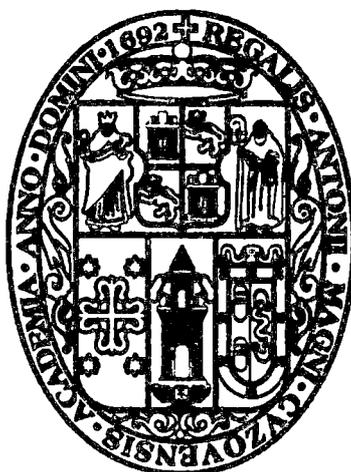


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

“ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA”



“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA MAQUINA LINEAL MODELO LMS – 23”

Presentado por:

- **Br. Banish Huber Rodolfo Callata Ocaña**
- **Br. Darcy Jhonson Huamanttica Salas**

Para optar al Título de Ingeniero Electricista

Asesor:

Ing. Mario Gonzales Vargas

CUSCO – PERÚ

2015

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y sabiduría necesaria para concluir este presente trabajo con satisfacción y alegría.

A mis padres Fidel y Matilde por darme el apoyo necesario para concluir con mis estudios universitarios y poder llegar a ser un buen profesional.

A mi hermano Edison por ser ejemplo a seguir, a mis hermanos Eric, Kevin y hermana Ruth por su apoyo y comprensión en cada momento que lo necesitaba.

A todos mis amigos por su confianza y apoyo incondicional.

¡Gracias a todos ustedes!

DARCY.

A mis padres, porque creyeron en mí y me sacaron adelante dándome ejemplos dignos de superación y entrega, hay puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera. Y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que hizo que vaya hasta el final.

A mis hermanos, tíos, y primos. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

A todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo sincero e incondicional.

HUBER

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento y gratitud a la UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO, a nuestra FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA, INFORMATICA Y MECANICA. EN ESPECIAL A NUESTRA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRICA por habernos acogido durante todo el tiempo de nuestros estudios universitarios.

Agradecemos el presente trabajo de investigación a todos los que aportaron y ayudaron en la realización del presente trabajo de investigación.

Atte. DARCY y HUBER

PRESENTACION

El trabajo de investigación denominado: "Evaluación Experimental de la Máquina Lineal Modelo LMS-23", Nos permitirá entender de mejor manera el funcionamiento y comportamiento del motor lineal, como vemos en los últimos años, los motores lineales han cobrado gran importancia a nivel mundial, por las diversas aplicaciones que tienen en el área industrial y de transporte, en operaciones dónde los motores rotativos, necesitan de otros componentes o mecanismos para convertir el movimiento rotatorio en movimiento lineal, lo cual es necesario para realizar algunas tareas deseadas. El uso de dichos mecanismos, incrementa las pérdidas de energía y por consiguiente se disminuye la eficiencia del conjunto.

Por lo mencionado anteriormente se presenta este trabajo de tesis a los docentes jurados de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, al decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica, así como, a la comunidad académica de la Escuela profesional de Ingeniería Eléctrica, con el fin de enriquecer y aportar a la investigación, con un tema de actualidad el cual permite desarrollar y aplicar los conocimientos adquiridos durante los años de formación. En el desenvolvimiento de la investigación se fortalecieron conocimientos teóricos y prácticos los cuales se vieron complementados con la investigación y experiencia adquirida y aportada para el logro de este trabajo.

INTRODUCCION

El trabajo presentado trata de la evaluación de un motor lineal de estator largo y deslizador corto (rotor). En comparación con el motor rotativo y el sistema de tracción tradicional, los motores lineales pueden producir un movimiento lineal directo. Esta característica junto con las ventajas que presenta, como son su alta precisión o la velocidad y el empuje que pueden alcanzar, hacen que los MSL sean utilizados en muchos campos, como la fabricación de equipos de alto rendimiento, en la instrumentación de medida de precisión, en las aplicaciones de transporte, etc. El diseño de estos motores sea estudiado extensivamente en propulsión de vehículos que levitan.

En la presente tesis se identifica, describe, analiza y opera el MSL, haciendo un interfaz con el software L-Force Engineer para una correcta manipulación de dicho motor, por lo tanto se programa en el software la secuencia de movimientos que debe realizar el MSL y poner en funcionamiento dicho motor.

El uso del MSL no es comercial en nuestro medio ya que sus costos son muy elevados tanto en adquisición como en la instalación y no existen profesionales capacitados en operar estas máquinas.

Nuestra Universidad cuenta con módulos de MSL instalado en el laboratorio de Máquinas Eléctricas, por lo cual elaboramos un manual de operación y hacer las mediciones de diferentes parámetros en laboratorio con la finalidad de profundizar en el estudio de estos motores, para el beneficio de docentes y estudiantes de la carrera profesional de Ingeniería Eléctrica.

Actualmente el empleo de tecnología de última generación en las máquinas eléctricas ha provocado que estas mejoren su eficiencia, longevidad y precisión. Este avance también implica la necesidad de adquirir los conocimientos necesarios para poder desarrollar y fabricar este tipo de máquinas en nuestro país. Por todo esto, es interesante que las universidades y centros de investigación fomenten la labor de estudiar este tipo de tecnologías para que en un futuro no lejano, seamos capaces de desarrollarlas nosotros mismos en la innovación, incluso mejorarlas.

