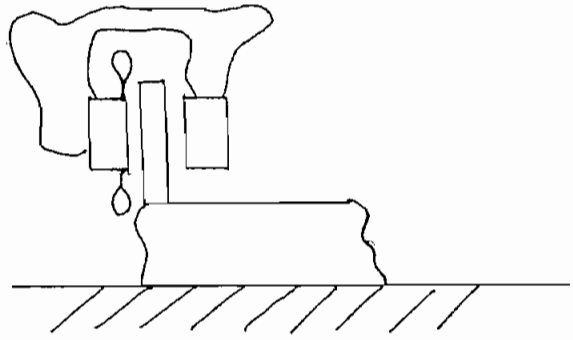


FIG. 1.27 MOTOR DE UN SOLO LADO

Debido a que el MIL para transportación es esencialmente una máquina que produce potencia mecánica, debe ser de alta eficiencia y consecuentemente de alta potencia (máquina grande). Esto último es una bendición, puesto que permite diseñar máquinas de gran eficiencia que podrían operar con grandes entrehierros y grandes pasos polares. Mientras que un gran entrehierro es desventajoso para un motor lineal, no es sólo el entrehierro el que determina la eficiencia del rotor. Este tipo de aplicación es el que analizaremos en esta tesis.

CAPITULO # 2

DISEÑO DEL MOTOR LINEAL PROTOTIPO

2.1 GENERALIDADES

Como se ha mencionado antes, este tipo de motores se utiliza actualmente en diversos campos, y nuestra intención es obtener datos y acumular experiencias que nos permitan entender mejor su comportamiento y las teorías que lo respaldan. Se establecerán ciertas condiciones que el prototipo deberá cumplir, y se diseñará una máquina que intente hacerlo. A continuación se calculará sus parámetros de construcción. El siguiente paso será la construcción efectiva, tratando de ajustar los parámetros de diseño a las facilidades de espacio, materiales y herramientas que se tenga en los laboratorios y talleres de la Escuela Politécnica.

Debemos tomar en cuenta que el objetivo de este trabajo no es optimizar los materiales, sino hacer una máquina tentativa que funcione con unos parametros igualmente tentativos. Así, se asignaran rangos de Corriente, Voltaje y Potencia debido a que no se poseen ecuaciones de diseño ni guía para realizar estos cálculos previos.

2.2 ALTERNATIVAS TECNICAS Y ECONOMICAS

Un motor lineal puede construirse en diversas formas como se vio en el capítulo anterior. Se ha propuesto como alcance del trabajo a hacer un vehículo terrestre tipo didáctico para uso en los laboratorios de la EPN, por lo cual

hemos escogido varias características.

2.2.1 Características propuestas para el Diseño

a) Primario corto y Móvil. (que es el mas económico de construirse).

b) Secundario simple, de lámina de aluminio y respaldo ferromagnético.

c) Plano (no tubular).

d) Bobina primaria de superficie, con bobinados de doble capa y ranuras finales a medio llenar.

e) De un solo lado electromagnético.

f) Voltaje de alimentación trifásico, hasta unos 100 voltios y frecuencia 60 Hz.

g) Baja velocidad (comparando velocidades de transporte terrestre).

h) Baja potencia de salida < 60 W.

i) Proporcionará potencia mecánica suficiente para mover una masa que incluye a sí misma y al vehículo.

VISTA ESQUEMATICA DEL VEHICULO PROPUESTO

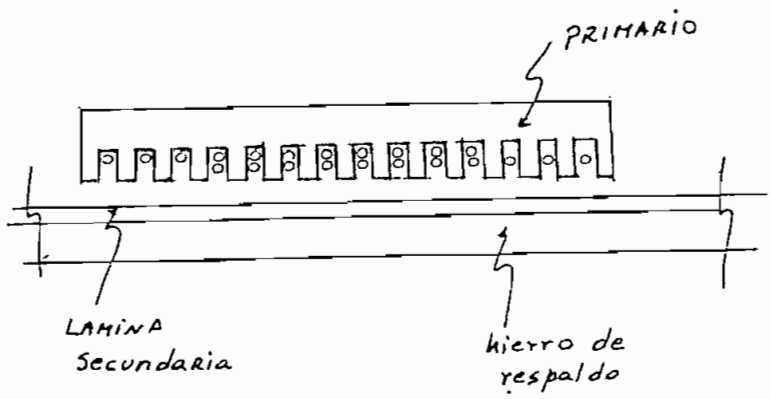


fig. 2.1 Vista lateral de un motor lineal de inducción.

2.2.2 Restricciones del diseño

Para asegurar una base para el diseño de una máquina no necesariamente práctica sino demostrativa, varias restricciones mecánica, térmicas y de pérdidas se imponen en nuestro motor.

1. Profundidad de ranura menor que 8 veces el ancho del diente
2. Longitud de la Máquina menor o igual a 200 mm.
3. Aumento pico de temperatura de bobinas menor a 60°C.
4. Potencia eléctrica de entrada menor a 1Kw.

La restricción 1 protegerá al motor contra la ruptura de los dientes de armadura. Las restricciones 2 y 4 permiten un motor didáctico y económico. 3 permite operarlo enfriado únicamente por aire forzado.

También hay restricciones en el diseño Magnético que se expresan de acuerdo con la siguiente tabla.

Campo Magnético	Pico de densidad de flujo
Diente de armadura	1.55 Tesla
Pista	1.55 Tesla
Entrehierro	1.55 Tesla

2.2.3 Peculiaridades del Bobinado

Recordamos que el MIL puede desarrollarse a partir de un motor rotativo por el método de cortar y extender. Esta aproximación requiere, sin embargo, ciertos cambios en los bobinados primarios, y hay dos arreglos posibles (fig.1 y 2..

El esquema de la figura 1 puede ser obtenido sin ningun cambio en las bobinas a los extremos de un bobinado de doble capa con bobinas completas. Notamos que el bobinado tiene 5 polos, pero los polos de los extremos son mas debiles. Este es un aspecto único de las máquinas de inducción lineal, y un puede tener un número impar (y aún fraccional) de polos. Desde luego, la ecuación de divergencia $\oint B.ds=0$ debe ser siempre satisfecha.

El arreglo de la figura tiene un número par de polos y es posible con bobinados de una sola capa con bobinas concentradas como en la armadura de un generador hidroeléctrico (fig. 2.4).

Hay un buen número posible de bobinados primarios para MILS.

Un bobinado de doble capa con ranuras finales a medio llenar resulta a menudo en un MIL que exhibe una buena actuación.

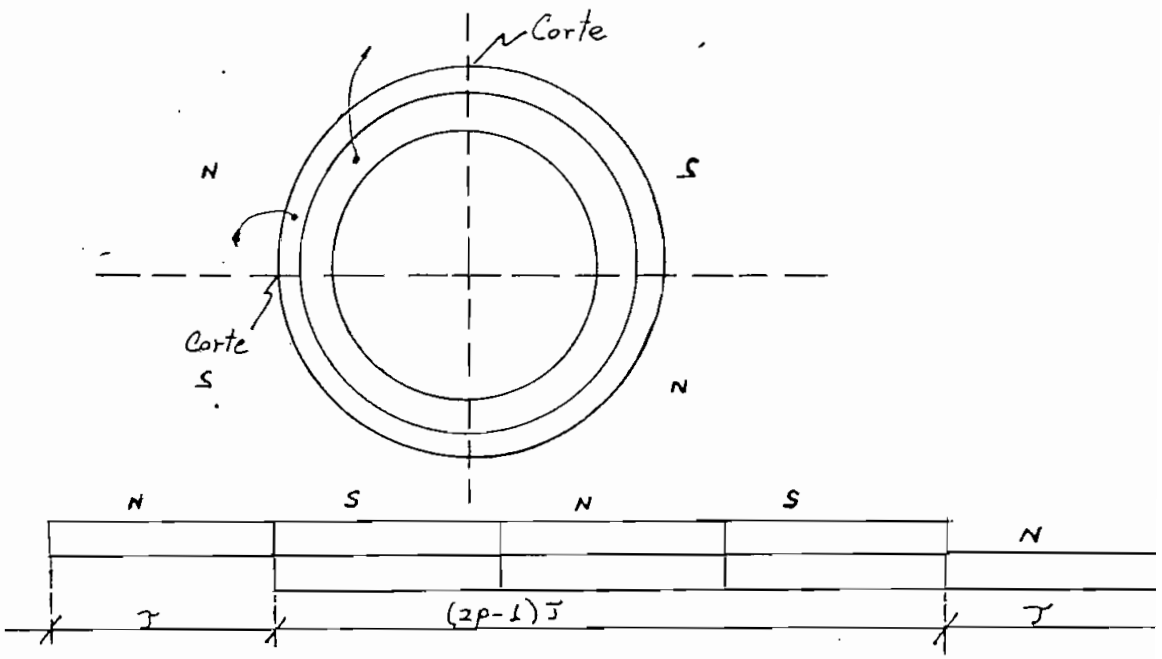


FIG.2.2 Motor lineal de inducción con número impar de polos y ranuras finales a medio llenar

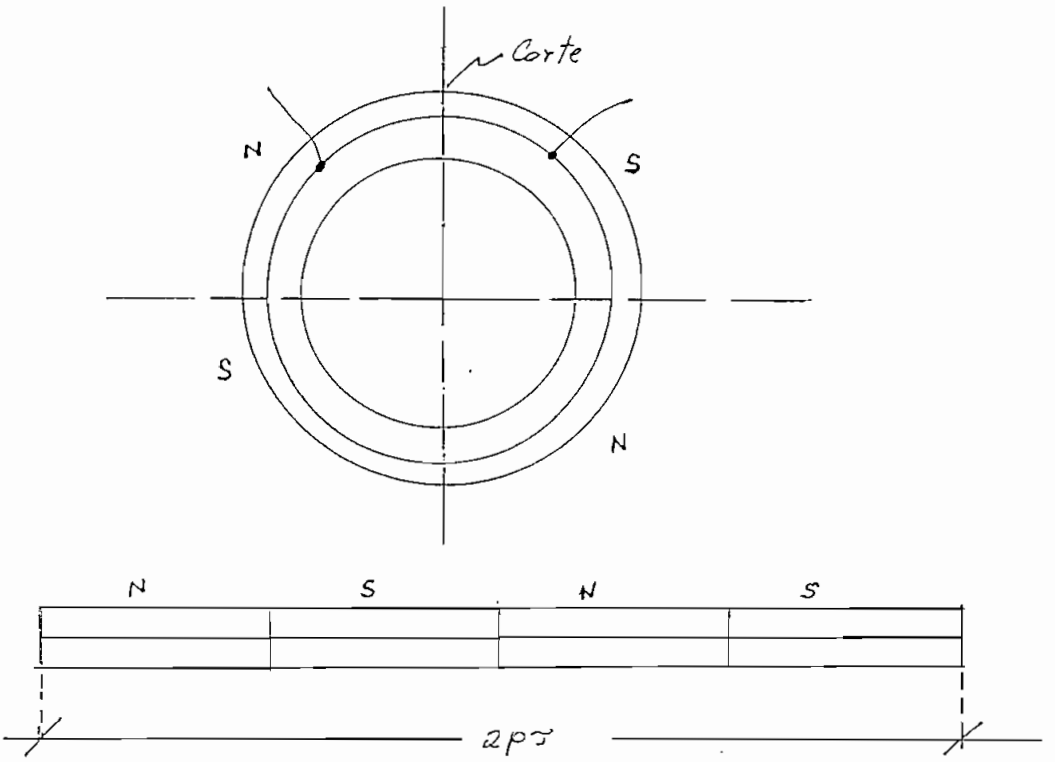


Fig.2.3 MIL con número par de polos

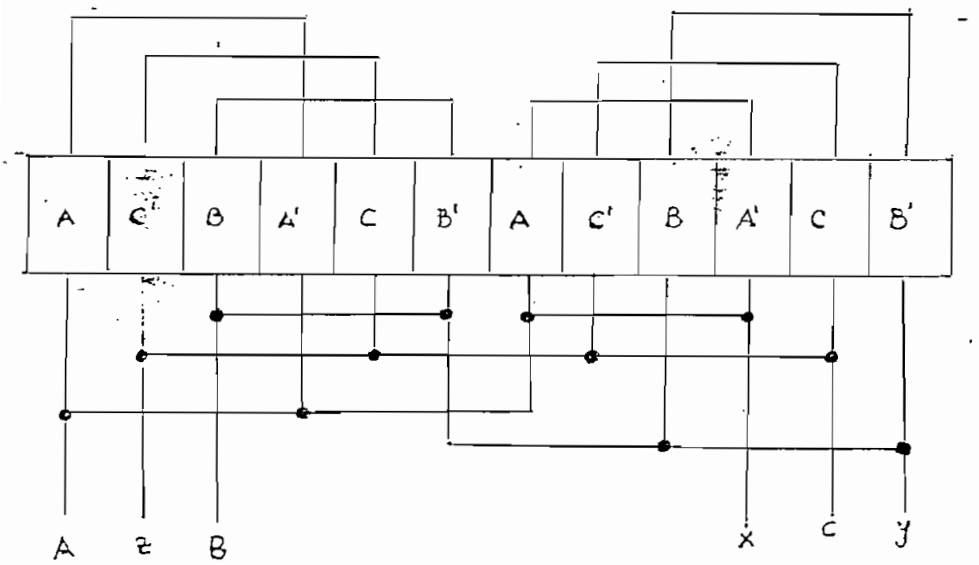


FIG.2.4 Un bobinado convencional trifásico

2.3 SELECCION DE PARAMETROS PARA EL PROTOTIPO: PRIMARIO Y SECUNDARIO

2.3.1 Longitud efectiva del Núcleo {17}

De acuerdo a la distribución de las bobinas del estator, al final de los pasos polares solo existe la mitad del número de alambres comparado con los otros. Así, en estas partes, la inducción magnética es la mitad de la que existe en las partes medias del devanado completo,. El empuje por polo F_p depende de la corriente y el campo, entonces la relación entre los empujes viene dada por

$F_m = \frac{1}{4} F$ pues la inducción es proporcional al número de conductores $F \sim W^2$

Luego el empuje total en el estator sale como

$$F_t = 2 F_m + \sum F$$

Con el número de polos (2p) se obtiene que el número de polos totalmente ocupado por el devanado es (2p-2). Derivamos

$$\sum F = (2p-2) F$$

$$2F_m = 2 \frac{1}{4} F = \frac{F}{2}$$

$$F_t = \frac{F}{2} + 2pF - 2F$$

$$F_t = F(2p - 1.5)$$

Este empuje será producido por la superficie del estator; entonces, la longitud efectiva del hierro será:

$$L_{ef} = (2p - 1.5)\ \tau_p$$

Así mismo nos queda que $L_{ef} = \alpha L_f$ donde L_f = longitud

física del hierro y α es el factor de reducción para tomar en cuenta el fin de los polos. Este factor tiene valores de 0.8 para un número de polos mayor que 4.

2.3.2 Especificaciones preliminares

Se han asumido y determinado las siguientes características eléctricas y mecánicas.

- Velocidad sincrónica del vehículo $v = 6$ m/s
- Masa promedio (vehículo mas motor) $m = 10$ Kg.
- Dimensiones Máximas del núcleo

  Longitud = 20 cm.

  Ancho = 3 cm.

  Profundidad = 5 cm.
- Motor lineal: Primario corto, móvil, plano, de un solo lado electromagnético, trifásico, de inducción, de 4 polos.
- Secundario: Lámina de reacción de aluminio de 5 mm. de espesor y $\sigma = 3.8 \times 10^{-7}$ $\mho$/m la conductividad del material.
- Frecuencia de operación 60 c/seg.
- Devanado primario de doble capa, con ranuras finales a medio llenar.

