

## PROYECTO FIN DE CARRERA

“Identificación de los Parámetros de un Motor Lineal De Inducción De Flujo Transversal Monolátero de Estator Acortado Mediante Elementos Finitos”



Universidad Carlos III De Madrid

Ingeniería Industrial

Dpto. Ingeniería Eléctrica

**Autor:** Juan Antonio Domínguez Hernández.

**Director Externo:** Javier José María Rivas Conde.

**Director Interno:** José Luis Rodríguez Amenedo.

## Índice General

Página

### **CAPITULO 1: Introducción.**

1.1 Fundamentos Teóricos. Leyes de Maxwell.....	10
1.2 Motores Lineales de Inducción: Concepto, clasificación y características.....	11
1.4 Objetivos del Proyecto y 1.3 Presentación del Prototipo de Motor Lineal de Flujo Transversal.....	13

### **CAPITULO 2: Estudio del comportamiento del motor en condiciones estáticas.**

2.1 Objetivos.....	16
2.2 Estudio del Devanado Estatórico: Principios de diseño y Factor de Devanado...	16
2.3. Alimentación del Motor y Valores de Inducción característicos.....	20
2.4 Análisis de Armónicos: D.A.T.....	28
2.5 Corrientes Inducidas en el Secundario.....	29
2.6 Entrehierro Equivalente: Coeficiente de Carter.....	32

### **CAPITULO 3: Estudio del comportamiento del motor en régimen dinámico.**

3.1 Objetivos.....	34
3.2 Presentación de Modelos y Particularidades del M.E.F.....	35
3.3 Resultados del modelo 1: MLFT <sub>Al_C_Fe_Lineal</sub> .....	36
3.3.1 Fuerzas presentes en la máquina.....	36
3.3.2 Inducciones en el Entrehierro.....	41
3.3.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.....	43
3.3.4 Fuerza Magnetomotriz creada por un sistema trifásico de Corrientes Desequilibradas.....	48
3.3.5 Consumo de Potencias y Rendimientos.....	50

3.4 Resultados del modelo 2: MLFT <sub>Al_C_Fe_No_Lineal</sub> .....	56
3.4.1 Fuerzas presentes en la máquina.....	56
3.4.2 Inducciones en el Entrehierro.....	63
3.4.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.....	65
3.4.4 Consumo de Potencias y Rendimientos.....	68
3.5 Resultados del modelo 3: MLFT <sub>Al_C_Respaldo_Aire</sub> .....	71
3.5.1 Fuerzas presentes en la máquina.....	71
3.5.2 Inducciones en el Entrehierro.....	73
3.5.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.....	74
3.5.4 Consumo de Potencias y Rendimientos.....	77

## **CAPITULO 4: Análisis Económico del proyecto.**

4.1 Descripción de costes.....	80
--------------------------------	----

**ANEXO 1: Fuerza Magnetomotriz producida por un devanado trifásico alimentado por corrientes desequilibradas. Campo giratorio elíptico.....83**

**ANEXO 2: Clasificación de los Motores Lineales de Inducción.....89**

**ANEXO 3: Trabajos Futuros.....91**

**ANEXO 4: Datos completos de las simulaciones.....93**

**BIBLIOGRAFÍA.....100**

## Índice de Gráficas

	Página
Gráfica 2.1: Valores máximos del Mod (B) para distintas cotas del Diente Central Estatórico.....	22
Gráfica 2.2: Distribución de la inducción magnética en el entrehierro para distintos path's.....	24
Gráfica 3.1: Valores medios de las fuerzas presentes en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal.....	31
Gráfica 3.2: Comportamiento dinámico del empuje para distintos deslizamientos.....	38
Gráfica 3.3: Valores eficaces de las componentes Bz y By de la inducción magnética en el entrehierro para distintos deslizamientos.....	39
Gráfica 3.4: Valores Eficaces de las Corrientes de Fase en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal....	41
Gráfica 3.5: Factores de Potencia en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal.....	44
Gráfica 3.6: Potencia Activa y Potencia Reactiva en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal.....	49
Gráfica 3.7: Potencia Aparente y la Corriente media en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal....	50
Gráfica 3.8: Rendimientos en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal.....	53
Gráfica 3.9: Curva B-H del material ferromagnético empleado en Flux.....	57
Gráfica 3.10: Valores Medios de las Fuerzas presentes en un MLFT AL C/Fe_No_Lineal....	58
Gráfica 3.11: Saturación magnética en el interior del respaldo de Fe.....	60
Gráfica 3.12: Saturación magnética en el interior del respaldo de Fe.....	61
Gráfica 3.13: Componentes Normal y Longitudinal de la Inducción Magnética en el Entrehierro en un MLFT AL C/Fe_No_Lineal.....	64
Gráfica 3.14: Valores Ef. de las Corrientes de Fase en un MLFT AL C/Fe_No_Lineal.....	65
Gráfica 3.15: Factores de Potencia en un MLFT AL C/Fe_No_Lineal.....	67
Gráfica 3.16: Rendimiento en MLFT AL C/Fe_No_Lineal.....	68

Gráfica 3.17: Potencia Activa y Potencia Reactiva en un MLFT <sub>Al_C/Fe_No_Lineal</sub> .....	69
Gráfica 3.18: Potencia Aparente y la Corriente media en MLFT <sub>Al_C/Fe_No_Lineal</sub> .....	69
Gráfica 3.19: Valores Medios de las Fuerzas en un MLFT <sub>Al_C/Respaldo_Aire</sub> .....	72
Gráfica 3.20: Componentes Normal y Longitudinal de la Inducción Magnética en el Entrehierro en un MLFT <sub>Al_C/Respaldo_Aire</sub> .....	74
Gráfica 3.21: Valores Ef. de las Corrientes de Fase en un MLFT <sub>Al_C/Respaldo_Aire</sub> .....	74
Gráfica 3.22: Factores de Potencia en un MLFT <sub>Al_C/Respaldo_Aire</sub> .....	76
Gráfica 3.23: Potencia Activa y Potencia Reactiva en un MLFT <sub>Al_C/Respaldo_Aire</sub> .....	77
Gráfica 3.24: del Rendimiento en un MLFT <sub>Al_C/Respaldo_Aire</sub> .....	78

## Índice de Figuras

	Página
Figura 1.1: Génesis de un motor lineal a partir de una máquina rotativa.....	8
Figura 1.2: Configuraciones posibles en un M.L.I.....	9
Figura 1.3: Dimensiones del perfil E del núcleo estatórico.....	14
Figura 1.4: Modelo del motor lineal de flujo transversal monolátero de estator acortado.....	14
Figura 2.1: Representación de inclinación de bobinas.....	15
Figura 2.2: Representación de apertura de ranuras.....	15
Figura 2.3: Representación del devanado estatórico.....	16
Figura 2.4: Núcleo ferromagnético alimentado por c.a.....	18
Figura 2.5: Circuito propuesto para alimentar la máquina en elementos finitos.....	19
Figura 2.6: Representación del devanado estatórico en elementos finitos.....	19
Figura 2.7: Criterio de alimentación de bobinas establecido por Flux.....	21
Figura 2.8: Representación en elementos finitos de la inducción magnética en la zona media del diente para la situación de arranque.....	23
Figura 2.9: Distorsión en la forma sinusoidal inducción magnética en el entrehierro debido a las ranuras.....	25
Figura 2.10: Descomposición en armónicos de $B_z$ en el entrehierro.....	25
Figura 2.11: Corrientes inducidas en el secundario.....	28
Figura 2.12: Líneas de flujo atravesando el entrehierro desde un estator liso a un rotor ranurado.....	29
Figura 3.1: Curva par-velocidad de una máquina asíncrona rotativa.....	32
Figura 3.2: Representación de la reacción de inducido en un motor lineal.....	40
Figura 3.3: Visualización de la configuración en estator acortado en Flux 3D.....	44

Figura 3.4: Campo elíptico resultante en un M.L.F.T <sub>AL C/Fe</sub> Lineal.....	48
Figura 3.5: Influencia del parámetro $w_{ov}$ en las fuerzas de la máquina.....	54
Figura 3.6: Efecto a nivel atómico de la saturación magnética.....	58
Figura 3.7: Dimensiones características en un M.L.I monolátero .....	62
Figura 3.8: Evolución de la corriente en el motor lineal CIGGT.....	65
Figura 3.9: Evolución del rendimiento frente al cociente $R1/R2G$ .....	79
Figura A1.1: Sistema trifásico desequilibrado y sus componentes simétricas.....	82
Figura A1.2: Campo elíptico producido por un sistema de corrientes desequilibrado.....	84
Figura A2.1: Clasificación de los motores lineales de inducción.....	88

## Índice de Tablas

	Página
Tabla 1.1: Dimensiones principales del motor.....	14
Tabla 2.1: Valores finales de los parámetros del estator.....	20
Tabla 2.2: Valores del Módulo de la Inducción Magnética en Distintas Zonas Características del Diente Central.....	22
Tabla 2.3: Valores de la descomposición en series de Fourier de $B_z$ y cálculo de la distorsión armónica total.....	26
Tabla 3.1: Valores de deslizamiento y velocidad del secundario asociada.....	32
Tabla 3.2: Condiciones de simulación en elementos finitos del modelo 1.....	34
Tabla 3.3: Condiciones de simulación en elementos finitos del modelo 2.....	55
Tabla 3.4: Condiciones de simulación en elementos finitos del modelo 3.....	71
Tabla 4.1: Evaluación de costes asociados al proyecto.....	82
Tabla A4.1: Fuerzas presentes en el modelo 1.....	94
Tabla A4.2: Inducciones presentes en el modelo 1.....	94
Tabla A4.3: Parámetros eléctricos del modelo 1.....	95
Tabla A4.4: Fuerzas presentes en el modelo 2.....	96
Tabla A4.5: Inducciones presentes en el modelo 2.....	96
Tabla A4.6: Parámetros eléctricos del modelo 2.....	97
Tabla A4.7: Fuerzas presentes en el modelo 3.....	98
Tabla A4.8: Inducciones presentes en el modelo 3.....	98
Tabla A4.9: Parámetros eléctricos del modelo 3.....	99

## Capítulo 1:

# Introducción

1.1 Fundamentos Teóricos. Leyes de Maxwell.

1.2 Motores Lineales de Inducción: Concepto, clasificación y características.

1.3 Objetivos del proyecto Y Presentación del Prototipo de Motor Lineal de Flujo Transversal

## 1.1 Fundamentos Teóricos. Leyes de Maxwell.

Las leyes de Maxwell constituyen las bases que gobiernan el funcionamiento de toda máquina eléctrica. A continuación, se enuncian de manera resumida tanto en el vacío<sup>1</sup> como en presencia de materia<sup>2</sup> [1]:

1.-El teorema de Gauss establece que el campo eléctrico  $E$ , a través de una superficie  $S$  cerrada, es proporcional a la carga eléctrica contenida en el interior de esa superficie.

$$(1) \quad \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dV \quad (1.1)$$

$$(2) \quad \text{donde} \quad \mathbf{E} = -\nabla \phi - \dot{\mathbf{A}} \quad (1.2)$$

2.-El teorema de Gauss para el campo magnético establece que las líneas de campo se cierran sobre sí mismas. En el caso del campo magnético que no hay cargas magnéticas, sólo dipolos, las líneas tienen que ser cerradas.

$$(1) \quad \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.3)$$

$$(2) \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.4)$$

3.-Ley de Ampère establece que la integral del campo  $B$  a lo largo de un camino cerrado es:

$$(1) \quad \oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} + \mu_0 \epsilon_0 \oint_C \dot{\mathbf{A}} \cdot d\mathbf{l} \quad (1.5)$$

$$(2) \quad \text{donde} \quad \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{A} + \dot{\mathbf{A}} \quad (1.6)$$

4.-La ley de Faraday es:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.7)$$

$$(1) \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}} \quad (1.8)$$

$$(2) \quad \text{donde} \quad \mathbf{E} = -\nabla \phi - \dot{\mathbf{A}} \quad (1.9)$$

Nota:  $S$  es una superficie asentada en el camino  $C$ .

## 1.2 Motores Lineales de Inducción: Concepto, clasificación y características.

Un motor lineal puede ser descrito como una máquina rotativa convencional, la cuál ha sido seccionada a lo largo de una generatriz y luego desarrollada a fin de conseguir una estructura plana, que a su vez es capaz de producir un movimiento de translación lineal sin necesidad de emplear ningún tipo de mecanismo convertidor del movimiento rotatorio en lineal. [3]

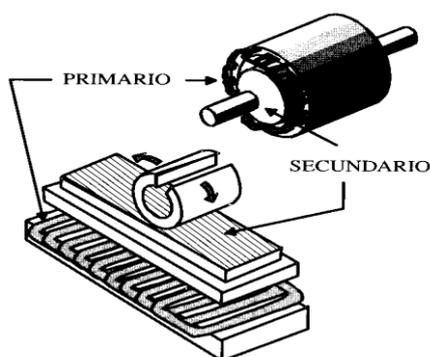


Figura 1.1: Génesis de un motor lineal a partir de una máquina rotativa.

Hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

1.- Además del empuje que se produce en un motor de inducción existe una atracción puramente magnética entre las dos partes de que constan los materiales de inducción lineales. Para tener una idea acerca de los órdenes de magnitud con los que se opera en motores lineales, si se consideran valores normales de la inducción magnética y de la corriente por cada Kg. fuerza de empuje producido por la acción de la inducción sobre la corriente ( $B \times I$ ) se producen cerca de 10 kg. fuerza de atracción magnética (proporcional a  $B^2$ ).

2.- Otro aspecto es que la máquina lineal es equivalente a un motor rotativo solamente cuando está parada. En cuanto la máquina lineal comienza a moverse, parte del estator deja de estar cubierta por el rotor, en una longitud igual al desplazamiento del rotor respecto al estator. Esto no significa forzosamente que la fuerza disminuya con el recorrido, ya que puede concebirse el rotor o el estator extendidos a lo largo de la trayectoria.

Atendiendo a la longitud de los componentes de una máquina lineal se derivan dos tipos principales llamados:

- a) Máquinas de estator acortado o de primario acortado, en las cuales el rotor es más largo que el estator.
- b) Máquinas de rotor acortado o de secundario acortado, en las cuales el estator es más largo que el rotor.

Los extremos del órgano más corto producen fenómenos transitorios que pueden hacer que las características del motor sean diferentes de las que cabría esperar basándonos en la teoría de las máquinas rotativas. Puesto que el tipo de motor que se va a tratar en este proyecto queda incluido en la primera clasificación se comenta, de manera somera, las tres propiedades más relevantes inherentes a este tipo de topología [7] [8]:

**1.-Secundario operando bajo condiciones de saturación (permeabilidad relativa no lineal):** La correcta solución de las ecuaciones que describen la distribución del campo magnético en materiales ferromagnéticos son complejas debido a la no linealidad de la curva B-H. Mediante elementos finitos se verá la discrepancia de los resultados según se tenga en cuenta o no esta no linealidad.

**2.-Efecto de borde longitudinal:** Se manifestará en el motor de tres maneras:

- No uniformidad en la distribución del campo magnético en el entrehierro y en la distribución de las corrientes inducidas en el secundario.
- Sistema de corrientes desequilibrado.
- Fuerzas de frenado parásitas.

**3.-Efecto de borde transversal:** Las principales consecuencias vienen en forma de:

- Distribución no uniforme en el entrehierro de la densidad de flujo magnético en la dirección transversal.
- Se va a originar una componente  $J_{mx}$  en la densidad de corriente del secundario además de la componente principal  $J_{my}$ .
- Generación de fuerzas transversales que tratarán de desplazar al secundario en la dirección perpendicular al campo magnético móvil.

Las aplicaciones más extendidas de este tipo de motores, entre otras, son:

**-Sistemas de transporte de pasajeros:** Ejemplo de ello pueden encontrarse en Japón, en el metro en la ciudad de Katsuta cerca de Tokio y en Osaka o el tranvía urbano en Detroit, USA. En Alemania destaca el Transrapid, cuyo sistema de levitación está basado en la fuerza de atracción entre electroimanes controlados individualmente. La tracción por otro lado se consigue por medio de un motor lineal síncrono de estator largo.

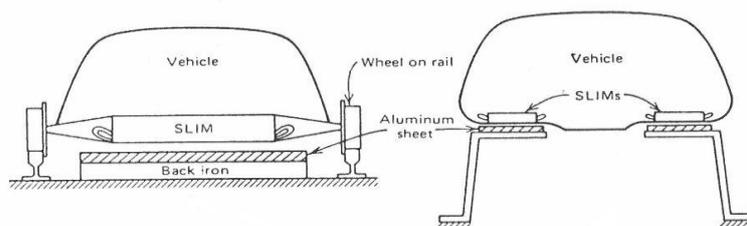


Figura 1.2: Configuraciones posibles en un M.L.I.

-**Aplicaciones militares:** La marina de EE.UU emplea esta tecnología como catapultas de aviones de combate en los buques de guerra.

-**Elevadores verticales en edificios.**

-**Control automático y Robótica.**

-**Aplicaciones industriales orientadas al flujo de material.**

Por último se hace un breve comentario a un par de aspectos operativos particulares de este tipo de máquinas [7]:

### 1.-Desconexión del motor de la alimentación:

Un motor lineal en funcionamiento contiene almacenada cierta cantidad de energía electromagnética. A mayor entrehierro mayor será dicha cantidad almacenada.

Cuando debe desconectarse de la línea la energía asociada al campo magnético debe ser disipada de una manera o de otra. Al abrir el circuito del secundario, la rápida extinción del flujo puede llegar a producir elevadas tensiones e incluso la aparición de arcos eléctricos. Secundarios con baja resistencia (formado por Al y Fe) disipan la energía de formas más gradual que aquellos motores con secundarios de alta resistencia (respaldo de Fe únicamente) .

### 2.-Vibraciones:

El principal objetivo es mantenerse alejado de las frecuencias próximas a las de resonancia de la máquina. El siguiente esquema ayuda a identificar las posibles causas de las vibraciones que pueden presentarse:

<i>Vibraciones de naturaleza electromagnética.</i> <i>Vibraciones de naturaleza mecánica.</i> <i>Vibraciones de naturaleza aerodinámica.</i>	<b>Fuentes de vibración en un L.I.M</b>
--	---

## 1.3 Objetivos del proyecto y Presentación del Prototipo de Motor Lineal de Flujo Transversal.

El objetivo fundamental de este proyecto fin de carrera es llevar a cabo un estudio en elementos finitos en 3D de un prototipo de motor lineal de flujo transversal. El software empleado es Flux 10.3. Este estudio se puede subdividir en dos categorías:

1.-Análisis estático: Con el secundario sin movimiento, se procederá a fijar parámetros característicos de la máquina así como determinar la alimentación del motor.

2.- Análisis dinámico: Se centrará fundamentalmente en obtener la curva empuje-velocidad del motor. Se llevarán distintos estudios según las distintas posibilidades que puede presentar la configuración del secundario.

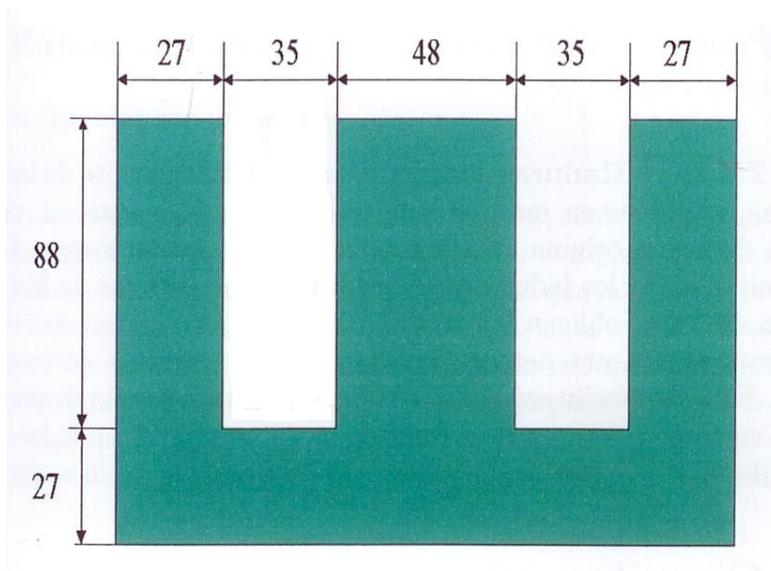


Figura 1.3: Dimensiones del perfil E del núcleo estatórico

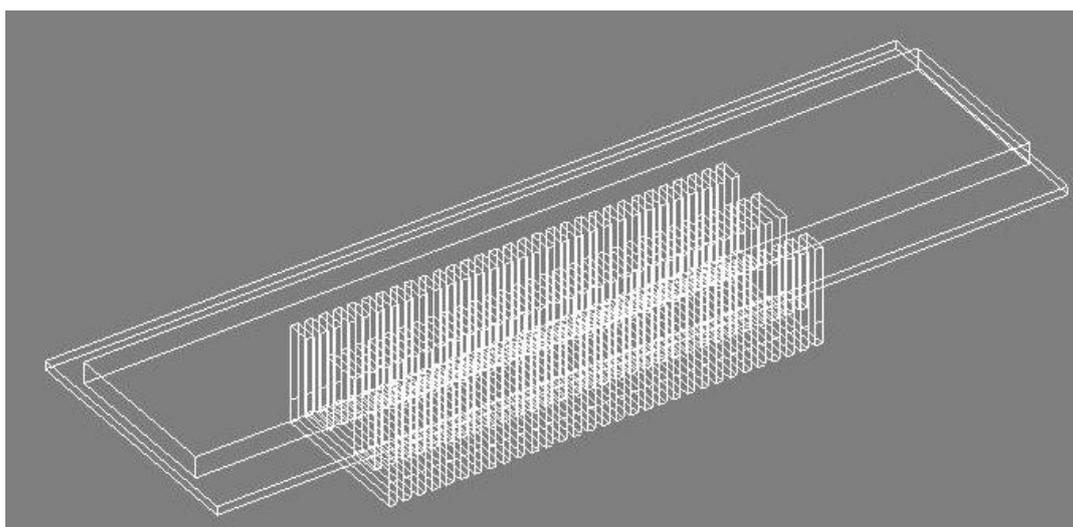


Figura 1.4: Modelo del motor lineal de flujo transversal monolátero de estator acortado.

Dimensiones Principales Motor [mm.]					
Espesor Al.	Espesor Fe.	Anchura Al.	Anchura Fe.	Longitud Al.	Longitud Fe.
10	25	300	195	990	970
Entrehierro Mecánico			5		
Espesor Longitudinal Ranura			8.5		
Paso ranura			16.5		
Longitud Estator			503.5		

Tabla 1.1: Dimensiones principales del motor.

## Capítulo 2:

### Estudio del Comportamiento del Motor en Condiciones Estáticas.

2.1 Objetivos.

2.2 Estudio del Devanado Estatórico: Principios de diseño y Factor de Devanado

2.3. Alimentación del Motor y Valores de Inducción característicos.

2.4 Análisis de Armónicos: D.A.T.

2.5 Corrientes Inducidas en el Secundario.

2.6 Entrehierro Equivalente: Coeficiente de Carter.

## 2.1 Objetivos.

El objetivo de este capítulo es doble:

- En primer lugar, caracterizar la máquina desde un punto de vista constructivo con la finalidad de tener bien definido el devanado estático.
- En un segundo lugar, caracterizar la máquina desde un punto de vista funcional con el objetivo de fijar parámetros como inducción magnética máxima en el entrehierro y en distintas cotas del diente, número de espiras, alimentación y conexionado del motor, etc.

## 2.2 Estudio del devanado estático: Principios de diseño y Factor de Devanado.

Como normas básicas en el diseño de devanados se pueden citar los dos principios generales siguientes [2]:

1.- La anchura de cada bobina (paso de bobina) debe ser lo más próxima a un paso polar con objeto de que los dos lados activos de la bobina queden frente a dos polos adyacentes N y S, para obtener así la máxima f.e.m inducida en cada uno de los lados de bobina y aprovechar de este modo, lo más posible, el cobre empleado en el devanado.

2.- Es conveniente que se genere una f.e.m cuyo contenido en armónicos sea lo más bajo posible, para ello es preciso distribuir el devanado en las ranuras y emplear acortamiento de paso en las bobinas. Por lo tanto, que el devanado no se encuentre concentrado y que los arrollamientos no sean de paso diametral, van a provocar una disminución en la f.e.m inducida que se cuantificarán a través de los factores de reducción correspondientes.

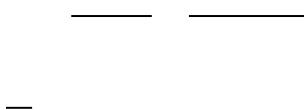
En cuanto a los devanados de doble capa merece la pena hacer las siguientes consideraciones [5]:

1.- Para que todas las bobinas elementales, a efectos de flujo abarcado durante el movimiento de la máquina, sean equivalentes, a cada lado de bobina situado en la parte superior (inferior) corresponde otro lado de bobina situado en la parte inferior o superior, respectivamente.

2.- Toda bobina de paso acortado debe tener su homóloga de manera que la onda de tensión magnética resultante sea simétrica en  $\pi$ .

Se describe a continuación el cálculo del factor de devanado para la máquina en cuestión:

1.- Determinar el número de ranuras por polo y fase: El paso polar vale 0.200 mm:



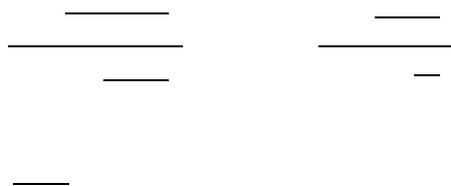
2.- Si el acortamiento de paso de bobina es del 50%:

3.- En máquinas lineales para tener todas las bobinas iguales obliga a incrementar el número de ranuras el mismo número que las ranuras correspondientes al acortamiento de paso. Puesto que se necesitan 48 lados activos de bobina:



Factores de Devanado [4] [5] [10]:

- I. **Factor de Distribución:** Se define como el cociente entre la amplitud de un armónico cualquiera producida por una bobina distribuida y la del armónico del mismo orden que produciría una bobina diametral y concentrada en una posición simétrica respecto de las  $q$  ranuras, con el mismo número de espiras y recorrida por la misma intensidad.



- II. **Factor de Acortamiento de Paso:** Los devanados reales tienen paso acortado en vez de un paso diametral. Si se ha acortado el paso de bobina un ángulo igual a  $\alpha$  Se define:



- III. **Factor de Inclinación de Ranura:** Otra medida constructiva para reducir los armónicos de la f.e.m. inducida en las máquinas de c.a consiste en la inclinación de ranuras. Si la ranura estuviese paralela al eje de la máquina las f.e.m. estarían en fase y su suma sería la f.e.m. total inducida en el conductor. Si, por el contrario, la ranura está inclinada, dichas f.e.m. presentarán un cierto desfase en el tiempo y la f.e.m. total será menor.



- IV. **Factor de apertura de ranura:** Mientras que la variación exacta de FMM a través de una ranura abierta es difícil de determinar, el efecto es bien aproximado asumiendo que la FMM varía linealmente a través de la ranura como muestra la figura 2.2 para una única bobina concéntrica.

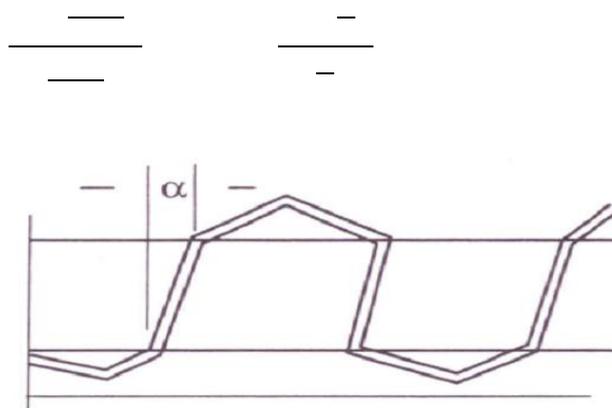


Figura 2.1: Representación de inclinación de bobinas.

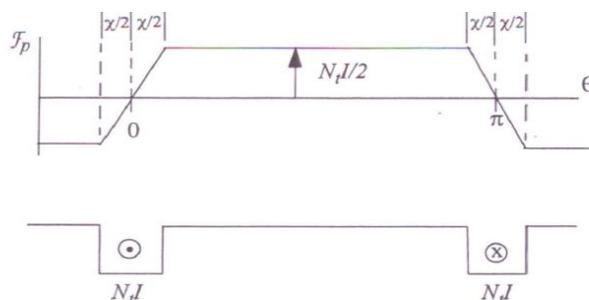


Figura 2.2: Representación de apertura de ranuras.