Índice.

| | |
|---|----|
| PRESENTACION | iv |
| INTRODUCCION..... | v |
| Índice..... | vi |
| Índice de Figuras..... | x |
| CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES..... | 1 |
| 1.1. Introducción..... | 1 |
| 1.2. Ámbito de Estudio..... | 1 |
| 1.3. Problema..... | 2 |
| 1.3.1. Planteamiento de Problema..... | 2 |
| 1.3.2. Formulación del Problema..... | 3 |
| 1.4. Objetivos..... | 3 |
| 1.4.1. Objetivo General..... | 3 |
| 1.4.2. Objetivos Específicos..... | 3 |
| 1.5. Justificación del Estudio..... | 3 |
| 1.6. Alcances, Restricciones y Limitaciones..... | 4 |
| 1.7. Antecedentes del Estudio..... | 4 |
| 1.8. Hipótesis..... | 6 |
| 1.8.1. Hipótesis General..... | 6 |
| 1.8.2. Hipótesis Específicas..... | 6 |
| 1.9. Variables e Indicadores..... | 7 |
| 1.9.1. Variables Independientes..... | 7 |
| 1.9.2. Variables Dependientes..... | 7 |
| 1.10. Metodología de la Investigación..... | 7 |
| 1.10.1. Diseño de la Investigación..... | 7 |
| 1.10.2. Técnicas de Investigación y Procesamiento de Datos..... | 9 |
| 1.11. Matriz de Consistencia..... | 10 |
| CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL Y TEORICO..... | 11 |
| 2.1. Introducción..... | 11 |
| 2.2. Conceptos Electromagnéticos..... | 12 |
| 2.2.1. Ley de Ampere..... | 12 |
| 2.2.2. Ley de Faraday..... | 13 |
| 2.2.3. Fuerza de Lorentz..... | 13 |
| 2.2.3.1. Análisis de la fuerza..... | 14 |
| 2.2.3.2. Campo magnético producido por un devanado..... | 15 |
| 2.2.4. Ley de Biot Savart..... | 18 |
| 2.2.5. Onda Viajera..... | 18 |
| 2.3. Aspectos Fundamentales de los Motores Lineales..... | 20 |
| 2.4. Transformación Topológica de un Motor Rotativo en un Motor Lineal..... | 22 |

| | | |
|--|---|----|
| 2.5. | Clasificación y Topologías de los Motores Lineales.----- | 23 |
| 2.5.1. | De acuerdo con la longitud de sus componentes:----- | 25 |
| 2.5.2. | De acuerdo con la forma geométrica de sus componentes:----- | 25 |
| 2.5.3. | De acuerdo con el número de lados activos.----- | 26 |
| 2.5.4. | De acuerdo con la forma constructiva de la armadura.----- | 26 |
| 2.5.5. | De acuerdo con el sentido de circulación del flujo magnético.----- | 27 |
| 2.6. | Principio de funcionamiento de los Motores Síncronos Lineales.----- | 28 |
| 2.6.1. | Velocidad del deslizador.----- | 28 |
| 2.6.2. | Fuerza Electromotriz inducida.----- | 29 |
| 2.6.3. | Potencia Electromagnética y empuje.----- | 31 |
| 2.7. | Modelo Matemático de un Motor Síncrono Lineal.----- | 36 |
| 2.7.1. | Ecuación de Poisson.----- | 38 |
| 2.7.2. | Calculo del Campo de los Imanes Permanentes.----- | 39 |
| 2.7.3. | La fuerza de Lorentz.----- | 42 |
| 2.8. | Efectos que Presentan en los Motores Síncronos Lineales.----- | 45 |
| 2.8.1. | Rizado en el Empuje de un Motor Síncrono Lineal.----- | 45 |
| 2.8.1.1. | Fuerzas por Armónicos en el Empuje de Reluctancia.----- | 45 |
| 2.8.1.2. | Fuerzas por Armónicos en el Empuje Síncrono.----- | 47 |
| 2.9. | Posicionamiento de un motor lineal.----- | 48 |
| 2.9.1. | Determinación de la posición por medio de un codificador.----- | 49 |
| 2.9.2. | Determinación de la posición por medio de sensores de campo magnético.----- | 50 |
| 2.9.3. | Punto de referencia.----- | 52 |
| 2.9.4. | Aplicaciones de posicionamiento.----- | 53 |
| 2.10. | Principales Ventajas e Inconvenientes de Los Motores Lineales.----- | 54 |
| 2.11. | Aplicaciones del Motor Lineal.----- | 55 |
| 2.11.1. | Motores Lineales de Bajas Velocidades.----- | 55 |
| 2.11.1.1. | Bandas Transportadoras.----- | 55 |
| 2.11.1.2. | Funcionamiento.----- | 56 |
| 2.11.1.3. | Otras Aplicaciones----- | 61 |
| 2.11.2. | Motores Lineales de Alta Velocidad----- | 63 |
| 2.11.3. | Aplicaciones como Maquinas de Energía.----- | 66 |
| CAPITULO III DESCRIPCION DEL MOTOR SINCRONO LINEAL.----- | | 69 |
| 3.1. | Descripción.----- | 69 |
| 3.2. | Partes del Motor.----- | 70 |
| 3.3. | Módulo de las piezas del Motor Lineal----- | 70 |
| 3.4. | Elementos de manejo y visualización de los dispositivos de control.----- | 72 |
| 3.5. | Sistemas de Detección de Posición----- | 74 |
| 3.5.1. | Sistema óptico para detectar la posición----- | 74 |
| 3.6. | USB diagnostic adapter.----- | 75 |
| 3.7. | Materiales empleados en la armadura.----- | 76 |
| 3.7.1. | Núcleo ferromagnético o yugo.----- | 76 |