2.3.3 Cálculo de los Parámetros constructivos. {23}

Se usarán derivaciones teóricas y curvas experimentales que obtenemos de diversos artículos sobre el motor lineal para obtener los parámetros de construcción y operación de la máquina.

1.- Selección del paso polar τ_p del devanado primario para la máquina de inducción.

$$v=2f\tau_p \quad ; \quad \tau = \frac{v}{2f} = \frac{6m/s}{2\cdot 60} = 0.05\ m = 5\ cm.$$

2.- Selección preliminar del entrehierro δ

Es evidente y un hecho conocido que un entrehierro muy grande exigirá de la línea eléctrica una alta corriente de magnetización, resultando así una reduccion del factor de potencia. Al aumentar el entrehierro, aumentarán las pérdidas de potencia provenientes de los efectos longitudinales de borde y disminuirá el empuje y la eficiencia de la máquina. Por tanto seleccionaremos un entrehierro pequeño con la limitante únicamente de que haya peligro de roce.

$$\delta = \frac{\tau_p}{K} = \frac{5cm}{K} = 0.4\ cm. = 4\ mm.$$

lo elegimos así para coincidir con tablas y tener referencias y por facilidades constructivas.

3.- Eficiencia Máxima esperada (ηmax)

$$\eta = f(V_m, S_n, \delta)$$

Para δ= 4 mm., v = 6 m/s.

$$\eta max. = 0.58$$

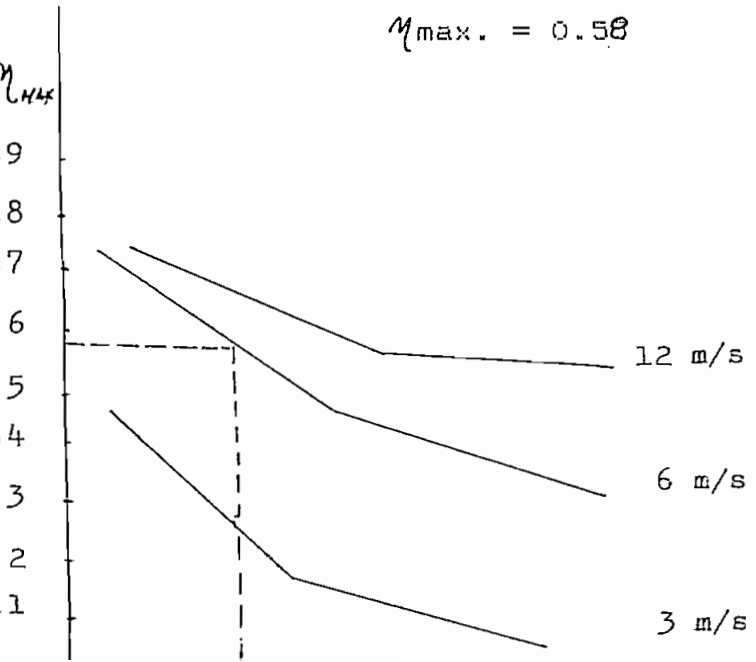


fig. 2.5

4.- Rendimiento esperado:

Para v = 6 m/s., η = 0.58

s = 0.20

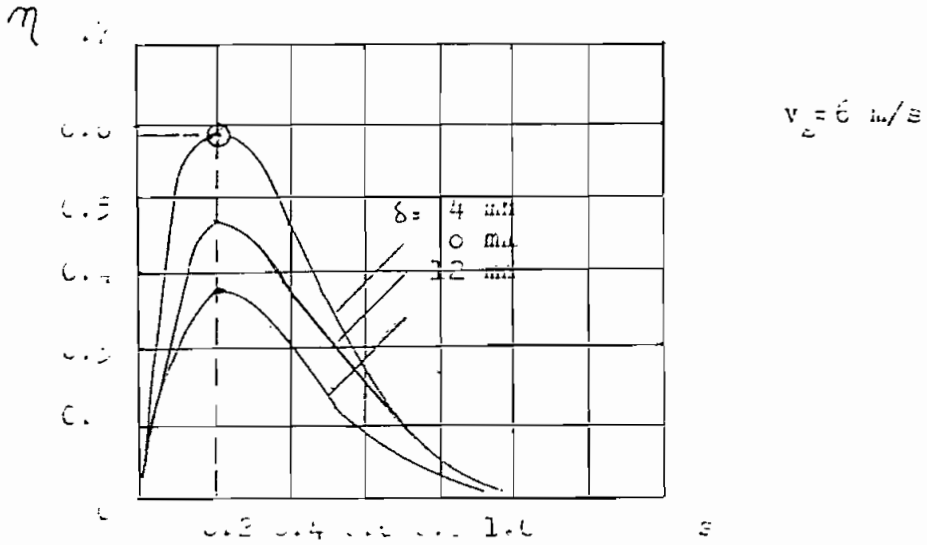


fig. 2.6

5.- Factor de potencia esperado

v = 6 m/s. Cosf = (V_w, S_n, δ)

Cosf = 0.45

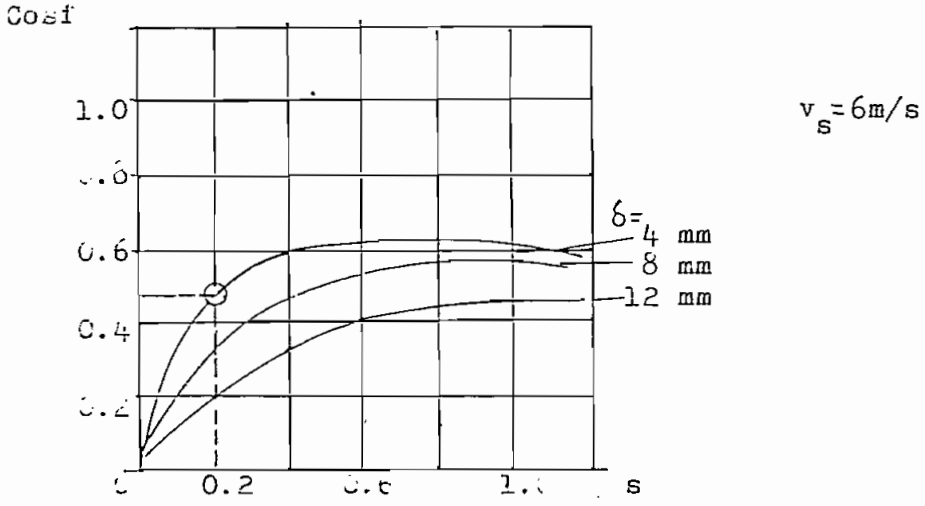


fig. 2.7

6.- Longitud física del nucleo de acero

La longitud efectiva del núcleo es

Lxf = (2p-1.5) = (4-1.5)0.05 = 12.5 cm.

La longitud física sería:

$$Lf = \frac{Lxf}{\alpha} = \frac{2p - 1.5}{2p} = \frac{4 - 1.5}{4} = 0.625$$

Lf = 12.5/0.625 = 20 cm.

7.- Potencia mecánica requerida

Pm = masa x aceleración x velocidad

v = 6 m/s

m = 10 Kg.

a = 1.2 m/s_2

Pm= 10 x 1.2 x 6 = 72 Watts

8.- Fuerza de propulsión requerida

$$F = \frac{Pm}{v} = \frac{72}{6} = 12 \text{ [Newtons]}$$

9.- Potencia eléctrica de entrada

Partimos de:

$$Pm = P_{elec} \times \mu \times Cosf \times k$$

k=constantes que depende de las dimensiones y capacidades del motor

de donde

$$P_{elec} = \frac{Pm}{\mu \, Cosf \times k}$$

Se asume k=1.5 para este tipo de Motores

$$P_{elec} = \frac{72}{0.58 \times 0.45 \times 1.5} = 180 \text{ Watts}$$

10.- Campo Magnético en el entrehierro para desarrollar la propulsión requerida. {15}

Partimos de la ecuación de la fuerza por polo discutida en el capítulo anterior.

$$\boxed{F_{polo} = 1/4\ B_m^2\ l\sigma h \Gamma s U_m \quad [Newton]}$$

donde

B_m = Campo en el entrehierro

l = Longitud axial de la máquina giratoria sin "recortar"

σ = Conductividad del secundario

h = Espesor del secundario

Γ = Longitud de onda

τ = Paso polar

s = Deslizamiento

U_m = Velocidad sincrónica

Para nuestro caso:

l = 0.03 m.

σ = 3.8 x 10^7 /m

h = 0.005 m.

$\Gamma = 2\tau$ = 2 x 0.05 = 0.1 m.

s = 0.2

U_m = 6 m/s.

De acuerdo con 2.3.1 el No. de polos efectivos por efectivos por núcleo será (2p-1.5), es decir 4-1.5 = 2.5 Como son 2 núcleos, tendremos 5 polos efectivos.

$F_{polo} = F_{total}/5 = 12/5 = 2.4$

Por tanto la ecuación se convierte en:

$F_{polo} = 2.4 = 1/4 x B_m^2 x 0.03 x 3.8 x 10^7 x 0.005 x 0.1 x 0.2 x 6$

Despejando el valor Bm tenemos

$B_m = 11.84 * 10^{-2}$ Tesla

B_m = 1184 gauss

Esto quiere decir que con este campo magnético en el entrehierro alcanzamos a desarrollar la propulsión mecánica

requerida.

2.3.4 Diseño de los devanados. {20}

2.3.4.1 Esfuerzos principales en un motor de inducción

Estos son:

a) Densidad de campo magnético en el entrehierro B&m.

b) Corriente total por unidad de longitud a lo largo del "estator" A [amp/cm].

Cuyos valores admisibles máximos son para motores de hasta 10 Kw.

B&m =>	4000 a 4700 gauss
A	180 a 380 amp/cm

2.3.4.2 Ecuaciones.

Potencia aparente del motor.

$P_a = M_1 V_{N1} I_{N1}$

M_1 = N° de fases del bobinado

V_{N1} y I_{N1} = voltaje y corriente nominales

$V_{N1} \approx E_{N1}$

$E_{N1} = 4.44 f_1 N_1 \mu_1 \Phi$

donde

E_{N1} = Voltaje inducido

f_1 = Frecuencia de la red

μ_1 = Factor de devanado

Φ = Flujo por polo

Φ = B&m τ_p l

l = Longitud axial del rotor

τ = Paso polar

2.3.4.3 Numeros de espiras y sección del conductor del devanado primario.

Se parte de la aplicación de A_1 [corriente por unidad de longitud]

z_1 = N° de conductores en una ranura.

τ_{R1} = Paso de ranura

$$A_1 = \frac{I_{N1} z_1}{\tau_{R1}}$$

donde I_{N1} = corriente en amperios por conductor

$$\boxed{z_1 = \frac{A_1 \ \tau_{R1}}{I_{N1}}}$$

Defino ahora Z_1 = N° de ranuras del estator

L_f = longitud física del estator

τ_R = Paso de ranura

$$\tau_R = \frac{L_f}{Z_1}$$

Expresando en estos términos tenemos:

$$z_1 = \frac{A_1 \ L_f/Z_1}{I_{N1}}$$

$P = \sqrt{3}\ V_{LL}\ I_L \cos\phi$

$180 = \sqrt{3}\ 70\ I_L\ 0.45$

$I_L = 3.3$ A

Para cada núcleo

$I_L = 3.3/2 = 1.65$ A

El numero de conductores por fase: N_1

$2\ N_1 = 2\ p\ m\ Z_1$

Cálculo de las variaciones de Z1 Y Bδm en el entrehierro al variar la constante A_1 (Densidad de corriente) en Amp/cm.

CUADRO 2.1

A_1	Z_1 [cond/ran]	N_1 [esp/fase]	ϕ maxwell	Bδm gauss	ncb condu x bobina
180	90.90	545.40	50100	5010	45.45
190	95.90	572.40	47810	4781	47.75
200	101.00	606.00	45160	4510	50.50
210	106.00	636.00	43030	4303	53.00
220	111.11	666.60	41060	4106	55.50
230	116.16	699.60	39120	3912	58.08
240	121.21	727.32	37630	3763	60.60
250	126.26	757.56	36130	3613	63.13
260	131.31	788.16	34720	3472	65.65
270	136.36	818.16	33450	3345	68.18
280	141.41	848.46	32250	3225	70.70
290	146.46	878.76	31140	3114	73.23
300	151.51	909.06	30100	3010	75.75
310	156.56	939.36	29130	2913	78.28
320	161.61	969.60	28210	2821	80.80
330	166.66	999.96	27370	2737	83.30
340	171.71	1030.26	26570	2657	85.85
350	176.76	1060.60	25800	2580	88.38
360	181.81	1090.90	25090	2509	90.90
370	186.85	1121.10	24410	2441	93.40
380	191.90	1151.40	23770	2377	95.95
390	196.95	1181.70	23160	2316	98.50
400	202.00	1212.00	22580	2258	101.00

Se escoge un valor que sobrepase el número de gauss requerido en el entrehierro pero que no implique demasiado cobre en las ranuras del núcleo, de tal manera que resulte relativamente fácil de manipular.

Se toma

A = 400

Z1 = 202 conductores por ranura

N_1 = 1212 espiras por fase

Bm = 2258 gauss en el entrehierro

Ncb = 101 conductores por bobina

Se usará un conductor # 23 AWG, cuyas caracteristicas son:

Sección = .258179 mm^2

Material : cobre esmaltado

El cual trabajará con una densidad de corriente de

$$d = I_{fase} / A_{cond} = 1.65 / .258179$$

$$d = 6.39 \ A/mm^2$$

la cual está dentro del rango permitido para máquinas de corriente alterna.

2.3.4.4 Area de ranura

Según la experiencia, los conductores que tienen que entrar en una ranura pueden ser colocados en ella, si la sección total neta de los conductores no sobrepasa un 35 a 40% del área de la ranura. Esta cifra es válida si el

voltaje nominal de una fase no es mayor que 400 voltios, o sea el aislamiento de la ranura es común, sin tener que reforzarlo.

La sección total de los conductores que ocupan una ranura es:

$$\Sigma A_{cond} = A_{cond} * Z_1 = .258179 * 200 = 51.6 \text{ mm}^2$$

Si 51.6 mm² corresponden a 40%, el área total requerida será 130 mm² por lo menos.

Considerando el papel aislante, el sistema de fijación del embobinado, y además que tenemos una dimensión fija (4 mm de ancho), se pensó en una ranura de 35 mm de profundidad.

Area total de ranura = 4 mm x 35 mm = 140 mm², que se permite colocar fácilmente el bobinado.

2.3.4.5 Desarrollo del bobinado.

Se seleccionó un bobinado imbricado de polos alternos, trifásico, de 24 ranuras, 4 polos, dos haces por ranura (doble capa) y paso diametral 1 a 7. Acoplamiento estrella. q = 24 / (4 x 3) =2 ranuras por polo fase.

El esquema desarrollado del bobinado aparece en la figura 2.8.