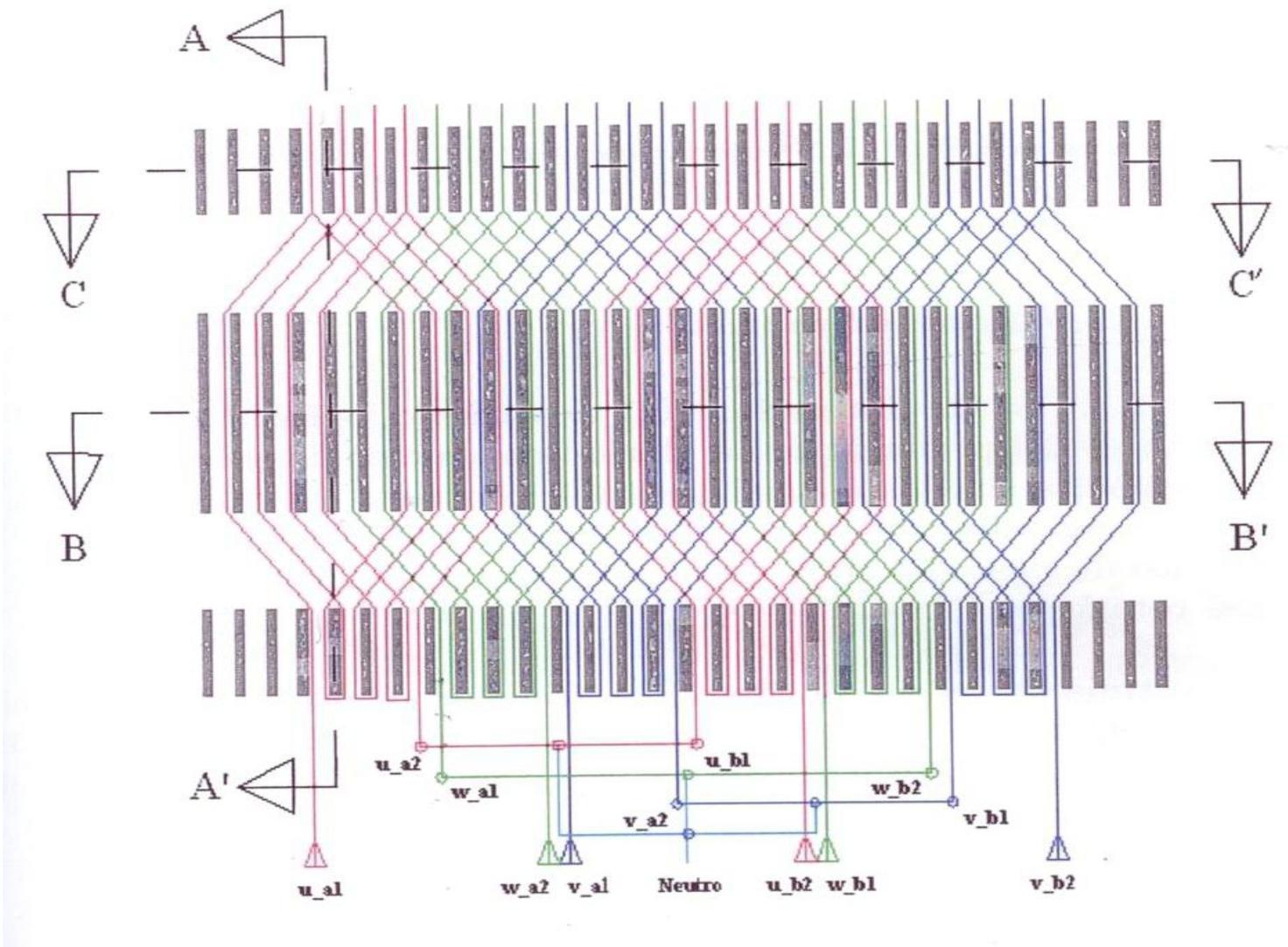


Figura 2.3: Representación del devanado estático.

### 2.3. Alimentación del motor y Valores de Inducción Característicos.

En el estudio de motores lineales, la F.m.m. creada por el devanado estatórico así como las características constructivas del mismo quedan incluidas en un nuevo término denominado capa ideal de corriente. Para ello se supondrá que la máquina posee un número arbitrariamente elevado de conductores activos ideales (sin dimensiones) y se definirá el concepto de capa de espiras como la densidad lineal de conductores activos por unidad de longitud periférica del entrehierro.

Al ser los conductores de sección infinitamente pequeña, el resultado de dicha capa de espiras es producir una capa ideal de corriente concebida como una especie de lámina que conduce intensidad y con una determinada ley de variación según sea su posición en la máquina. Su valor viene expresado en amperios por metro de longitud de entrehierro  $[A/m]$ , cuyo módulo viene expresado por [8] [9]:

$$-$$

El interés de introducir la capa ideal de corriente estriba en la consideración del motor como un secundario formando por  $n$  capas cuyo comportamiento vendrá determinado como consecuencia de una capa ideal de corriente resultante del devanado estatórico.

El punto de partida en el estudio del motor mediante la herramienta de elementos finitos debe comenzar acorde con la metodología que se propone con el objetivo de fijar 3 parámetros fundamentales:

1. Valor máximo de densidad de flujo en el entrehierro.
2. Tensión de línea de alimentación.
3. Número de espiras.

(Nota: Las condiciones en las que se ha llevado a cabo este estudio corresponden al caso del arranque  $[s=1]$ ; situación de deslizador parado).

**Paso 1:** Alimentación del motor mediante sistema trifásico de corriente. El objetivo de esta primera etapa es alcanzar un valor máximo de inducción magnética en el entrehierro. Dicho límite, en una primera aproximación, si el régimen de operación es de 50 Hz se aproxima por la siguiente ecuación [10]:

$$-$$

Para ello se creará una línea o *path* que atraviese longitudinalmente el motor por el plano medio del entrehierro mecánico y en dirección transversal por encima del diente central. Este proceso será iterativo. Se irá modificando el valor eficaz de la corriente hasta llegar a un valor de inducción que se redondeará a 0.8 T. Se parte de  $N=1$ .

**Paso 2:** Una vez alcanzado dicho valor se pasa a fijar el número de espiras. Para ello se recuerda que en un circuito inductivo si se desprecia el efecto resistivo se tiene una dependencia cuadrática de la inductancia con el número de espiras:

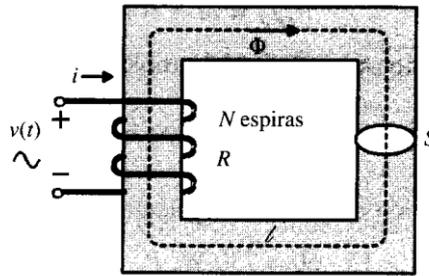


Figura 2.4: Núcleo ferromagnético alimentado por c.a

Según la 2ª Ley de Kirchoff: \_\_\_\_\_

Y la ley de Hopkinson: \_\_\_\_\_



Se comienza a aumentar el número de espiras simultáneamente se disminuye el valor de la corriente obtenido en el paso 1. Este proceso se repetirá tantas veces hasta que se alcancen unos valores de corriente y número de espiras que satisfagan de nuevo los 0.8 T en el entrehierro. Así, quedan fijados  $N$  y  $B_{\text{Entrehierro}}$ .

**Paso 3:** Cambiar la alimentación de la máquina a un sistema trifásico de tensiones. Esta etapa tiene como objetivo conseguir el valor de la corriente alcanzado al final de la etapa 2 con la diferencia que el parámetro a variar pasa a ser la tensión de línea.

Al final de estos tres pasos se tendrán fijados:

Se propone el siguiente circuito de alimentación del motor:

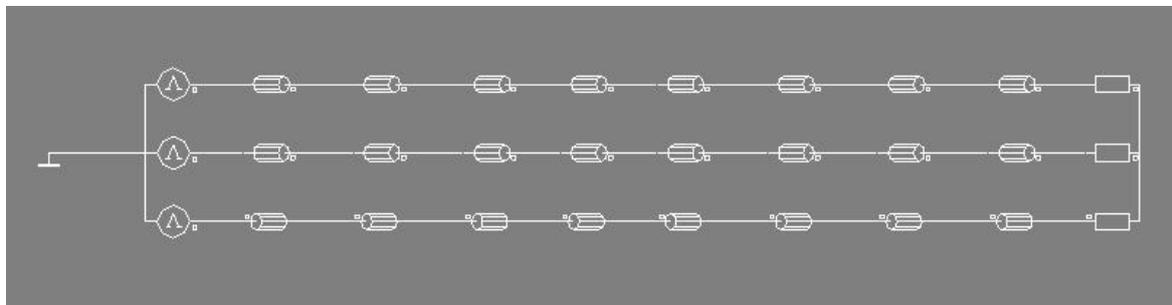


Figura 2.5: Circuito propuesto para alimentar la máquina en elementos finitos.

Por necesidades constructivas del modelo en la herramienta de elementos finitos el devanado queda modificado según se observa en la figura:

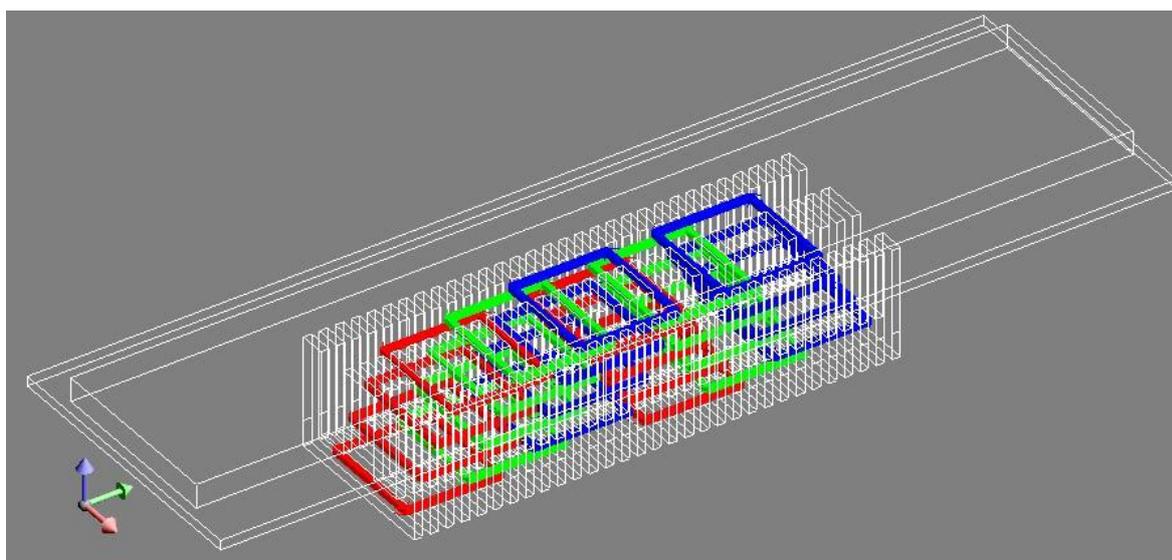
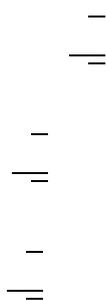


Figura 2.6: Representación del devanado estatórico en elementos finitos.

La alimentación queda fijada del siguiente modo:



El estator queda fijado en los siguientes valores:

V_Linea [V]	Nº Espiras/Bobina	R_fase
660	22	2.6

Tabla 2.1: Valores finales de los parámetros del estator.

Por último, una indicación de cómo se realiza la asociación de las bobinas del devanado a las bobinas del circuito eléctrico pues la orientación del componente eléctrico define la dirección de la corriente en las regiones del dominio de elementos finitos. El siguiente esquema resume el convenio de signos empleado:

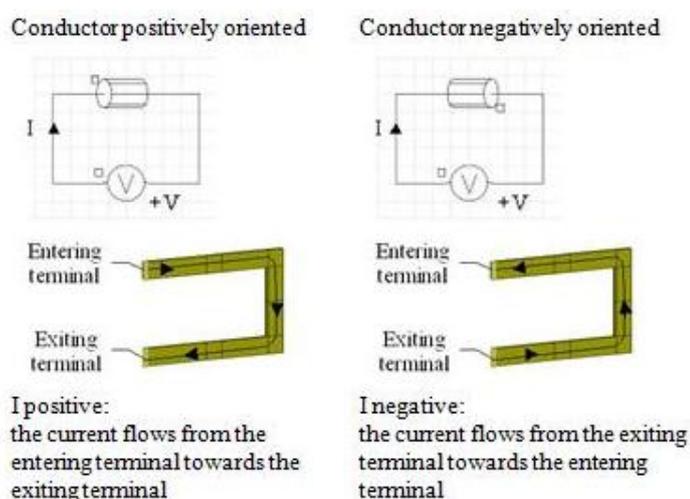


Figura 2.7: Criterio de alimentación de bobinas establecido por Flux.

Una vez fijado dicho valor en el entrehierro hay otra serie de inducciones en diversas zonas de la máquina, principalmente en el diente, que deben de ser tenidas en cuenta. Un criterio de diseño añadido se basa en considerar que la densidad de flujo máxima en la zona más estrecha de los dientes no llegue a alcanzar 1,6 a 2,2 veces la densidad máxima en el entrehierro.

Obviamente estos valores orientativos de inducciones máximas recomendadas son válidos para la frecuencia de trabajo nominal. Para frecuencias de trabajo superiores a 50 Hz, y para una misma calidad de chapa, tales densidades máximas deben reducirse, para evitar que las pérdidas en el hierro alcancen valores excesivos. El efecto de la frecuencia en inducciones permisibles en el diente y en el entrehierro puede calcularse mediante las siguientes expresiones [10]:

$$\text{---} \quad \text{---}$$

donde  $w$  y  $\tau$  son la apertura de ranura y el paso de ranura respectivamente.

Es útil definir los siguientes símbolos:

- $B_{gt}$  como el pico de la componente fundamental de la inducción magnética en el entrehierro de aire en la línea central del entrehierro de aire.
- $B_m$  como la inducción magnética del diente en el punto mitad de camino hacia abajo del diente.
- $B_{gt}$  la inducción magnética en el entrehierro justo por encima de la superficie (superior) de la cabeza del diente.
- $B_t$  inducción magnética justo debajo de la superficie de la cabeza del diente.
- $B_r$  inducción magnética en la raíz del diente (donde el flujo entra en el núcleo del estator o del rotor).

A modo de resumen, la elección de la alimentación de la máquina debe garantizar 2 requisitos en cuanto a inducciones máximas se refiere:

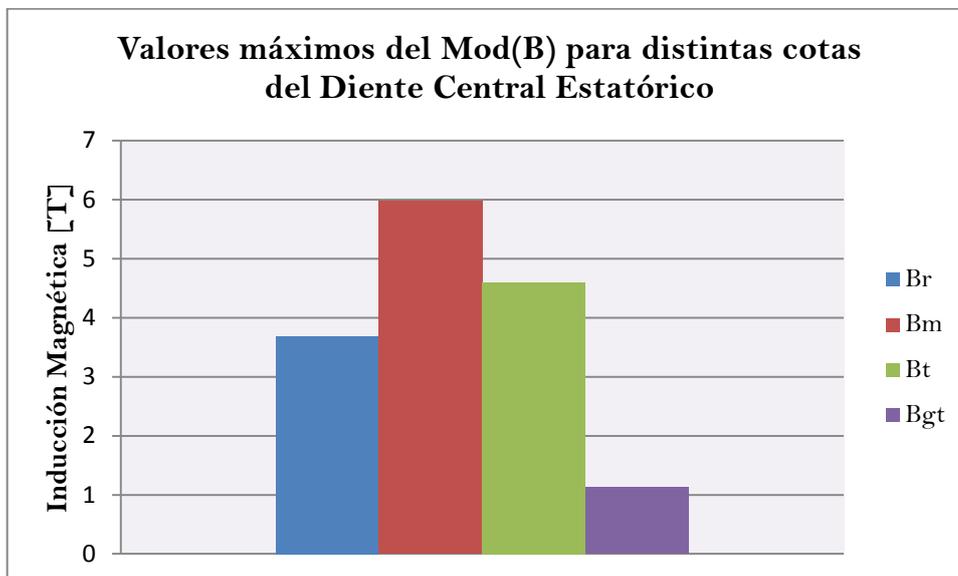
$$(2.25)$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras simular el modelo propuesto en elementos finitos. La situación corresponde a la situación de deslizador parado, donde la variación de flujo es máxima para un instante de tiempo determinado:

Valores del Módulo de la Inducción Magnética en Distintas Zonas Características del Diente Central				
	$B_r$ [T]	$B_m$ [T]	$B_t$ [T]	$B_{gt}$ [T]
Min	13,5E-6	0,746	12,581E-6	0,490
Max	3,687	5,973	4,596	1,121

Tabla 2.2: Valores del Módulo de la Inducción Magnética en Distintas Zonas Características del Diente Central.

Los valores corresponden a los valores de pico del módulo de la inducción magnética. Aún realizando la conversión a valores eficaces, son demasiado elevados. El caso más desfavorable, cota media del diente central, llega a alcanzar los 5,973 T.



Gráfica 2.1: Valores máximos del Mod (B) para distintas cotas del Diente Central Estático.

Hay que señalar que en la simulación llevada a cabo, la curva B-H del material ferromagnético del respaldo del secundario y del perfil en E que conforma el estator se asume lineal ( $\mu_r=2500$ ). En modelos donde la curva B-H presente zona de saturación, la inducción en el diente nunca va a sobrepasar el límite marcado por  $B_{sat}$ , con lo que el valor de B en las distintas cotas propuestas disminuirá considerablemente.

Con el fin de ilustrar lo anteriormente comentado se adjunta la figura 2.8 en la que se muestran las inducciones presentes en el estator del motor lineal. En particular corresponde al valor del Mod(B) a la altura media del diente, siendo éste el caso más desfavorable en cuanto a valores máximos de B se refiere.

El primer parámetro al que se hizo mención,  $B_{g1}$ , merece un tratamiento especial. Para ello se han creado 3 path's. Esto no es más que una línea imaginaria que atraviesa longitudinalmente el entrehierro. Una por encima del diente central y las otras dos por encima de los dientes laterales. Para cada una de ellas se ha representado la componente vertical de la inducción magnética en el entrehierro (Ver gráfico 2.2). Un par de comentarios al respecto:

- Se logra el valor de inducción deseado en el entrehierro, en torno a los 0.77 T. eficaces, pues el valor de pico alcanza los 1.1 T.
- La inducción en los dientes laterales es justamente la mitad y de signo contrario que la obtenida en el diente central. Ello indica que el flujo longitudinal está prácticamente abortado, predominando en la máquina el flujo transversal que se cierra a través de los dientes laterales del perfil en E.

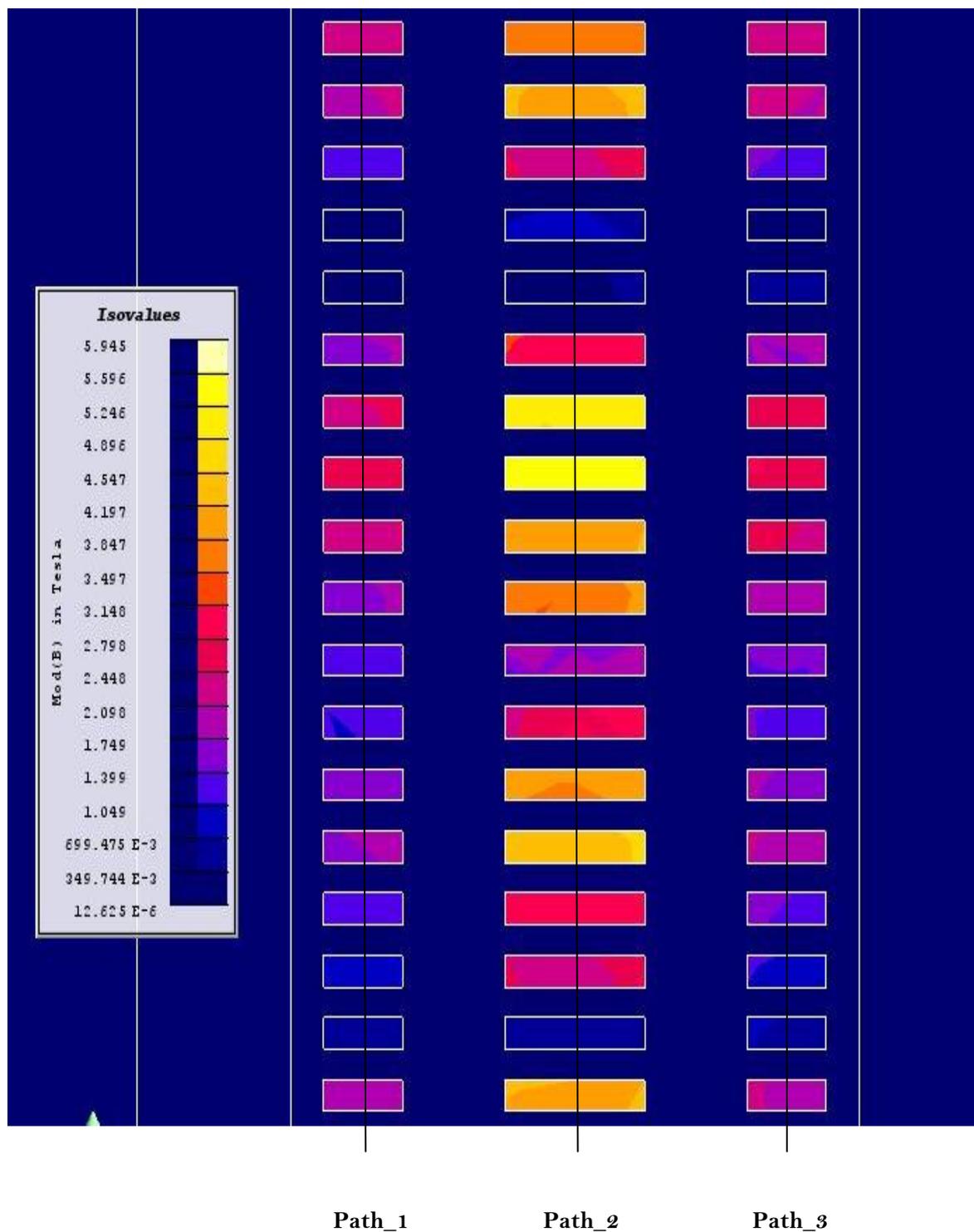
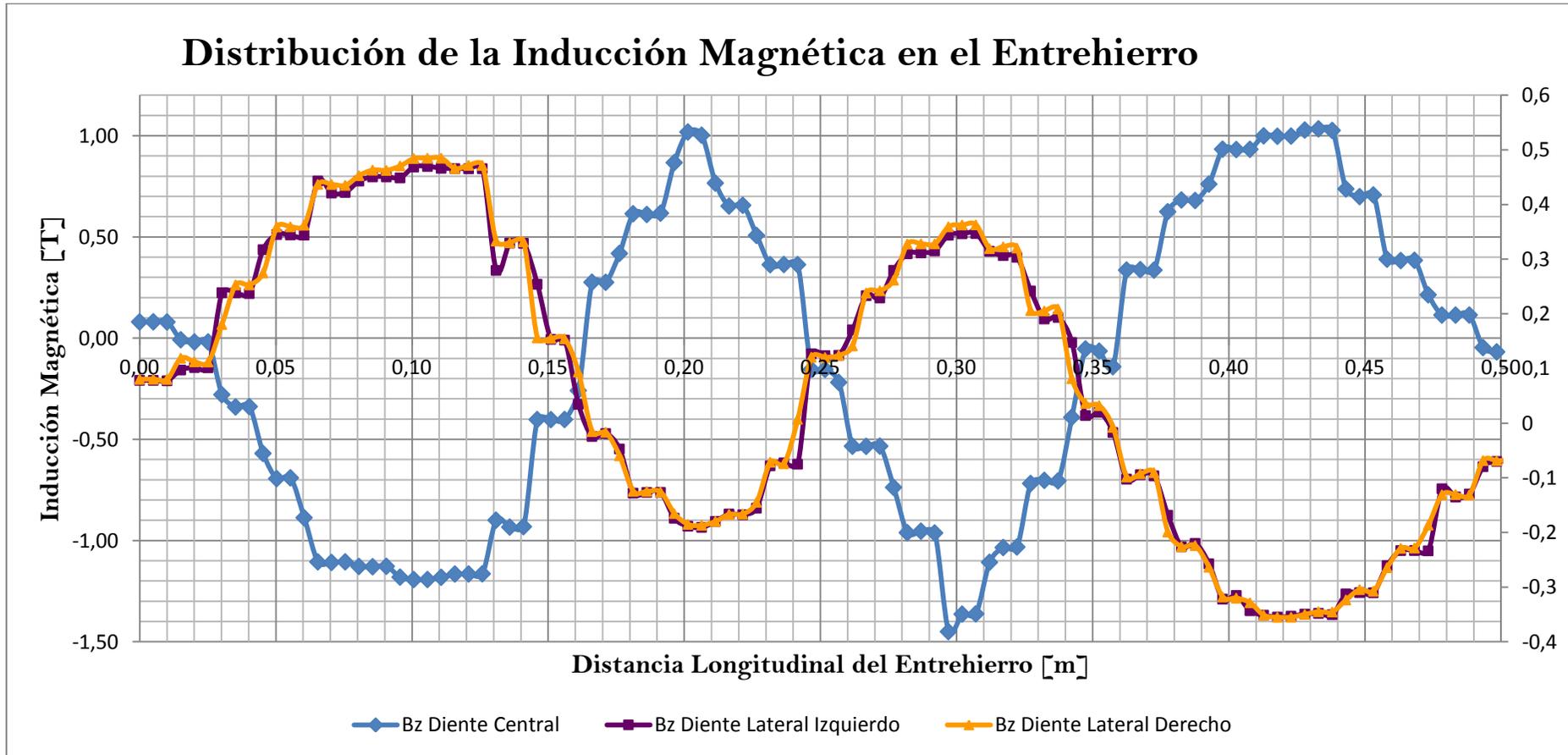


Figura 2.8: Representación en elementos finitos de la inducción magnética en la zona media del diente para la situación de arranque.



Gráfica 2.2: Distribución de la inducción magnética en el entrehierro para distintos path's.

*Importante: La disposición de las ranuras y los dientes crea unas condiciones de contorno del campo magnético que distorsionan notablemente su distribución y forma. Las líneas de fuerza tenderán a saltar por el camino de menor reluctancia, es decir, por la cabeza de diente. Esto repercutirá en la descomposición en series de Fourier introduciendo más contenido en armónicos [9].*

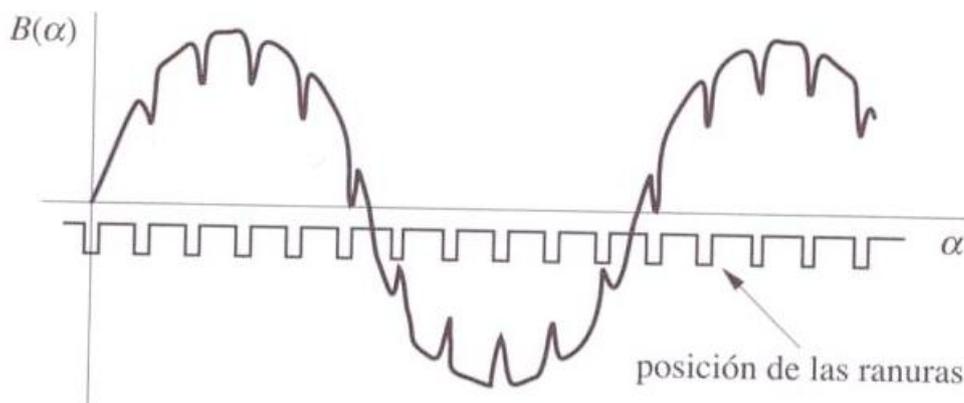


Figura 2.9: Distorsión en la forma sinusoidal inducción magnética en el entrehierro debido a las ranuras.

## 2.4 Análisis de Armónicos: D.A.T.

Para cuantificar el grado de semejanza de una señal respecto a una señal sinusoidal se emplea la tasa de distorsión armónica total **THD**, que se define como:

$$\frac{\sum_{h=2}^{\infty} B_h^2}{B_1^2}$$

- Valor eficaz del armónico fundamental de la componente z de la inducción magnética en el entrehierro.
- Valor eficaz del armónico  $h$  (distinto del armónico fundamental) de la componente z de la inducción magnética en el entrehierro.



Figura 2.10: Descomposición en armónicos de  $B_z$  en el entrehierro.

Nº del Armónico	Valor de pico $B_{ph}$ [T]	Valor eficaz $B_{ef\_h}$ [T]	$B_{ef\_h}^2$
1	1.03890	0.73461	0.53965
2	0.09105	0.06438	0.00414
3	0.01261	0.00892	0.00008
4	0.03937	0.02784	0.00078
5	0.02476	0.01751	0.00031
6	0.03940	0.02786	0.00078
7	0.03253	0.02300	0.00053
8	0.02544	0.01799	0.00032
9	0.01248	0.00883	0.00008
10	0.00940	0.00665	0.00004
D.A.T[%]		<b>11.44</b>	

Tabla 2.3: Valores de la descomposición en series de Fourier de  $B_z$  y cálculo de la distorsión armónica total.

## 2.5 Corrientes Inducidas en el Secundario.

Un tratamiento especial merece las corrientes inducidas en el secundario. Para ello se recurre a dos teoremas fundamentales en máquinas eléctricas [1]:

1. Ley de Faraday: La f.e.m. inducida en un conductor de longitud  $L$  que se mueve a una velocidad  $v$  dentro de un campo  $B$  tiene un valor:

Se originarán unas corrientes inducidas que como se demuestra a continuación dependen de las características del material conductor. Si se define la densidad de corriente  $J$  en un punto  $P$  según:

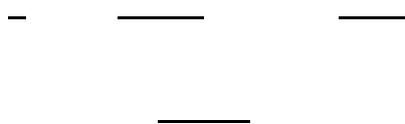
siendo  $u$  la velocidad media de los electrones definida como una función vectorial

Al aplicar un campo eléctrico a un material que posee electrones libres:



La ecuación anterior indica que la velocidad de los electrones aumenta linealmente con el tiempo hasta el infinito, lo cual implicaría que la corriente por el conductor aumentaría también con el tiempo, lo cual está en contradicción con los resultados experimentales.

Lo que ocurre en la realidad es que en un material real, existe una fuerza amortiguadora adicional resultante de los choques de los electrones con la red cristalina del medio. La fuerza amortiguadora estabiliza los electrones, resultando una velocidad de arrastre  $u_a$  constante y cuya magnitud es proporcional al campo eléctrico. Si se denomina  $\tau$  al tiempo libre medio entre colisiones y se considera que después de cada colisión el electrón pierde toda su velocidad, es decir que el choque anula toda la energía cinética adquirida desde la colisión anterior, se tendrá una velocidad media de arrastre de valor:



La densidad de corriente de conducción  $J$  queda definida:



En la figura 2.11 se representan las corrientes inducidas en el secundario obtenidas en elementos finitos.

2.- Ley de Laplace: Al circular corrientes por la lámina de Al, aparecerán en ésta las fuerzas de reacción correspondientes.

Al aplicar ambos principios en este tipo de motor cuyo estator está constituido a base de perfiles en E se observa que la fuerza o empuje ejercida por un volumen de lámina de Al coincidente, desde una perspectiva en planta, con el diente central es de sentido contrario que el empuje desarrollado por aquél volumen de Al que se encuentra por encima de los dientes laterales.