| | |
|---|-----|
| CAPITULO IV: DESCRIPCION GENERAL DEL SOFTWARE L-FORCE ENGINEER. ---- | 78 |
| 4.1. Introducción. ----- | 78 |
| 4.2. Alcances del Software. ----- | 78 |
| 4.2.1. L-Force 9400 Servo Drives. ----- | 78 |
| 4.2.2. Definición del CANopen. ----- | 79 |
| 4.2.2.1. Frame de Datos. ----- | 80 |
| 4.3. L-force Engineer – High Level. ----- | 80 |
| 4.3.1. Programación Convertidores de Frecuencia. ----- | 80 |
| 4.3.2. Interfaz de usuario. ----- | 85 |
| 4.3.3. El Establecimiento de una Conexión de Bloques de Función. ----- | 95 |
| 4.3.3.1. Terminología Usada en el Bloque de Función (FB). ----- | 96 |
| 4.3.3.2. Bloques de Función Parametrizables. ----- | 96 |
| 4.3.3.3. Bloque de Sistema (SB). ----- | 97 |
| 4.3.3.4. Bloque de Puerto. ----- | 98 |
| 4.3.3.5. Variables. ----- | 98 |
| 4.3.4. Diagnóstico del Accionamiento. ----- | 99 |
| 4.3.5. Osciloscopio. ----- | 100 |
| 4.3.5.1. Interface de Usuario. ----- | 101 |
| CAPITULO V: PROGRAMACION EN EL SOFTWARE Y PUESTA EN OPERACIÓN DEL MOTOR SINCRONO LINEAL. ----- | 102 |
| 5.1. Introducción. ----- | 102 |
| 5.2. Aspectos generales para la operación del motor. ----- | 102 |
| 5.2.1. Flujo de señal básico. ----- | 102 |
| 5.2.2. Descripción de las funciones básicas. ----- | 103 |
| 5.2.2.1. Bloque de sistema LS_Stop. ----- | 103 |
| 5.2.2.2. Bloque de sistema LS_Quickstop. ----- | 104 |
| 5.2.2.3. Bloque de sistema LS_ManualJog. ----- | 104 |
| 5.2.2.4. Bloque de sistema LS_Homing. ----- | 105 |
| 5.2.2.5. Bloque de sistema LS_Positioner. ----- | 106 |
| 5.2.2.6. Bloque de sistema LS_Limiter. ----- | 106 |
| 5.2.2.7. Bloque de sistema LS_Brake. ----- | 107 |
| 5.3. Operaciones básicas del motor. ----- | 108 |
| 5.3.1. Contrastación de entradas y salidas digitales. ----- | 108 |
| 5.3.2. Programación básica para el funcionamiento del motor. ----- | 109 |
| 5.3.3. Programación avanzada para el funcionamiento del motor. ----- | 113 |
| 5.4. Pruebas experimentales en el Motor Lineal. ----- | 114 |
| 5.4.1. Experimento I: Secuencia de movimiento de ciclo completo. ----- | 114 |
| 5.4.1.1. Velocidad del motor. ----- | 117 |
| 5.4.1.2. Tensión del motor. ----- | 117 |
| 5.4.1.3. Corriente del motor. ----- | 118 |
| 5.4.1.4. Aplicación práctica del movimiento de ciclo completo. ----- | 119 |
| 5.4.1.5. Cuestionario. ----- | 120 |
| 5.4.2. Experimento II: Secuencia de movimiento de ciclo compuesto. ----- | 121 |
| 5.4.2.1. Velocidad del motor. ----- | 123 |

| | | |
|---------------------------------|---|-----|
| 5.4.2.2. | Tensión del motor. | 123 |
| 5.4.2.3. | Corriente del motor. | 124 |
| 5.4.2.4. | Aplicación práctica del movimiento de ciclo compuesto. | 124 |
| 5.4.2.5. | Cuestionario. | 125 |
| 5.4.3. | Experimento III: Secuencia de movimiento de ciclo continuo. | 126 |
| 5.4.3.1. | Velocidad del motor. | 128 |
| 5.4.3.2. | Tensión del motor. | 129 |
| 5.4.3.3. | Corriente del motor. | 130 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. | | 133 |
| Conclusiones. | | 133 |
| Recomendaciones. | | 134 |
| BIBLIOGRAFIA | | 135 |
| ANEXOS. | | 137 |

Índice de Figuras.