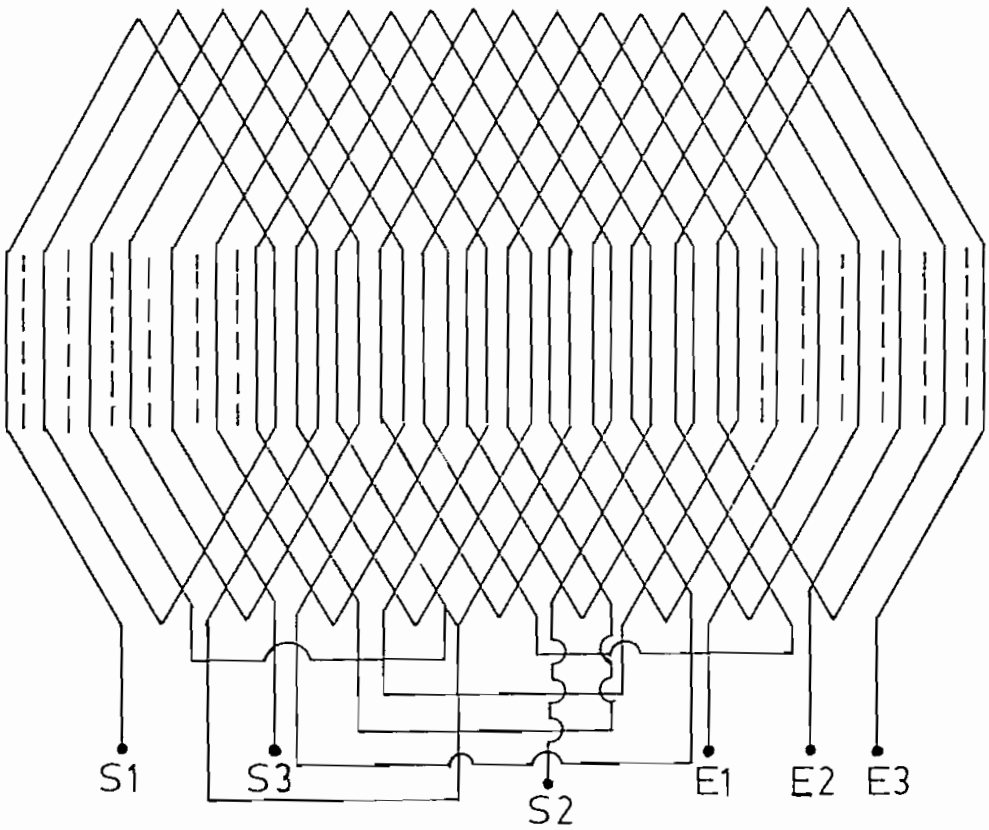


fig. 2.8 Bobinado de los núcleos

2.4 DIMENSIONES DE PRIMARIO Y SECUNDARIO

En estas circunstancias nos queda solo definir con precesión que dimensiones tendran las partes integrantes de la máquina.

2.4.1 Primario

El bloque de láminas de acero silicoso será de las siguientes dimensiones:

Longitud: 200 mm

Ancho: 20 mm

Profundidad: 50 mm

Profundidad de ranura: 35.00 mm

Ancho de ranura: 4.00 mm

Ancho de diente: 4.16 mm

Paso de ranura: 200 / 24 mm

No de ranuras: 24

El bobinado tendrá las siguientes características:

4 polos

Doble capa

Bobinado de superficie

100 espiras por bobina

200 espiras por ranura

Conductor # 23 AWG

Paso polar 0.5 m

2.4.2 Secundario

El motor se ha planificado tipo didáctico, con facilidad de observar la produccion de movimiento lineal, y para adaptarlo a las dimensiones del Laboratorio de Máquinas.

El secundario será una lámina de aluminio de las siguientes características:

Longitud: 3 m

Espesor: 5 mm

Conductividad: $3.8 * 10^7$ ℧/ m

2.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

2.5.1 Antecedentes

Revisando la expresión de velocidad

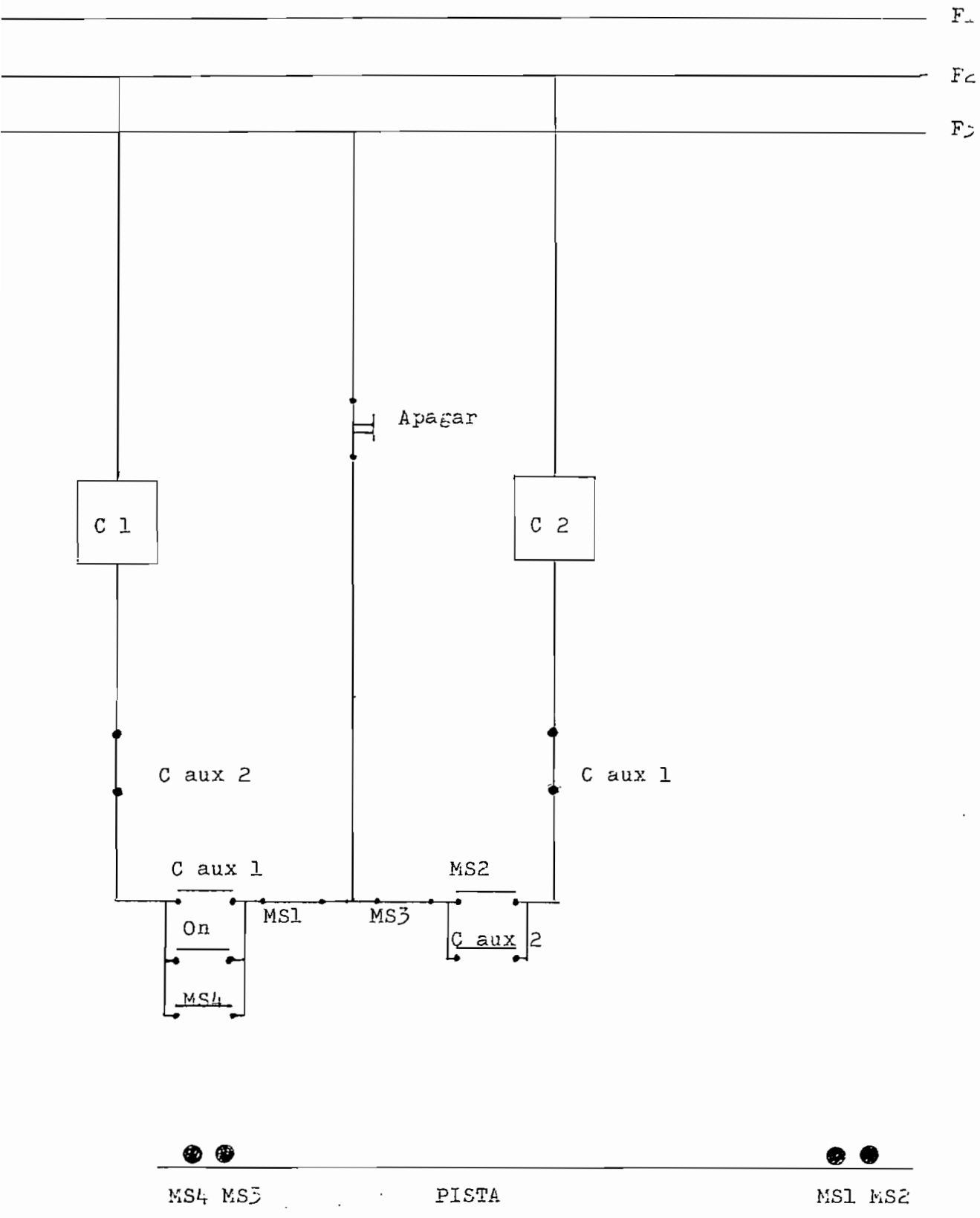
$$v = 2 \times f \times \tau$$

vemos que podemos variar la velocidad variando la frecuencia o el paso polar. El paso polar depende de la estructura física de la máquina, por lo cual no podemos en nuestro caso variarlo. La frecuencia de la corriente aplicada, en cambio, puede variarse con los elementos del laboratorio, y nos da las siguientes relaciones, para un paso polar fijo:

$$V_2 = \frac{V_1 \quad f_2}{f_1}$$

Por lo cual, al disminuir la frecuencia de operación disminuye la velocidad.

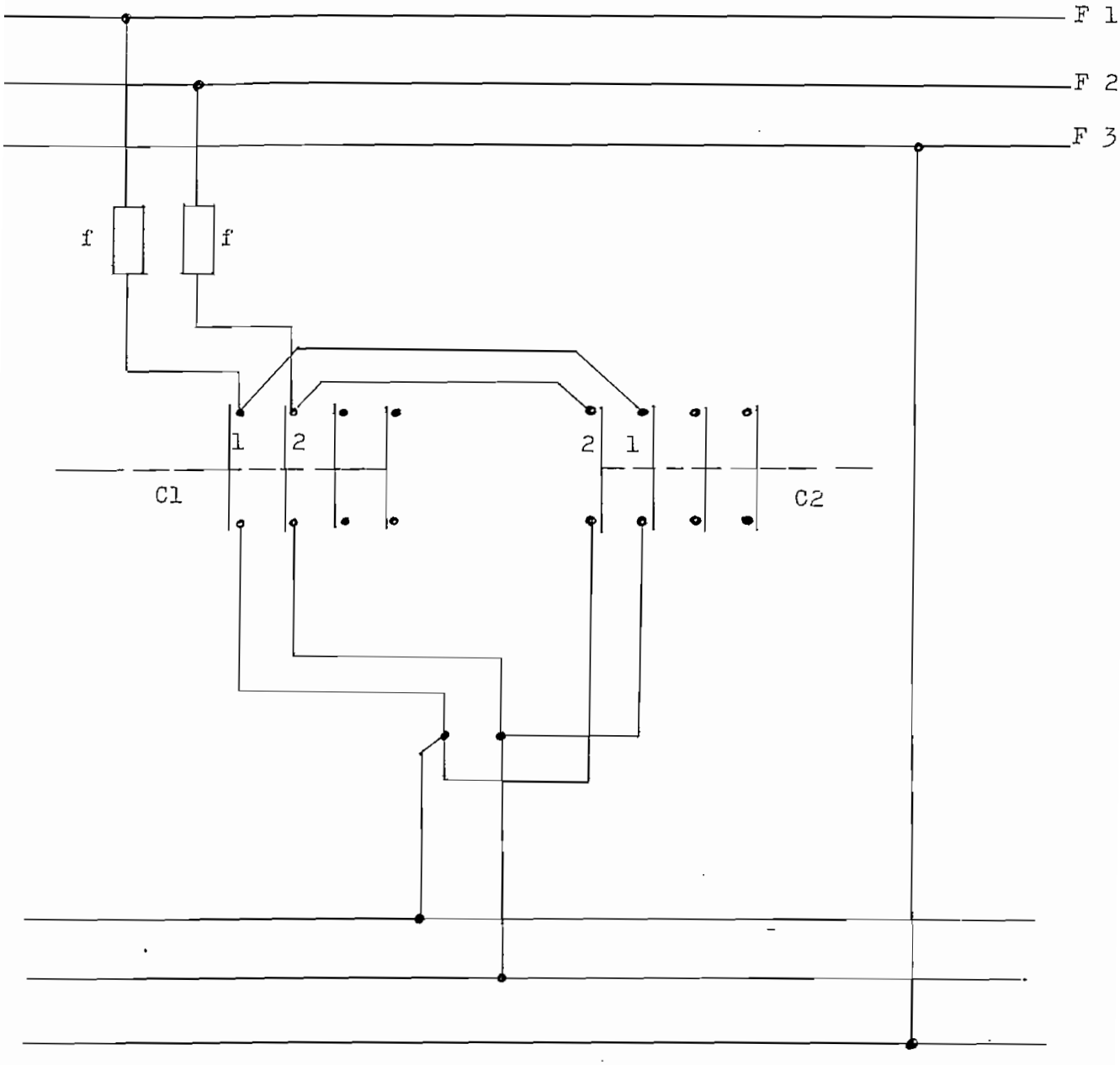
CONTROL DE INVERSION DE SENTIDO DE MARCHA POR INVERSION DE FASE



C1 Contactor de marcha hacia la derecha.

C2 Contactor de marcha hacia la izquierda.

DIAGRAMA DE FUERZA



CAPITULO 3

CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

3.1 DESCRIPCION

El prototipo consta de un vehículo y una pista de rodamiento y el sistema es en general similar al de los ferrocarriles convencionales. Para el vehículo se ha utilizado una estructura de aluminio con piezas sólidamente atornilladas, para que constituya el soporte de 2 nucleos bobinados, y se ha dispuesto de cuatro pequeños rodamientos que sirvan de ruedas, sujetas convenientemente por pernos al carro.

El motor es plano y de un solo lado, lo que quiere decir que la cara ranurada del núcleo enfrenta a la lámina de reacción de aluminio, ésta lámina de reacción se sujeta a la pista en posición horizontal.

La pista consta de 2 tubos cuadrados de 40x20 mm. unidos entre si y que mantienen una distancia fija entre ellos de tal modo que permiten circular las ruedas del vehículo. Sobre esta estructura metálica se ha fijado la lámina de aluminio, convenientemente aislada de los tubos metálicos por medio de bloques de fibra aislante. Por debajo de la lámina hay una pletina de hierro de 3 mm. que constituye el respaldo feromagnético. El vehículo toma la energia de una pista de alimentación trifásica por medio de un juego de escobillas. La pista de alimentación está constituida por tres pletinas de cobre de 1/2" de ancho por 1/8" de espesor que recorren

todo el largo de la trayectoria del carro, en posición vertical.

En realidad se trata de 2 motores trifásicos pues tenemos 2 núcleos bobinados idénticos trabajando en paralelo. Originalmente se pensó y probó un sistema de 2 núcleos enfrentados en posición vertical, con la lámina de aluminio entre ellos, pero tras varias pruebas en que la lámina que se usó resultó muy flexible y no daba lugar a una buena alineación, se optó por este sistema, el cual tiene la ventaja de permitir un entrehierro extremadamente pequeño sin mayor problema.

Los núcleos de los estatores que van a bordo del vehículo están integrados por láminas de acero silicoso de menos de 0.5 mm. de espesor en los cuales se ha procedido a realizar ranuras para alojar el devanado. Se realizaron, mediante un minucioso proceso de fresado, 24 de estas aberturas en la cara de cada núcleo y se procedió a alambrarlos con un bobinado trifásico, de superficie doble capa y 4 polos, con 6 salidas terminales c/u, una vez terminado el bobinado de los núcleos se los instaló en el vehículo, cada uno en conexión estrella, y los 2 núcleos finalmente en paralelo.

El sistema se alimenta con tensión trifásica variable hasta 100 voltios.

3.2 PROCESO DE CONSTRUCCION

Para ejecutar este proceso se procedió a construir los siguientes elementos:

a) Primario: constituidos por los núcleos ranurado y bobinados trifásicos ubicados en cada nucleo.

b) Secundario: constituido por un riel de reacción, es decir la lámina de aluminio, y por un respaldo ferromagnético ya mencionado.

c) Vehículo: que soporta las bobinas primarias

d) Pista de rodamiento.

e) Toma de energía: pletinas de cobre y escobillas.

f) Caja con sistemas de control

3.2.1 Primario

3.2.1.1 Núcleos

Estos se construyeron utilizando láminas de acero silicoso de menos de 0.05 cm de espesor, 20 cm de largo y 3 cm de ancho cuya densidad de campo máxima es teóricamente 1.6 Tesla, y que se usa normalmente en la construcción de transformadores. Se determinó que alojaran 24 ranuras de 4 mm. de ancho.

El paso de ranura se lo hizo de 200/24 mm. y el ancho de diente = 200/24 - 4 = 4.33 mm. Profundidad de diente = 35 mm.

Para realizar estas ranuras en los núcleos se acudió al proceso de fresado utilizando una máquina fresadora del taller de máquinas - herramientas de la Facultad de Mecánica de la EPN. Con esta máquina, y con una fresa tipo sierra

circular de 315x10x4 mm., que fue necesario importar de Alemania, se realizó los cortes en la cara del núcleo, ensamblado con pernos y sujetado en prensa. Este proceso, de suma paciencia y prolijidad dio como resultado dos núcleos con ranuras perfectamente regulares.