Tal y cómo se comprobó anteriormente que la inducción en los dientes laterales sea la mitad y de sentido contrario que la inducción en el diente central es la causa de la divergencia en el sentido del empuje desarrollado por el secundario. Claramente esto es un punto a tener realmente en cuenta en posteriores trabajos de optimización del motor, pues la configuración actual tiene la contraprestación de restar empuje efectivo al motor.

La ausencia de culata de Fe en el estator tiene sus repercusiones. En general, una de las principales ventajas que presentan los motores de flujo transversal es la disminución en la corriente de magnetización. Siendo más precisos, en este tipo de motores con perfil en E la inductancia de magnetización es elevada fruto de una baja reluctancia. Todo ello se traduce en un incremento de corriente rotórica que dará lugar a empujes mayores. Sin embargo, que no exista un yugo de hierro en la parte inferior de las ranuras longitudinales provoca que el flujo en dirección longitudinal esté abortado.

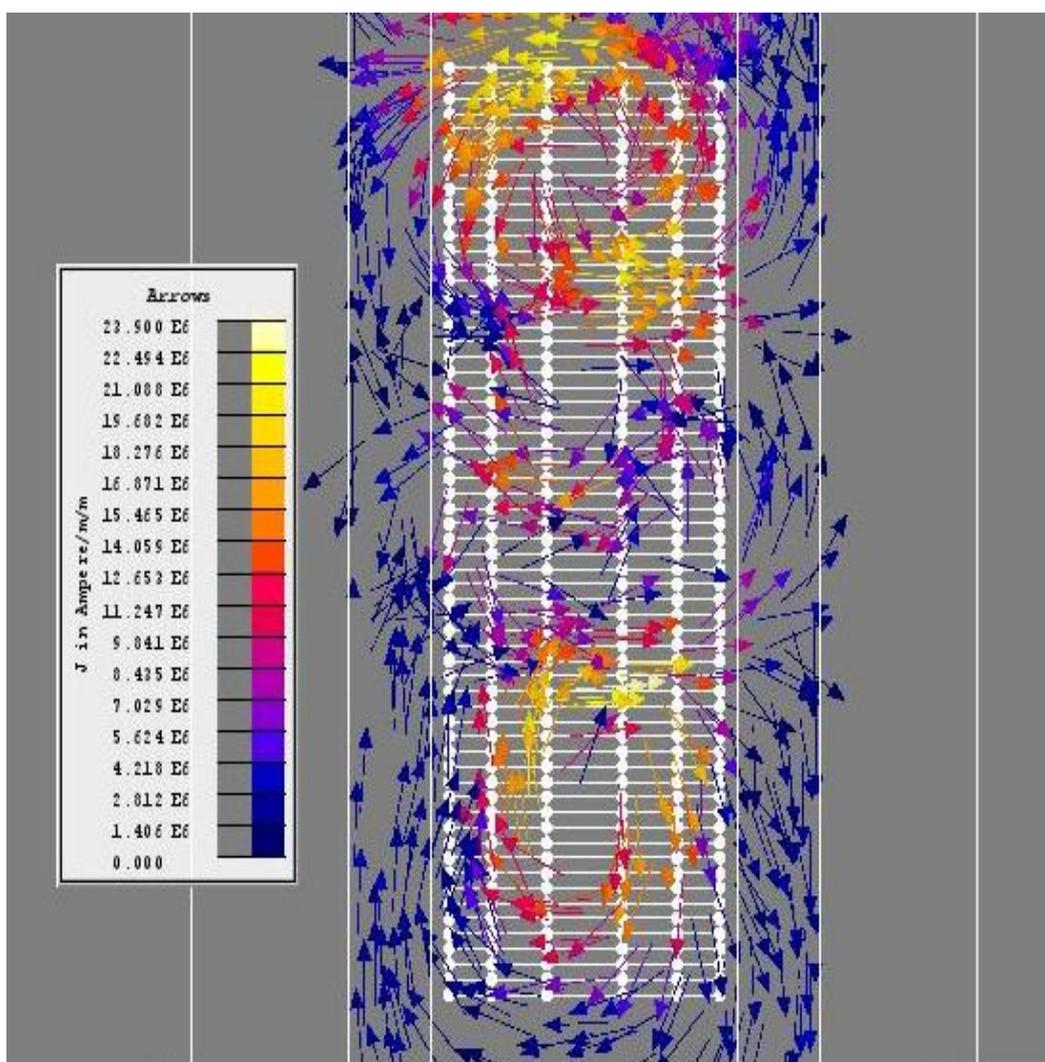


Figura 2.11: Corrientes inducidas en el secundario

## 2.6 Entrehierro Equivalente: Coeficiente de Carter.

Para finalizar este capítulo se va a incorporar al estudio un parámetro relevante en el diseño de máquinas eléctricas: *coeficiente de Carter*. La justificación de este factor radica en el hecho de que la determinación precisa de la reluctancia del entrehierro no es tan obvia ya que no es sencillo fijar el área efectiva de paso de flujo magnético en el entrehierro así como la longitud equivalente del mismo [9].

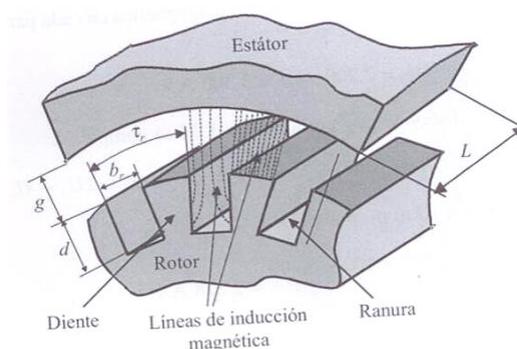


Figura 2.12: Líneas de flujo atravesando el entrehierro desde un estator liso a un rotor ranurado.

Carter definió el coeficiente que lleva su nombre como el cociente entre las reluctancias de un rotor ranurado y un rotor liso:

$$K_c = \frac{R_{\text{ranurado}}}{R_{\text{liso}}}$$

Se tendrá un entrehierro mecánico equivalente:

En consecuencia, si se desea alcanzar una determinada inducción magnética en el entrehierro, se requiere una mayor fuerza magnetomotriz en el devanado de excitación de la máquina que el previsto con estructura lisa. Al utilizar el método de elementos finitos intrínsecamente se está teniendo en cuenta este incremento del entrehierro mecánico en torno al 43%.

## Capítulo 3:

### Estudio del Comportamiento del Motor en Régimen Dinámico.

3.1 Objetivos.

3.2 Presentación de Modelos y Particularidades del M.E.F.

3.3 Resultados del modelo 1: **MLFT<sub>Al\_C\_Fe\_Lineal</sub>**.

3.3.1 Fuerzas presentes en la máquina.

3.3.2 Inducciones en el Entrehierro.

3.3.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.

3.3.4 Fuerza Magnetomotriz creada por un sistema trifásico de Corrientes Desequilibradas.

3.3.5 Consumo de Potencias y Rendimientos.

3.4 Resultados del modelo 2: **MLFT<sub>Al\_C\_Fe\_No\_Lineal</sub>**.

3.4.1 Fuerzas presentes en la máquina.

3.4.2 Inducciones en el Entrehierro.

3.4.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.

3.4.4 Consumo de Potencias y Rendimientos.

3.5 Resultados del modelo 3: **MLFT<sub>Al\_C\_Respaldo\_Aire</sub>**.

3.5.1 Fuerzas presentes en la máquina.

3.5.2 Inducciones en el Entrehierro.

3.5.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.

3.5.4 Consumo de Potencias y Rendimientos.

### 3.1 Objetivos.

El principal objetivo de este capítulo es el estudio dinámico del motor. Es importante destacar que aunque se trate de una máquina lineal la curva empuje-velocidad se corresponde a la característica par-velocidad típica de las máquinas rotativas de inducción y por lo tanto presentará tres zonas de funcionamiento [2]:

- 1.-Zona 1: Funcionamiento como freno.
- 2.-Zona 2: Funcionamiento como motor.
- 3.-Zona 3: Funcionamiento como generador.

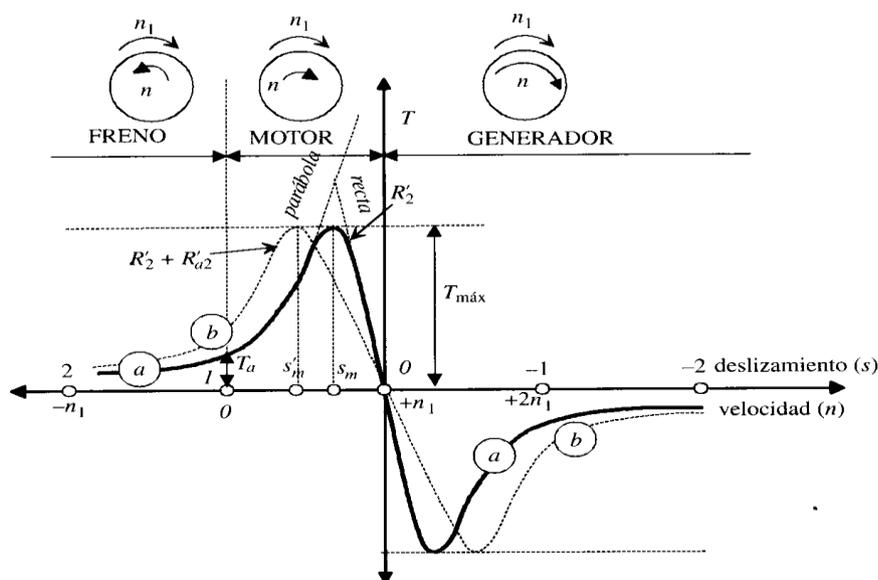


Figura 3.1: Curva par-velocidad de una máquina asíncrona rotativa.

Tal y cómo se indica se centrará el estudio al tramo II correspondiente al funcionamiento como motor, por lo tanto el deslizamiento estará comprendido entre  $[0, 1]$ . La velocidad del secundario viene expresada por:

Para dicho rango de deslizamientos se han escogido un conjunto de diez valores:

Deslizamiento	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$V_{\text{Secundario}} \text{ [m/s]}$	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0

Tabla 3.1: Valores de deslizamiento y velocidad del secundario asociada.

### 3.2 Presentación de Modelos y Particularidades del M.E.F.

Los estudios que se han llevado a cabo se han clasificado en función de las características eléctricas y magnéticas de los materiales que conforman el secundario del motor. Así, se propone la siguiente nomenclatura:

- **MLFT\_Al\_c\_Fe\_Lineal:** Secundario constituido por placa conductora de Aluminio y respaldo de Hierro no conductor y curva B-H lineal.
- **MLFT\_Al\_c\_Fe\_No\_Lineal:** Secundario constituido por placa conductora de Aluminio y respaldo de Hierro conductor y curva B-H no lineal.
- **MLFT\_Al\_c\_Respaldo\_Aire:** Secundario constituido por placa conductora de Aluminio y respaldo de aire.

Es conveniente realizar la siguiente aclaración relacionada con el tratamiento de materiales magnéticos en software de computación como son los elementos finitos.

- **Magnetic No Conducting Region:**

Esta opción permite introducir las propiedades magnéticas del material que se desee. Da la posibilidad de trabajar con diferentes curvas B-H según modelos matemáticos propuestos, tanto lineales como no lineales, y añade una amplia posibilidad de campos a completar por el usuario según el cuadrante de la curva B-H en el que se quiera operar para poder añadir imanes permanentes, etc.

- **Solid conductor Region:**

Se reserva esta opción con la finalidad de poder tratar el estudio de las corrientes inducidas en un material como resultado de campos magnéticos variables en el tiempo. Son las conocidas Eddy –currents o corrientes torbellino. Son ahora las propiedades eléctricas del material las que quedan abiertas a configuración, tal y como conductividad, temperatura de trabajo, etc.

Antes de proceder a exponer de una manera pormenorizada los resultados obtenidos es conveniente sintetizar en unas breves líneas los estudios que se han llevado a cabo y la justificación de los mismos. Para cada uno de los modelos propuesto se han llevado a cabo los siguientes estudios respetando los deslizamientos indicados en la tabla anterior:

- 1.-Evolución de las fuerzas presentes en el motor, principalmente empuje y fuerza normal, así como la potencia mecánica de salida.

**Importante:** Se desprecia el efecto del campo gravitatorio y en consecuencia no se tiene en cuenta el peso de las masas que intervienen en el modelo.

- 2.- Valores representativos de la inducción magnética en el entrehierro.
- 3.- Ya en el terreno eléctrico, corriente y factor de potencia de cada una de las fases con el objetivo de calcular la evolución del rendimiento del motor.
- 4.- Potencia activa, reactiva y aparente consumida por el motor.

A continuación se exponen las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales empleados:

**Aluminio**

—

**Hierro**

—

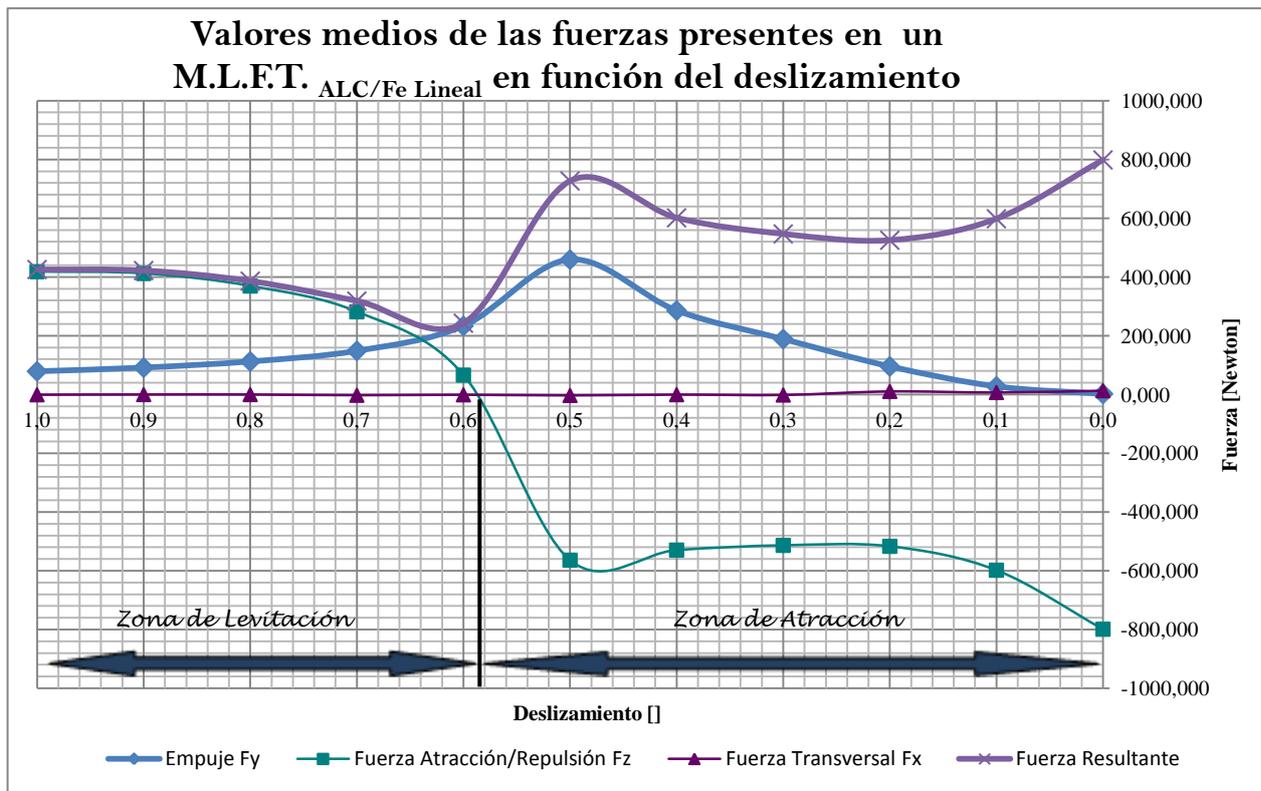
### 3.3 Resultados del modelo 1: MLFT\_Al<sub>c</sub>\_Fe<sub>Lineal</sub>.

#### 3.3.1 Fuerzas presentes en la máquina.

Se esquematizan las condiciones en las que se han llevado a cabo las simulaciones, en elementos finitos, de este primer modelo:

<u>CONDICIONES DE SIMULACION</u>	
Tipo de Estudio	Transitorio
Tiempo de Simulación [ms]	60
Frecuencia Alimentación [Hz.]	50
Tensión de Línea [Voltios]	660
Conexión	Estrella
Entrehierro Mecánico [mm]	5
Entrehierro Magnético [mm]	15
Curva B-H	Lineal

Tabla 3.2: Condiciones de simulación en elementos finitos del modelo 1.



Gráfica 3.1: Valores medios de las fuerzas presentes en un M.L.F.T. <sub>ALC/Fe Lineal</sub>.

En relación a las fuerzas presentes en un motor lineal de inducción hay que destacar una serie de fenómenos exclusivos de este tipo de máquinas que en un motor de inducción rotativo no se ponen de manifiesto y que se exponen a continuación:

- La **curva Empuje vs Deslizamiento** es muy similar a la característica par-velocidad clásica de un motor asíncrono pero analizando más en detalle los valores obtenidos se observa:

1.- El empuje máximo tiene lugar en , es decir, cuando la velocidad del secundario es exactamente la mitad de la velocidad media de sincronismo desarrollada por el armónico fundamental de la F.M.M creada por el primario.

2.- En el arranque el empuje alcanza un valor  $F_{y\_arranque} = 79.169$  Newton.

- Si algo caracteriza a los motores lineales de inducción es la presencia de fuerzas en la dirección vertical que en la máquina rotativa a causa de su geometría cilíndrica, no se encuentran presentes o siendo más precisos se anulan entre sí.

Resulta especialmente relevante la dependencia del sentido de esta fuerza con el valor del deslizamiento, diferenciándose así dos zonas, tal y como se observa en la figura 3.1. Así, se puede hablar de una **zona de atracción** y de una **zona de levitación**.

Si se analiza la zona de atracción se observa que para bajos deslizamientos, y por lo tanto elevadas velocidades, están presentes en la máquina fuerzas de carácter fuertemente atractivo, alcanzando su valor máximo en

—  A medida que la velocidad disminuye (el deslizamiento aumenta) el valor de dicha fuerza disminuye hasta que el motor se sitúa en un tramo de deslizamientos comprendido entre  $[0.5-0.6]$ .

Es en este rango de velocidades  $[10 \text{ m/s}-8\text{m/s}]$  en el cual tiene lugar la transición del sentido de la fuerza normal. Desde una velocidad cercana a 8 m/s hasta que la velocidad se hace nula el secundario del motor está sometido a fuerzas de levitación.

En esta última situación descrita (velocidad nula), de “rotor bloqueado”, el secundario experimenta la máxima variación de flujo, por lo tanto según la ley de **Lenz-Faraday**, son mayores las fuerzas electromotrices inducidas y en consecuencia las corrientes inducidas (eddy-currents) obteniéndose una  $F_{z\text{máx}} = +418.184 \text{ Newton}$ .

- Las fuerzas en dirección transversales son prácticamente insignificantes, tal y cómo se puede observar en la tabla adjunta.

*Nota: Es importante que el deslizador se encuentre bien centrado ya que de lo contrario estas fuerzas irán en aumento provocando la inestabilidad del secundario.*

Por regla general, a lo largo del documento se trabajará con valores medios y eficaces. El propósito de incluir una representación en régimen dinámico, es decir, en función del tiempo es mostrar el efecto de una característica inherente a los motores lineales: **el efecto de borde**.

Como se verá más adelante y consultando el **Anexo I** la circulación de un sistema de corrientes trifásico desequilibrado por el devanado estático da como resultado un campo magnético resultante que difiere del supuesto bajo el teorema de Ferraris. En resumen, se generará un campo magnético que se desplaza linealmente pero que no tiene una amplitud constante y la velocidad de desplazamiento instantánea tampoco lo es. Las 2 consecuencias principales son:

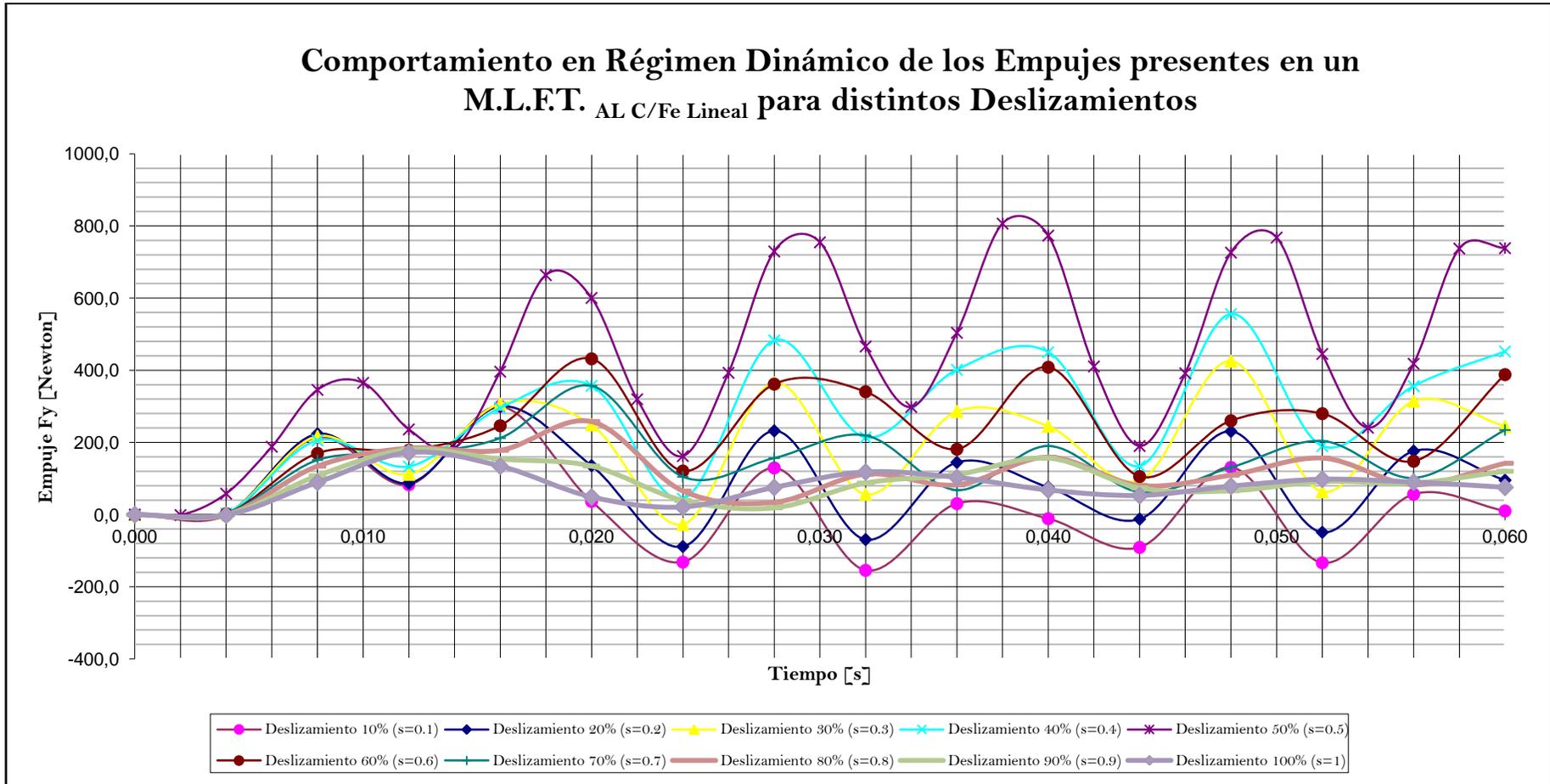
1.- Ripple en la curva dinámica del empuje:

Por cada ciclo de corriente que transcurre ( $T=20$  ms.) el afijo de la f.m.m. resultante describirá la trayectoria correspondiente a una elipse. Físicamente esto equivale a dos instantes de tiempo donde el campo magnético es máximo (semieje mayor) y otros dos momentos en los que el campo es mínimo (semieje menor). Estas fluctuaciones en el módulo del campo magnético resultante se traducirán en variaciones en el empuje tal y como se muestra en la gráfica que sigue. Para cada deslizamiento habrá asociado un desequilibrio y por lo tanto una elipse específica. De ahí, que haya deslizamientos en los que el ripple se presenta de manera mas acusada.

2.- Existencia de variación de flujo para deslizamiento cero:

Si se establece una analogía entre este fenómeno y las leyes de kepler, la velocidad de dicha f.m.m será mínima cuando pase por el semieje mayor y máxima cuando atraviese el semieje menor. Ante la no existencia de una velocidad instantánea constante, como sucede en la máquina rotativa, conviene definir una *velocidad de sincronismo media*. Se entiende que aunque se asigne al secundario dicha velocidad, éste estará sometido a una variación de flujo y por lo tanto aparecerá una f.e.m y en consecuencia aparecerá un empuje no nulo

Además hay que incluir la presencia de armónicos que originarán fuerzas de empuje y de frenado parásitas. Por último, hay que tener presente una inexactitud asociada al mallado. En 3D resulta complicado alcanzar una calidad de mallado excelente en todo el dominio por lo tanto hay que contar con pequeñas desviaciones en los cálculos que se llevan a cabo.

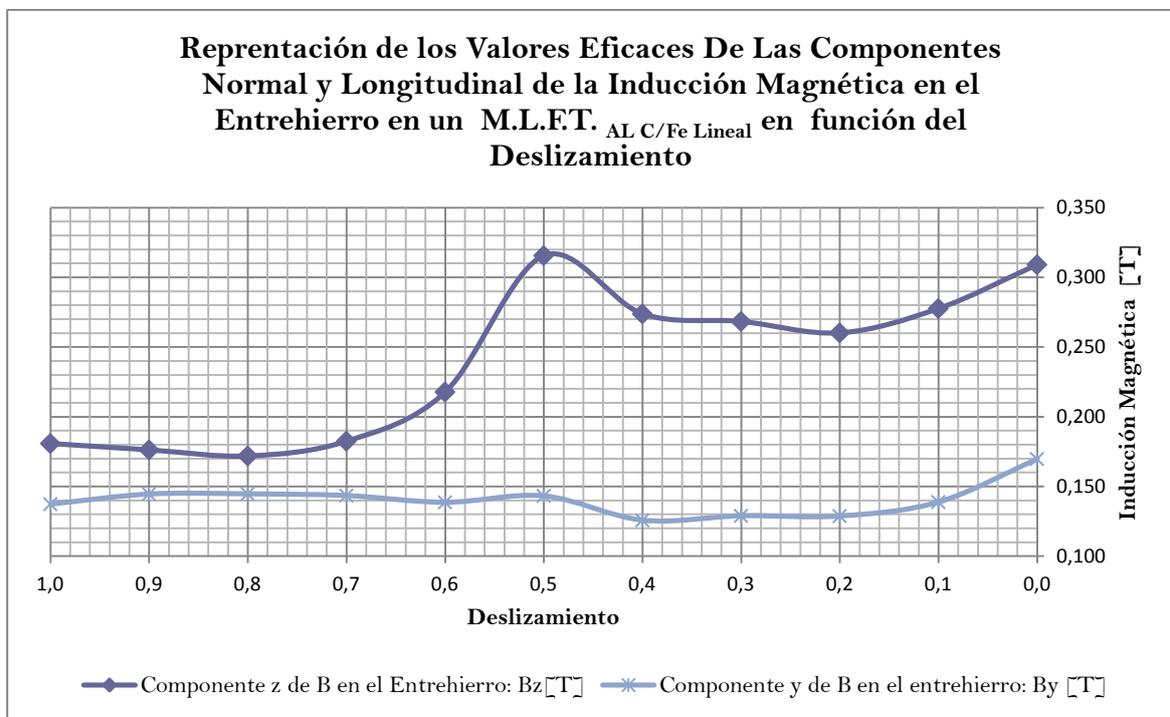


Gráfica 3.2: Comportamiento dinámico del empuje para distintos deslizamientos.

### 3.3.2 Inducciones en el Entrehierro.

Es importante destacar la relación que existe entre la fuerza en dirección vertical y las componentes  $z$  e  $y$  de la inducción magnética en el entrehierro  $[B_y - B_z]$ : [7]

A continuación se ha representado la variación de estas dos componentes para los distintos deslizamientos:



Grafica 3.3: Valores eficaces de las componentes  $B_z$  y  $B_y$  de la inducción magnética en el entrehierro para distintos deslizamientos.

1.-Los valores de inducción magnética en dirección normal siempre son superiores a los valores en sentido longitudinal. Esta diferencia es máxima en la zona de transición anteriormente comentada donde  $B_z$  es máxima y  $B_y$  es mínima.

2.-Respecto a la componente normal,  $B_z$ , es importante resaltar la diferenciación de dos niveles de funcionamiento claramente definidos según se esté en la zona de atracción o de levitación. En la zona de atracción la componente  $B_z$  es mayor que en la zona de levitación.

Lo contrario ocurre con la componente longitudinal  $B_y$  la cual presenta valores superiores en zona de repulsión en comparación con la zona de atracción. Se muestran a continuación las máximas variaciones de inducción máxima que tienen lugar en la zona de trabajo de la máquina correspondiente a valores de deslizamiento :

Se cumple que:

3.-Debe destacarse la dependencia cuadrática, de la fuerza de atracción con  $B_{mz}$  y respecto a la fuerza de levitación la proporcionalidad con  $B_{my}$  e inversamente proporcional a  $B_{mz}$ .

4.- Por último, se comprueba que la componente transversal  $B_{mx}$  es, aproximadamente, dos órdenes de magnitud inferior al resto de componentes y por lo tanto no interviene de manera decisiva en las fuerzas presentes en la máquina.

*Nota*

- Los valores de  $B_z$  y  $B_y$  corresponden a la inducción magnética resultante en el entrehierro tras considerar el efecto reacción de inducido, tal y cómo se ilustra en la imagen.
- Su valor, aparentemente bajo, es lógico ya que además se trata de valores eficaces y no de valores pico.