CAPITULO II

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1 | Líneas de fuerza del campo magnético..... | 14 |
| Figura 2.2 | Campo magnético producido por una hilera de estos imanes..... | 15 |
| Figura 2.3 | Interacción del campo magnético a partir de una bobina arrollada. | 16 |
| Figura 2.4 | Representación bidimensional del campo generado por una bobina empleada en un motor lineal..... | 16 |
| Figura 2.5 | Bobina se encuentra sobre la superficie del conjunto de imanes permanentes..... | 17 |
| Figura 2.6 | Superposición de los campos magnéticos de las bobinas y de los imanes. | 17 |
| Figura 2.7 | Conductores portadores de corriente y onda de campo para L1 | 18 |
| Figura 2.8 | Distribución del campo a lo largo del primario..... | 19 |
| Figura 2.9 | Sección Transversal de un Motor Rotativo Síncrono. | 21 |
| Figura 2.10 | Motor Lineal Síncrono Obtenido del Desarrollo del Motor Rotativo..... | 22 |
| Figura 2.11 | Transformación de un Motor Rotativo en Motor Lineal..... | 22 |
| Figura 2.12 | Diferentes tipos de Disposición de los Imanes..... | 24 |
| Figura 2.13 | Esquema de Clasificación de los Motores Lineales. | 24 |
| Figura 2.14 | Tipos de PMLSMs..... | 25 |
| Figura 2.15 | Tipos de PMLSMs..... | 26 |
| Figura 2.16 | Tipos de PMLSMs..... | 27 |
| Figura 2.17 | Tipos de PMLSMs..... | 27 |
| Figura 2.18 | Diagrama Fasorial de un MSL. | 31 |
| Figura 2.19 | Diagramas de los empujes en un PMLSM..... | 34 |
| Figura 2.20 | Aire del núcleo del Motor Síncrono lineal con Arrollamientos Concentrados.. | 37 |
| Figura 2.21 | Diagramas esquemáticos, utilizan para derivar el modelo de fuerza del Motor Lineal Síncrono | 41 |
| Figura 2.22 | Densidad de Flujo Magnético del MSL. | 42 |
| Figura 2.23 | Grafica del comportamiento de la fuerza. | 45 |
| Figura 2.24 | Fuerza de Diente en un MSL. | 46 |
| Figura 2.25 | Señales de las inducciones magnéticas longitudinal y perpendicular en el entrehierro de un MSL de bobinados concentrados con armadura lisa y Ranurada. | 48 |
| Figura 2.26 | Escala que se emplea para determinar la posición del motor. | 49 |
| Figura 2.27 | Sensor de posicionamiento. | 49 |
| Figura 2.28 | Sensor de efecto hall..... | 50 |
| Figura 2.29 | Esquema de un sensor de efecto hall. | 51 |
| Figura 2.30 | Movimiento de un sensor de efecto hall..... | 51 |
| Figura 2.31 | Control para determinar el punto de referencia. | 52 |
| Figura 2.32 | Ejemplo para determinar el punto de referencia. | 54 |
| Figura 2.33 | Estator de motor síncrono lineal. a) Ubicación del núcleo y b) Ubicación de los estatores..... | 56 |
| Figura 2.34 | Vehículo del motor. a) Vista general y b) detalle de la ubicación de los imanes..... | 58 |
| Figura 2.35 | Un centro de maquinado que utiliza 5 motores lineales. | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.36 Un Robot Megamation, diseñado para la industria farmacéutica y realiza un proceso de HTS, utiliza dos motores lineales bidimensionales para posicionar las cepas y el otro para posicionar los instrumentos. | 63 |
| Figura 2.37 Fotografía de un transporte terrestre de alta velocidad que utiliza un motor síncrono lineal. | 64 |
| Figura 2.38 Los sistemas EMALS utilizan motores lineales para impulsar a las aeronaves por la borda del portaaviones. | 67 |
| Figura 2.39 Esquema de un motor lineal utilizado como catapulta en los portaaviones. | 68 |

CAPITULO III

| | |
|---|----|
| Figura 3. 1 Modulo del Motor Síncrono Lineal. | 69 |
| Figura 3. 2 Esquema general del Motor Lineal. | 70 |
| Figura 3. 3 Partes del Motor Lineal. | 71 |
| Figura 3. 4 Entradas y salidas digitales. | 72 |
| Figura 3. 5 Vista posterior del amplificador de energía. | 73 |
| Figura 3. 6 Terminales de conexión del motor. | 74 |
| Figura 3. 7 Detección de Posición. | 75 |
| Figura 3. 8 USB diagnostic adapter. | 76 |