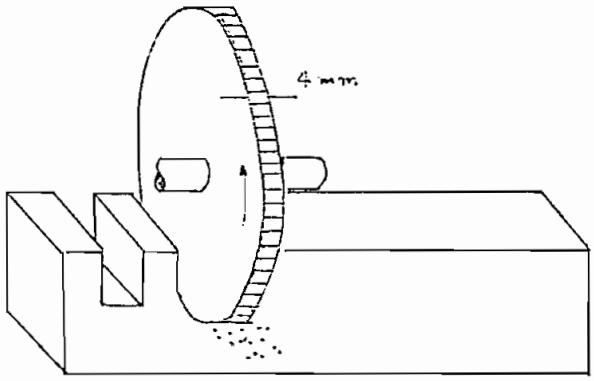


fig. 3.1 Proceso de fresado

Una vez obtenidos los núcleos ranurados se procedió a ensamblarlos nuevamente con pernos ubicados en agujeros realizados para el caso y aislados con un espagueti para no cortocircuitar las láminas. Así mismo se barnizó cada una de las láminas con barniz rojo, clase F de poliuretano ER 41 para asegurarnos que no haya pérdidas por corrientes parásitas (de foucault).

Este barniz presenta las siguientes características:

Tensión dieléctrica en seco	2000 Vol/mil
Tensión dieléctrica en húmedo	1200 Vol/mil
Tiempo de sacado al aire	10 minutos
Resistencia química	sobre 600 horas

3.2.1.1 Bobinado de los nucleos.

Este tiene en definitiva las siguientes características:

Trifásico

Doble capa

Cuatro polos

Ranuras finales a medio llenar

Tipo imbricado

18 bobinas por núcleo

Grupos de 2 bobinas

q = 2 ranuras x polo fase

m = 3 fases

2p = 4 polos

Conductor No. 23 AWG

100 vueltas por bobina

200 conductores por ranura

Bobinados de los dos núcleos conectados en paralelo

El esquema adoptado para este trabajo aparece en el capítulo anterior, y se amplía con la figura en que aparecen las conexiones.

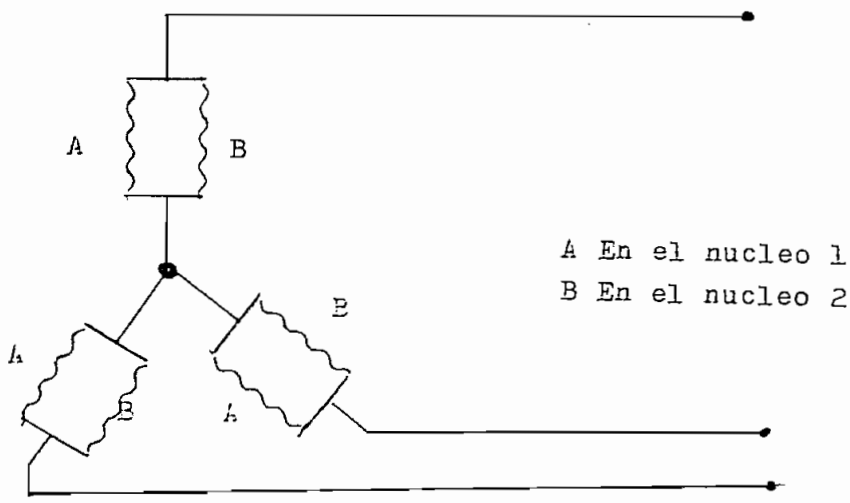


fig. 3.2 Conexiones

Una vez que se programó el devanado, se [illegible] bobinas utilizando un molde. Se fabricó de una sola vez las 36 bobinas que se requerían para los dos núcleos y se las aisló con barniz tipo F. Cuando secaron y previa la colocación de papel prespán en cada ranura para mantener aisladas las bobinas del núcleo de hierro se procedió a instalar las bobinas en las ranuras, y a colocar tacos de caña de guadua a manera de cuñas para evitar que las bobinas se muevan de su lugar. El siguiente paso fue la conección de los grupos bobina para integrar cada una de las tres fases. Una vez probadas las fases, cada una con respecto a la otra y luego con respecto a tierra, se marcó los terminales correspondientes con letras X,Y,Z,U,V,W y se los conectó en las borneras correspondientes ubicadas sobre la estructura del carro. En dichas borneras se realizaron los puentes correspondiente para que cada núcleo esté conectado en estrella y ambos núcleos trabajen en paralelo.

3.2.1.3 Construcción del vehículo

El vehículo, como se explicó antes, es una estructura rectangular de aluminio con uniones convenientemente empernadas de tal manera de obtener una rigidez suficiente. Las bobinas se fijan en la parte superior del carro con la cara hacia abajo, y se ha ranurado la estructura de tal modo que los ejes de las ruedas puedan variar su posición en el sentido vertical. Esto permite que el entrehierro pueda aumentar o disminuir a voluntad.

Los ejes de las ruedas son pernos pasantes ajustables

por [illegible] las ruedas son pequeños rodamientos, lo que permite un giro con un mínimo rozamiento.

A un lado del vehículo se ha fijado un sistema de "escobillas" para tomar energía de la pista, está constituida por tres barras de cobre. Dada la pequeña corriente que circula por las barras, se probó este sistema, que no dio muestras de desgaste ni de producción de soldaduras por arco.

3.2.2 Secundario

3.2.2.1 Perfil de aluminio y respaldo ferromagnético.

Para instalar el secundario se procedió a construir una base, que constituye al mismo tiempo la pista de rodamiento uniendo con pedazos de pletina de hierro de 1/2"x1/8" y tubos cuadrados de hierro de 20x40 mm., manteniéndolos a una distancia fija entre ellos de 12 cm. Sobre las pletinas de unión se fijaron pequeños bloques de fibra aislante, para a continuación sobre ellos fijar sucesivamente una pletina de hierro de 2"x3mm. que es el respaldo ferromagnético ya mencionado, y un perfil de aluminio de 5 mm. de espesor y de 6 cm. de ancho horizontal, con sus bordes doblados hacia abajo. Se trata de un perfil de los que se usan para borde inferior de puerta y se lo denomina sardinel.

3.2.2.2 Pista de toma de energía.

Fijada a la base del secundario se construyó la pista de toma de energía. Esta se instaló en posición vertical, es decir perpendicular a la anterior, usando igualmente 2 tubos cuadrados de 20x40 mm. unidos con pletina de hierro. Sobre estos tubos se fijaron pequeños bloques de fibra aislante, y

a su vez sobre ellos se fijaron con tornillos las tres pletinas de cobre de 1/2"x1/8" de las cuales el motor tomara su energía al recorrer la pista de rodamiento.

3.2.3 Sistema de control del vehículo

Para que el vehículo pueda ser probado en el laboratorio se procedió a armar su propio sistema de control, el cual únicamente seria, de arranque-parada y cambio de sentido de marcha por inversión de fase.

Este se lo efectuó con 2 contactores, siguiendo el diagrama que aparece en el capítulo anterior y se lo instaló en una pequeña caja metálica de 15x15, de tal manera que se pudiera controlar el funcionamiento independientemente de los elementos que están disponibles en el laboratorio.

Se usó el diagrama ya indicado en el capítulo de diseño.

3.2.4 Sistemas de ventilación.

Este es un sistema de extracción de aire por tiro forzado, es decir, que se colocan extractores para sacar por la parte superior del vehículo el aire que se calienta alrededor del bobinado. Para ello se perforó dos aberturas circulares en la lámina superior del vehículo, y se fijó con pernos los extractores sobre las aberturas. Los extractores con 110 V y consumen una potencia de apenas 14 W cada uno. Se alimentan de una toma de energía independiente de la toma del motor, constituida por un alambre de cobre desnudo que recorre la pista en toda su longitud y una escobilla que la

recorre.

3.3 LISTA DE MATERIALES

3.3.1 Núcleos primarios

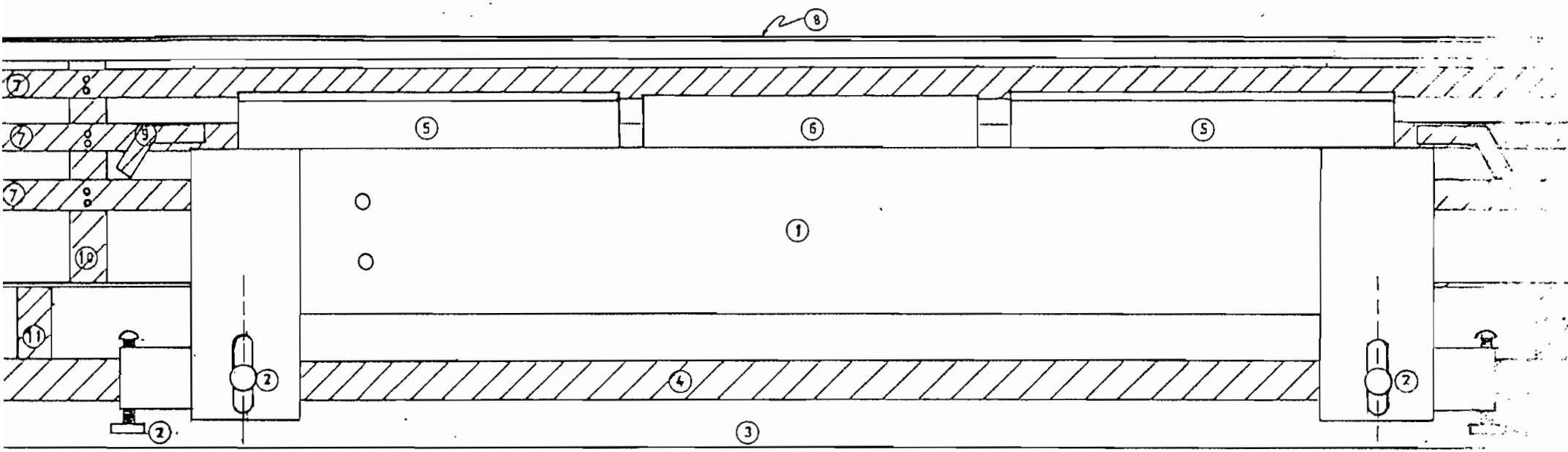
- Láminas de acero silicoso de menos de 0.5mm de espesor, recortadas a 160x20x1 cm. ------ 180
- Pernos de sujección de 1/8" x 1" ------ 6
- Alambre esmaltado # 23 AWG ------ 4 lb
- Barniz de aislamiento clase F ------ 1tarro
- Cinta aislante ------ 1
- Angulo de hierro 1/8" x 3/4" ------ 1 m
- Bornera para conexiones ------ 1
- Spageti para aislamiento ------ 1 m
- Papel prespan para aislar las ranuras ------ 1 Pl
- Trozos pequeños de caña de guadua ------ 1Lote

3.3.2 Pista de rodamiento y secundario

- Tubo cuadrado de hierro de 20x40 mm ------ 12 m
- Pletina de hierro de 1/2 x 1/8" ------ 2 m
- Bloques de fibra aislante de 2x2x3 cm ------ 6
- Bloques de fibra aislante de 1x2x4 cm ------ 6
- Pletina de hierro de 2" x 3mm ------ 3 m
- Perfil de aluminio de 5mm x 6 cm ------ 3 m

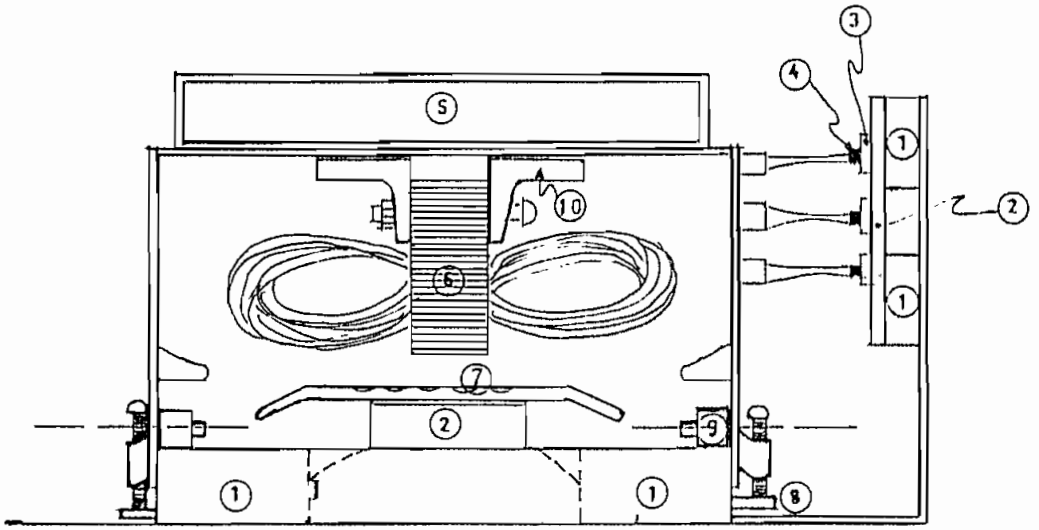
3.3.3 Toma de energia.

- Pletina de cobre de 1/2" x 1/8" ------ 9 m
- Alambre desnudo de cobre #10 QWG ------ 3 m
- Aisladores de porcelana para 110 V ------ 2
- Bornera oe conexiones ------ 1



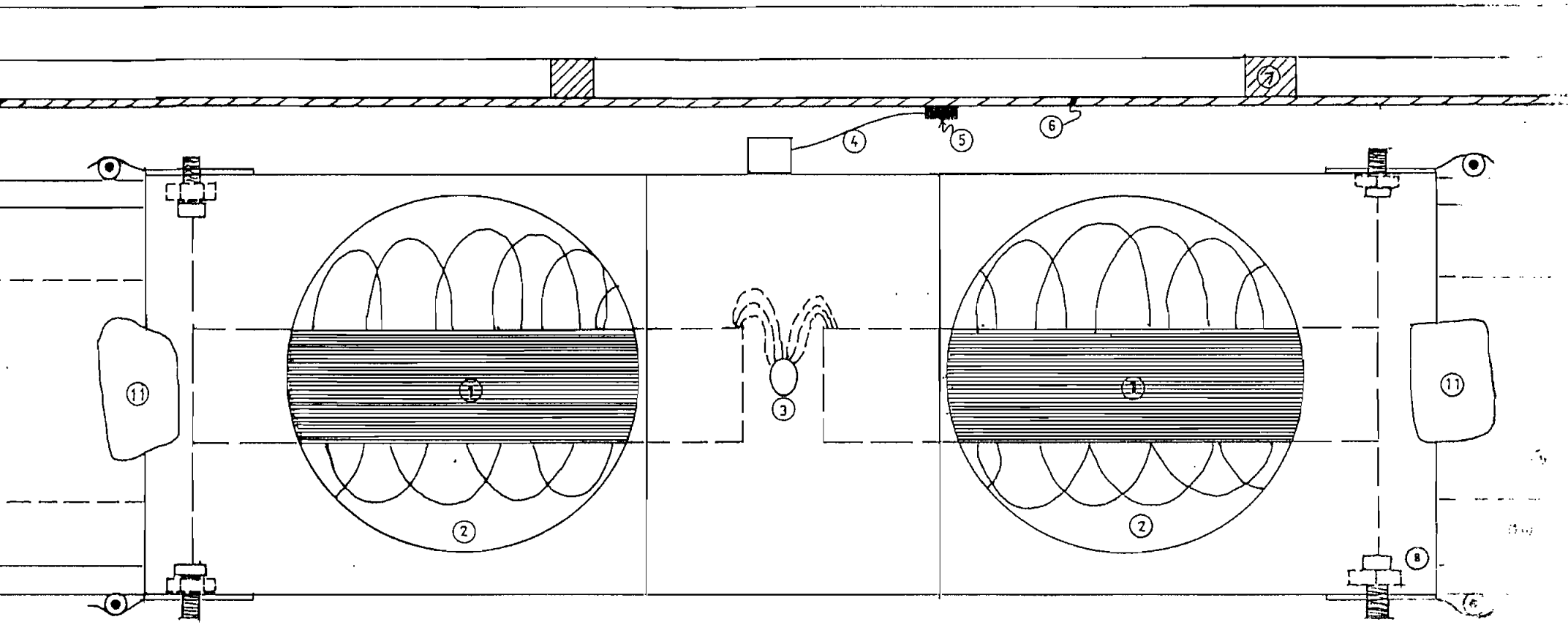
1	VEHICULO DE ESTRUCTURA DE ALUMINIO
2	RUEDAS GUIA SUPERIOR Y LATERAL
3	TUBO CUADRADO PISTA DE RODAMIENTO
4	LAMINA DE ALUMINIO 5 mm
5	EXTRACTOR DE AIRE
6	CAJA DE CONEXIONES
7	PLATINAS DE COBRE DE TOMA DE ENERGIA 1/2×1/8"
8	ALAMBRE DE COBRE # 10 AWG
9	CAUCHO ANTICHOQUES
10	BLOQUE AISLADOR
11	PLATINA DE SOPORTE