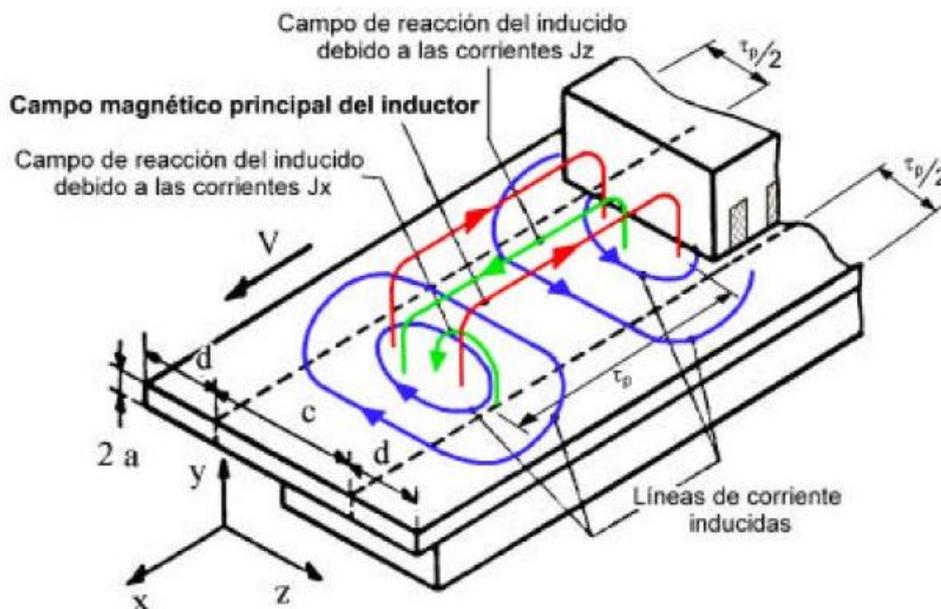
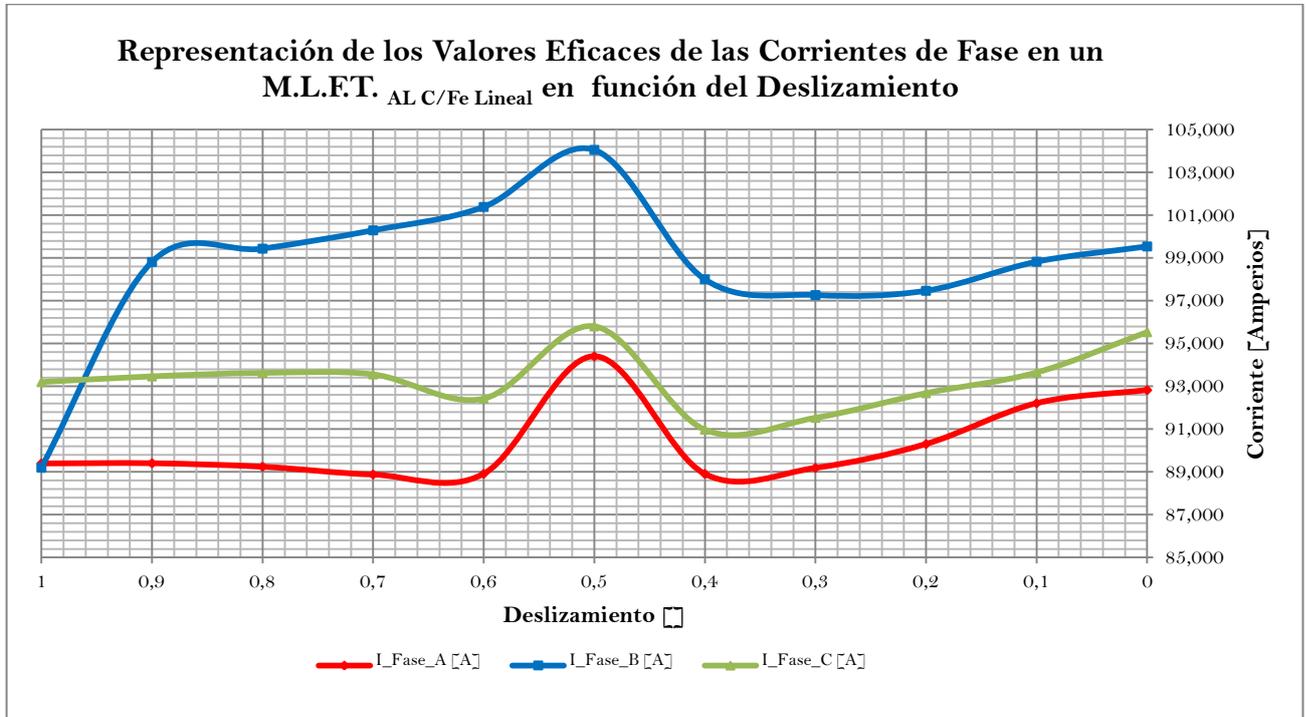


Figura 3.1: Representación de la reacción de inducido en un motor lineal.

### 3.3.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.

El siguiente paso es describir el comportamiento eléctrico del motor, con el fin de determinar parámetros como consumos, potencias, rendimientos, factores de potencia, etc.



Gráfica 3.4: Valores Eficaces de las Corrientes de Fase en un M.L.F.T. <sub>AL C/Fe Lineal</sub>

Son varias las observaciones a tener en cuenta respecto a la gráfica anterior:

- Queda de manifiesto el desequilibrio de corrientes. Tal y como se explicó en el capítulo anterior la principal consecuencia de los efectos de borde es la circulación por los devanados del motor de un sistema trifásico de corrientes desequilibrado. Antes de entrar en profundidad a valorar las consecuencias de este desequilibrio (**tanto en módulo como en fase**) es preciso tener en consideración lo siguiente:

- Disposición del secundario: Se trata de una disposición de estator acortado por lo tanto la longitud del secundario (constituido por aluminio y hierro) es superior a la del primario.

- Disposición de fases en el estator: Hay que tener en cuenta que en el borde de ataque se encuentran más próximas las bobinas correspondientes a la **fase A**, en el borde de salida las bobinas correspondientes a las bobinas de la **fase B** y en el centro de la máquinas las bobinas de la **fase C**. Por lo tanto, la relación de reluctancias:

$$(3.13)$$

Según lo anterior se observa que si la inductancia se define como:

—

y la Ley de Hopkinson establece que:

Entonces:

$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_r \mu_0 N^2}{2g} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right)$$

En consecuencia, la corriente consumida por cada una de las fases:

- Se cumple, para cada una de las fases, que la máxima demanda de corriente tiene lugar para aquel deslizamiento en el cuál el empuje es máximo y la fuerza en dirección vertical cambia de sentido, pasando el secundario de estar sometido a fuerzas de atracción a fuerzas repulsivas. Será, en este caso, la fase B que alcanza un valor máximo de 104.025 Amperios la que determine la sección mínima de conductor necesaria para hacer frente a los requerimientos de potencia.
- La gráfica anterior, además, pone de manifiesto que para cada deslizamiento existirá un determinado desequilibrio. Además, el desequilibrio entre la fase A y fase C es menor que el desequilibrio entre la fase B y el resto. Esto queda especialmente de manifiesto a la velocidad a partir de la cual se produce la transición de atracción a levitación. Para un valor de deslizamiento aproximadamente del 50% el desequilibrio entre las fases A y C se hace mínimo llegando a 1,4 Amperios de diferencia y el desequilibrio entre la fase B y A se hace máximo llegando a alcanzar los 12.4 Amperios.
- La evolución de las corrientes de la fase A y fase B (borde de ataque y borde de salida respectivamente) en función del deslizamiento resulta de especial interés.

1.- La evolución de la corriente por la fase B presenta dos tramos bien diferenciados. Para bajas velocidades del secundario, inferiores al 50% de la velocidad de sincronismo, la reluctancia asociada al circuito magnético de la fase B es elevada pues el secundario apenas se desplaza por lo tanto la inductancia de dicha fase es baja lo que conlleva a un aumento de la corriente. Efecto contrario ocurre a medida que la velocidad del secundario se aproxima a la velocidad de sincronismo. Para dichos casos la reluctancia del circuito magnético de la fase B disminuye por la presencia del secundario por lo tanto la inductancia aumenta y la corriente decrece.

2.- Razonamiento inverso ocurre con la fase A situada en el borde de ataque.

Este efecto se ve atenuado por tratarse de una configuración de estator acortado.

3.- La fase C sin embargo presenta ciertas desviaciones respecto a lo comentado anteriormente. Por un lado, para el primero de los tramos, la corriente se mantiene casi constante en torno a un valor medio de 93.25 Amperios. Una vez abandonado el máximo anteriormente comentado van a existir un conjunto de deslizamientos (exactamente 20%, 30% y 40%) para los cuales la reluctancia de la fase B es mínima lo cual se traduce en una inductancia máxima y en una corriente que permanece por debajo del valor medio anteriormente señalado, aproximadamente en 91.72 Amperios. Para velocidades muy próximas a la velocidad de sincronismo se pone de manifiesto de nuevo el efecto de borde, incluso para la fase C que ocupa la posición central en la máquina, provocando un aumento de 2.85 Amperios para velocidades cercanas a 20 m/s.

4.- Dado que la máquina, únicamente, tiene un par de polos los efectos de borde se manifiestan de manera muy acusada. Nótese, además, que por necesidades constructivas del modelo en 3D el devanado se ha representado mediante 4 capas que alternativamente se han ido alternando unas sobrepuestas a otras. Esta disposición contribuye a que el efecto de borde se manifieste aún de manera más notable.

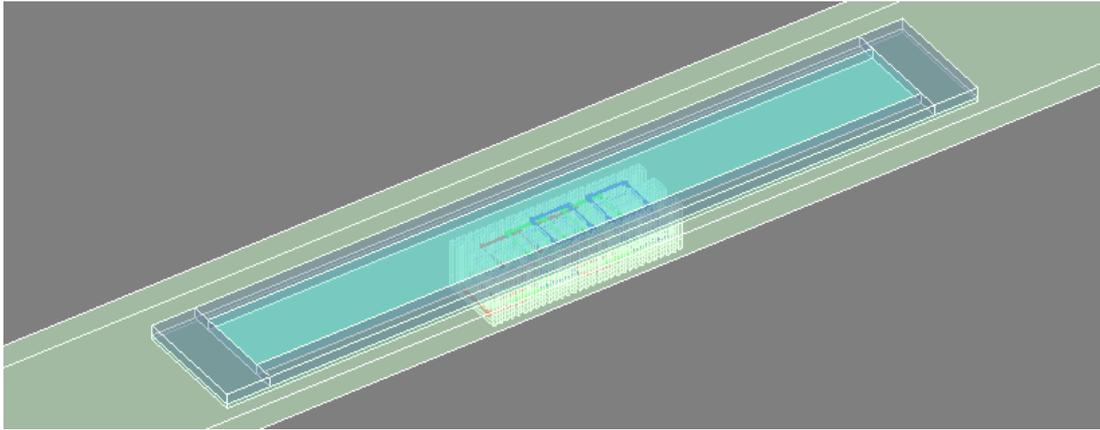
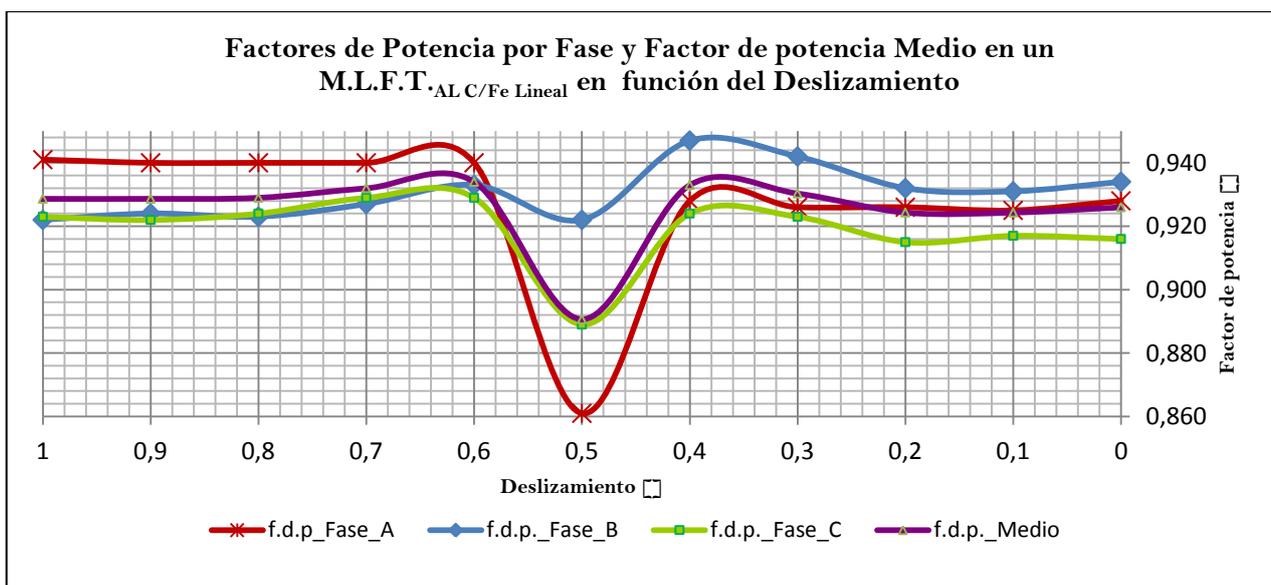


Figura 3.3: Visualización de la configuración en estator acortado en Flux 3D.

5.- Efecto Pelicular: Principalmente se pone de manifiesto en aquella situación en la que la variación de flujo es máxima, es decir, para  $s=1$  con lo que:

La principal consecuencia de este fenómeno, es un aumento de la impedancia en el arranque, y por lo tanto un decremento de la corriente. Por este motivo, el máximo consumo de corriente no tiene lugar en el arranque sino en la transición del sentido de la fuerza vertical, de atracción a levitación. La manera de cuantificar el efecto pelicular es mediante el coeficiente de profundidad de penetración que depende de los siguientes parámetros [9] [10]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$



Grafica 3.5: Factores de Potencia en un M.L.F.T. ALC/Fe Lineal

Con la finalidad de corroborar lo anteriormente expuesto se ha representado el factor de potencia del que cabe mencionar lo siguiente:

- Aunque a primera vista pueda parecer que el f.d.p. presenta bruscas variaciones se debe atender al rango de valores del eje de ordenadas, que presenta un mínimo de 0.86 y un máximo de 0.95, es decir, el  $\cos\vartheta$  oscila dentro de un restringido conjunto de valores. El elevado valor que toma el f.d.p, que en el caso más desfavorable cae sólo a un 0.86, se debe fundamentalmente a que el flujo de dispersión de cabeza de bobina queda recogido por las columnas laterales del perfil E que constituye el estator.
- Hay un comportamiento que merece ser tenido en cuenta. Se observa, en cada una de las fases, que para el deslizamiento en el cual tiene lugar el cambio de atracción a levitación ( $s=50\%$ ), el factor de potencia presenta un mínimo. Este mínimo se acentúa en la fase correspondiente al borde de ataque, que pasa de un valor de 0.928 a **0.861**. En contraposición , la fase B es la que presenta una caída del f.d.p más atenuada, disminuyendo su valor de 0.947 a **0.922**. El mínimo de la fase C está comprendido en un valor intermedio respecto a las fases que ocupan las posiciones extremas, en torno a **0.889**.

Cuando el secundario comienza a estar sometido a fuerzas de repulsión y el empuje es máximo, las corrientes inducidas en el secundario alcanzan su valor máximo y con ello la reacción de inducido, traduciéndose todo ello en un decremento de la inducción magnética (y flujo magnético) en el entrehierro.

Se expone de manera esquematizada esta secuencia de fenómenos:

—

De nuevo queda de manifiesto el efecto de la influencia de la velocidad del secundario en los desfases de la fase A (borde de ataque) y la fase B (borde de salida). En el tramo I en el que predominan las bajas velocidades, es la fase A la que presenta mayor f.d.p. en torno a 0.94 y la fase B y C toman valores muy cercanos entre sí pero inferiores, alrededor de 0.926. Por el contrario en el tramo II donde la velocidad empieza a alcanzar los 20 m/s la tendencia anterior se invierte. Es ahora la fase B la que presenta mayor f.d.p. alcanzando un valor medio de 0.9372 que la fase A que cae a 0.927 debido a la presencia del secundario.

### **3.3.4 Fuerza Magnetomotriz creada por un sistema trifásico de Corrientes Desequilibradas.[2][6]**

Llegados a este punto, y con la información que se dispone, es posible hallar el fasor espacial de tensión magnética fundamental producido por un devanado trifásico cuyas fases están alimentadas con un sistema trifásico de corrientes senoidales desequilibradas. Va a resultar instructivo resolver este problema utilizando componentes simétricas. A tal fin, se descompondrá el sistema de corrientes senoidales desequilibradas, en tres sistemas senoidales equilibrados de secuencia directa, inversa y homopolar, para a continuación, calcular el fasor de tensión magnética producido por cada sistema, combinarlos y obtener el fasor espacial resultante. A este respecto, hay que tener en cuenta que el sistema homopolar no produce componen fundamental de tensión magnética en el entrehierro.

Se define la matriz de componentes simétricas como:

De manera genérica se propone el siguiente método de cálculo:

1.- Los fasores temporales de las corrientes  $i_R(t)$ ,  $i_S(t)$ ,  $i_T(t)$  vienen dados por:

2.- Las componentes simétricas se obtienen mediante la transformación:

—

3.- Las corrientes de las fases pueden expresarse en función de dichas componentes simétricas, de acuerdo con las formulas:

4.- Resolviendo la ecuación matricial se tiene:

—

—

5.- El sistema trifásico de corrientes de secuencia directa es:

6.- El sistema trifásico de corrientes de secuencia inversa es:

Los sistemas trifásicos de secuencia directa e inversa dan origen a sendas ondas espaciales de tensión magnética giratoria con sentidos de giro positivo la primera y negativo la segunda. Los fasores espaciales que caracterizan dichas ondas son:

—

—

Siendo el factor de escala:

\_\_\_\_\_

Sumando ambas expresiones:

—

En el Anexo II se incluye el programa desarrollado en Matlab para la construcción del fasor espacial de tensión magnética fundamental.

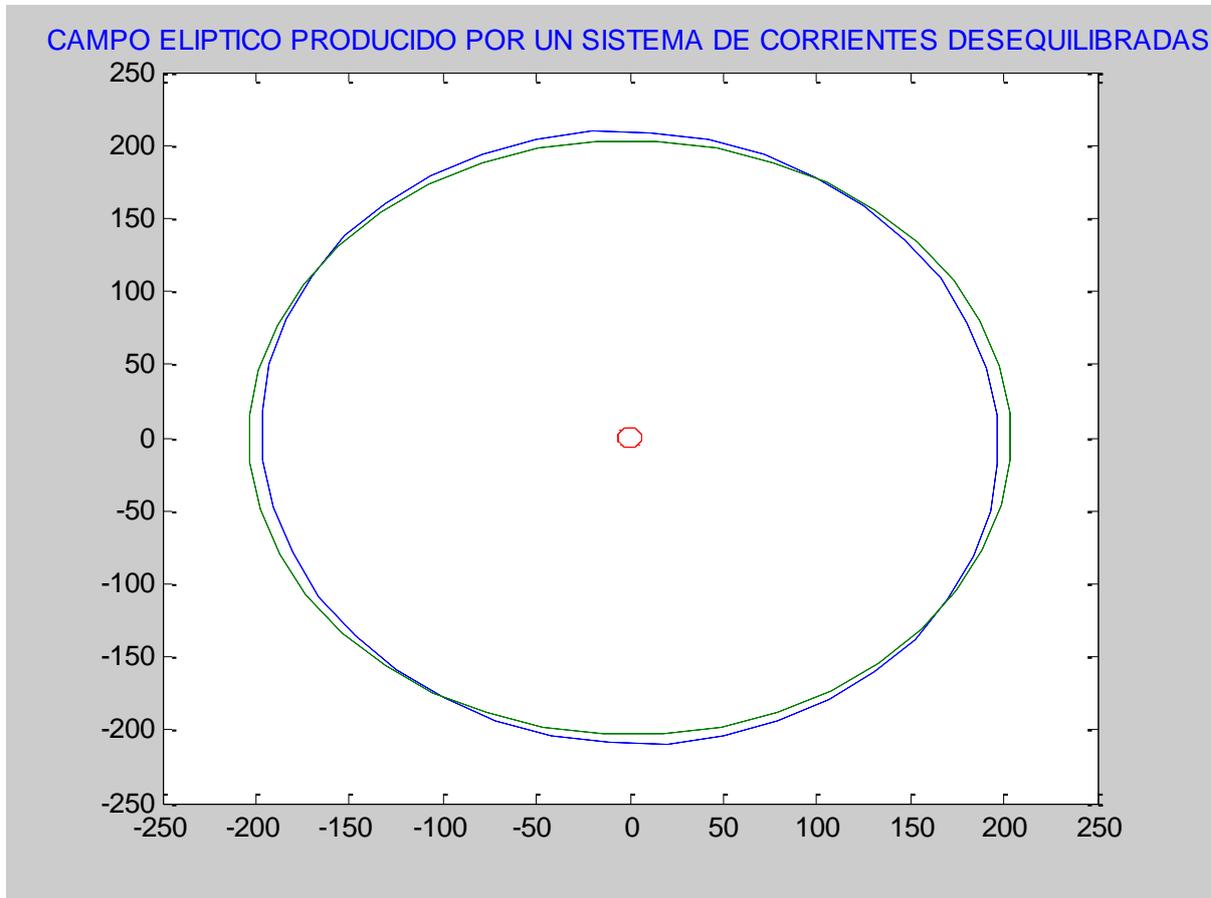


Figura 3.4: Campo elíptico resultante en un M.L.F.  $T_{AL C/Fe}$  Lineal

### 3.3.5 Consumo de Potencias.

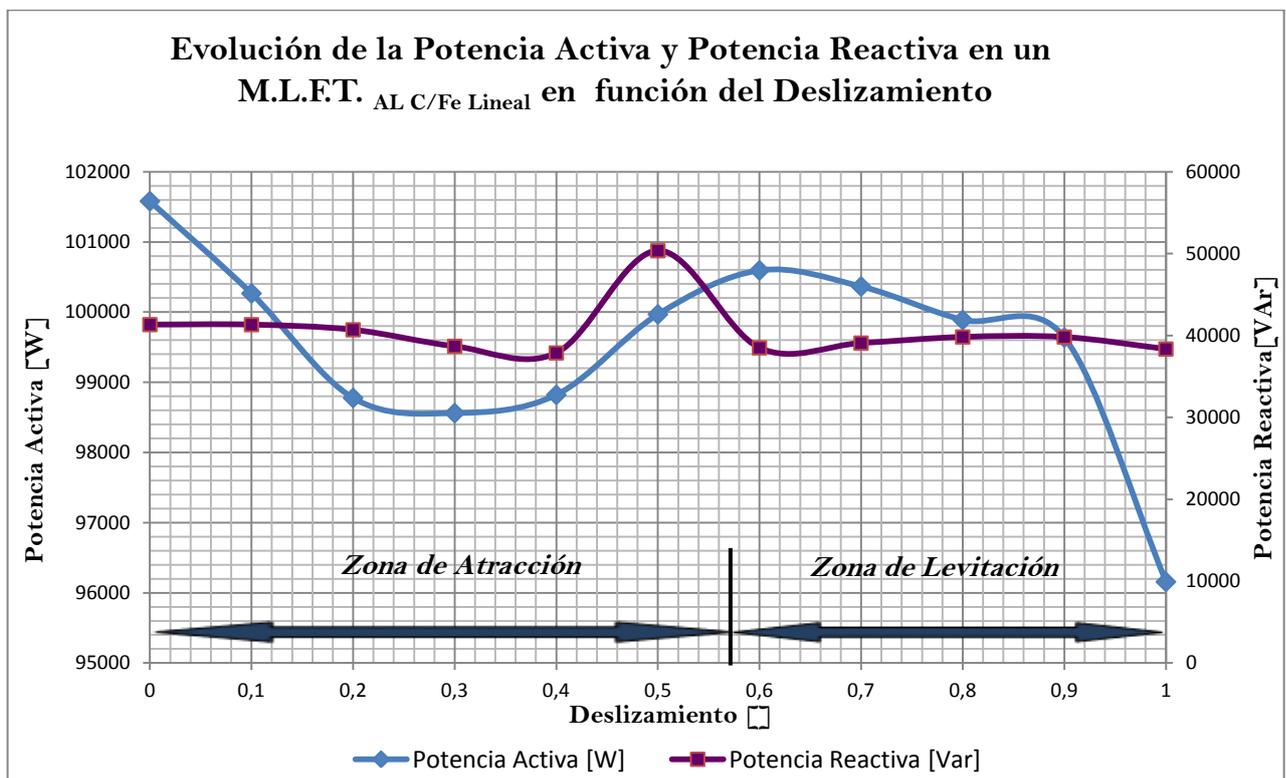
Una vez conocido el desfase entre tensión y corriente, para cada una de las fases, se procede a representar la potencia activa, reactiva, y aparente consumida por el motor en función del deslizamiento. En un sistema trifásico desequilibrado, las potencias anteriores obedecen a las siguientes expresiones:

La potencia instantánea total para una conexión en estrella o triángulo es igual a:

Y de un modo análogo, la potencia activa o media total es:

donde  $U_k$  representa el valor eficaz de la tensión simple de la fase K,  $I_k$  la corriente eficaz simple de la fase K, y el f.d.p. de la fase K. De forma similar, la potencia reactiva total es:

y la potencia aparente vendrá expresada por:



Gráfica 3.6: Potencia Activa y Potencia Reactiva en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal

En cuanto al consumo de potencias es notable destacar el comportamiento de la potencia reactiva. La zona de atracción presenta valores ligeramente superiores a la zona de levitación. Aproximadamente, la zona de atracción muestra un consumo medio de 41.500 VAr, mientras que en la zona de levitación disminuye a un valor en torno a los 39.100 VAr.

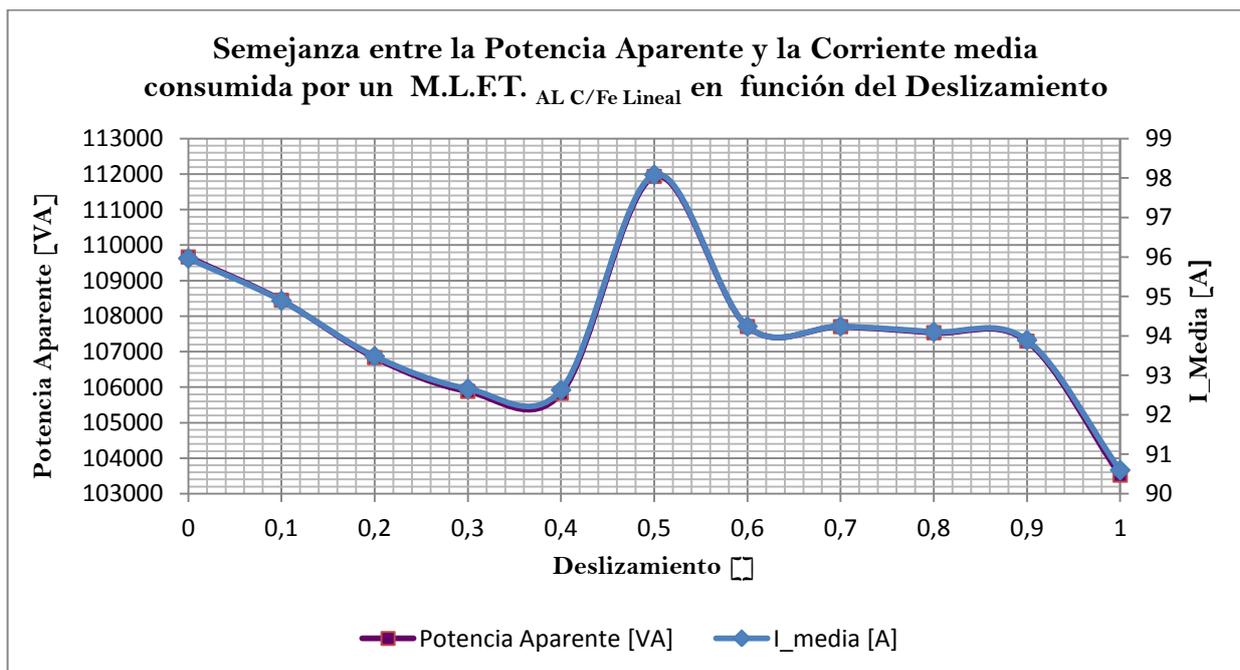
En la zona de trabajo en la cual el secundario se encuentra sometido a fuerzas atractivas el valor del módulo de inducción magnética en el entrehierro ronda los 0.31 T. en contraste con los 0.23 T. de media correspondientes a la zona de levitación. Por lo tanto, resulta lógico que a mayor valor de inducción magnética (en módulo) en el entrehierro mayor consumo de potencia reactiva. El máximo consumo de reactiva, alrededor de los 50300 VAR., tiene lugar en las condiciones de tránsito de atracción a levitación anteriormente expuestas.

Referente al consumo de potencia activa cabe destacar lo siguiente:

- 1.- La zona de atracción presenta dos comportamientos. Una tendencia decreciente correspondiente a altas velocidades hasta alcanzar un mínimo relativo de 98.560 W. para una velocidad de 14 m/s. Para velocidades inmediatamente inferiores la pendiente se torna positiva hasta alcanzar un máximo relativo de 100.594 W. El máximo absoluto tiene lugar a la velocidad de sincronismo donde el consumo de potencia está próximo a los 101.579 W.
- 2.- La zona de levitación se caracteriza por presentar un consumo decreciente de potencia activa hasta que el secundario llega a la velocidad nula. En este punto la potencia toma un valor mínimo de 96.156 W.