CAPITULO IV

| | |
|---|----|
| Figura 4. 1 Convertidor de frecuencia HighLine 9400. | 79 |
| Figura 4. 2 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 81 |
| Figura 4. 3 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 82 |
| Figura 4. 4 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 82 |
| Figura 4. 5 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 83 |
| Figura 4. 6 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 83 |
| Figura 4. 7 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 84 |
| Figura 4. 8 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 84 |
| Figura 4. 9 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 85 |
| Figura 4. 10 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 85 |
| Figura 4. 11 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 88 |
| Figura 4. 12 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 88 |
| Figura 4. 13 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 89 |
| Figura 4. 14 Estados de equipo de la máquina de estado para el control del equipo. | 91 |
| Figura 4. 15 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 92 |
| Figura 4. 16 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 93 |
| Figura 4. 17 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 94 |
| Figura 4. 18 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 94 |
| Figura 4. 19 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 95 |
| Figura 4. 20 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 96 |
| Figura 4. 21 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 97 |
| Figura 4. 22 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 98 |
| Figura 4. 23 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 98 |
| Figura 4. 24 Estructura del software para realizar el procedimiento. | 99 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4. 25 Estructura del software para realizar el procedimiento..... | 99 |
| Figura 4. 26 Estructura del software para realizar el procedimiento..... | 101 |

CAPITULO V

| | |
|--|-----|
| Figura 5. 1 Flujo de señales de la TA, posicionamientos multiuso. | 102 |
| Figura 5. 2 Sistema de bloque LS_Stop. | 103 |
| Figura 5. 3 Sistema de bloque LS_Quickstop. | 104 |
| Figura 5. 4 Sistema de bloque LS_ManualJog..... | 104 |
| Figura 5. 5 Sistema de bloque LS_Homing. | 105 |
| Figura 5. 6 Sistema de bloque LS_Positioner. | 106 |
| Figura 5. 7 Sistema de bloque LS_Limiter. | 106 |
| Figura 5. 8 Conexión de los interruptores de final de carrera a las entradas digitales 3 y 4. | 107 |
| Figura 5. 9 Sistema de bloque LS_Brake..... | 108 |
| Figura 5. 10 Vista de Programación..... | 109 |
| Figura 5. 11 Vista de Programación..... | 110 |
| Figura 5. 12 Vista de Programación..... | 111 |
| Figura 5. 13 Vista de Programación..... | 112 |
| Figura 5. 14 Vista de Programación..... | 113 |
| Figura 5. 15 Vista de Programación..... | 113 |
| Figura 5. 16 Vista de tabla de variables de la velocidad..... | 116 |
| Figura 5. 17 Ciclo de velocidad del MSL..... | 117 |
| Figura 5. 18 Voltaje actual de MSL..... | 118 |
| Figura 5. 19 Corriente actual del MSL..... | 118 |
| Figura 5. 20 Diagrama de Bloques..... | 120 |
| Figura 5. 21 Vista de tabla de variables de la velocidad..... | 122 |
| Figura 5. 22 Ciclo de velocidad del MSL..... | 123 |
| Figura 5. 23 Voltaje actual de MSL..... | 123 |
| Figura 5. 24 Corriente actual del MSL..... | 124 |
| Figura 5. 25 Modulo para Embotellado y Etiquetado..... | 125 |
| Figura 5. 26 Vista de tabla de variables de la velocidad..... | 128 |
| Figura 5. 27 Ciclo de velocidad del MSL en sentido positivo..... | 128 |
| Figura 5. 28 Ciclo de velocidad del MSL en sentido negativo..... | 129 |
| Figura 5. 29 Voltaje actual de MSL..... | 129 |
| Figura 5. 30 Corriente actual del MSL..... | 130 |
| Figura 5. 31 Corrientes de fase del MSL..... | 130 |
| Figura 5. 32 Imagen Transporte Terrestre de Alta Velocidad..... | 131 |

Índice de Abreviaturas.

| | |
|--------|---|
| MSL | Motor Síncrono Lineal. |
| PMLSMs | Motor Lineal de Imanes Permanentes. |
| FEM | Fuerza Electromotriz Inducida. |
| FMM | Fuerza Magneto motriz. |
| FB | Bloque de Función. |
| SB | Bloque de Sistema. |
| PLC | Controlador Lógico Programable. |
| TAs | Aplicaciones Tecnológicas. |
| DC | Corriente Continua. |
| MAGLEV | Levitación Magnética. |
| HTS | high-throughput screening (Cribado de Alto Rendimiento) |
| EMS | Suspensión Electromagnetica. |
| EDS | Suspensión Electrodinámica. |
| EMALS | Electromagnetic Aircraft Launch System. |
| PWM | Modulación de Ancho de Pulso. |

CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES.

1.1. Introducción.

En la actualidad las máquinas lineales se encuentran en un alto grado de desarrollo, debido a su aplicación en diversas actividades industriales como las máquinas herramientas de alta velocidad, los sistemas que utilizan mesas con posicionamiento en tres ejes, el transporte, la aeronáutica y muchas otras aplicaciones. Por ello es de vital importancia estudiarlos en sus aspectos constructivos y de funcionamiento para poder entender ciertas características electromagnéticas y dinámicas.

Este motor funciona bajo el mismo principio de su homólogo rotatorio, en este caso ya no se genera un movimiento rotacional sino lineal. El motor está constituido por dos partes, una estática y otra móvil. La parte móvil o vehículo, es una estructura en la que están ubicadas las bobinas que al interactuar con el estator donde están los imanes de la máquina generan el movimiento.