		TESIS DE GRADO
MOTOR LINEAL DE INDUCCION	ESCALA: 1:2	LAMINA Nº 1 / FECHA: MA
		DIBUJO C D P
VISTA LATERAL	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRIC. DEPARTAMENTO DE POTENCIA



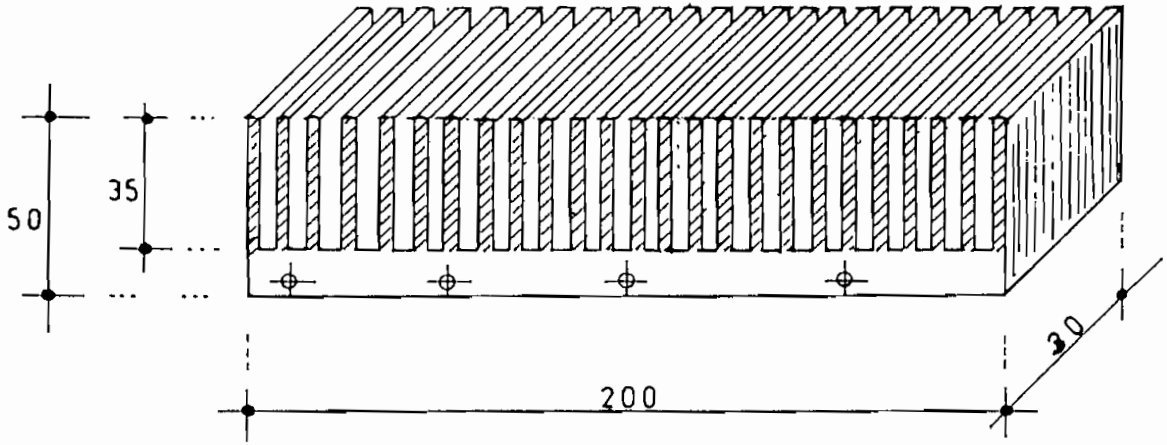
1	TUBO CUADRADO 20×40 mm
2	BLOQUE DE MATERIAL AISLANTE
3	PLATINA DE COBRE 1/2"×1/8"
4	ESCOBILLA DE CARBON
5	EXTRACTOR DE AIRE
6	NUCLEO BOBINADO
7	PERFIL DE ALUMINIO 5 mm
8	RULIMAN GUIA LATERAL
9	RULIMAN GUIA SUPERIOR
10	HIERRO ANGULO SOPORTE DE NUCLEOS

		TESIS DE GRADO
MOTOR LINEAL DE INDUCCION	ESCALA 1:2	LAMINA Nº 2 / FECHA MAI
		DIBUJO: C D P
VISTA FRONTAL	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRIC DEPARTAMENTO DE POTENCIA



1	NUCLEO DE ACERO BOBINADO
2	ABERTURA DE VENTILACION (SIN EL EXTRACTOR)
3	ABERTURA PARA PASAR LOS ALAMBRES
4	LAMINA METALICA PARA LA ESCOBILLA
5	ESCOBILLA DE CARBON
6	PLATINA DE COBRE 1/2 x 1/8"
7	BLOQUE DE MATERIAL AISLANTE
8	RULIMANES DE GUIA
9	PERFIL DE ALUMINIO
10	RIEL DE METAL 20 x 40 mm
11	CAUCHO ANTICHOQUES

MOTOR LINEAL DE INDUCCION	ESCALA 1:2	**TESIS DE GRADO**
		LAMINA Nº 3 — FECHA [illegible]
		DIBUJO C D P
PLANTA (SIN EXTRACTORES DE AIRE)	**EPN**	**FACULTAD DE INGENIERIA ELEC[illegible]** DEPARTAMENTO DE POTENCIA



		TESIS DE GRADO
MOTOR LINEAL DE INDUCCION	ESCALA 1:2	LAMINA Nº 4 / FECHA: MAR/9
		DIBUJO: C D P
NUCLEO RANURADO PERSPECTIVA	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA DEPARTAMENTO DE POTENCIA

3.4 DETALLES DEL MOTOR

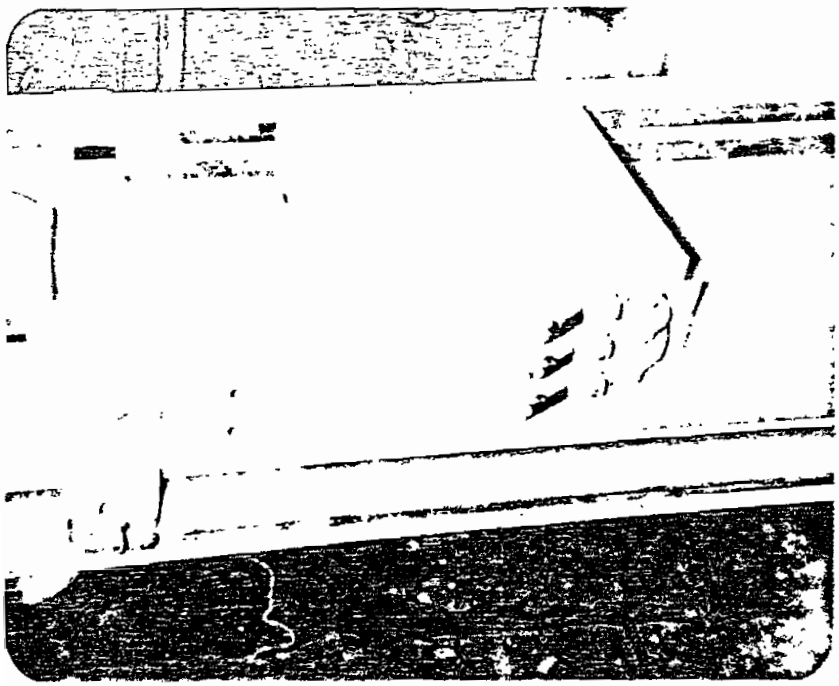


Fig. 3.

Aspecto [illegible] del vehículo, con el sistema de escobillas montado.

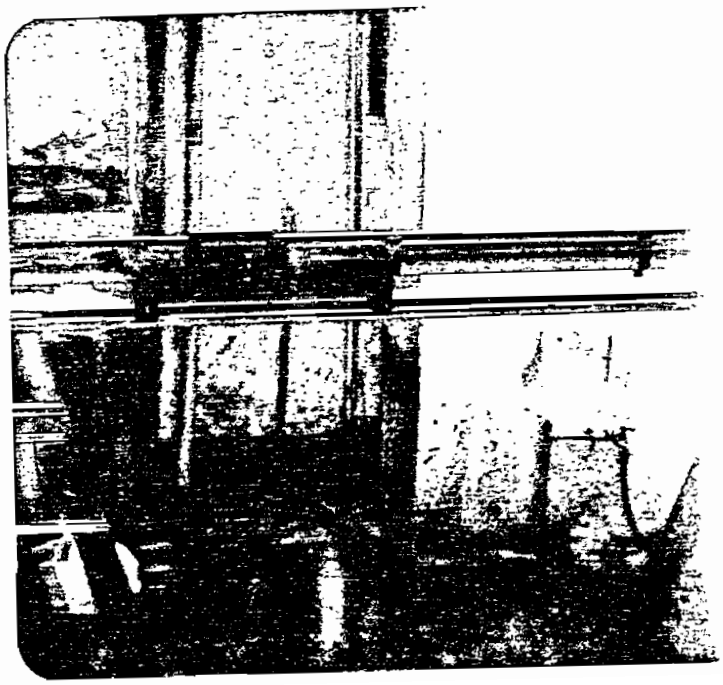


Fig. 3.5

El vehículo sobre la pista, sometido a pruebas.

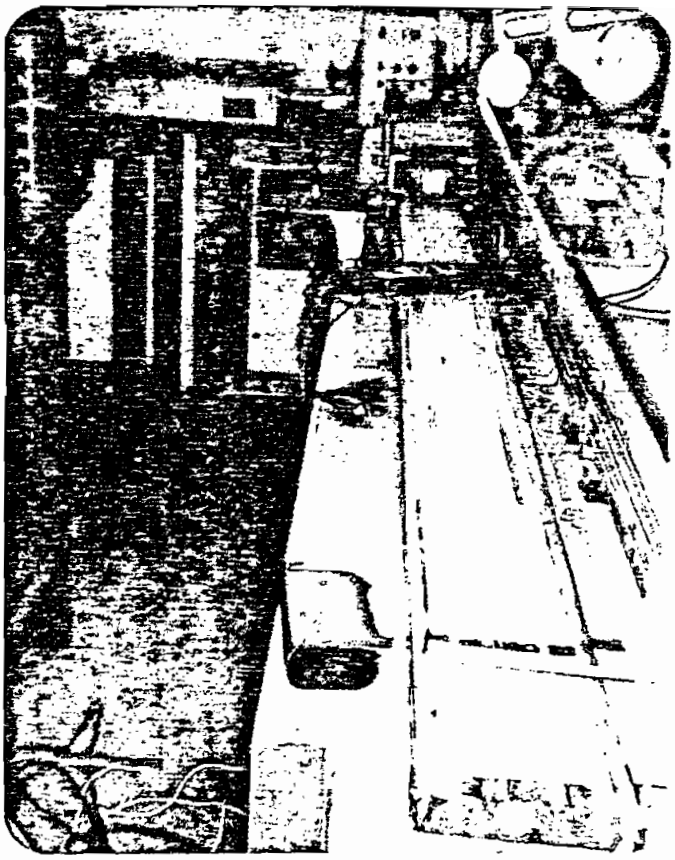


Fig. 3.6

Pista instalada con el vehículo en el laboratorio de máquinas.

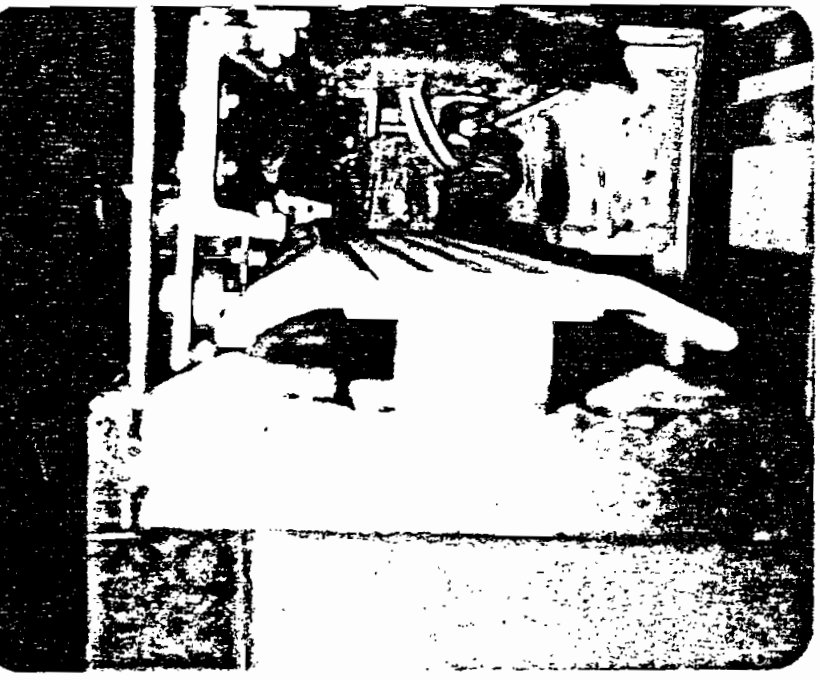


Fig. 3.7

Vista frontal del vehículo y la pista.

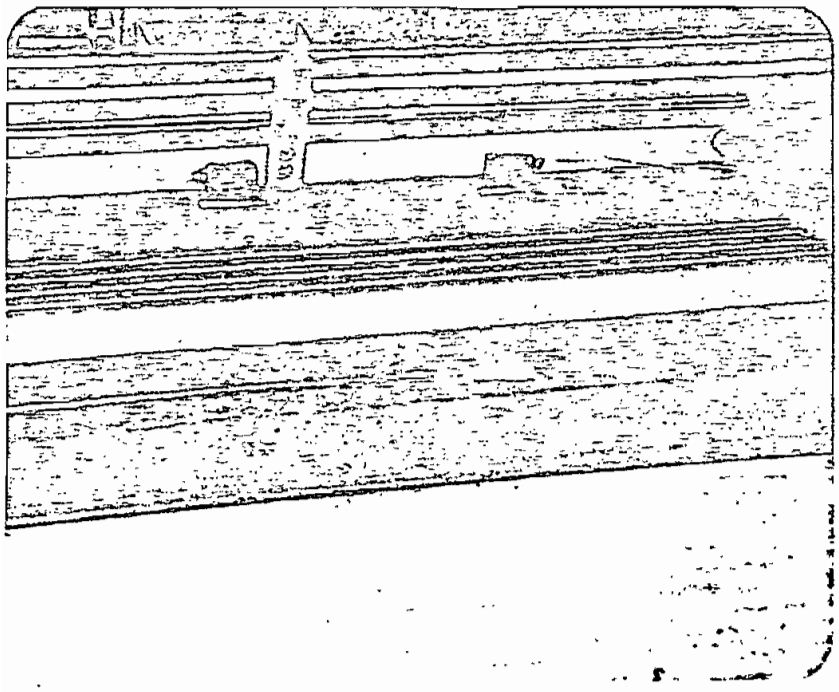


Fig. 3.8

Vista parcial de la pista. Toma trifasica de energia. Microswitchs de control. Lámina de aluminio

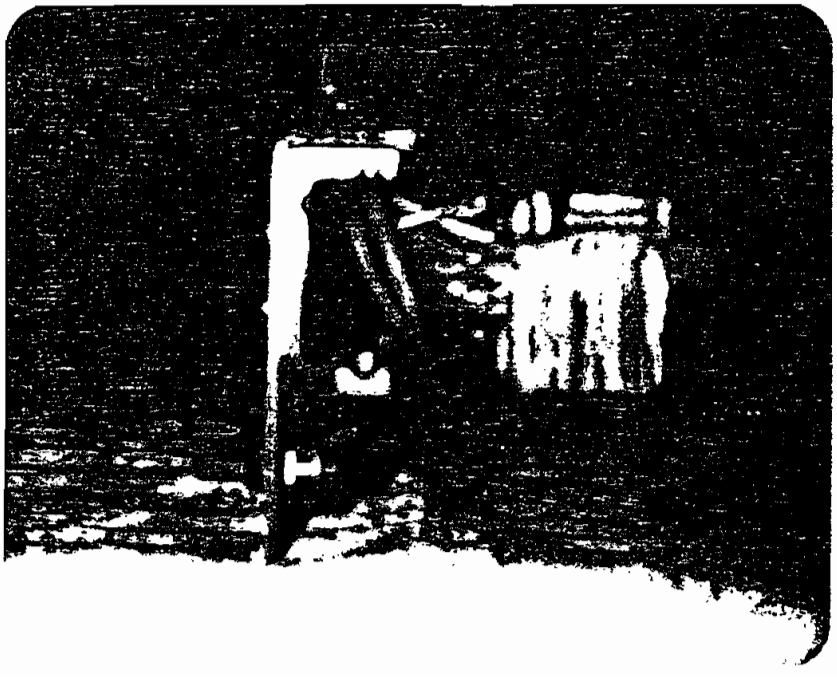


Fig. 3.9

Detalles del vehículo

- Bobina soportada con ángulo y pernos en el fondo del vehículo.
- Caucho parachoques.