La gráfica que sigue es particularmente interesante. Anteriormente se comprobó que el efecto de borde da como resultado la circulación de un sistema trifásico de corrientes desequilibrado, por lo tanto, cada fase tiene su amplitud y desfase propio. Si se calcula el valor medio de ese sistema de corrientes desequilibrado se observa que la evolución de la potencia aparente consumida por el motor es idéntica a la evolución de dicha corriente media ficticia.

-



Gráfica 3.7: Potencia Aparente y la Corriente media en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal

Este gráfico muestra las siguientes conclusiones:

- I. En los motores de inducción lineales la corriente máxima no tiene lugar en el arranque tal y como sucedía en la maquina asíncrona rotativa (Ver Anexo IV). Una vez explicada la evolución de cada fase se puede decir, de una manera más general, que la máxima demanda de corriente tiene lugar para aquel deslizamiento en el cuál se produce el cambio en el sentido de la fuerza vertical. Esto ocurre para un deslizamiento cercano a 0.6 y el valor medio eficaz de la corriente está próximo a 80 A. Lo mismo ocurre con la potencia aparente, alcanzándose un máximo absoluto cercano a los 112 KVA.
- II. En  $s=0$ , es decir, cuando la velocidad del secundario coincide con la velocidad de sincronismo media la corriente no es nula como ocurría con la maquina rotativa. Alcanza un valor y bastante elevado, 96 A., cercano al máximo absoluto anterior. Hay que recordar que para esta velocidad de 20 m/s aunque el empuje sea prácticamente nulo la fuerza vertical no lo es y de hecho alcanza su máximo valor.

En el arranque el valor medio de la corriente alcanza los 90 A. Es el mínimo valor obtenido para el rango de deslizamientos propuesto. La palabra mínimo debe tomarse con cautela ya que conviene hacer hincapié en la escala elegida en la representación del amperaje. Así, se tendrá una variación máxima que no excede los 8 amperios de media.
- III. Mientras que el secundario esta sometido a fuerzas atractivas tanto la corriente media como la potencia aparente manifiestan una tendencia decreciente a medida que la velocidad del secundario disminuye. Este comportamiento cambia en cuanto predominan las fuerzas repulsivas manteniéndose en valores cercanos a los 94 A. y los 107 KVA. independientemente del deslizamiento.

El siguiente parámetro a tratar es el rendimiento. Éste puede definirse como:

$$\eta = \frac{P_{\text{mec}}}{P_{\text{e}}}$$

Por lo tanto:

$$\frac{\dots}{\dots}$$

Sin embargo llegados a este punto debe hacerse notar lo siguiente. Supóngase el secundario trabajando en condiciones de levitación. Es cierto que en la dirección vertical (eje  $z$ ) no existe velocidad alguna por lo tanto no tiene sentido hablar de potencia mecánica pero ello no significa que no deba incluirse algún parámetro que trate de cuantificar el efecto de que el secundario levita. La potencia mecánica no es la única forma de potencia posible sino que debe de extenderse el término e incorporar el concepto de potencia electromagnética y con ella el de rendimiento magnético. Se dispone de la energía magnética almacenada en el secundario para cada uno de los deslizamientos.

Planteando el correspondiente balance energético, que consiste en aplicar la ley de conservación de la energía a un sistema motor, se tiene [2]:

- (1): Cambio en la energía eléctrica absorbida por la red.
- (2): Cambio en la energía magnética almacenada en el sistema.
- (3): Cambio en la energía mecánica debido al movimiento del secundario.
- (4): Cambio en la energía perdida.

Si se expresa el balance anterior en términos de potencia:

$$\dots - \dots$$

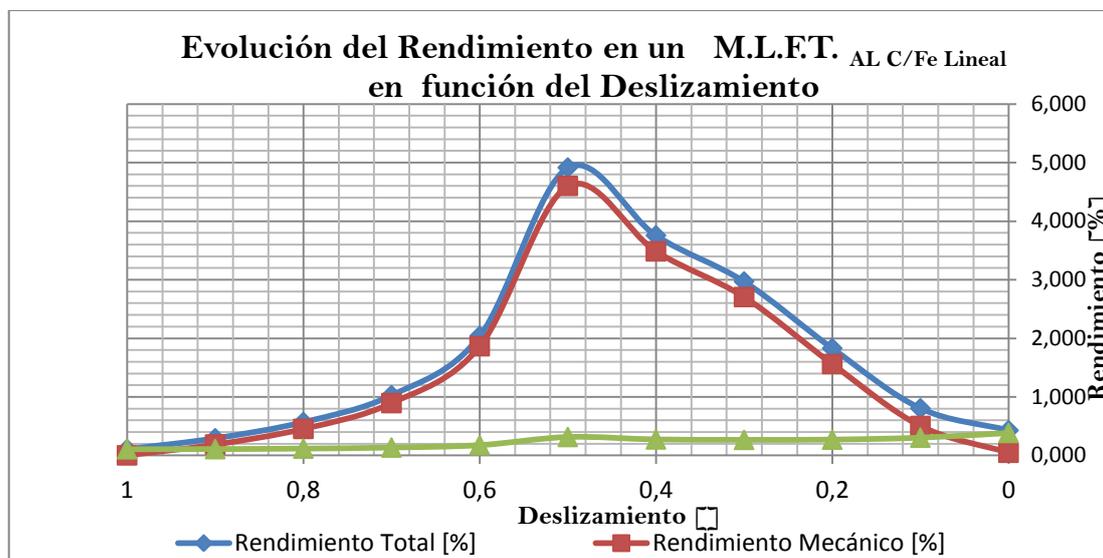
Considerando ambos términos:

$$\dots$$

En este primer modelo se asume:

$$\dots$$

Las gráficas que siguen ilustran lo anteriormente expuesto:



Gráfica 3.8: Rendimientos en un M.L.F.T. AL C/Fe Lineal

La evaluación de los rendimientos anteriores pone de manifiesto:

- I. En general, rendimiento global pobre. Alcanza un máximo del 8%. Se observa una evolución similar a la curva empuje-deslizamiento.
- II. Rendimiento mecánico considerablemente superior al rendimiento magnético. Si tomamos como deslizamiento de muestra un 50% de la velocidad de sincronismo se comprueba que para una potencia de alimentación de 99967 W. se alcanza una potencia de salida de 4593 W. y una potencia magnética de 313 W. un orden de magnitud inferior a la mecánica.
- III. El rendimiento magnético, sin embargo, presenta una tendencia que difiere del magnético. Se puede decir que presenta dos escalones según el motor funcione a atracción o levitación, siendo inferior en este último modo de funcionamiento. La potencia magnética en el tramo correspondiente a atracción presenta una media de 295 W y en levitación cae a unos 124 W.

La siguiente etapa en el estudio del motor lineal que nos ocupa consiste en modificar las propiedades del secundario con el objetivo de encontrar un comportamiento del mismo lo más cercano a la realidad que nos sea posible. Así, el cambio que se propone respecto al modelo anterior consiste en modificar las propiedades del respaldo de Fe aproximando la curva B-H a un modelo no lineal, es decir, con saturación y asociarle una conductividad.

Nótese que la geometría permanece invariante y sin duda alguna los resultados anteriores variarán si alguna modificación en las dimensiones del secundario se llevase a cabo. Ciertamente habrá parámetros más sensibles que otros. De entre todos ellos resulta especialmente relevante [7]:

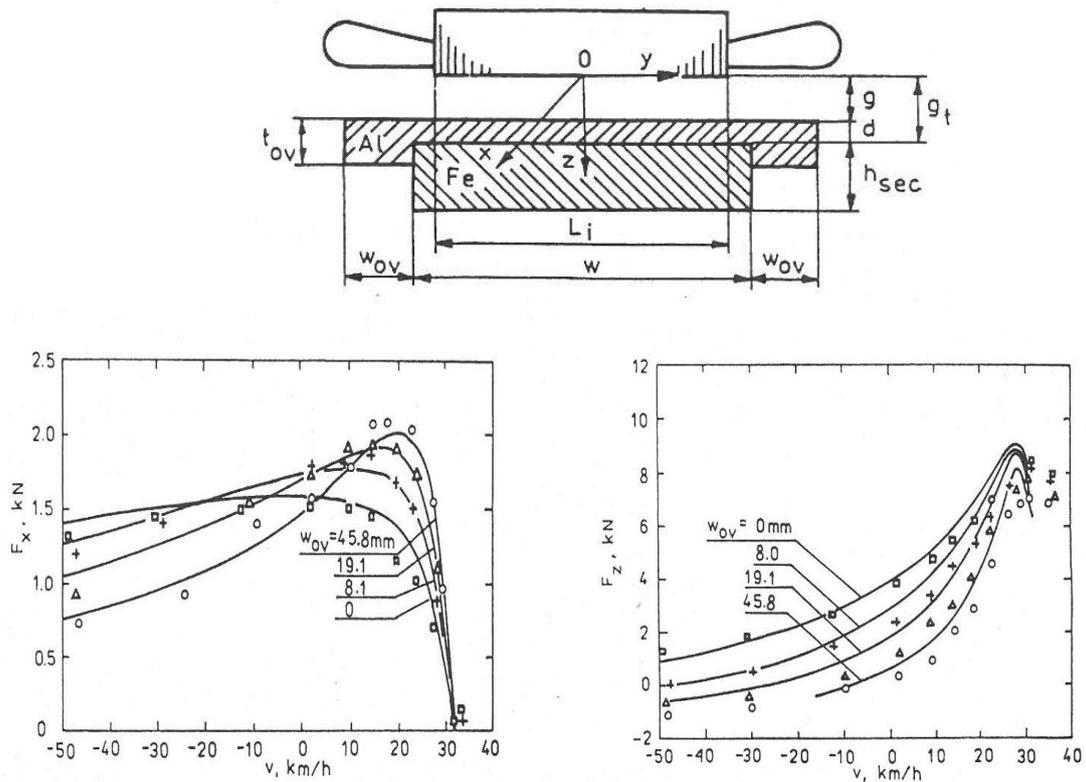


Figura 3.5: Influencia del parámetro  $w_{ov}$  en las fuerzas de la máquina.

Ciertamente constituye un parámetro clave en la optimización del máximo empuje capaz de desarrollar el motor. Se observa que al aumentar  $w_{ov}$  no sólo se consigue aumentar la potencia de salida sino que la fuerza de atracción disminuye de tal manera que incluso es capaz de situar al motor en condiciones de levitación, como ocurre en 45.8 mm. Las gráficas corresponden al CIGGT= Canadian Inst. of Guide Ground Transport, Canada.

### 3.4 Resultados del modelo 2: MLFT\_Al\_c\_Fe\_No\_Lineal.

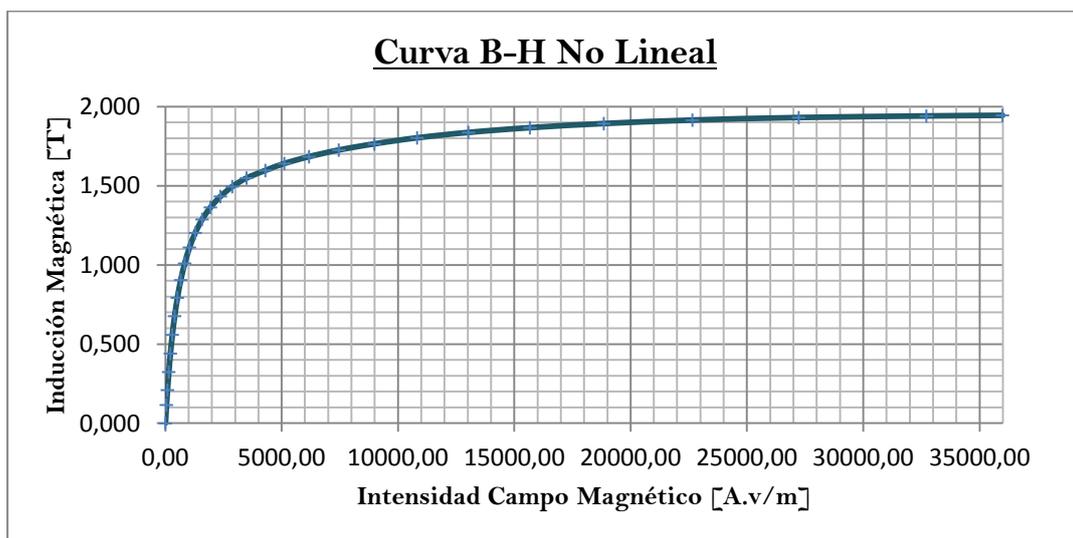
#### 3.4.1 Fuerzas presentes en la máquina.

CONDICIONES DE SIMULACION	
Tipo de Estudio	Transitorio
Tiempo de Simulación [ms]	50
Frecuencia Alimentación [Hz.]	50
Tensión de Línea [Voltios]	660
Conexión	Estrella
Entrehierro Mecánico [mm]	5
Entrehierro Magnético [mm]	15
Curva B-H	No Lineal

Tabla 3.3: Condiciones de simulación en elementos finitos del modelo 2

**Nota:** Es imprescindible, si se desea ser lo más riguroso posible, mencionar el matiz de que el tiempo de simulación ha disminuido de 60 ms a 50 ms respecto al primer modelo. Factores como el elevado tiempo de simulación, el paso asociado a cada periodo de integración, la no-linealidad del modelo, la convergencia de la solución, etc. forzaron la reducción de estos 10 ms. Dicho de otro modo, la longitud recorrida por el secundario disminuye y en consecuencia las posiciones relativas del secundario respecto al primario para cada uno de los deslizamientos no serán exactamente coincidentes. A mayor velocidad mayor efecto tendrá este cambio efectuado en las condiciones de simulación.

Algunos autores, como Nassar y Boldea [8], inciden en la importancia de que el secundario con respaldo de hierro opere generalmente bajo condiciones de saturación, lo cual contribuye sustancialmente a las fuerzas de levitación a elevadas velocidades. De hecho así ha ocurrido a la hora de tratar el respaldo de Fe como material conductor en el modelo que nos ocupa.



Gráfica 3.9: Curva B-H del material ferromagnético empleado en Flux.

Para comprender las consecuencias de esta no linealidad es necesaria una concisa explicación de lo que sucede en un material ferromagnético a nivel atómico. Cuando éste se coloca dentro de un campo magnético externo, los dominios magnéticos tienden a alinearse, de tal forma que sus campos magnéticos se suman al campo externo, resultando un campo total más fuerte. Al asumir una curva B-H lineal se está suponiendo que este proceso descrito ocurre indefinidamente, es decir, no se contempla la situación en la que el material tenga todos sus dominios magnéticos alineados (zona de saturación). Además se debe tener en cuenta:

1. El ferromagnetismo depende de la temperatura, y para cada material ferromagnético existe un valor, denominado *temperatura de Curie*, por encima del cual el material se hace paramagnético. Este fenómeno ocurre cuando el movimiento térmico es suficientemente grande para vencer las fuerzas de alineación.

2. Aparecen pérdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos. Esto ocurre cuando parte de la energía almacenada en el material se pierde irremediamente en forma de calor. Esta pérdida de energía se debe a la **característica de histéresis** del material y a las corrientes inducidas (**corrientes de Foucault**).

La gráfica que sigue trata de ilustrar lo anteriormente comentado [2]:

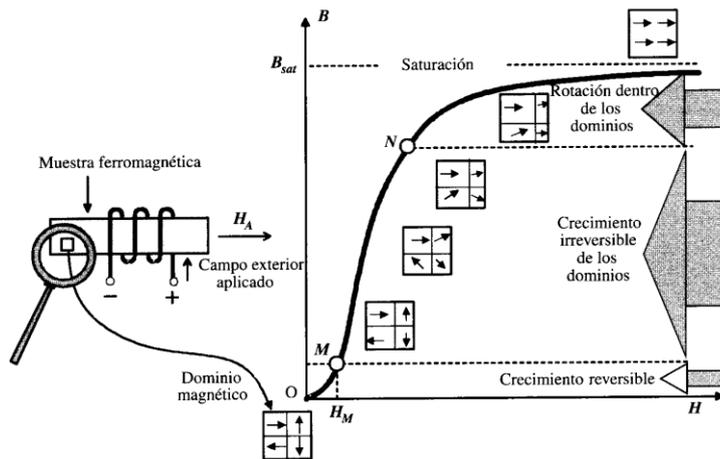
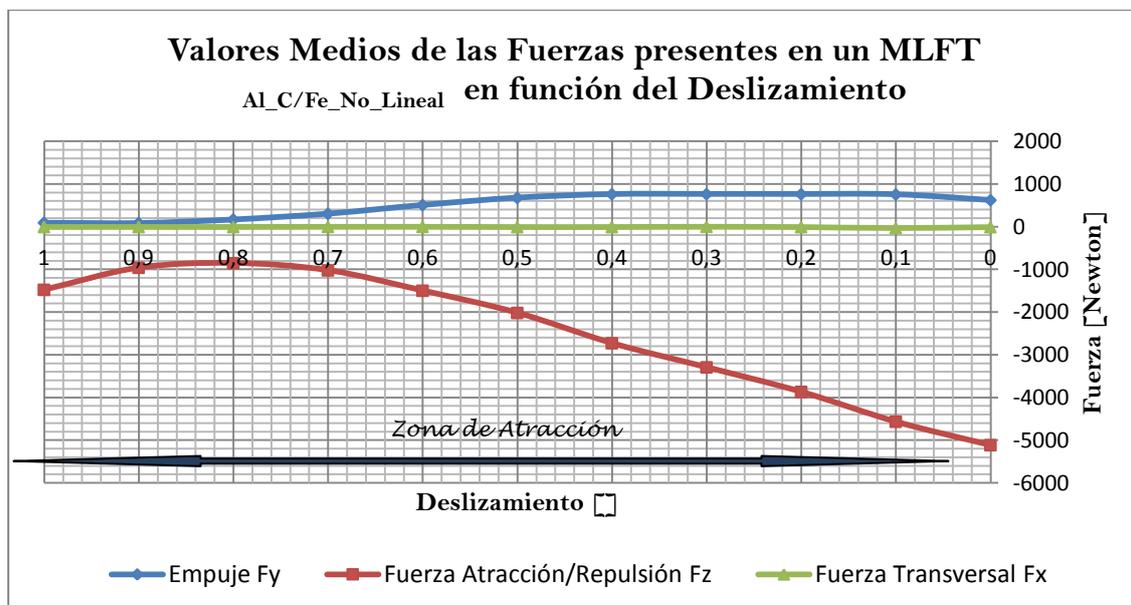


Figura 3.6: Efecto a nivel atómico de la saturación magnética.

Los resultados obtenidos, una vez tenidas en cuenta estas consideraciones, se exponen y explican a continuación. Se comienza por la curva Fuerza Vs Deslizamiento.



Gráfica 3.10: Valores Medios de las Fuerzas presentes en un MLFT  $Al_C/Fe_{No\_Lineal}$

Respecto al modelo anterior son numerosas las diferencias que se encuentran:

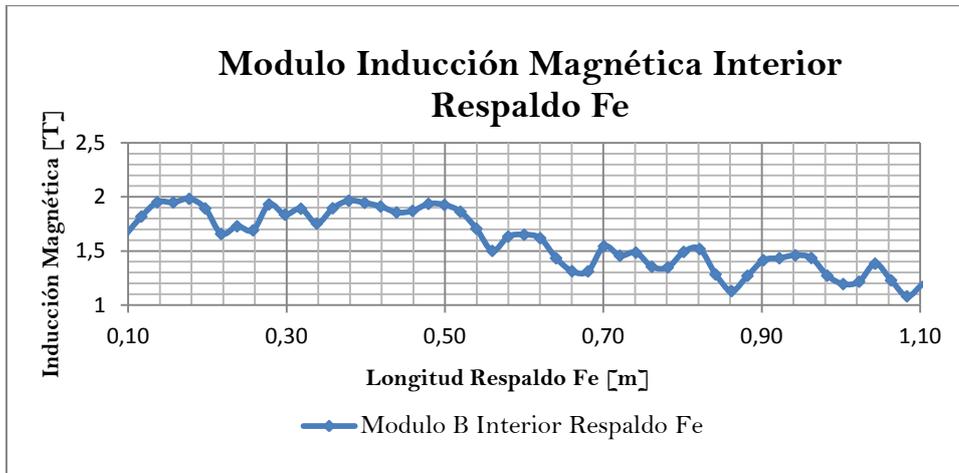
1.- En primer lugar desaparece la zona de levitación. La máquina durante todo el rango de funcionamiento como motor esta sometida a fuerzas de atracción. El secundario constituido por dos capas conductoras presenta la siguiente relación de conductividades y permeabilidades relativas:

— —————

Se puede establecer una relación entre las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales empleados y las fuerzas desarrolladas por el secundario. Así, la conductividad estará relacionada con la fuerza de levitación y la permeabilidad relativa con la fuerza de atracción. Por un lado existirá una fuerza de levitación desarrollada por la placa de Al. Por otro lado la placa de Fe presentará fuerzas de repulsión proporcionales a la conductividad y por lo tanto inferiores a la del aluminio y fuerzas de atracción en proporción a la permeabilidad relativa. Entonces, la fuerza resultante, en la dirección z, corresponderá a la suma de las fuerzas desarrolladas por cada una de las capas del secundario:

Según el razonamiento expuesto, resultaría lógico prever que el sentido de dicha fuerza neta debería ser en sentido positivo del eje z, es decir, el secundario debería estar sometido al menos en algún rango de velocidades a repulsión ¿Por qué no es así si el modelo anterior ya estaba sometido a repulsión?:

La respuesta se encuentra en la no linealidad de la curva B-H del material ferromagnético empleado y más exactamente en su zona de funcionamiento, ya que el respaldo de hierro funciona bajo condiciones de saturación. Se comprueba para todo el conjunto de deslizamientos establecidos que, la inducción magnética a lo largo de una línea imaginaria que atraviesa longitudinalmente el respaldo de hierro por su plano medio, se encuentra fijada en **1.9 T**. valor correspondiente al  $B_{sat}$  de la curva de imanación.



Gráfica 3.11: Saturación magnética en el interior del respaldo de Fe.

Por lo tanto la **reacción de inducido del chapón de hierro** juega un papel importante en el comportamiento de la máquina. Una vez establecidas las corrientes de Foucault en el respaldo ferromagnético, éstas serán a su vez fuente de un nuevo campo magnético. Debido al valor tan elevado que adquieren dichas corrientes inducidas y en consecuencia la intensidad de campo magnético asociada  $H$ , al establecerse en un material ferromagnético la amplitud de este campo magnético vendrá limitada tal y cómo se indicó anteriormente por el valor límite de inducción magnética del material.

Se inició el estudio del modelo incorporando las propiedades eléctricas propias del hierro pero se mantuvo la curva B-H lineal. El resultado fue ciertamente sorprendente. Las fuerzas presentes en la máquina, sin alterar la alimentación, se disparaban al orden de los mega-Newton lo cual carecía de significado físico. Esta anomalía en los resultados obtenidos se debía precisamente a obviar esta no linealidad en la curva B-H del material.

La siguiente expresión propuesta por Gieras pone de manifiesto la enorme dependencia de la saturación en las fuerzas involucradas en el respaldo de Fe. Si se modela la curva B-H mediante [8]:

donde  $K$  y  $n$  son constantes comprendidas entre [0.3-0.6] y [2.15-2.16] respectivamente dependiente del tipo de material.

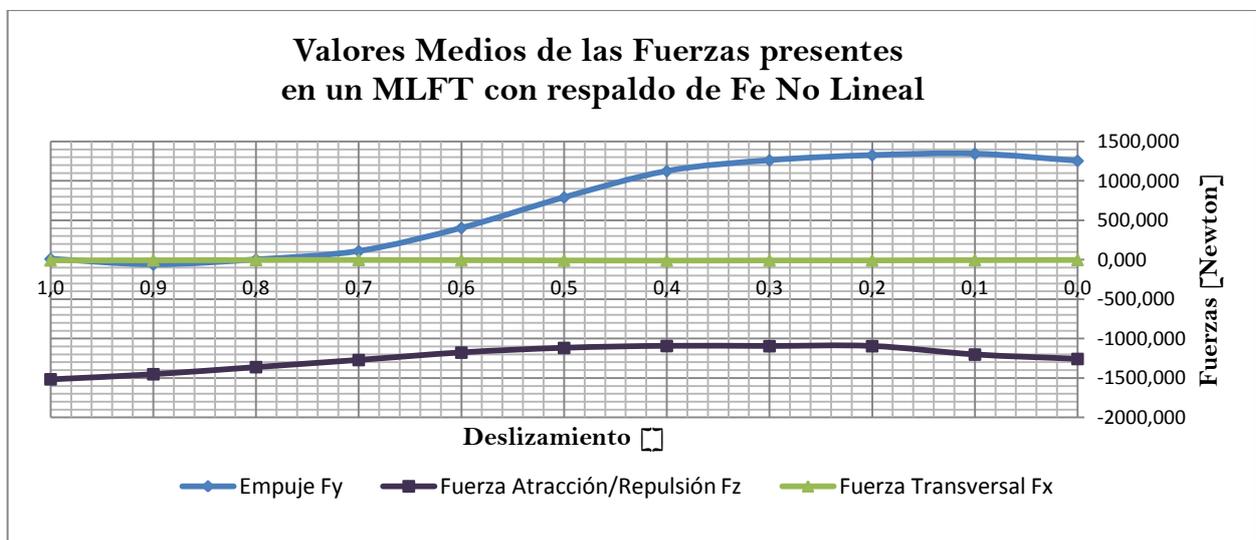
- I. La *fuerza de levitación* (2) desarrollada por el respaldo de Fe:

$$\underline{\hspace{10em}}$$

II. La *fuerza de atracción* (3) desarrollada por el respaldo de Fe:

La fuerza vertical resultante aportada por el respaldo de Fe será:

Con la finalidad de determinar la contribución del respaldo de Fe a las fuerzas totales desarrolladas por el motor se ha llevado a cabo un estudio considerando, exclusivamente, un secundario constituido por el respaldo de Fe. En este modelo el Al carece de propiedades eléctricas. Por lo tanto al no presentar conductividad alguna, las corrientes inducidas sólo tendrán lugar en el material ferromagnético. Este estudio se ha llevado a cabo bajo unas condiciones de simulación similares al modelo 2.



Gráfica 3.12: Saturación magnética en el interior del respaldo de Fe.

Únicamente un par de comentarios al respecto:

- I. El sentido de la fuerza vertical predominante es en sentido negativo. Por lo tanto, la contribución del respaldo de Fe a las fuerzas atractivas es importante. Resultado lógico por otra parte, pues la baja conductividad del Fe no permite que las corrientes inducidas generen una fuerza de repulsión que compense la fuerza de atracción ejercida a causa de sus propiedades magnéticas.

- II. Bajo condiciones de saturación, la permeabilidad relativa de trabajo del material ferromagnético viene determinada por:

\_\_\_\_\_

- III. Los empujes son bastante elevados, llegando a rozar los 1350 N para  $s=0.1$ . La dependencia de esta fuerza con la saturación de la curva B-H del Fe viene dada por:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

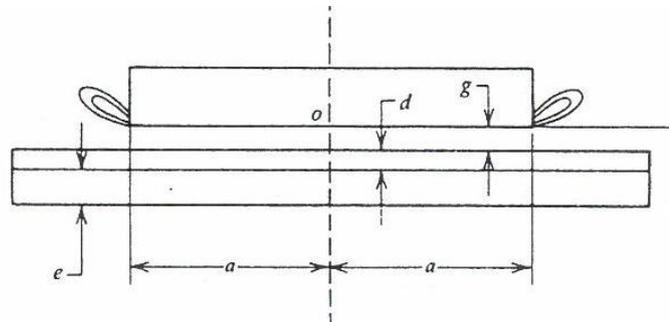


Figura 3.7: Dimensiones características en un M.L.I monolátero.

2.- La curva empuje-deslizamiento abandona la evolución obtenida en el modelo 1. Antes de comenzar el análisis es conveniente decir que el empuje resultante será resultado de la contribución de ambos elementos del secundario:

Se comienza el estudio para  $s=1$ , es decir, situación de rotor parado. Se consigue un empuje inferior que el obtenido para  $s=0$  (aproximadamente 96 N frente a 620 N respectivamente). Esta desviación respecto a la curva teórica empuje-velocidad encuentra su justificación en la particularidad del modelo simulado en elementos finitos. Se trata de una configuración de secundario en estator acortado y concretando en el modelo simulado la longitud del secundario es aproximadamente 2.5 veces la longitud del estator. A esto hay que añadir la posición relativa inicial del estator y del secundario. Todo ello tendrá su repercusión en este modelo no lineal.

Es evidente, que para velocidad nula el secundario no cambia su posición y según se ha llevado a cabo la simulación la zona activa, es decir, aquella superficie expuesta a variación de flujo es inferior que a velocidades superiores. A medida que ésta aumenta la zona activa también se incrementa y en consecuencia la superficie de material conductor. En este caso al ser conductores el Al como el Fe el efecto de estator acortado queda especialmente de manifiesto.

En una configuración contraria, como sería la de rotor acortado la zona activa prácticamente permanece invariante, independientemente de la velocidad del secundario y la dependencia del empuje con el deslizamiento se ajustaría más fielmente a la curva teórica esperada.

Resulta interesante el caso de  $s=0$ . Por un lado queda clara la existencia de mayor zona activa a elevadas velocidades pero si es cierto que a medida que la velocidad del secundario se aproxima a la velocidad media de sincronismo la variación de flujo decrece. Estos dos efectos son claramente contrapuestos. Que ambos elementos del secundario sean conductores dotan de mayor importancia la presencia de mayor zona activa que la disminución de la variación de flujo.

Como se indicó al comienzo del capítulo, tal variación siempre va a estar presente, incluso a deslizamiento nulo, ya que la velocidad instantánea del campo magnético creado por la armadura nunca coincidirá con la del secundario y por lo tanto siempre existirá una f.e.m. Puede decirse que este efecto queda magnificado, por un lado, en un modelo de estator acortado cuyo secundario queda constituido por dos elementos conductores y, por otro lado, con la consideración de la posición relativa inicial del motor. Así, la superficie expuesta al campo magnético estático irá en aumento con la velocidad.