La parte estacionaria es una estructura que conforma la pista, a través de la cual se desplaza el vehículo, y en la que van alojados los devanados trifásicos de la máquina. Los estatores están conformados por los imanes permanentes.

Al excitar los devanados se generan campos magnéticos, creando alternadamente polos magnéticos norte y sur. Como los polos magnéticos contrarios se atraen y los polos iguales se repelen, es posible ubicar los imanes permanentes del vehículo bajo este campo, generando así una atracción y una repulsión entre ambos, dando origen al movimiento lineal a lo largo de la pista.

1.2. Ámbito de Estudio.

El estudio del presente proyecto de tesis tiene carácter de *investigación aplicada* y está enmarcado dentro del ámbito académico de la Carrera Profesional de Ingeniería Eléctrica, en el área de Máquinas Eléctricas, que permitirá facilitar la operación del Motor Síncrono Lineal en el ámbito académico teórico-práctico así como sus aplicaciones en la industria.

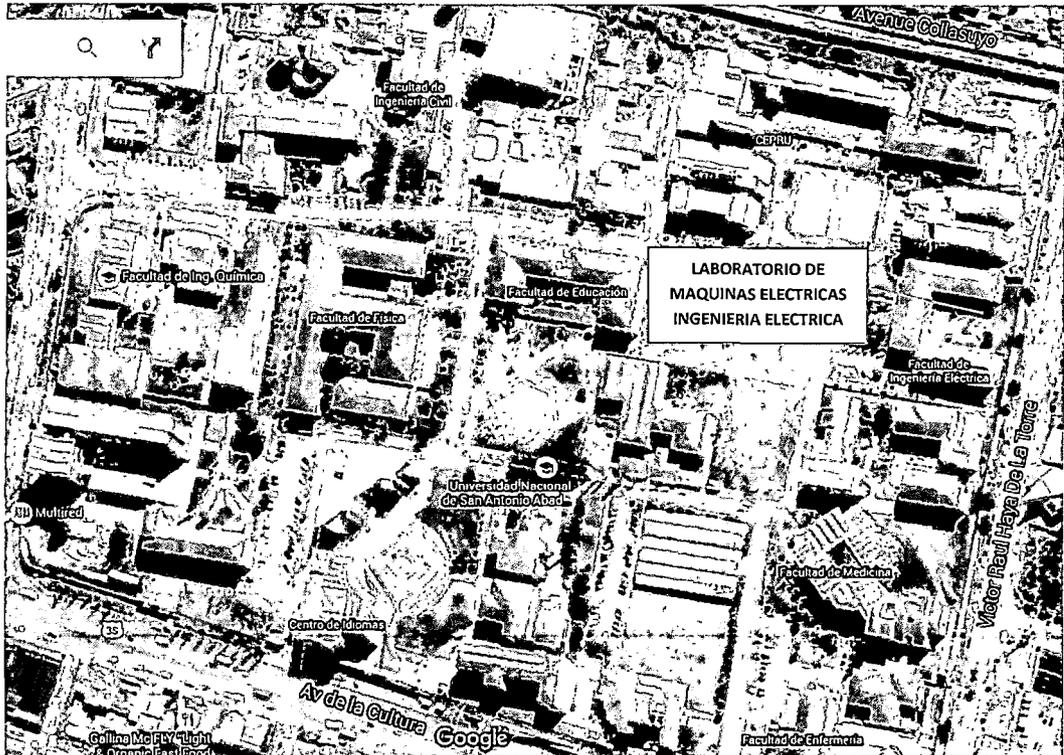


Figura 1.1 Ubicación del laboratorio de Máquinas eléctricas.

Fuente: Elaboración Propia.

1.3. Problema.

1.3.1. Planteamiento de Problema.

En la actualidad la Carrera Profesional de Ingeniería Eléctrica, se ha implementado con laboratorios en las diferentes áreas, puesto que en el área de Maquinas Eléctricas y Generación se tiene el motor síncrono lineal con software propio para su manipulación y operación.

El motor síncrono lineal instalado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas no cuenta con las especificaciones de operación y del comportamiento del motor, porque el proveedor alcanzó manuales de operación básicas del motor lineal y software de control. Por lo que el problema es programar y operar la máquina de forma lógica, ordenada, actualizada y sistemática en los temas específicos de la máquina lineal concerniente a su caracterización, operación y comportamiento para diferentes condiciones de operación y sus aplicaciones fundamentales en la industria así como el control del motor lineal que es un tema fundamental de las máquinas eléctricas en general.

El empleo del motor síncrono lineal dentro del laboratorio de máquinas eléctricas es nuevo, ya que no se contaba con este módulo anteriormente, dentro del equipamiento que tenía la carrera profesional de Ingeniería Eléctrica.

1.3.2. Formulación del Problema.

Entonces planteado el problema se formula el problema con la siguiente pregunta.

¿Es necesario identificar, describir y operar el motor síncrono lineal para aplicaciones académicas e industriales en el laboratorio de Maquinas Eléctricas?