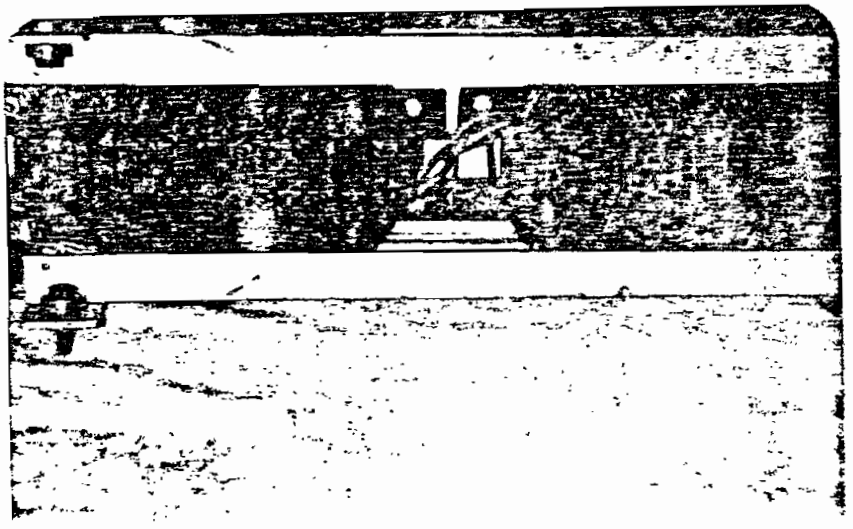


Fig. 3.10

Vista inferior del ventilador en que se aprecian los 2 núcleos hibridos y sus soportes.

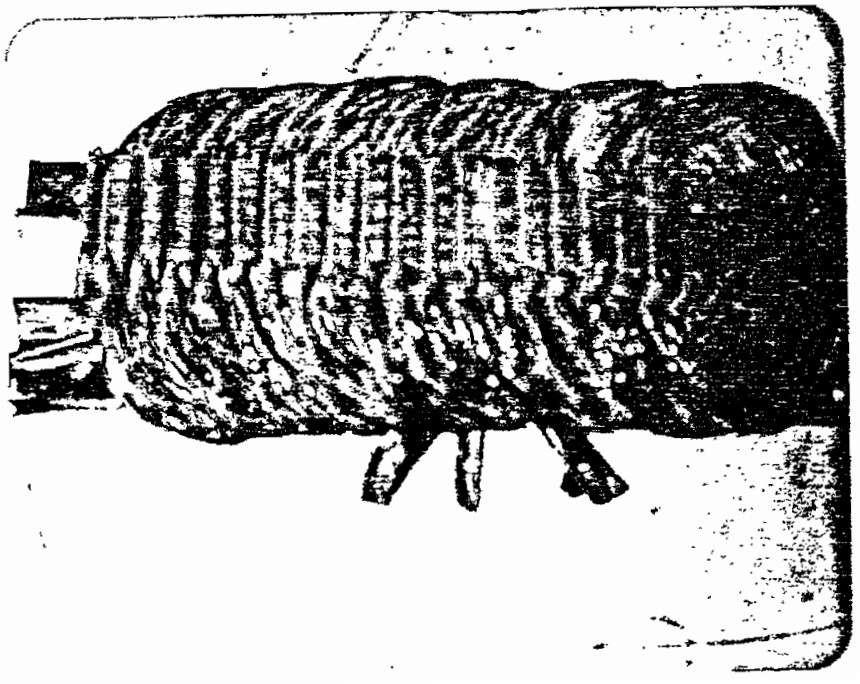


Fig. 3.11

Núcleo bobinado completamente, con las ranuras finales a medio llenar.

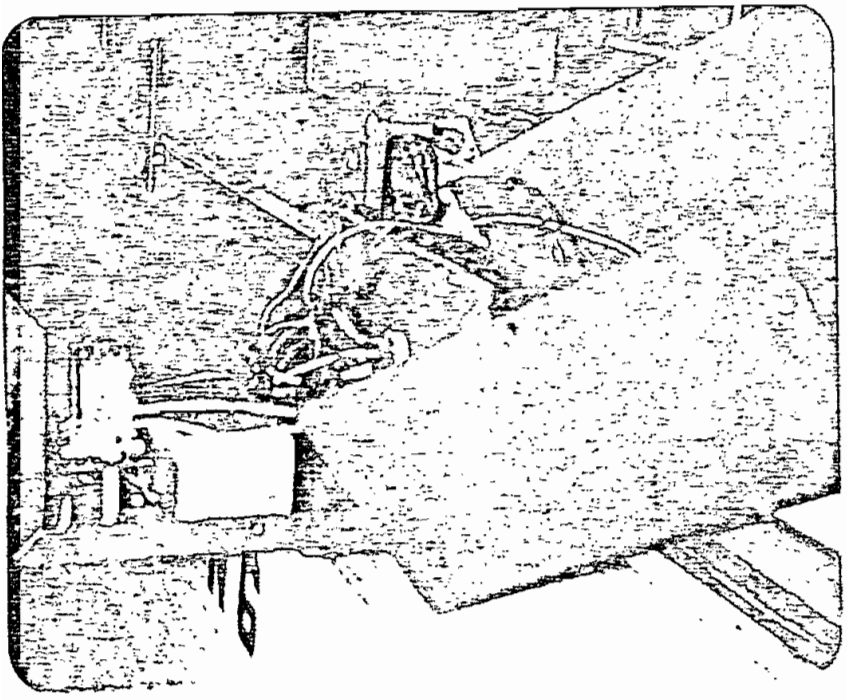


Fig. 3.12

Control del vehiculo acercandose a la pista, con [illegible] a [illegible].

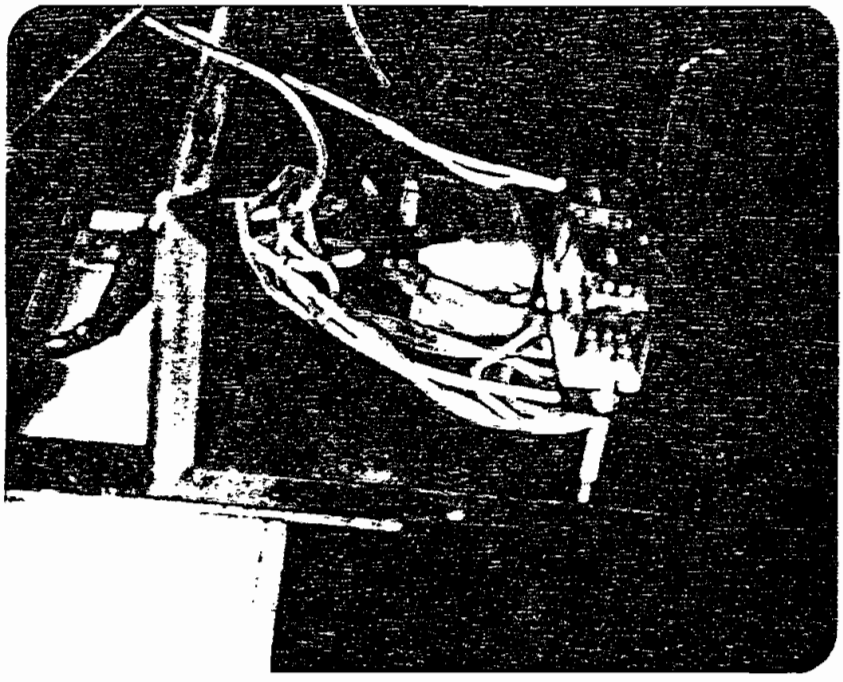


Fig. 3.13

Control del vehiculo.

Vista lateral.

CAPITULO # 4

PRUEBA EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO

En esta parte de la tesis se prueba y se hace experiencias con el vehículo construido. Se determina un circuito electrico equivalente que nos permita calcular su comportamiento en lo que se refiere a potencias, perdidas, eficiencia, etc.

El motor se lo somete a pruebas estáticas y dinamicas. Las pruebas estáticas se utilizan para obtener los valores componentes del circuito equivalente electrico, y estos se obtienen usando las pruebas normales que se usan en un motor rotativo. Las pruebas dinámicas se las realiza mientras el vehículo circula a lo largo de la pista de pruebas.

Para determinar el circuito equivalente real de la máquina, se modifica los parámetros de la máquina de acuerdo con la teoría de un circuito equivalente propio de las máquinas lineales y que pone de manifiesto la principal diferencia entre motores rotativos y motores lineales, ya que en éstos el secundario es continuamente reemplazado por un nuevo material, el cual tiende a resistir un súbito incremento en penetración de flujo y solo permite un crecimiento gradual de la densidad de flujo en el entrehierro. La entrada de nuevo material y su influencia en el flujo modificará el comportamiento del motor.

4.1 INSTRUMENTOS Y ELEMENTOS USADOS.

Se utilizo los siguientes elementos:

- Termómetro digital con punta bimetálica.
- Vatímetros monofásicos de bajo factor de [illegible] de rango 120, 240 V y 1,5 Amp.
- Watímetro trifásico para similares rangos de voltaje y corriente.
- Amperímetro de corriente alterna de rango 12-24 voltios.
- Variac trifásico hasta 240 V.
- Resistencia de 1 ohmio.
- Osciloscopio Tektronix.
- Transformadores de corriente 10, 20, 50 / 5

4.2 PRUEBAS PRELIMINARES.

Una vez terminada la construcción del vehículo se procedio a probar en primer lugar su movimiento sin obstáculos en la pista en uno u otro sentido. A continuación se preparó un valor de entrehierro de prueba y se aplicó un voltaje trifásico para observar entre que valores se logra un movimiento uniforme y suave para el vehículo, a fin de adaptarlo a la pista de 3 metros de largo.

Entre hierro promedio (parámetro difícil de medir)	3.5 a 4.0 mm
Voltaje mínimo para obtener movimiento	65 Voltios a 60 Hz
Voltaje máximo	75 Voltios a 60 Hz

Pasado este valor de voltaje el carro choca fuertemente contra el tope de cada extremo de la pista.

Lo que se nota es que las corrientes medias de cada fase no son iguales, y esto se debe no a que los devanados de la máquina no se los haya construido balanceados, sino a las condiciones asimétricas, tanto eléctricas como magnéticas, que prevalecen en el motor lineal, pues la configuración del entrehierro magnético cambia constantemente.

4.2.1 Prueba de temperatura.

En un primer momento, no se había considerado la ventilación forzada, pero tras las primeras pruebas, se vio que era imperativo considerarla. En esta forma se determinó que se lograba llegar a un valor estable de temperatura, la que se controló con ayuda de un termómetro digital fijo en el vehículo y cuya punta de prueba, un bimetal, se colocó en las bobinas.

En la figura podemos ver la curva de temperatura en función del tiempo, tendiendo hacia la estabilización.

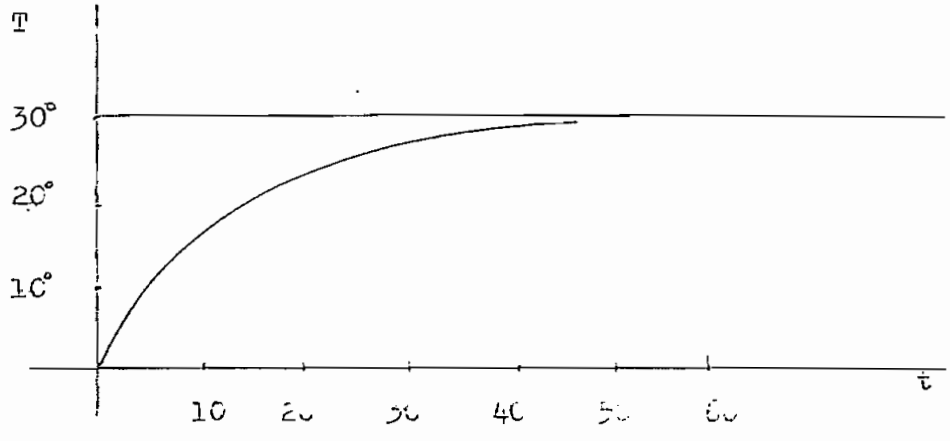


Fig. 4.1

generalmente [illegible] para el motor lineal de inducción. La mayoría de los modelos existentes dependen de la teoría de campo y pueden mostrar [illegible] tanto razonablemente precisos. Desgraciadamente [illegible] proveen el conveniente marco conceptual de referencia [illegible] el circuito equivalente provee.

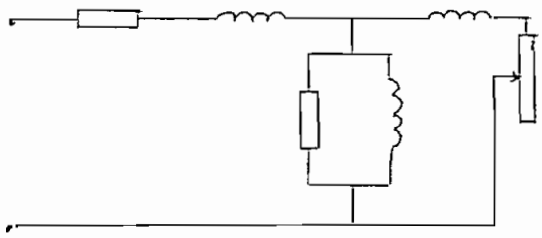
El circuito equivalente es escencialmente un modelo de COMPORTAMIENTO, y por lo general no requiere datos de diseño interno de la máquina. Los datos de la máquina pueden obtenerse de los terminales de la máquina por mediciones y luego se incorporan al modelo. El motor lineal tiende a presentar problemas mas difíciles de medición, pero en principio se puede obtener la misma clase de datos que en el motor rotativo.

El circuito equivalente del motor de inducción rotativa es bien conocido, y puede ser representado como se muestra en la figura 4.2 con sus parámetros por fase y referidos al primario. En el caso del motor lineal, el uso de un gran entrehierro lleva a densidades de flujo bajas que tienden a hacer que las pérdidas en el hierro sean muy pequeñas, de tal manera que la componente de pérdidas en el hierro puedan ser despreciadas sin pérdida significativa de precisión. Sin embargo, el circuito equivalente del motor rotativo no toma en cuenta el comportamiento del motor lineal, y esta falla es atribuida al fenomeno conocido como "efecto de borde".

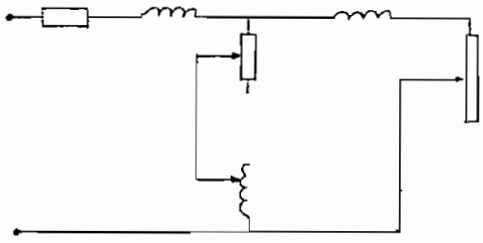
Como ya se mencionó, en los motores lineales, mientras

a, primario se mueve, el secundario es continuamente reemplazado por un nuevo material, el cual tiende a resistir el súbito incremento en penetracion de flujo y solo permitira un incremento gradual de la densidad de flujo en el entrehierro. Para obtener un circuito equivalente adecuado, será necesario cuantificar la influencia de la entrada de nuevo material en la distribucion de flujo en el entrehierro y cuanto cuenta el efecto el efecto de borde. Este análisis se encuentra en el capítulo teorico y aquí mostramos únicamente el circuito equivalente resultante.