Por lo tanto, la curva empuje vs  $s$  puede dividirse en dos tramos.

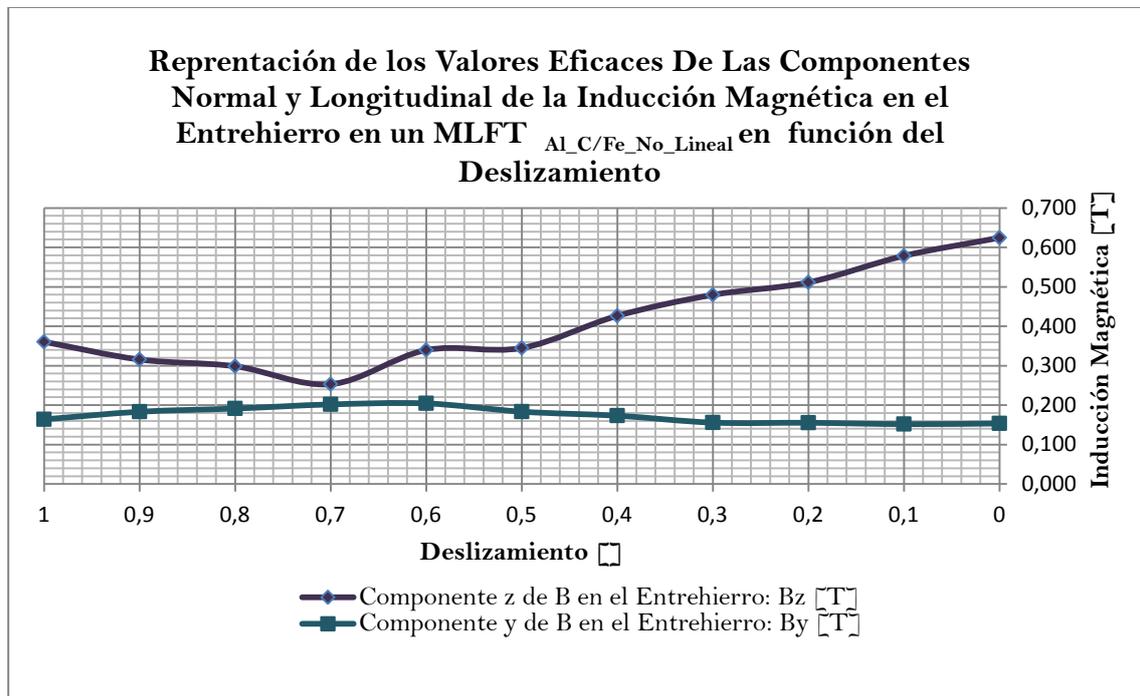
1. Una primera zona de bajas velocidades: — . A medida que la velocidad aumenta el valor medio del empuje también va en incremento.
2. Una segunda región dominada por las altas velocidades donde — donde el empuje alcanza su máximo valor cercano a los 755 N.

Por último, hacer notar la importancia que al dotar a todos los elementos del secundario de conductividad eléctrica el empuje resultante es suma de las contribuciones de cada una de las capas.

### **3.4.2 Inducciones en el Entrehierro.**

El efecto de incorporar al modelo una conductividad al Fe y modificar la curva B-H de lineal a no lineal da como resultado un incremento en los valores de inducción magnética en el entrehierro. Puesto que únicamente existen fuerzas de atracción los valores de la componente  $z$  de B son considerablemente superiores a los correspondientes a la dirección y responsable de la repulsión electrodinámica.

Los valores de inducción magnética en el entrehierro son:

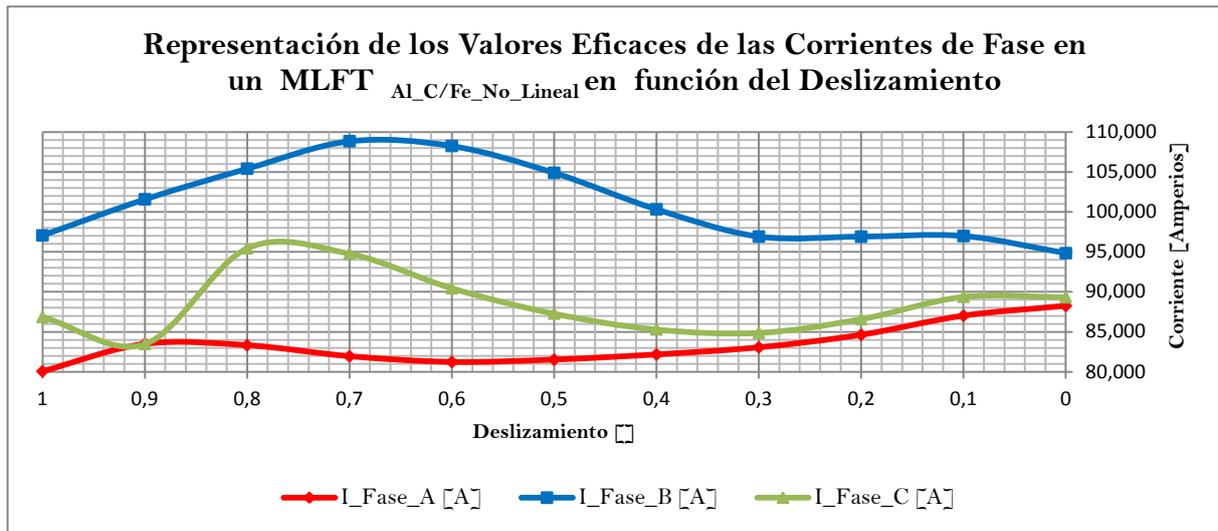


Gráfica 3.13: Componentes Normal y Longitudinal de la Inducción Magnética en el Entrehierro en un MLFT <sub>Al\_C/Fe\_No\_Lineal</sub>.

Si para deslizamiento nulo la fuerza de atracción es máxima alcanzando los 5.115 N. el valor de  $B_z$  también tiene su máximo, llegando a alcanzar los 0.6 T. A medida que la fuerza de atracción comienza a disminuir de una manera casi lineal conforme el deslizamiento aumenta el valor de  $B_z$  responde con el mismo comportamiento decreciente. La  $F_z$  alcanza su mínimo para una velocidad de 6 m/s ( $s=0.7$ ) situación en la que la  $B_z$  tan solo vale 0.25 T. Para bajos valores de velocidad del secundario la componente vertical de B en el entrehierro vuelve a experimentar un ligero aumento hasta alcanzar en rotor parado los 1475 N. en atracción y los 0.36 T. en  $B_z$ .

La componente  $B_y$  mantiene un valor aproximadamente constante para todo el rango de velocidades alrededor de los 0.15 T. Únicamente alcanza su mayor valor en la situación previamente descrita en la que la fuerza de tracción y  $B_z$  son mínimas, sin llegar a superar los 0.2 T. Por último, como ocurría en el modelo anterior la componente  $B_x$ , puede considerarse irrelevante no llegando a alcanzar las fuerzas en esta dirección valores significantes respecto a las otras dos direcciones salvando el caso para el cual el deslizamiento vale 0.1. Para esta situación se obtiene una fuerza en dirección transversal cercana a los 31 N. que no debe pasar inadvertida.

### 3.4.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.



Gráfica 3.14: Valores Eficaces de las Corrientes de Fase en un MLFT  $Al_C/Fe\_No\_Lineal$

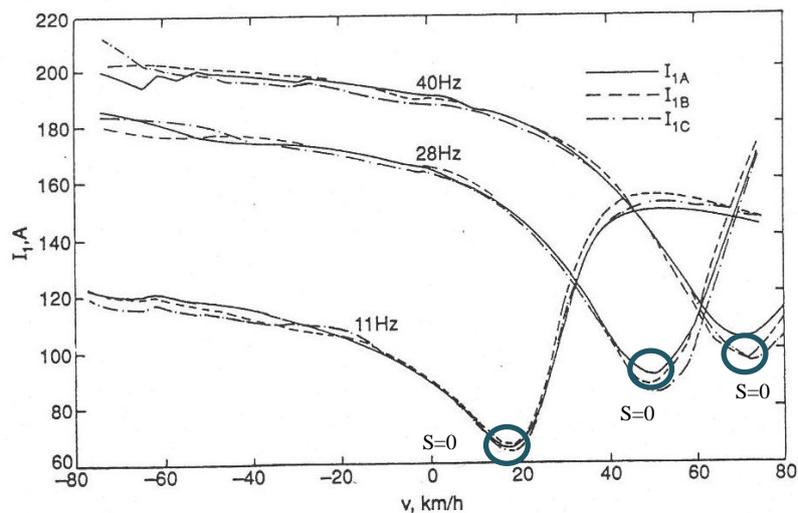


Figura 3.8: Evolución de la corriente en el motor lineal CIGGT

De nuevo queda de manifiesto el desequilibrio de corrientes. Como se explicó anteriormente vuelve a cumplirse:

Aunque la evolución de las mismas a medida que varía la velocidad muestra las siguientes peculiaridades:

- 1.- El deslizamiento en el cuál tiene lugar la máxima demanda de corriente no corresponde a la situación de deslizamiento nulo en la que la fuerza de atracción es máxima y el empuje está próximo a su máximo valor. Sino que el máximo amperaje tiene lugar en aquél punto donde la fuerza de atracción alcanza su mínimo registro.

Estos resultados llevan a la conclusión que el máximo consumo de corriente tendrá lugar en aquél deslizamiento para el cuál la fuerza de atracción sea mínima o bien se hayan conseguido las condiciones de repulsión electrodinámica, como ocurría en el modelo anterior. De media este pico de consumo ronda los 95 A.

2.- Se observa que el desequilibrio entre la fase A y la fase C es menor que el desequilibrio entre la fase A y la fase B. Para velocidades próximas a la velocidad de sincronismo el desequilibrio entre las fases A y C se mantiene prácticamente constante y en su mínimo valor cercano a los 2 A. de diferencia. Ésta es máxima en el punto de mínima atracción cercana a los 13 A. Exactamente en estas condiciones, el desequilibrio entre las fases A y B toma su valor más desfavorable. En este caso la diferencia llega a alcanzar los 22 A.

3.- Las fases A y C muestran consumos en el arranque ligeramente inferiores a los amperios consumidos para deslizamiento nulo. Recordar que estas dos fases corresponden al borde de ataque y a la posición central respectivamente. Comportamiento opuesto muestra la fase B ubicada en el borde de salida del estator. En el arranque la corriente es ligeramente superior que para  $s=0$ .

La gráfica 3.8 se ha añadido con la intención de ilustrar este comportamiento que tanto difiere del motor rotativo. Que exista consumo de corriente en aquella situación en la que teóricamente es nula la variación de flujo no deja de constituir un aspecto a tener muy en consideración. Repetidamente, se propone como ejemplo el motor lineal CIGGT= Canadian Inst. of Guide Ground Transport, Canada [7].

Conocido el valor del paso polar:

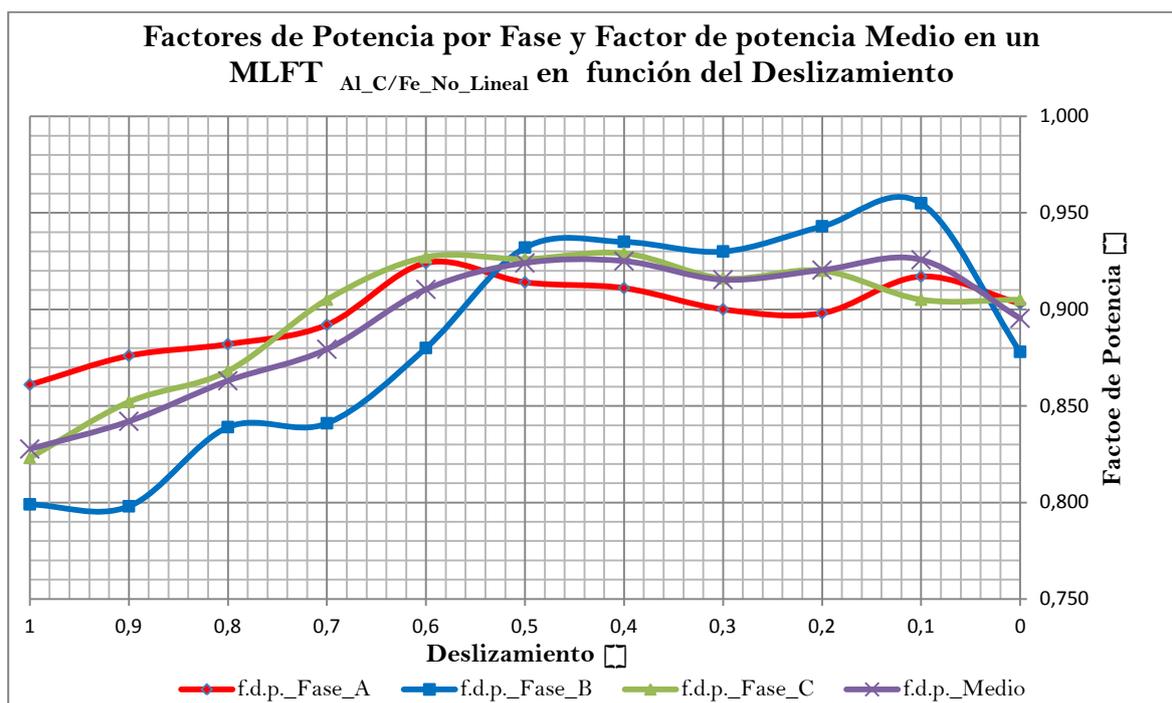
Para las frecuencias que se indican las velocidades de sincronismo asociadas son:

Se ha señalado en el gráfico, para cada frecuencia el punto de la curva correspondiente a una velocidad del secundario igual a la velocidad de sincronismo, es decir, situación de deslizamiento nulo. Se destacan las siguientes ideas:

- Se verifica que para deslizamiento cero el consumo no lo es. Dicha corriente corresponde a la mínima consumida por el motor en todo su rango de funcionamiento. Las particularidades del modelo que nos ocupa (estator acortado, distintos entrehierro mecánico y magnético, número de polos, etc), muestran que el mínimo puede obtenerse en distinto deslizamiento. Recaltar la importancia de la diferencia de escalas empleadas en las 2 gráficas anteriores.

- A medida que la frecuencia aumenta, este mínimo se incrementa. Para la máxima frecuencia representada, 40 Hz, la corriente puede llegar a alcanzar los 100 A.
- Existencia de una velocidad característica en la cual el desequilibrio de las fases es máximo. En el ejemplo seleccionado ocurre para esta situación de  $s=0$ .

A la hora de representar aquellos parámetros relevantes en el comportamiento de la máquina no puede obviarse el estudio del factor de potencia:



Gráfica 3.15: Factores de Potencia en un MLFT  $Al_C/Fe\_No\_Lineal$

Independientemente de la fase de la que se trate se observa una tendencia general que observando la evolución del empuje guardan cierta semejanza. El caso más desfavorable comienza en el arranque tanto para el f.d.p como para  $F_y$ . Hay un primer tramo comprendido desde la situación de deslizador parado hasta que éste adquiere una velocidad aproximadamente la mitad de la velocidad de sincronismo en la que ambos parámetros toman una característica creciente. Si se toma como referencia el coseno medio se comprueba como éste experimenta una subida de 0.828 a 0.924. A partir de este deslizamiento hasta que se hace nulo se mantiene en torno a un valor de 0.922. En ausencia de levitación, por lo tanto, la evolución del factor de potencia resulta previsible si se conocen los valores de los diferentes empujes.

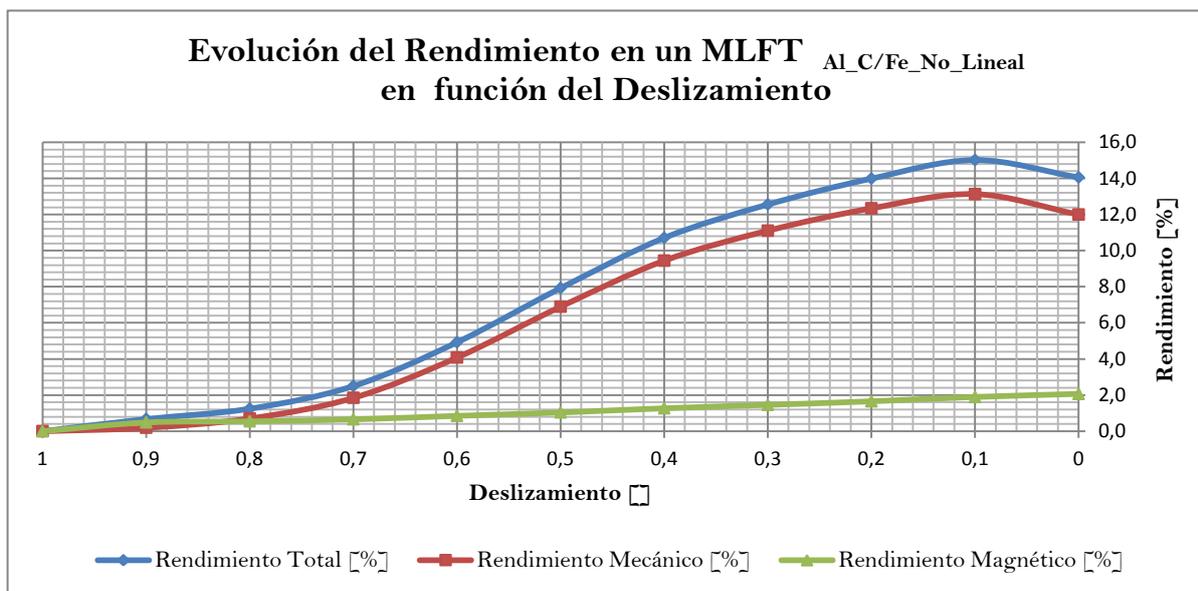
Otra vez la configuración de estator acortado deja entrever la relevancia de la disposición relativa entre estator y deslizador. Para un deslizamiento igual a la unidad el f.d.p de la fase A comienza siendo el mayor de los tres, seguido de la fase C, siendo la fase B la que peor f.d.p presenta.

A medida que aumenta la velocidad las inductancias asociadas a las fases A y B (bordes de ataque y salida respectivamente), variarán pues para elevadas velocidades la posición relativa entre ambos elementos del motor es totalmente distinta al posicionamiento de partida. A partir de  $s=0.5$ , el dominio de la fase A deja su puesto a la fase B. Desde una velocidad de 10 m/s en adelante, el circuito magnético asociado a la fase B mejora debido a la presencia del secundario, y con ello la inductancia y el f.d.p asociado a la fase B aumenta. Por el contrario, una vez que el secundario ha abandonado el borde de ataque, el circuito magnético asociado a la fase A empeora al aumentar la reluctancia.

En consecuencia, la inductancia y el factor de potencia de la fase A decaen. La fase C, que ocupa una posición intermedia en el devanado de la máquina, mantiene también un f.d.p comprendido en un valor medio del correspondiente a las fases extremas.

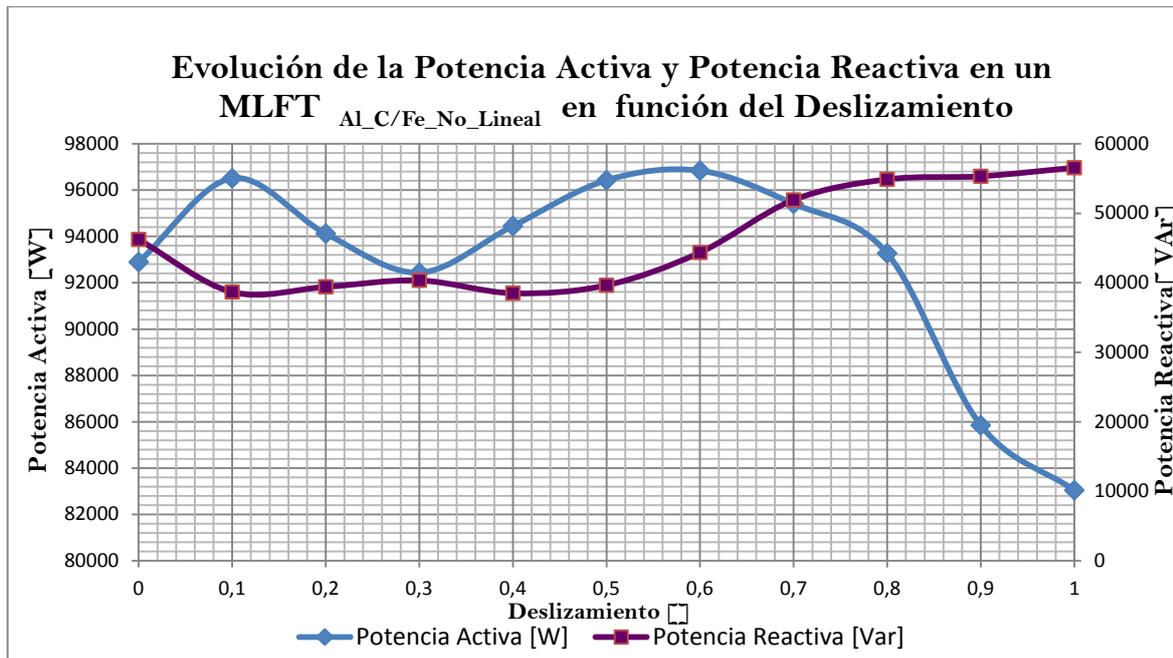
Si bien para algunos deslizamientos esto último deja de cumplirse hay que remitirse al Capítulo 2 y analizar las singularidades del devanado empleado en elementos finitos. Éste consta de 4 capas que se han ido escalonando en las diferentes ranuras de tal manera que su representación en tres dimensiones fuera asumible.

### 3.4.4 Consumo de Potencias y Rendimientos.

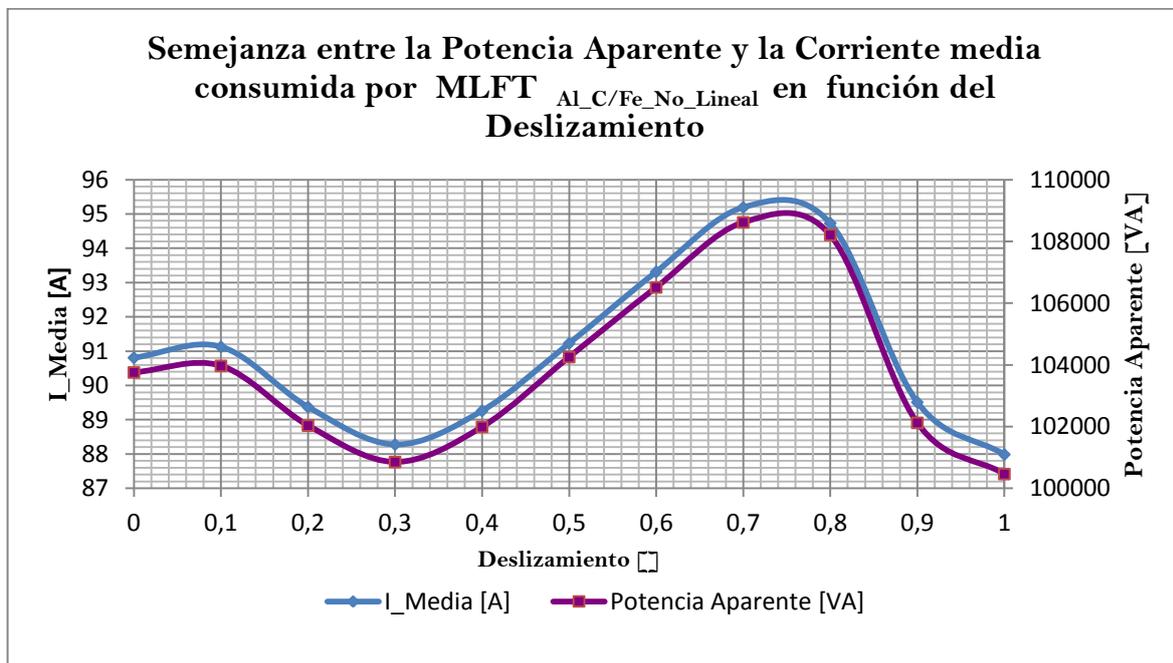


Gráfica 3.16: Rendimiento en un MLFT <sub>Al\_C/Fe\_No\_Lineal</sub>

La evolución del rendimiento mecánico divide el gráfico anterior en dos zonas. Una región de altos y otra de bajos rendimientos. La primera de ellas corresponde a aquellos deslizamientos en los cuales los empujes alcanzados son máximos, llegando a alcanzar un rendimiento total máximo del 15%. Por su parte, el rendimiento magnético, de magnitud mucho menor que el anterior, muestra una tendencia decreciente a medida que la fuerza vertical disminuye.



Gráfica 3.17: Potencia Activa y Potencia Reactiva en un MLFT  $Al_C/Fe\_No\_Lineal$



Gráfica 3.18: Potencia Aparente y la Corriente media en un MLFT  $Al_C/Fe_No\_Lineal$

Mediante las dos gráficas que se muestran en la parte superior, se va a tratar de sintetizar los dos fenómenos más relevantes que se han encontrado en este segundo modelo con el objetivo de explicar el consumo de potencias. Pues hay dos deslizamientos clave que marcan situaciones bien diferentes:

1.- El primero de ellos está relacionado con el empuje. Se sabe que a partir de  $s$  [0.5-0.6] hasta la situación de deslizador parado el empuje cae considerablemente. La potencia activa consumida por el motor así lo pone de manifiesto. Hasta dicha velocidad se mantiene fluctuante en torno a los 95 KW. Una vez la velocidad comienza a disminuir desde los 10 m/s a 0 m/s la potencia activa sigue la misma tendencia. El mínimo consumo se registra 83 KW.

2.- La función de la potencia reactiva consiste en suministrar energía para generar los campos eléctricos y magnéticos que permiten el funcionamiento de la máquina. Que la fuerza de atracción disminuya, aunque no lleguen a alcanzarse las condiciones de levitación, tiene su repercusión en el consumo de potencia reactiva. Se vio anteriormente que en  $s=0.8$  la fuerza vertical alcanza su mínimo. Esto quiere decir que a medida que la máquina se posiciona en condiciones de velocidad nula las fuerzas de repulsión electrodinámica van compensando las fuerzas de atracción magnética.

Es decir, al tratarse de un secundario constituido por elementos conductores, una disminución de la fuerza de atracción debe interpretarse como un reforzamiento de las fuerzas repulsivas resultado de mayores corrientes inducidas en el secundario consecuencia de variaciones de flujo magnético elevadas que tienen lugar a bajas velocidades.

La teoría electromagnética define la densidad de energía asociada a campos eléctricos y magnéticos que se propagan en un medio material como:

$$- \quad - \quad - \quad - \quad -$$

En situación de saturación, el término 2 vendrá fijado por la curva B-H del material. Sin embargo el campo eléctrico alcanza sus valores más elevados. Aquí estriba la razón del aumento de potencia reactiva consumida para dicho deslizamiento. La energía asociada a ambos términos y en especial al término 1 requiere un consumo de potencia. A medida que se aproxima el secundario a operar en condiciones de sustentación magnética se necesitan elevados campos eléctricos que en función de la conductividad del material impondrán el valor de las corrientes inducidas.

En conclusión, una disminución de la fuerza de atracción supone un aumento de la fuerza de repulsión lo que implica E y J elevados y por lo tanto un incremento en la potencia reactiva consumida.

Para 4 m/s la potencia reactiva asciende a unos 55 KVAR. Aproximadamente valor en el que permanece hasta que se detiene. La segunda gráfica evidencia este efecto. En este punto tienen lugar el máximo consumo medio de corriente y potencia aparente, en torno a los 95 A. y los 109 VA respectivamente.

### 3.5 Resultados del modelo 3 MLFT<sub>Al\_C\_Respaldo\_Aire</sub>:

#### 3.5.1 Fuerzas presentes en la máquina.

Este modelo suele conocerse por el nombre de río magnético. A diferencia de los dos modelos anteriores, la configuración del secundario que se propone prescinde del respaldo de Fe quedando exclusivamente constituido por la lámina de Al. La capa de Fe se elimina y se sustituye por aire o por cualquier material no conductor y de muy baja permeabilidad relativa. Las condiciones de simulación son:

CONDICIONES DE SIMULACION	
Tipo de Estudio	Transitorio
Tiempo de Simulación [ms]	60
Frecuencia Alimentación [Hz.]	50
Tensión de Línea [Voltios]	660
Conexión	Estrella
Entrehierro Mecánico [mm]	5
Entrehierro Magnético [mm]	15
Curva B-H	No aplica

Tabla 3.4: Condiciones de simulación en elementos finitos del modelo 3

Como curiosidad, el tipo de modelo ahora en estudio, presenta una serie de propiedades, que la sitúan al frente de aplicaciones realmente innovadoras. Una de ellas es la bomba para acero líquido. Una fábrica de coches de Leningrado utiliza este modelo de motor lineal para impulsar acero líquido remontando una pendiente de hasta 3°. El mismo acero líquido constituye el rotor, pues su temperatura está muy por encima del punto de Curie y no es magnético; su resistividad es mucho mayor que la del cobre o el aluminio, y se halla separado de los bobinados del estator por un material refractario para impedir que los deteriore. A pesar del bajo rendimiento, inferior al 0.1%, el dispositivo incorpora las siguientes ventajas [3]:

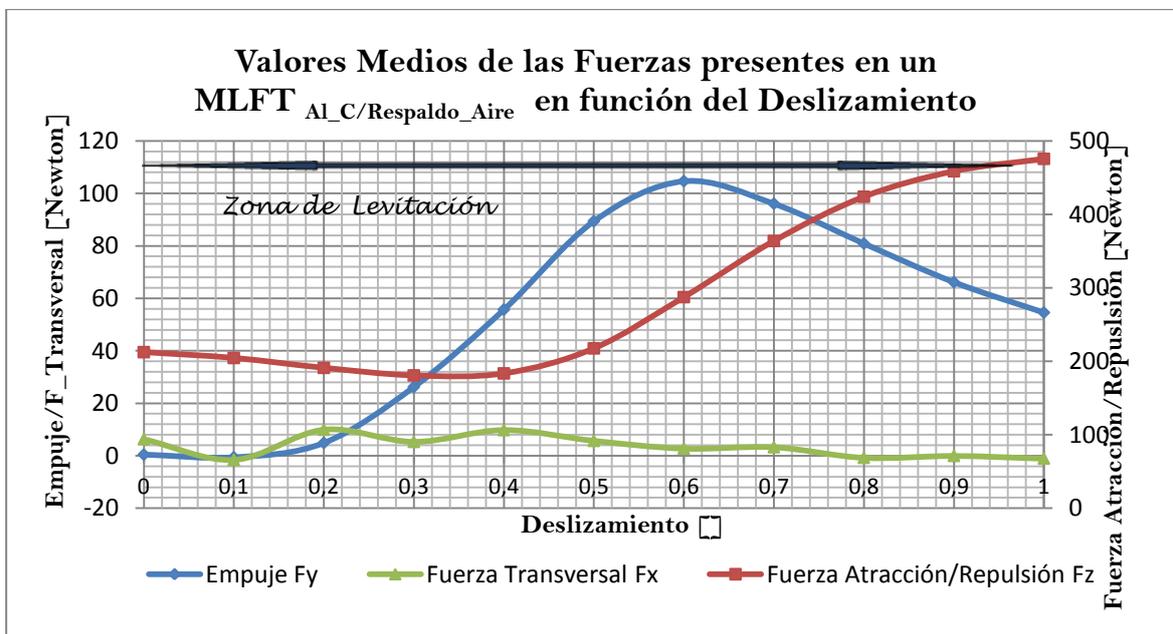
- 1.- Los gastos de acero líquido son la mitad que con cualquier otro sistema.
- 2.- Reducción de los gastos de mantenimiento, hasta un 40 %.
- 3.-La productividad del trabajo se multiplica por 3.
- 4.- El acero se depura, pues la escoria no conductora no es impulsada.