El equipamiento del Laboratorio de máquinas eléctricas, incluye el Motor Síncrono Lineal modelo LMS-23, cuya finalidad específica es de carácter académico, utilizado para el proceso enseñanza-aprendizaje. En ese contexto todo equipamiento es factible de permanente mejora, para tal efecto se formuló un conjunto de propuestas de laboratorio para ampliar los alcances operativos de a máquina en estudio de tal forma que se logró optimizar la utilización práctica de dicha máquina.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo General.

Estructurar y sistematizar propuestas experimentales de laboratorio en la operación del motor síncrono lineal, mediante la mejora en la programación del software para controlar las variables y condiciones operativas.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- ✓ *Fundamentar teóricamente el comportamiento del motor síncrono lineal.*
- ✓ *Describir, operar y configurar los diferentes parámetros del motor síncrono lineal haciendo uso del software.*
- ✓ *Puesta en marcha del Motor Síncrono Lineal con la programación propuesta en el Software.*
- ✓ *Elaborar manuales de laboratorio del Motor síncrono lineal.*

1.5. Justificación del Estudio.

Este proyecto de investigación planteado es importante porque contribuye en la formación académica de los estudiantes de la Carrera Profesional de Ingeniería Eléctrica de forma teórica-práctica en el área de Máquinas eléctricas, además posibilita a los docentes, estudiantes, egresados y técnicos a operar y configurar los parámetros para su aplicación en la industria del motor lineal.

Con el desarrollo de esta tesis de investigación pretendemos facilitar el conocimiento práctico del motor lineal para los futuros ingenieros electricistas, lo que redundara en un incentivo hacia la generación de nuevas competencias de los profesionales egresados de la carrera profesional, esta permitirá la programación en el software y posteriormente la puesta en marcha del motor.

1.6. Alcances, Restricciones y Limitaciones.

El alcance de este proyecto de investigación se enmarca fundamentalmente en la identificación, descripción, evaluación y operación del motor síncrono lineal, modelo LMS-23, que cuenta actualmente el laboratorio de máquinas eléctricas de la carrera profesional de ingeniería eléctrica. Además realizar pruebas para la mejor formación de los estudiantes de ingeniería eléctrica.

Con respecto a las restricciones, cabe mencionar que en nuestro medio no existen motores lineales ya que el costo de dicho motor es muy caro, por la cual tomaremos el modulo del motor síncrono lineal instalado en el laboratorio de Maquinas eléctricas Rotativas situado en el pabellón de Ingeniería Eléctrica de la UNSAAC.

El software L-Force Engineer HighLevel - LENZE 9400, es un software complejo y de alto nivel, con un lenguaje de programación nueva en nuestro medio lo cual no permite programar fácilmente. Además el osciloscopio que trae este software no muestra en tiempo real los resultados, tampoco nos permite lecturar todos los parámetros.

En el contexto teórico el concepto de Máquina Eléctrica implica la operación de la máquina como generador y como motor; pero sin embargo, para el caso específico de la presente tesis solo se consideró la operación de la máquina como "motor" en vista de que el laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica tiene en su equipamiento el *motor síncrono lineal LMS-23*; este hecho significa una limitación que se presentó en el desarrollo de la presente tesis.

1.7. Antecedentes del Estudio.

La historia de motores eléctricos lineales proviene desde la década de 1840, con el trabajo de Charles Wheatstone en el King's College de Londres. Pero su modelo no era lo suficientemente eficiente para hacerlo práctico. El ingeniero alemán Hermann Kemper construyó un modelo operativo en 1935.

A finales de la década de los años 1940, el profesor Eric Laithwaite del Imperial College de Londres desarrolló el primer modelo operativo a tamaño real, este diseño, y en la mayor parte de los diseños de baja aceleración, la fuerza se produce por la variación de campos electromagnéticos lineales que actúan sobre los conductores expuestos a estos campos. Los conductores se disponen en lazo, una espiral o sencillamente un trozo de plancha metálica que se sitúa en el campo electromagnético lo que produce corrientes inducidas en forma de remolino creando así un campo electromagnético opuesto.

Estos campos electromagnéticos opuestos se repelen mutuamente, forzando así al conductor a alejarse del estator y transportándolo en la dirección de la variación del campo magnético.

Ponemos en conocimiento algunos trabajos realizados con respecto al motor lineal.

- ✓ Análisis y Diseño del Motor de Inducción Lineal. Presentado por el bachiller Grover Calvo Jara en el año de 1988 – UNSAAC Cusco.
- ✓ Diseño y Construcción de un Motor de Inducción Lineal, presentado por: Alexander Rodríguez G. y José R. Bedoya S. Bogotá DC. 2004.

El proyecto técnico denominado “Caracterización de un motor lineal de inducción” elaborado por Carlos Pérez Rodríguez, muestra el desarrollo de un prototipo de motor lineal, cuyas conclusiones inciden en el uso del método de elementos finitos con la finalidad de mejorar la aproximación de los cálculos reales y especificaciones técnicas; Plantea de otro lado la utilización del software Flux para determinar las características operativas del motor lineal, en este mismo proyecto se muestra un ejemplo de la armadura prototipo que es común para motores lineales de inducción y síncronos.