Fig. 4.2 Circuito equivalente del motor de inducción rotativo



Circuito equivalente del motor de inducción lineal



D Es la longitud de motor [illegible] lineal

θ Es una cantidad sin dimensiones que repr[illegible] longitud del motor en escala normalizada de [illegible]

v Es la velocidad del primario relativa a la lámina secundaria.

R_{21} Resistencia secundaria referida al primario

L_m Inductancia de magnetización

L_{21} Inductancia de dispersión

$$\theta = D \; R_{21} / (L_m + L_{21}) \; v$$

4.3.2 Pruebas para determinar los parametros del circuito equivalente.

4.3.2.1 Prueba en Vacio

En esta prueba, se aplica el voltaje nominal a la máquina y se la hace trabajar sin carga alguna acoplada a su flecha. El voltaje polifásico balanceado que se aplica es normalmente el de la placa, y de la frecuencia especificada también en la placa. Las lecturas que se toman son los voltajes de entrada (de línea línea); las corrientes de línea y la potencia de salida. La condición para que esta prueba resulte exitosa es que el deslizamiento sea muy pequeño, es decir que se esté trabajando a una velocidad cercana a la de sincronismo, en este caso, la medición física de la inducción magnética no va a ser posible, dada la corta longitud de la pista, lo que no permite alcanzar una velocidad cercana a los 6 metros por segundo requeridos. Ante esta limitación, se resolvió más bien optar por hacer un cálculo del valor de la inductancia de magnetizacion X_m, basado en las

características físicas del motor lineal, específicamente en el número de vueltas de alambre por fase y en las dimensiones del motor.

Estimación de la inductancia.

Para ello se considera la disposición física de los núcleos y su conexión en paralelo.

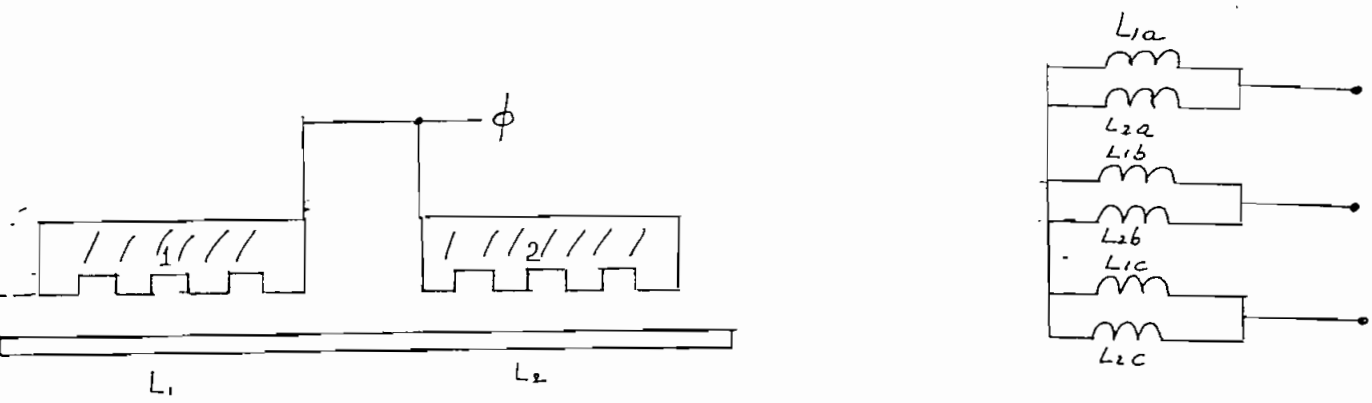


Fig. 4.3

Las condiciones necesarias para estimar la inductancia de la máquina son:

1. Funcionamiento en estado estable.
2. Máquina detenida.

Se considera un circuito magnético lineal, independiente del circuito secundario, y se estima la inductancia que servirá como parámetro de referencia para la prueba que corresponde a la formulación el circuito equivalente.

En el circuito magnético tenemos:

$L = N^2 / \mathcal{R}$

Se considera significativa solo la reluctancia del aire

$L = N^2 \mu o A / g$

donde $\mu o = 4 \pi * 10^{-7}$ [Weber/amp.vuelta.m]

$g =$ entrehierro promedio

$A =$ área que atraviesa el flujo

Para el caso

$g = 0.004$ m y A = ancho del nucleo x longitud promedio afectada por una fase de corriente

$A = 0.03 \times 0.166$m

$L_1 = N^2 \mu o A / g$ $L_2 = N^2 \mu o A / g$

$L_t = (L_1 * L_2) / (L_1 + L_2)$

Como $L_1 = L_2$

$L_t = 0.5 L_1$

$$L_t = \frac{N^2 \mu o A}{2 g} = \frac{600^2 * 4\pi x 10^{-7} * (0.03 * 0.166)}{2 * (0.004)}$$

$L_t = 0,2815$

$X_{1t} = 120 \pi L_t = 106.7$ ohms a 60 Hz

Este valor;

$X_{1t} = X_m + X_{11} = 106.7$ ohms

4.3.2.2 Prueba de rotor bloqueado

Esta prueba se lleva a cabo con el rotor mecánicamente parado; en este caso con el vehículo mecánicamente detenido, (s=1) y se aplica un voltaje tal que circule la corriente

nominal de plena carga, a una frecuencia menor de la .. placa, en nuestro caso 20 Hz. Se registran los valores de Potencia de entrada, voltaje y corrientes de línea. Debido al entrehierro en el circuito magnético, la rama de reactancia de magnetización no puede despreciarse como se hace en el transformador.

Los valores terminales de la impedancia, reactancia y resistencia de rotor bloqueado son:

$$Z_{BL}' = \frac{V_{BL}}{I_{BL}} \quad , \quad R_{BL} = \frac{V_{BL}}{m_1 \; I_{BL}^2}$$

$$X_{BL} = (Z_{BL}'^2 - R_{BL}^2)^{1/2}$$

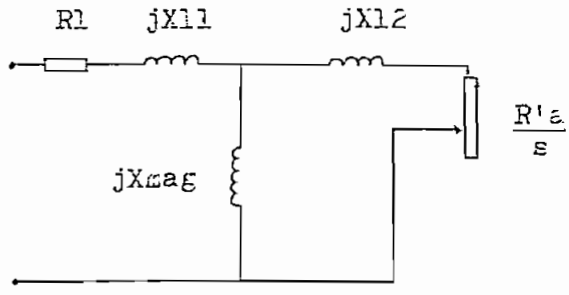


Fig. 4.4

Al examinar el circuito equivalente de la figura 4.4 se observan las siguientes relaciones, suponiendo R_{BL} independiente de la frecuencia y $R_{BL} = R_{BL}'$ (frec línea / 20)

$$R_{BL} = R_1 + \{ j X_{mag} \parallel (R_2' + j X_{12}') \}$$

4.3.3 Valores de la fuerza de empuje al variar el entrehierro y al variar el voltaje.

h = 4,0 mm	
VOLTAJE	EMPUJE [N]
60	7
65	9
70	11
75	13
80	
85	
90	

h = 5,0 mm	
VOLTAJE	EMPUJE [N]
60	--
65	5.0
70	5.8
75	8.0
80	9.0
85	11.0
90	

4.3.4 Variacio de la [illegible] al variar el voltaje aplicado, [illegible]

VOLTAJE	[illegible]
60	[illegible]
65	0.47
70	0.51
75	0.68
80	0.62
85	0.72

4.3.5 Observacion de las corrientes en el osciloscopio.

Se procedió a conectar un osciloscopio que nos permita determinar las formas de onda de la corriente al momento de conectar y desconectar el aparato. El circuito para poder hacer las lecturas fue el siguiente:

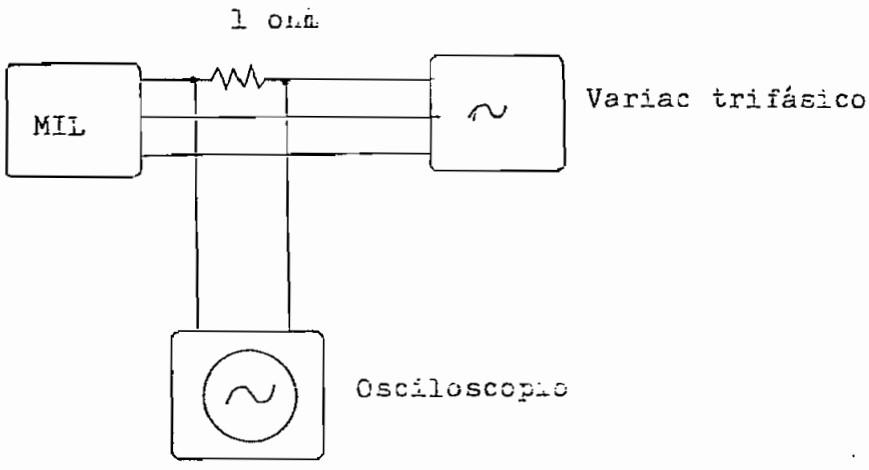
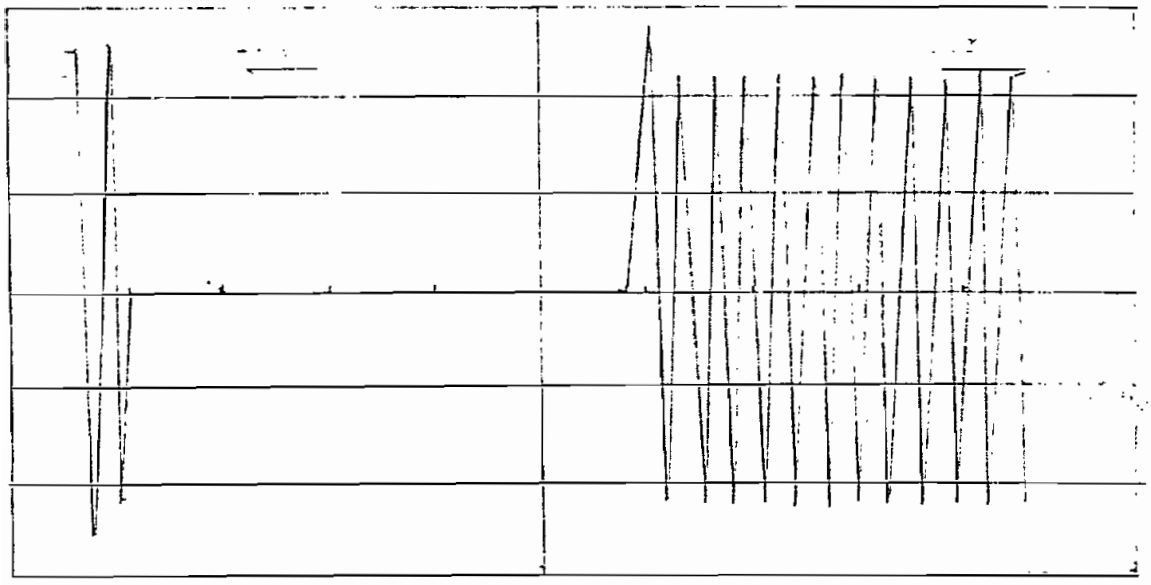
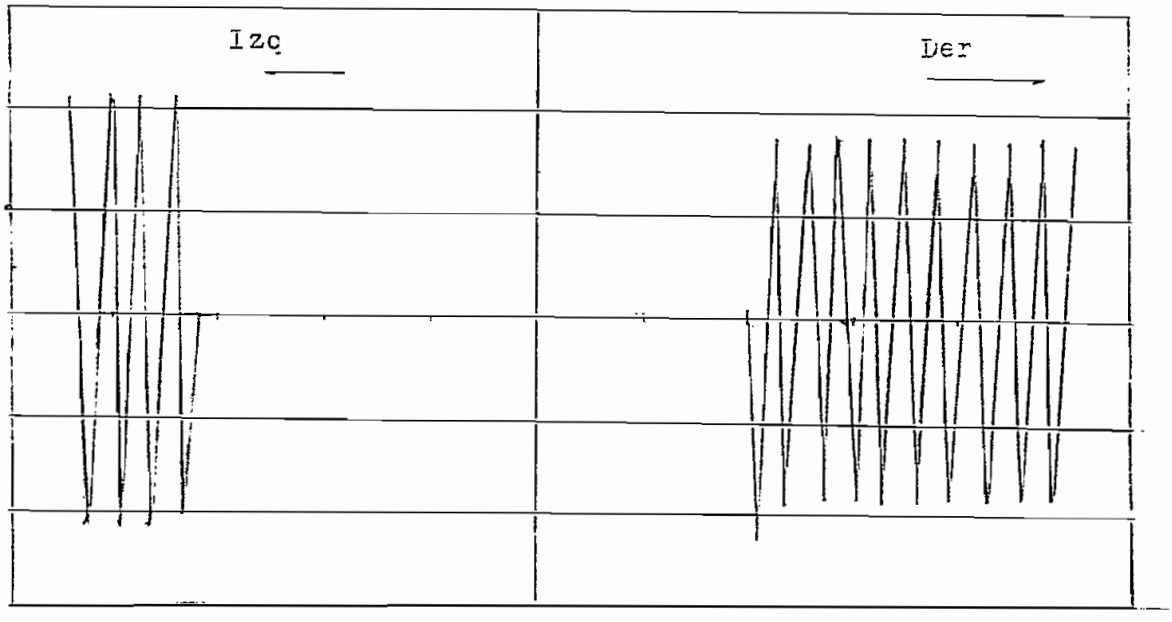