Es indispensable para entender bien los fenómenos más relevantes hacer un breve comentario al concepto de diamagnetismo. Sabemos, hoy, que la materia está constituida por átomos y éstos contienen protones y electrones, siendo los electrones, además, partículas de gran movilidad, dado que son mucho más ligeros que los iones positivos. Además del movimiento orbital, se sabe que los electrones tienen spin, una propiedad cuántica que podemos imaginar como una rotación sobre sí mismos. Por tanto, se espera que todos los materiales sean, en mayor o menor grado, susceptibles de interactuar con un campo magnético. Entonces, ¿por qué hay materiales que parecen no tener propiedades magnéticas y otros las exhiben tan fuertemente?. Todo depende de la estructura atómica y molecular de cada material.

En las sustancias ferromagnéticas, los momentos magnéticos asociados al movimiento orbital, y sobre todo al spin de los electrones, son tan grandes que cada dipolo acaba por orientarse espontáneamente, de acuerdo con el campo magnético creado por los vecinos. Por el contrario, ¿Qué le sucede a una sustancia sin “imanes”, a nivel atómico y molecular, es decir, que no tiene momentos magnéticos intrínsecos en un campo exterior B?. Se sabe que si se crea un campo magnético al lado de un circuito se va a inducir una fuerza electromotriz, que permanece en tanto dure la variación de flujo magnético. Es fuerza electromotriz da lugar a un campo magnético inducido, que tiende a contrarrestar la variación de flujo (Ley de Lenz). Por eso, las sustancias diamagnéticas son repelidas por los imanes, al contrario de las sustancias paramagnéticas y, en particular, de las ferromagnéticas.

Lo anterior explica los valores de  $\chi_m$ . La susceptibilidad magnética es un parámetro adimensional que expresa la proporción entre la magnetización o imanación  $M$  y la intensidad de campo magnético  $H$ .

- **Diamagnéticos:** si  $\mu_r \approx 1$  ( $\chi_m$  es del orden de  $-10^{-5}$ )
- **Paramagnéticos:** si  $\mu_r \approx 1$  ( $\chi_m$  es del orden de  $+10^{-3}$ )
- **Ferromagnéticos:** si  $\mu_r \gg 1$  ( $\chi_m$  tiene un valor elevado)



Gráfica 3.19: Valores Medios de las Fuerzas presentes en un MLFT<sub>AL\_C/Respaldo\_Aire</sub>

En la aplicación que nos ocupa, el Al como único material constituyente del secundario del motor lineal muestra esta tendencia repulsiva como respuesta al campo magnético móvil creado por el estator. Toda la curva Fuerza Vertical vs deslizamiento esta sometida a levitación.

Queda de manifiesto que a deslizamientos altos, es decir, velocidades bajas, mayor es la variación de flujo y mayores son las corrientes inducidas. Por lo tanto más elevada ha de ser la reacción de inducido causante de la fuerza vertical en sentido positivo. En el arranque llega a estar cercana a los 500 Newton. Sin duda alguna, esto le confiere a estos motores de inducción una característica nada desdeñable frente a otras configuraciones empleadas en la construcción de motores lineales.

Un claro ejemplo lo presentan los motores lineales síncronos (LSM), en particular aquellos con una configuración del secundario constituido por imanes permanentes (PM's) en disposición Halbach. En este tipo de motores las fuerzas de atracción llegan a ser tan elevadas que el que el diseño del bastidor y del recinto donde se alojan los imanes debe ser muy riguroso para evitar el pandeo y posterior rotura de la estructura.

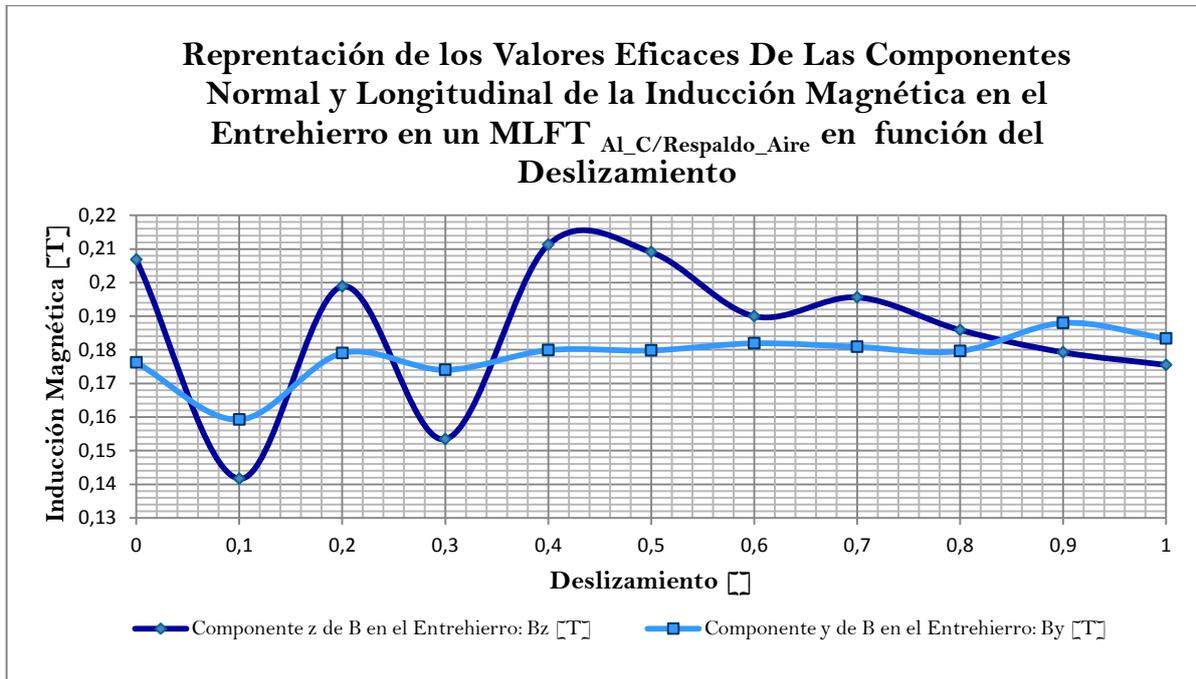
El empuje retorna de nuevo a la característica par-velocidad clásica de los motores de inducción rotativos. El empuje máximo se alcanza para  $s=0.6$  con una fuerza igual a 105 N. y en el arranque disminuye hasta los 50 N. aproximadamente. De nuevo las fuerzas en dirección transversal pueden asumirse insignificantes. A este modo de funcionamiento, bajo condiciones de levitación y empujes positivos, a lo largo de todo el rango de deslizamientos correspondientes al tramo de funcionamiento como motor se le denomina *río magnético*.

### **3.5.2 Inducciones en el Entrehierro.**

Íntimamente relacionado con lo anterior son los valores de las componentes  $z$  e  $y$  de la inducción magnética en el entrehierro. En este modelo deja de predominar la componente vertical frente a la longitudinal. La presencia de fuerzas repulsivas implica valores de  $B_y$  similares a los de  $B_z$ . que en algunos casos llegan a ser incluso superiores Como sucede en el arranque. A deslizador parado la fuerza de repulsión puede considerarse diez veces superior al empuje de arranque; para tal caso  $B_y$  supera a  $B_z$  en torno a 0,2 T. Como se detalló en el modelo 1 la dependencia de la fuerza de levitación con el cociente queda patente en la gráfica adjunta. A partir de  $s=0.4$  en adelante el valor de  $B_y$  no sufre grandes fluctuaciones y sin embargo la fuerza de repulsión va en aumento. Esto no sería posible sin una progresiva disminución de  $B_z$  tal y como puede observarse.

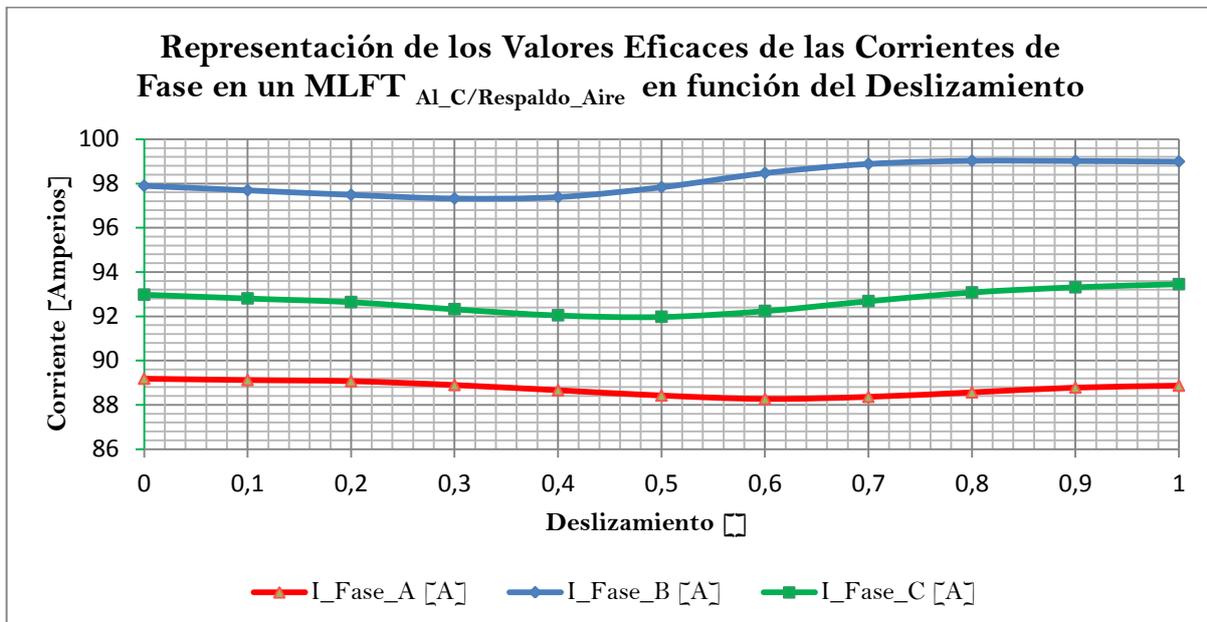
De manera aproximada se puede hablar de un valor de  $B_y$  medio rondando los 0.17 T y de  $B_z$  muy próximo a 0.185 T. Esto refleja que en una máquina de inducción lineal deben tenerse en consideración ambas componentes pues intervienen de manera decisiva en la fuerzas de tracción y levitación; mientras que en una máquina rotativa es la componente  $B_z$  la que únicamente interesa.

Debe comentarse, que los valores de inducción obtenidos en elementos finitos no corresponden al valor eficaz del primer armónico de  $B$ . Sino que la componente  $z$  e  $y$  de la inducción magnética es el valor correspondiente a la suma de los infinitos términos que la descomposición en serie de Fourier contempla. Los efectos de borde y las limitaciones del modelo introducido en elementos finitos añadirán importancia a los armónicos distintos del fundamental.



Gráfica 3.20: Componentes Normal y Longitudinal de la Inducción Magnética en el Entrehierro en un MLFT<sub>Al\_C/Respaldo\_Aire</sub>

### 3.5.3 Evolución de Corrientes y Factor de potencia.



Gráfica 3.21: Valores Eficaces de las Corrientes de Fase en un MLFT<sub>Al\_C/Respaldo\_Aire</sub>

Este modelo 3 presenta las características siguientes:

1.-La evolución de cada una de las corrientes de fase respecto al deslizamiento es bastante rígida respecto al cambio de velocidad del secundario. Vuelve a cumplirse la relación entre ellas:

En modelos anteriores se especificó la influencia en este desequilibrio de dos factores:

- Posición relativa de cada fase en el devanado estatórico.
- Clasificación del motor del motor lineal en la categoría de estator acortado.

Llegados a este punto merece la pena comentar un efecto adicional que diferentes autores, Laithwaite y Gieras entre otros, llaman efecto de borde dinámico. Dicho fenómeno trata de poner de manifiesto la importancia de la velocidad del deslizador en la trayectoria descrita por las líneas de flujo magnético según se trate del borde de ataque o del borde de salida. Se pone de relieve, en las imágenes adjuntas al respecto, un doble aspecto:

- Evidentemente, se toma como valor de referencia los valores de la inducción en el entrehierro correspondientes a la situación de arranque. Para un deslizamiento dado, se observa que a medida que la posición a lo largo de estator se sitúa más cercana al borde de salida el valor de la inducción aumenta respecto al de la situación de secundario parado y lo contrario sucede con el borde de ataque.
- Según la velocidad del secundario se aproxima a la velocidad de sincronismo media ( $s=0$ ) el efecto anterior queda aún más de manifiesto.

Este efecto refuerza el razonamiento descrito en los modelos anteriores. De manera general se sabe que:

tal que -

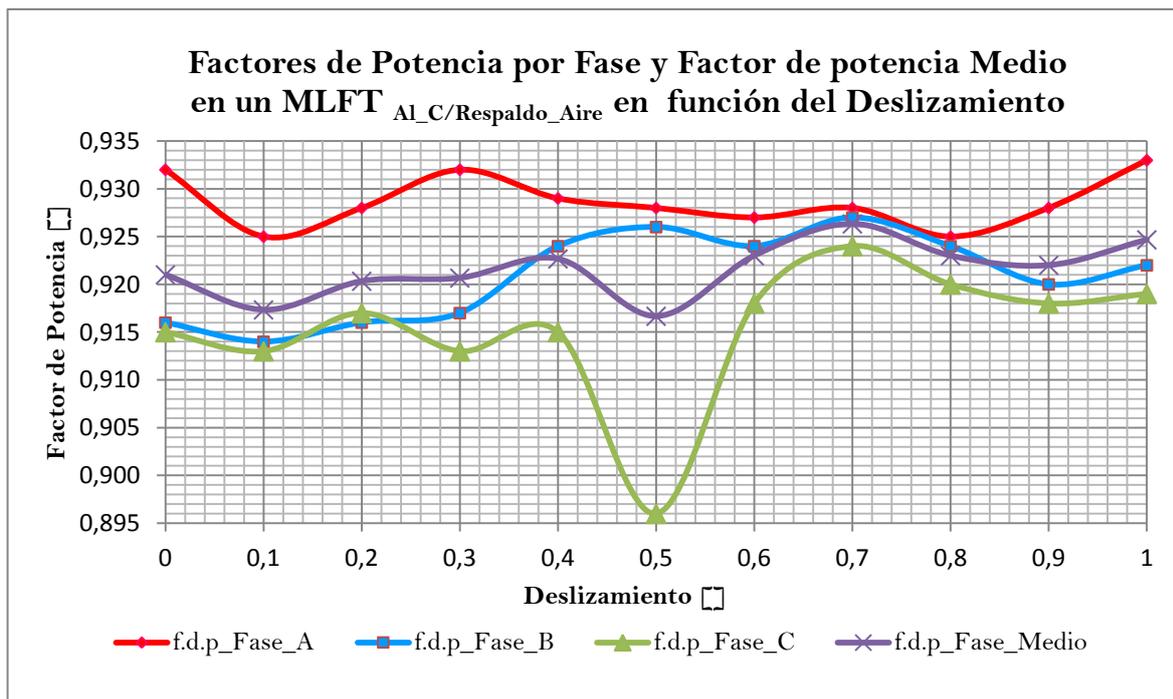
$$\frac{\text{---}}{\text{---}} \quad \frac{\text{---}}{\text{---}}$$

Nótese que, a elevadas velocidades, el circuito magnético de la fase B (borde de salida) no mejora con la presencia del secundario ya que el modelo que se está describiendo corresponde a un deslizador formado por una lámina de aluminio ( ). Lo mismo sucede con el borde de ataque; al abandonar el deslizador la región de entrada no empeora el circuito magnético de la fase A, pues el Al carece de propiedades magnéticas. Por lo tanto, los efectos del acortamiento del estator quedan atenuados al no variar las reluctancias asociadas a cada fase con la velocidad del secundario.

He aquí una justificación al valor tan estable que adquiere la corriente de cada fase.  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  se mantienen en torno a los 89, 98 y 92 amperios independientemente del valor del deslizamiento. Según lo razonado hasta el momento sería de esperar que las reluctancias de los extremos fuesen iguales y por lo tanto no hubiese desequilibrio entre las fases de los extremos (fase A y B). ¿Por qué no sucede así?. Por dos motivos fundamentalmente:

- La última ecuación muestra la dependencia de la corriente con el flujo total abarcado por el conjunto de bobinas asociadas a cada fase a pesar de no existir modificación del circuito magnético. El efecto de borde dinámico queda pues especialmente de manifiesto en este tipo de modelos conocidos como motores de secundario abierto.
- La asimetría del devanado. Como se comentó anteriormente, la construcción del devanado se ha adecuado a las posibilidades disponibles al introducir el modelo en elementos finitos.

Evidentemente, el factor de potencia quedará determinado por lo comentado del siguiente modo:



Gráfica 3.22: Factores de Potencia en un MLFT <sub>Al\_C/Respaldo\_Aire</sub>

Nota: Se pide prestar atención a la escala empleada en el eje de ordenadas, la cual está limitada en un rango de valores bastante restringido [0,895-0,935]. Los f.d.p de cada fase, aunque presentan variaciones, están acotados entre límites muy cercanos entre sí.

Para la máxima velocidad, a la vista de lo expuesto previamente, lo que cabe esperar es:

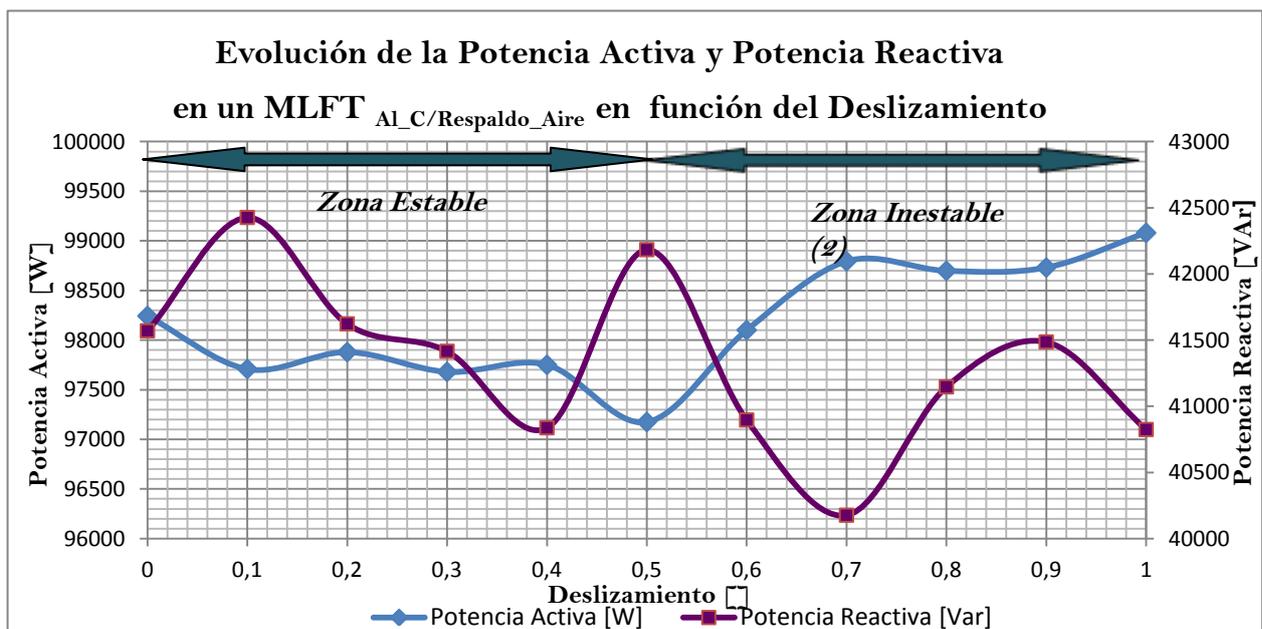
Sin embargo nos encontramos un resultado diferente:

La causa de que el efecto de borde dinámico quede ensombrecido radica en la manera en la que el devanado ha sido representado. La disposición en cuatro capas obliga a que las fases situadas en los bordes extremos no presenten la misma inductancia. Además el paso de bobina transversal varía de dimensión según las bobinas de una misma fase se encuentren en una capa u otra. Todo ello añade asimetrías entre las fases extremas de tal forma que el flujo abarcado por ellas no podrá ser nunca coincidente. Lo mismo ocurre con la fase C que ocupa la posición central; su representación no corresponde a una posición centrada en la mitad del estator. Todo ello explica esta pequeña desviación en los resultados obtenidos.

Es interesante comprobar que a pesar de tratarse de un modelo de secundario abierto el f.d.p medio es bastante elevado, de valor medio 0,922. He aquí, una ventaja de la elección del perfil en E que constituye el estator del motor, cuyas columnas laterales recogen prácticamente la totalidad del flujo de dispersión de cabezas de bobina. Dicho de otra manera, es como si las bobinas tuvieran todos sus lados activos, pues el flujo transversal se cierra a través de los dientes laterales.

### 3.5.4 Consumo de Potencias y Rendimientos.

La evolución de la corriente va a determinar el comportamiento de las potencias activa, reactiva y aparente; cuyos valores apenas sufren fluctuaciones a medida que el deslizamiento aumenta.



Gráfica 3.23: Potencia Activa y Potencia Reactiva en un MLFT Al\_C/Respaldo\_Aire

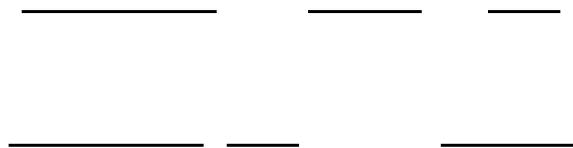
El empuje máximo divide al motor en dos zonas de funcionamiento [2]:

- Zona 1: Es la zona estable del motor en la que se obtiene un aumento del empuje conforme el motor disminuye su velocidad, lo que implica una .
- Zona 2: Es la zona inestable del motor en la que

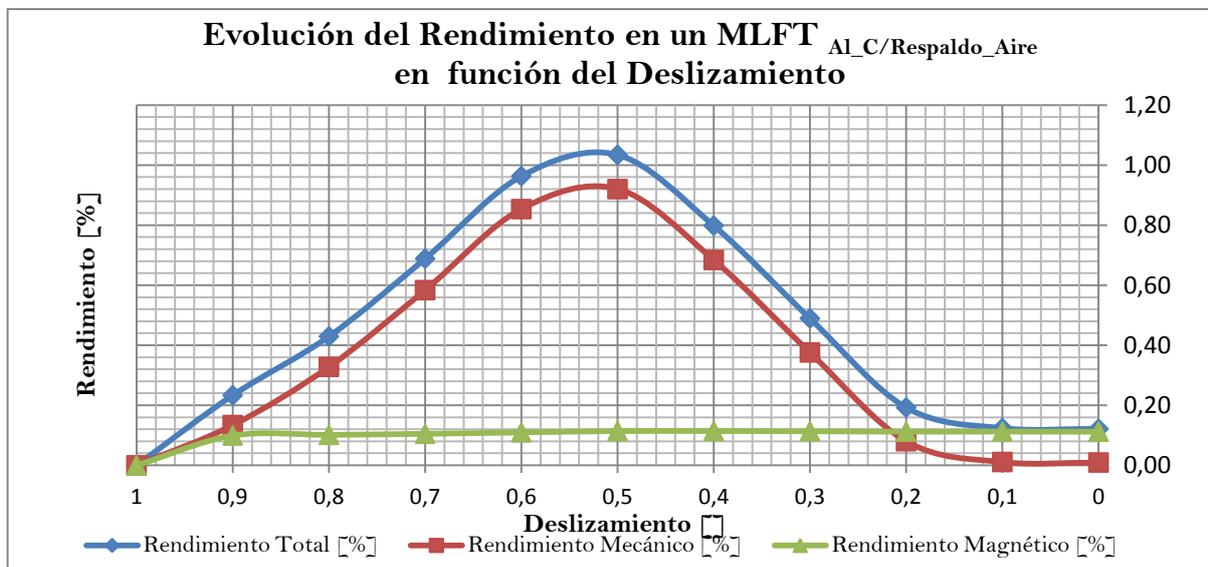
La zona inestable es la que presenta un mayor consumo de potencia activa. Su tendencia es creciente a medida que el motor se aproxima a la situación de arranque. Por el contrario el consumo de potencia reactiva es algo menor en la zona inestable que en la zona 1. Presenta un mínimo para  $s=70\%$  a partir del cual vuela a aumentar.

En la zona estable, la tendencia de ambas potencias es decreciente a medida que la velocidad decae. Si bien en  $s_{m\acute{a}x}$  el comportamiento de la potencia activa y reactiva deja de ser parejo pues la potencia reactiva en este punto característico se torno con pendiente positiva hasta alcanzar un máximo relativo cercano a los 42 KVAR.

Cualitativamente puede decirse que la potencia activa y reactiva son función de 3 parámetros fundamentales: deslizamiento, corrientes inducidas y resistividad en el secundario [3]:



Para concluir este tercer modelo destacar el rendimiento tan bajo que presenta un motor lineal de inducción con secundario de Al. Su valor máximo en  $s=0.5$  no llega a superar el 1.1 %.



Gráfica 3.24: del Rendimiento en un MLFT Al\_C/Respaldo\_Aire

No puede finalizar el capítulo sin mencionar las posibilidades disponibles por el diseñador para mejorar el rendimiento de la máquina. En el diseño de motores lineales, se introduce un nuevo parámetro conocido como **factor de calidad G**, que nos da idea de los elementos a considerar para mejorar el . La intención de incorporar el factor G es la necesidad de expresar la capacidad de una máquina para transformar potencia de una forma en otra. Además, sería interesante expresar la ecuación del factor de calidad en función de las dimensiones físicas de la máquina. De forma cualitativa G se define como [3]:

$$G = \frac{A_{\text{efectiva}}}{l_{\text{entrehierro}}}$$

Se toma el área efectiva del circuito magnético proporcional al paso polar  $p$  y al ancho  $w$ . En primera aproximación, la longitud del circuito magnético se toma el entrehierro.

$$G = \frac{p \cdot w}{l_{\text{entrehierro}}}$$

El rendimiento queda definido como función de cuatro parámetros:

$$\eta = f\left(\frac{R_2}{R_1 G}, \text{Deslizamiento}, R_{\text{estática}}, R_{\text{equivalente}}\right)$$

- Deslizamiento.
- Resistencia estática.
- Resistencia equivalente del secundario, dependiente del número de capas.
- Factor de calidad.

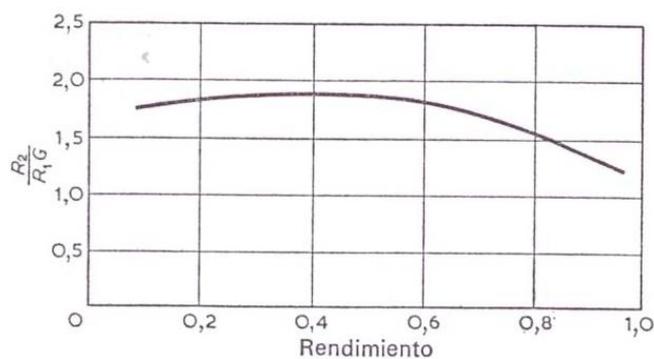


Figura 3.9: Evolución del rendimiento frente al cociente  $R_1/R_2G$

## Capítulo 4:

### Estudio Económico del Proyecto.

## 4.1 Descripción de costes.

Se realiza un pequeño estudio económico en el que se desglosan las distintas partidas presupuestarias para la realización del proyecto:

1.- Licencia Software Elementos Finitos Flux 10.3.1.

- El coste inicial es de 22.000 €.
- Se considera un período de amortización de cinco años y cuatro años de antigüedad.
- El factor de utilización es del 100% pues el equipo se mantiene en funcionamiento las 24 h.
- El coste de mantenimiento anual de la licencia es del 15%.

2.- Ordenador personal HP Pavilion/Ordenador Portátil DELL.

- El coste inicial es de 1.500 €.
- Se considera un período de amortización de cinco años y cuatro años de antigüedad.
- El factor de utilización es del 100% pues el equipo se mantiene en funcionamiento las 24 h.

- El coste inicial es de 1.000 €.
- Se considera un período de amortización de 3 años y 2 años de antigüedad.
- El factor de utilización es del 80%.

3.- Para aquellos materiales de nueva adquisición.

- Disco Duro Externo de 2TB:
- Material de Oficina:
- Material Bibliográfico:

4.- En cuánto a los recursos humanos se refiere.

- Ingeniero Senior: Javier José María Rivas Conde.  $C_{\text{horario}} = 60 \text{ €/h}$ .
- Ingeniero Junior: Juan Antonio Domínguez Hernández.  $C_{\text{horario}} = 12 \text{ €/h}$ .

Notas:

- a. La duración del proyecto ha sido de 6 meses.
- b. Se obvia el coste asociado al interés debido a la inflación.

<b>DESGLOSE DE COSTES ASOCIADOS AL PROYECTO</b>		
<b>Id.</b>	<b>Recursos Materiales</b>	<b>Costo [€]</b>
1	Licencia Software Flux 10.3	3.850
2	Ordenador Personal HP Pavilion	150
3	Ordenador Portátil DELL	45
4	HD Iomega 2TB	100
5	Material Fungible	20
6	Material Bibliográfico	40
<b>TOTAL</b>		<b>4.205</b>
<b>Id.</b>	<b>Recursos Humanos</b>	<b>Costo [€]</b>
1	Ingeniero Senior	7.200
2	Ingeniero Junior	11.520
<b>TOTAL</b>		<b>18.720</b>
<b>Coste Total Proyecto [€]</b>		
<b>22.925</b>		

Tabla 4.1: Evaluación de costes asociados al proyecto.

## **ANEXO 1:**

**Fuerza Magnetomotriz producida por un devanado trifásico alimentado por corrientes desequilibradas.**

**“Campo giratorio elíptico”**

Cuando un devanado trifásico está recorrido por corrientes desequilibradas sinusoidales, la determinación de la f.m.m. resultante requiere el empleo de las componentes simétricas. De acuerdo con el teorema de Fortescue, tres corrientes desiguales (en general tanto en magnitud como en fase)  $[i_a, i_b, i_c]$  se pueden considerar como la superposición de tres sistemas trifásicos de corrientes equilibradas, denominados directo o de secuencia positiva, inverso o de secuencia negativa, y homopolar o de secuencia cero, de acuerdo con las expresiones siguientes [2]:

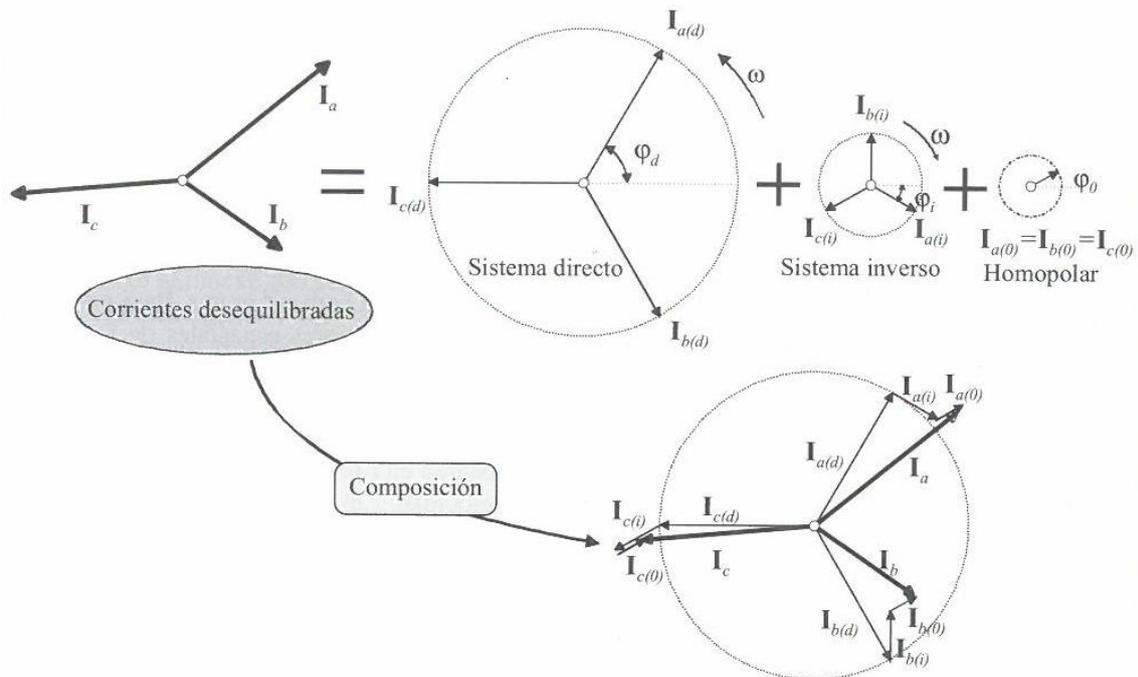


Figura A1.1: Sistema trifásico desequilibrado y sus componentes simétricas

El sistema de corrientes de secuencia directa al pasar por las tres fases de un devanado trifásico, produce una f.m.m. resultante en un punto P del entrehierro que forma  $90^\circ$  eléctricos con el eje del devanado AA', que según la expresión siguiente toma el valor:

Y cuyo resultado es:

-

Las expresiones de \_\_\_\_\_ y de la velocidad del campo giratorio son:

- \_\_\_\_\_ -

De un modo análogo el sistema de corrientes de **secuencia inversa** produce una f.m.m. resultante en el entrehierro de valor:

-

Las expresiones de \_\_\_\_\_ y de la velocidad del campo giratorio son:

- \_\_\_\_\_ -

El **sistema homopolar** no produce ninguna f.m.m. resultante ya que se cumple:

En definitiva la f.m.m. resultante o total se compone de una f.m.m. directa y otra inversa, es decir:

- \_\_\_\_\_ -

Para mayor claridad se muestra la evolución de los fasores espaciales de f.m.m. directa e inversa en seis periodos de tiempo separados  $T/6$  segundos y que son:

- - - - -

Se observa:

- 1.-En el caso de la f.m.m. directa el fasor gira en sentido positivo a una velocidad angular  $[\text{rad/s}]$ , que corresponde a una velocidad en r.p.m.  $n=60f/p$ .
- 2.-La f.m.m. inversa gira en sentido contrario a la misma velocidad.
- 3.-Los radios correspondientes a cada círculo representan los valores máximos.
- 4.-El lugar geométrico del fasor espacial de la f.m.m. resultante es una elipse.

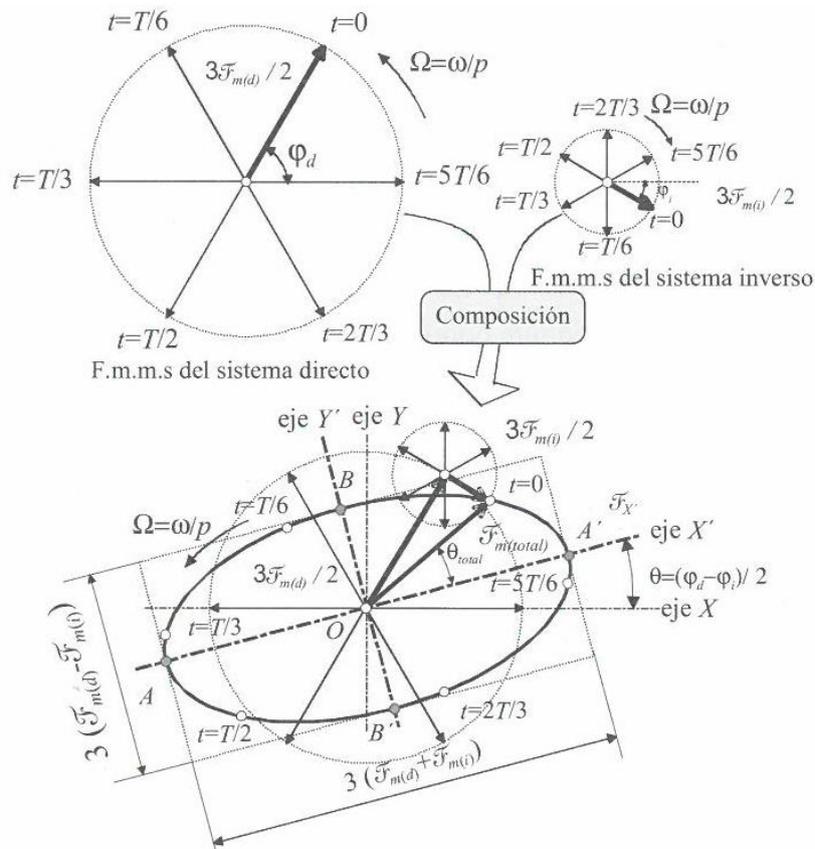


Figura A1.2: Campo elíptico producido por un sistema de corrientes desequilibrado.

Para una mejor comprensión se especifica con detalle la suma de ambos fasores e n el instante de tiempo  $t=0$ :

- Los puntos de la elipse A y A' son aquellos en los que los fasores directo e inverso coinciden en dirección y sentido y corresponden a los puntos del semieje mayor de la elipse en los que la f.m.m. vale:

—

- Los puntos de la elipse B y B' son aquellos en los que los fasores directo e inverso coinciden en dirección pero tienen sentido contrario y corresponden a los puntos del semieje menor de la elipse en los que la f.m.m. vale:

—

En definitiva la ecuación de la elipse respecto a los ejes X' e Y' viene expresada por:

Notas:

- El ángulo que forman los ejes OX y OX' es  $\theta$ .
- El afijo de la f.m.m. resultante en el entrehierro se mueve con una velocidad media constante en sentido directo que es igual a  $\omega$  [rad/s], sin embargo la velocidad instantánea es variable, siendo máxima cuando la amplitud es mínima (puntos B y B') y es mínima cuando la amplitud es máxima (puntos A y A').

El programa desarrollado en Matlab para llevar a cabo esta representación se adjunta a continuación:

```
num = xlsread('CORRIENTES_POTENCIAS_2.xls',2,'C12:H16');
```

```
ValorEficaz=num(1:5,1:2:6);
```

```
Desfase=num(1:5,2:2:6);
```

```
[F_Resultante,F_Directo,F_Inverso]=  
FMM_GIRATORIO(ValorEficaz(1,:),Desfase(1,:));
```

```
function[F_Resultante,F_Directo,F_Inverso]=FMM_GIRATORIO(ValorEficaz,Desfase)
```

```
%Operador a:
```

```
a=exp(1j*120*pi/180);
```

```
F_Resultante=zeros(81,1);
```

```
F_Directo=zeros(81,1);
```

```
F_Inverso=zeros(81,1);
```

```
i=1;
```

```
for tiempo=0:0.00025:0.02
```

```
    frecuencia=50;
```

```
    w=2*pi*frecuencia;
```

```
    M_Fortescue= [1 1 1;1 a^2;1 a^2 a];
```

### %CORRIENTES DE FASE.

$I_a = \sqrt{2} * \text{ValorEficaz}(1) * \exp(-1j * \text{Desfase}(1) * \pi / 180) * \exp(1j * w * \text{tiempo});$

$I_b = \sqrt{2} * \text{ValorEficaz}(2) * \exp(-1j * (120 + \text{Desfase}(2)) * \pi / 180) * \exp(1j * w * \text{tiempo});$

$I_c = \sqrt{2} * \text{ValorEficaz}(3) * \exp(-1j * (240 + \text{Desfase}(3)) * \pi / 180) * \exp(1j * w * \text{tiempo});$

$I_{\text{Trifasica}} = [I_a; I_b; I_c];$

### %DESCOMPOSICIÓN EN COMPONENTES SIMÉTRICAS

$I_{\text{simetricas}} = (1/3) * M_{\text{Fortescue}} * I_{\text{Trifasica}};$

### NDAS ESPACIALES DE TENSION MAGNÉTICA

#### %SISTEMA\_DIRECTO

$\text{Mod\_directo} = \text{abs}(I_{\text{simetricas}}(2));$

$\text{Theta\_directo} = \text{angle}(I_{\text{simetricas}}(2)) * 180 / \pi;$

$F_{\text{Directo}}(i,1) = (3/2) * \text{Mod\_directo} * \exp(1j * (w * \text{tiempo} + \text{Theta\_directo} * \pi / 180));$

#### %SISTEMA\_INVERSO

$\text{Mod\_Inverso} = \text{abs}(I_{\text{simetricas}}(3));$

$\text{Theta\_Inverso} = \text{angle}(I_{\text{simetricas}}(3)) * 180 / \pi;$

$F_{\text{Inverso}}(i,1) = (3/2) * \text{Mod\_Inverso} * \exp(-1j * (w * \text{tiempo} + \text{Theta\_Inverso} * \pi / 180));$

#### %SISTEMA\_TOTAL

$F_{\text{Resultante}}(i,1) = F_{\text{Directo}}(i,1) + F_{\text{Inverso}}(i,1);$

$i = i + 1;$

end

plot(real(F\_Resultante), imag(F\_Resultante), real(F\_Directo), imag(F\_Directo),  
real(F\_Inverso), imag(F\_Inverso))

title ('CAMPO ELIPTICO PRODUCIDO POR UN SISTEMA DE CORRIENTES  
DESEQUILIBRADAS','Color','b')

end

**ANEXO 2:**  
**Clasificación de los Motores Lineales de Inducción [8]**

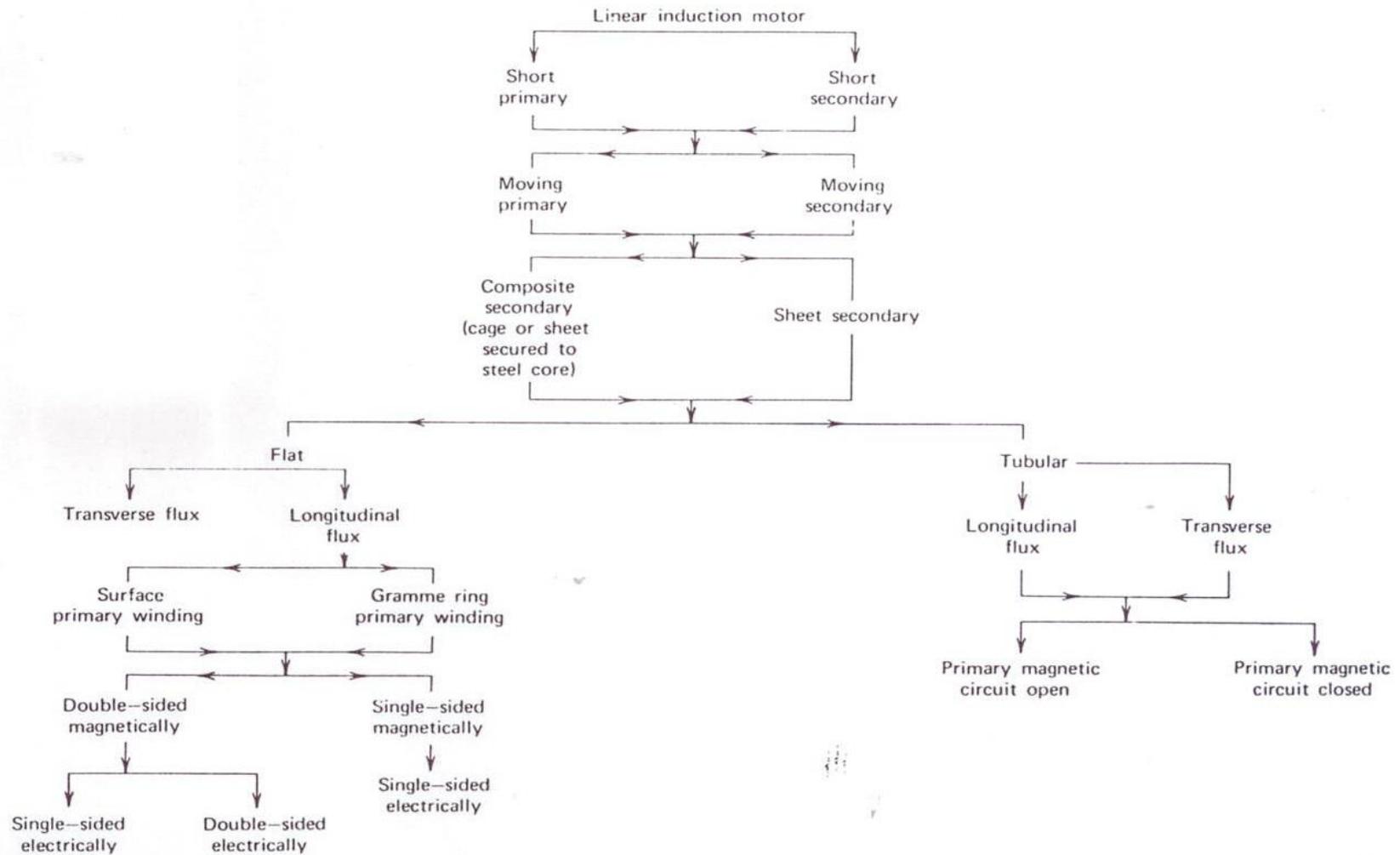


Figura A2.1: Clasificación de los motores lineales de inducción.

## **ANEXO 3:**

# **Trabajos Futuros**

Se proponen para futuros trabajos de optimización del motor dos orientaciones que pueden contribuir a alcanzar mayores empujes:

- Añadir al modelo una culata de Fe con el objetivo de que el flujo longitudinal se sume al transversal.
- Incrementar la anchura de las ranuras transversales. La finalidad es tratar de modificar el circuito magnético del estator de tal manera que se llegue a anular el efecto indeseado en los dientes laterales.

Por otro lado sería interesante realizar los siguientes trabajos:

- 1.- Cuantificación de los efectos de borde longitudinal y transversal para añadir tales efectos al circuito equivalente del motor. Estos fenómenos se tratarán como una impedancia en paralelo con la inductancia de magnetización.
- 2.- Obtener el circuito equivalente del motor en secuencia directa e inversa.
- 3.- Obtener el modelo anterior en ejes d-q y llevar a cabo un control vectorial del motor lineal.

Todo lo anterior será interesante llevarlo a cabo, además, con las dos topologías que a continuación se proponen con el objetivo de llegar a la selección de un motor lineal de flujo transversal lo más optimizado posible; por un lado alcanzar mayores valores de empuje y fuerzas de repulsión y por otro un buen comportamiento frente a la estrategia de control diseñada.

- Modelo A: Motor lineal monolátero de secundario acortado.
- Modelo B: Motor Lineal bilátero tanto de estator como de secundario acortado.

## ANEXO 4:

# Datos Completos de las Simulaciones

**DATOS CORRESPONDIENTES AL MODELO 1: MLFT<sub>Al C Fe Lineal</sub>**

<b><u>FUERZAS PRESENTES EN EL MODELO 1</u></b>			
<b>slip (s)</b>	<b>EMPUJE F<sub>y</sub> [Newton]</b>	<b>FUERZA Atracción/Repulsión F<sub>z</sub> [Newton]</b>	<b>FUERZA Transversal F<sub>x</sub> [Newton]</b>
0	2,28656355	-798,5928172	13,33901302
0,1	27,85894521	-597,815438	7,065939213
0,2	95,90846738	-516,4872514	10,76066198
0,3	188,9362869	-513,1743948	-1,519857373
0,4	285,8389342	-529,3221441	-0,353006124
0,5	459,3727718	-563,655018	-3,068142635
0,6	233,7232791	66,31038844	-0,79442468
0,7	148,7886248	281,8479585	-2,382029896
0,8	112,6166402	369,5119781	0,000840611
0,9	91,827588	412,0419975	0,000840611
1	79,16863735	418,1841751	-0,643928328

Tabla A4.1: Fuerzas presentes en el modelo 1.

<b><u>INDUCCIONES EN EL ENTREHIERRO DEL MODELO 1</u></b>		
<b>slip (s)</b>	<b>B<sub>z</sub>_Entrehierro [T]</b>	<b>B<sub>y</sub>_Entrehierro [T]</b>
0	-0,040435937	-0,067680459
0,1	-0,001160544	0,112597102
0,2	-0,106540836	0,110183225
0,3	-0,296180141	0,115491195
0,4	-0,4254254	0,110090804
0,5	-0,548533365	0,140103428
0,6	-0,267258439	0,168369302
0,7	-0,188814572	0,138451365
0,8	-0,220928008	0,128869432
0,9	-0,194279625	0,110946667
1	-0,192058256	0,111179681

Tabla A4.2: Inducciones presentes en el modelo 1.

**PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MODELO 1**

slip (s)	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	cos_a	cos_b	cos_c	cos_medio	Potencia Activa Total [W]	Potencia Reactiva Total [VAr]
0	92,8239546	99,53871005	95,52845647	0,928	0,934	0,916	0,926	101579,8773	41327,3753
0,1	92,20786022	98,82312471	93,64096983	0,925	0,931	0,917	0,924	100266,0056	41323,4405
0,2	90,30085936	97,46540671	92,67777446	0,926	0,932	0,915	0,924	98776,73353	40694,24585
0,3	89,1875084	97,26533268	91,5250289	0,926	0,942	0,923	0,930	98560,57676	38683,96067
0,4	88,90759836	98,00254332	90,97067547	0,928	0,947	0,924	0,933	98820,56586	37868,89194
0,5	94,40045471	104,0519437	95,80129624	0,861	0,922	0,889	0,891	99967,5557	50356,19891
0,6	88,91021196	101,3851051	92,42113842	0,940	0,933	0,929	0,934	100594,3403	38489,83328
0,7	88,875758	100,2910274	93,5539209	0,940	0,927	0,929	0,932	100364,7678	39075,29602
0,8	89,24098129	99,43538933	93,62358878	0,940	0,923	0,924	0,929	99888,13505	39818,47379
0,9	89,40327286	98,81327106	93,46200845	0,940	0,924	0,922	0,929	99637,02859	39805,01533
1	89,39307824	89,19643979	93,19651687	0,941	0,922	0,923	0,929	96156,16628	38347,33659

Tabla A4.3: Parámetros eléctricos del modelo 1.

**DATOS CORRESPONDIENTES AL MODELO 2: MLFT** Al C. Fe. No. Lineal

<b><u>FUERZAS PRESENTES EN EL MODELO 2</u></b>			
<b>slip (s)</b>	<b>EMPUJE Fy [Newton]</b>	<b>FUERZA Atracción/Repulsión Fz [Newton]</b>	<b>FUERZA Transversal Fx [Newton]</b>
0	620,9991015	-5113,115641	-9,36841496
0,1	754,7953432	-4564,51265	-31,85167545
0,2	762,3656557	-3865,038705	-8,912569267
0,3	763,0064367	-3290,916874	-1,516824748
0,4	760,7312939	-2726,681189	-7,656740495
0,5	676,9265796	-2016,955955	-8,072637599
0,6	506,7591581	-1497,311542	-2,558056018
0,7	304,7937221	-1020,703729	-2,730890419
0,8	169,0098792	-852,4901754	-6,628206359
0,9	86,17966196	-960,4016532	-5,625657372
1	93,25753971	-1475,683284	-6,278228456

Tabla A4.4: Fuerzas presentes en el modelo 2.

<b><u>INDUCCIONES EN EL ENTREHIERRO DEL MODELO 2</u></b>		
<b>slip (s)</b>	<b>Bz_Entrehierro [T]</b>	<b>By_Entrehierro [T]</b>
0	0,624398739	0,153645007
0,1	0,578675284	0,152019644
0,2	0,511284702	0,155431448
0,3	0,479651317	0,15585334
0,4	0,426386094	0,173317035
0,5	0,344814867	0,183543532
0,6	0,339602115	0,204566113
0,7	0,253078472	0,202025772
0,8	0,298486096	0,191535129
0,9	0,315620588	0,183421452
1	0,360459692	0,164063407

Tabla A4.5: Inducciones presentes en el modelo 2.

**PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MODELO 2**

slip (s)	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	cos_a	cos_b	cos_c	cos_medio	Potencia Activa Total [W]	Potencia Reactiva Total [VAr]
0	88,25097428	94,84182593	89,32983191	0,903	0,878	0,905	0,895	92889,80056	46221,08694
0,1	87,01219029	96,98801382	89,378081	0,917	0,955	0,905	0,926	96507,64099	38670,63354
0,2	84,61340341	96,90951181	86,59037314	0,898	0,943	0,920	0,920	94119,05834	39401,7439
0,3	83,04311179	96,91836689	84,87108568	0,900	0,930	0,916	0,915	92436,23739	40336,22479
0,4	82,15528845	100,3324139	85,29380269	0,911	0,935	0,929	0,925	94446,93486	38492,25119
0,5	81,50555604	104,9050465	87,26955157	0,914	0,932	0,926	0,924	96423,16997	39638,46643
0,6	81,21259434	108,2701445	90,45106011	0,924	0,880	0,927	0,910	96837,35919	44350,39969
0,7	81,92968947	108,8676921	94,77756738	0,892	0,841	0,905	0,879	95407,24273	51913,47419
0,8	83,30839627	105,4254963	95,45879242	0,882	0,839	0,868	0,863	93264,31514	54873,82037
0,9	83,47328019	101,5889507	83,47328019	0,876	0,798	0,852	0,842	85843,03793	55315,5527
1	80,04601849	97,06138543	86,85527318	0,861	0,799	0,823	0,828	83040,30587	56546,19592

Tabla A4.6: Parámetros eléctricos del modelo 2.

**DATOS CORRESPONDIENTES AL MODELO 3: MLFT, Al C Respaldo Aire**

<b><u>FUERZAS PRESENTES EN EL MODELO 3</u></b>			
<b>slip (s)</b>	<b>EMPUJE Fy [Newton]</b>	<b>FUERZA Atracción/Repulsión Fz [Newton]</b>	<b>FUERZA Transversal Fx [Newton]</b>
0	0,458908459	212,4840301	6,297858068
0,1	-0,598097733	204,5719115	-1,54504586
0,2	4,909596496	191,1174122	9,918866625
0,3	26,23466448	180,782355	5,303987416
0,4	55,72340676	183,5527798	9,781136023
0,5	89,42401026	217,6227155	5,687223527
0,6	104,6710551	287,396421	2,727840636
0,7	96,09028053	363,8590229	3,251881596
0,8	80,91269852	424,0466923	-0,75508526
0,9	66,17822468	458,8120052	-0,045132505
1	54,5892	475,631	-1,069

Tabla A4.7: Fuerzas presentes en el modelo 3.

<b><u>INDUCCIONES EN EL ENTREHIERRO DEL MODELO 3</u></b>		
<b>slip (s)</b>	<b>Bz_Entrehierro[T]</b>	<b>By_Entrehierro[T]</b>
0	0,206827576	0,176244434
0,1	0,141629905	0,159262113
0,2	0,198878507	0,179024471
0,3	0,153401897	0,174054012
0,4	0,211273723	0,17991708
0,5	0,209080515	0,179828087
0,6	0,190010926	0,181957841
0,7	0,195615301	0,180907779
0,8	0,185900232	0,179640911
0,9	0,179266907	0,187999194
1	0,175497786	0,183378292

Tabla A4.8: Inducciones presentes en el modelo 3.

**PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MODELO 3**

slip (s)	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	cos_a	cos_b	cos_c	cos_medio	Potencia Activa Total [W]	Potencia Reactiva Total [VAr]
0	89,1786997	97,89122038	92,97479159	0,932	0,916	0,915	0,921	98242,69415	41569,54755
0,1	89,1175444	97,68829312	92,80428585	0,925	0,914	0,913	0,917	97707,8849	42426,50525
0,2	89,0673513	97,48282473	92,63903881	0,928	0,916	0,917	0,920	97878,43063	41622,43963
0,3	88,89241331	97,31825161	92,31910666	0,932	0,917	0,913	0,921	97679,22183	41415,17914
0,4	88,65659495	97,38246259	92,0430473	0,929	0,924	0,915	0,923	97750,41172	40836,89405
0,5	88,41927412	97,82634998	91,9756929	0,928	0,926	0,896	0,917	97174,24328	42183,25173
0,6	88,26558077	98,46717766	92,23821036	0,927	0,924	0,918	0,923	98100,08675	40895,76957
0,7	88,35911636	98,88235015	92,68226084	0,928	0,927	0,924	0,926	98793,15049	40175,99307
0,8	88,56218437	99,02400702	93,07624331	0,925	0,924	0,920	0,923	98697,42016	41146,11013
0,9	88,7763778	99,01466375	93,30805345	0,928	0,920	0,918	0,922	98730,34444	41485,61478
1	88,86458305	98,98582637	93,44734056	0,933	0,922	0,919	0,925	99080,45736	40823,72742

Tabla A4.9: Parámetros eléctricos del modelo 3.

## **Bibliografía:**

### **Electricidad y Magnetismo:**

- [1] Jesús Fraile Mora."Electromagnetismo y Circuitos Eléctricos". Cuarta Edición, 2005. Edición McGraw Hill.

### **Máquinas Eléctricas:**

- [2] Jesús Fraile Mora."Máquinas Eléctricas". Sexta Edición, 2008. Edición McGraw Hill.
- [3] Eric R. Laithwaite."Máquinas de inducción especiales". Primera edición, 1976. Editorial Labor.
- [4] Javier José María Rivas Conde." Estudio de la interacción magneto-eléctrica en el entrehierro de los motores de inducción de flujo transversal. Aplicación al diseño de un prototipo para tracción ferroviaria de tren monoviga". Tesis doctoral, UPM 2003.
- [5] Luis Serrano Iribarnegaray."Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas". Primera Edición. Editorial Marcombo. Boixerau Editores.
- [6] Luis Serrano Iribarnegaray."Teoría de los fasores espaciales: Introducción y Aplicaciones Industriales". Primera Edición. Editorial Marcombo. Boixerau Editores.
- [7] Jacek F. Gieras. "Linear Induction Drives". Clarendon Press. Oxford 1994.
- [8] S.A.Nasar, I.Boldea. "Linear Motion Electric Machine". Wiley-Interscience Publications JOHN WILEY & SON, 1976.
- [9] Javier Sanz Feito."Máquinas Eléctricas".2002.
- [10] Thomas A. Lipo. "Introduction to AC Machine Design". Wisconsin Power Electronics Research Center University Of Wisconsin, 2004.