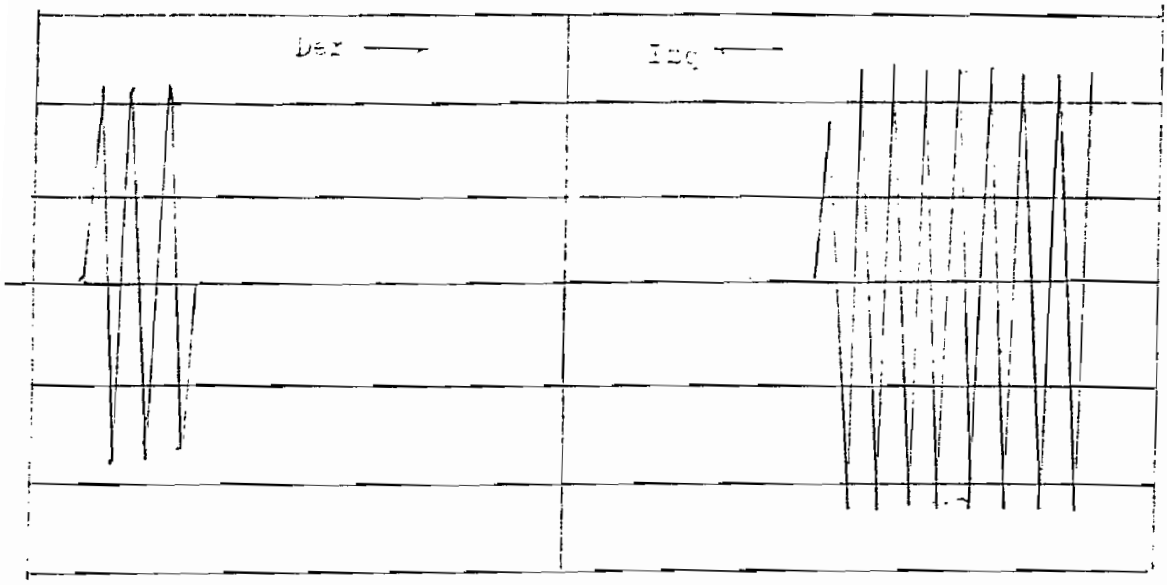
Fig. 4.5

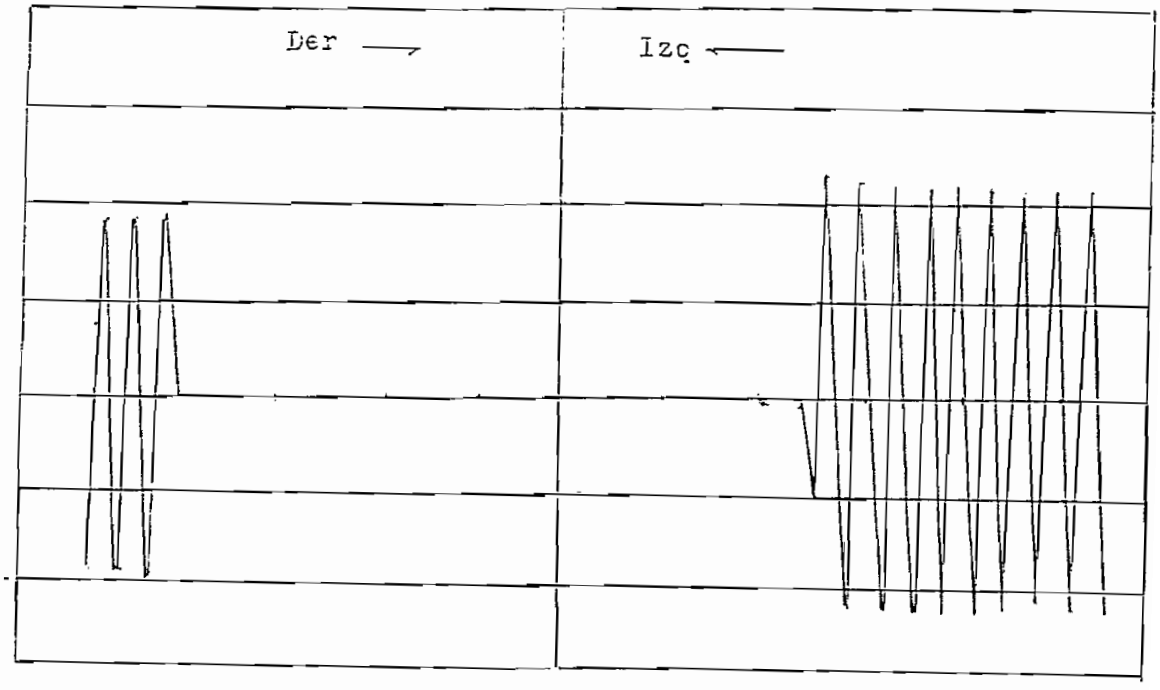




Vert .2v/div

Horiz 50 ms/div





Vert .2v/div

Horiz 50 µs/div

4.4 ANALISIS DE RESULTADOS.

4.4.1 Circuito equivalente.

$$Z_{BL} = \frac{46 / 3}{3.4} = 7.81 \text{ ohms}$$

$$R_{BL} = \frac{224 / 3}{(3.4)^2} = 6.45 \text{ ohms}$$

$$X_{BL} = (7.81^2 - 6.45^2)^{1/2} = 4.4 \text{ Ohms}$$

$$X_{BL} = X_{BL} \quad (60/20) = 13.2 \text{ ohms}$$

$$X_{11} = X_{12} = \frac{13.2}{2} = 6.66 \text{ ohms}$$

$$X_{mag} + X_{11} = 106.7 \text{ ohms} \quad \text{(de la prueba anterior)}$$

$$X_{mag} = 106.7 - 6.66 = 99.04 \text{ ohms}$$

Se determina R_m'

$$R_{BL} - R_1 = \left[\frac{(j\ 99.04)(R_m' + j\ 6.66)}{R_m' + j(106.7)} \right]$$

$$R_{BL} - R_1 = 6.45 - 4.65 = 1.8$$

$$\left[\frac{(j\ 99.04)(R_m' + j\ 6.66)}{R_m' + j(106.7)} * \frac{R_m' - j106.7}{R_m' - j106.7} \right] = 1.8$$

$$\frac{5452.7\ R_m'}{R_m'^2 + 106.7^2} = 1.8$$

$$R_m'^2 - 5452.7\ R_m' + 11172.5 = 0$$

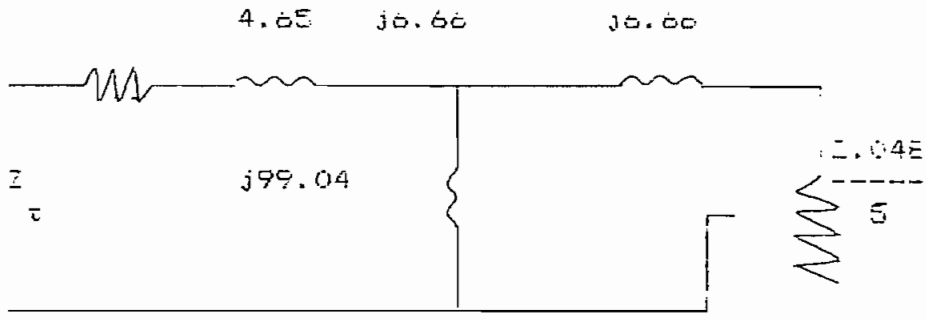
Resolviendo la ecuación cuadratica

$$R_a = \frac{-5425.7 \pm 5456.79}{2}$$

$$R_a = 2.048 \text{ ohms}$$

Se descarta la otra raiz

Por lo tanto el circuito equivalente electrico quedaria conformado asi.



Se modifica el circuito equivalente, de acuerdo con la teoria anterior.

$$D = 0.2 + 0.2 = 0.4 \text{ m} = \text{long. del motor}$$

$$R_{12} = R_a' = 2.048 / s \text{ ohms}$$

$$X_m = 99.04 \text{ ohms}$$

de donde

$$L_m = \frac{Xm}{2 \pi f} = \frac{99.04}{120 \pi} = 0.2627 \text{ henry}$$

$$X_{12} = 6.66$$

se obtiene

$$L_{12} = \frac{X_{12}}{2\,\pi\,f} = \frac{5.66}{120\,\pi} = 0.0176 \text{ henry}$$

Del capítulo 1

$$Q = D\,\frac{R_{21}}{(L_{m1} + L_{21})\,V}$$

Se calcula las variaciones de Q y L_m en función de S y se grafica.

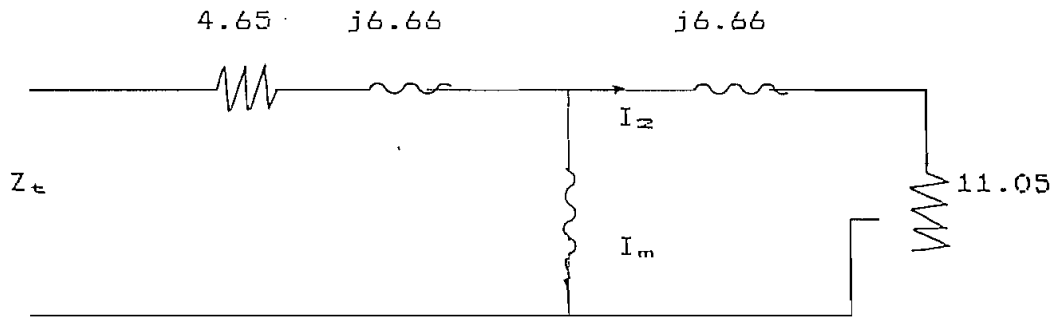
Deslizamientos	V (m/s)	Q	L_m (henrios)	X_m (ohms)
0.00	6.00	0.4866	0.05469	20.61
0.01	5.94	0.4916	0.05517	20.80
0.02	5.88	0.4966	0.05565	20.97
0.05	5.70	0.5122	0.05712	21.53
0.10	5.40	0.5407	0.05978	22.53
0.15	5.10	0.5725	0.06268	23.63
0.20	4.80	0.6080	0.06582	24.83
0.30	4.20	0.6952	0.07337	27.65
0.50	3.00	0.9733	0.09477	35.73
0.90	0.60	4.8660	0.209138	78.85
0.93	0.42	6.9530	0.22490	84.80
1.00	0.00	∞	0.26270	99.04

Se ve que a mayor velocidad hay una significativa pérdida de flujo en el borde delantero del motor.

4.4.2 Aplicacion del circuito equivalente efectivo.

Para un deslizamiento S = 0.2 que es un deslizamiento normal para este tipo de motores, incluso es el deslizamiento esperado para este motor, según el diseño:

$X_m = 24.83$



$$Z_t = 4.65 + j\ 6.66 + \frac{j24.83\ (11.05 + j6.66)}{11.05 + j31.5}$$

$Z_t = 10.91 + j15.87 = 18.93 \quad 54.80$ Ohms

$I = 70 / [\ \sqrt{3} * 18.93 \quad 54.80\ ] = 2.135 \quad -54.8$

$\cos \phi = 0.576$

Potencia neta de entrada:

$P_{in} = \sqrt{3} * 70 * 2.135 * 0.576 = 149.2$ Watt

Potencia que atravieza el entrehierro:

$P_g = 149.2 - 3\ (2.135)^2 * 4.65 = 85.61$

Potencia desarrollada:

$P_d = P_g\ (1-S) = 68.49$

Potencia de salida:
$P_{sal} = 68.49 - Perd = 68.49 - 5 = 63.49$ Watts

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{sal}}{P_{in}} = \frac{63.49}{149.2} = 0.425 \equiv 42.5\ \%$$

_o cual es una eficiencia dentro de los limites en que trabaja una maquina lineal.

Este valor es bajo con relacion a una maquina rotativa, la cual, si es de baja potencia tiene un limite tolerable minimo de hasta 70% y si es de alta potencia, de hasta 85%.

4.4.C Analisis de las pruebas dinamicas

- Las curvas de corriente que se ven en el osciloscopio no muestran una disminucion de la corriente en ningun momento, por lo que podemos confirmar que estamos aún en el periodo de arranque en toda la trayectoria de la pista, tanto en el un sentido como en el otro.

- La variacion de velocidad por variación de voltaje es muy sensible, y es el metodo que se emplea.

- El empuje medido aumenta al aumentar el voltaje aplicado, pues estamos aumetando la potencia aplicada, pero asi mismo el empuje aumenta al disminuir el entrehierro, lo cual va de acuerdo con las teorias vistas.

4.5. FORMULACION DE LOS PARAMETROS NOMINALES DEL PROTOTIPO.

Para una máquina los parametros nominales de

funcionamiento puede expresarse [illegible] el deslizamiento usual es S = 0.[illegible].

Voltaje nominal	[illegible]
Fases	[illegible]
Frecuencia	[illegible]
Corriente nominal	[illegible].4 Amp
Potencia nominal	[illegible] W
Cos ϕ	[illegible]

CAPITULO # 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. Al ser las referencias teoricas limitadas, hemos formulado una vision teorica amplia de la maquina, orientada al diseño.

2. Se ha logrado construir y hacer funcionar un motor lineal prototipo, con lo que se pudo ver fisicamente la produccion de movimiento lineal, en que el secundario ejerce un empuje magnetico sobre el primero sin contacto mecánico; es decir que la propulsion es independiente de la friccion. Hasta el momento solo se tenia referencias teoricas sobre el funcionamiento de este motor. Con esta construccion se ha contribuido a acumular alguna experiencia real sobre maquinas lineales.

3) La pista de pruebas, que tiene una longitud de tres metros de largo, no es suficientemente larga para que el motor alcance a vencer la inercia inicial, ni para alcanzar la velocidad nominal. Si bien es cierto que todo motor lineal trabaja en una zona de alto deslizamiento, el prototipo lo hace en un rango de deslizamiento particularmente alto. (S=0.9). La velocidad media a voltaje nominal es bastante baja

(0.4 m/s) comparada con la sincronica (6 m/s), por lo que parece ser que nos encontramos en la zona de arranque de la maquina en todo su recorrido.

4) En la prediccion del comportamiento de un motor lineal hay un numero de factores que ayudar y otros que impiden obtener resultados mas precisos. La configuracion del circuito magnetico esta constantemente cambiando y esto lleva a inexactitudes. El entrehierro variable, en la practica, tiende a producir valores de empuje y fuerzas verticales diferentes a aquellos obtenidos de un modelo.

La incertidumbre y dificultades de medición de entrehierro y su falta de uniformidad en un motor lineal montado en un vehiculo son grandes. Debe notarse que un motor de un solo lado, usado en un vehiculo de transporte encontrara cambios en el entrehierro y resistencia de riel mucho mayores que aquellos obtenidos en estas pruebas. El MIL, debe ser diseñado para producir la potencia de salida requerida en el caso de tener las peores condiciones.

5) Se ha comprobado que la construcción y mantenimiento del motor lineal es definitivamente mas simple que en un motor rotativo, pues se pudo inclusive realizar el trabajo de ranurado de nucleos con un proceso de

fresado, evitando el tedioso y caro metodo de troquelado.

c) En un motor lineal de induccion, la reactancia y resistencia de magnetizacion son, a diferencia de lo que ocurre en los motores rotativos, valores variables, que dependen de la velocidad a la que se mueve el motor. Una alta velocidad llevara a una perdida significativa de flujo de concatenacion en el borde delantero del motor. Se determino teoricamente en un ejemplo los valores de reactancia de magnetizacion entre los que oscila la maquina para diferentes valores de deslizamiento (de S=0 a S=1).

5.2. RECOMENDACIONES

1) Extender la pista, en forma lineal o circular, para poder ver con mas claridad los fenómenos producidos.

2) Estudiar comparativamente otros tipos de maquinas lineales, tales como la máquina sincronica, o los motores tubulares, y sus aplicaciones en diversas areas.

3) Estudiar proyectos de motores lineales a los que se haya incorporado la levitacion por traccion o repulsion

with a SLIM", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 15, N°6, Nov. 1979

11. E.R. Laithwaite, D. Tipping, D.E.Hemondhalgh. "The aplication of LIM to conveyors", IEE Paper N°2115 June 1960

12. J. Duncan. "Linear induction motor - equivalent - circuit model". IEE Proc., vol. 130, Pt.B, N°1, January 1983.

13. Nakamura. "Experimental results of the single - sided linear induction motor". IEEE transactions on magnetics, Vol MAG-15, N°6. November 1979.

14. Manuel Cortez. "Curso de máquinas Eléctricas". Pag. ..

15. Nasar. "Máquinas eléctricas y electromecánicas". Colección Shaum

16. O.C. Coho, G.B.Aiman, J.I. Robinson. "Experimental evaluation of a high speed double sided linear induction motor". IEEE Transactions in Power Apparatus and Sistems. Pas 94 PP 10-17. 1975

17. P-K Buding."Some Remarks on the device of three - phase linear motors for low synchronous speed" Linear Electrical Machines Conference Papers - IEE, Power Division. 1974, Oct, London

18. M.G. Resin, N.M. Pirumian, F.N. Sarapulov, N.D.Yasenev "Some aspects of the linear motors desing and application" Linear Electrical Machines Conference Papers - IEE, Power Division. 1974, Oct, London

19. Tecnología de la Electricidad. Tomo: bobinado de máquinas eléctricas

20. Narváez Carlos. "Cálculo, diseño y construcción de una