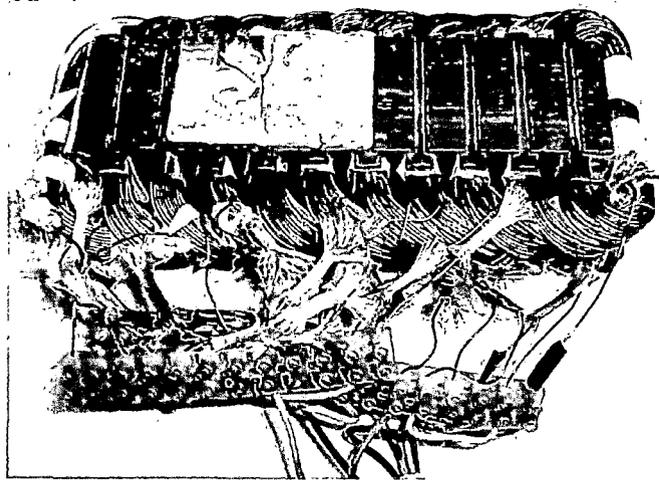


Figura 1.2 Prototipo de la armadura de un motor lineal.

Fuente: Gabriel Gonzales Palomino.; Optimización del Empuje y las Fuerzas de Diente en Dos Modelos de Motores Lineales Síncronos de Imanes Permanentes. Tesis Doctoral; Universidad Carlos III de Madrid; España - 2012.

Adicionalmente formula la utilización de los Métodos de Elementos Finitos, que viene a ser un método de aproximación de problemas continuos, el mismo que se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado. Esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en su interior de este modelo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un determinado número finito de puntos.

1.8. Hipótesis.

1.8.1. Hipótesis General.

“Al identificar y describir apropiadamente la maquina lineal modelo LMS-23, permitirá el análisis y operación del motor síncrono lineal para fines académicos que enmarca la investigación y aplicación práctica de la máquina”

1.8.2. Hipótesis Específicas.

- ✓ *La interpretación correcta del principio de funcionamiento del motor síncrono Lineal nos permitirá tener criterios para analizar y operar adecuadamente la máquina.*
- ✓ *El conocimiento y manipulación del software del motor síncrono lineal (L-Force Engineer HighLevel - LENZE 9400) nos facilitara programar y ordenar el tipo de secuencia que debe realizar la máquina.*

- ✓ *Con la programación en el L-Force Engineer nos permitirá operar y configurar los parámetros del Motor Lineal.*
- ✓ *La implementación de manuales de laboratorio permitirá usar adecuadamente el Motor Síncrono Lineal.*

1.9. Variables e Indicadores.

1.9.1. Variables Independientes.

- ✓ Conocimiento y análisis del motor síncrona lineal LMS-23

Indicadores:

- ✓ Tensión de entrada.
- ✓ Corriente de entrada.
- ✓ Perdidas.
- ✓ Potencia.
- ✓ Rendimiento.

1.9.2. Variables Dependientes.

- ✓ Operación del motor síncrono lineal LMS-23 con fines académicos

Indicadores:

- ✓ Arranque y parada.
- ✓ Variación de la frecuencia.
- ✓ Regulación de la velocidad.
- ✓ Programas de laboratorio.

1.10. Metodología de la Investigación.

1.10.1. Diseño de la Investigación.

El proyecto de tesis de acuerdo a la finalidad es una investigación aplicada en vista que se pretende conocer las condiciones de comportamiento del Motor Lineal, con la innovación tecnológica se designa la incorporación del conocimiento científico y tecnológico, propio o ajeno con el objeto de modificar un proceso productivo que en nuestro caso el objeto de estudio es el Motor Síncrono Lineal Modelo LMS-23; de acuerdo al nivel de investigación es explicativa porque se determinó las causas y efectos operativos del Motor Lineal.

Para la investigación de tipo explicativo la causa es:

Conocimiento y análisis del motor síncrona lineal LMS-23

Y el efecto es:

Operación del motor síncrono lineal LMS-23 con fines académicos.

Por estas condiciones el diseño del proyecto de tesis es la investigación no experimental, por lo tanto es observar fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlos. La investigación no experimental es cualquier investigación en la que resulta imposible manipular variables o asignar aleatoriamente a los sujetos o a las condiciones. De hecho, no hay condiciones de estímulos a los cuales se expongan los sujetos del estudio.

Para demostrar cada una de las hipótesis que contienen las variables dependientes e independientes se hizo uso de los indicadores para demostrar los niveles de relación entre las variables y para cuantificar dichas relaciones se hizo uso del estadígrafo denominado *Coefficiente de correlación R*, donde los valores fueron las siguientes:

| HIPÓTESIS GENERAL DEL PROBLEMA | | |
|--|-----|---|
| Nº | X | Y |
| 1 | 100 | 1 |
| 2 | 120 | 2 |
| 3 | 150 | 5 |
| 4 | 200 | 7 |
| X= VARIABLES DE ENTRADA (CAUSA) | | |
| Y= VARIABLES DE SALIDA (EFECTO) | | |

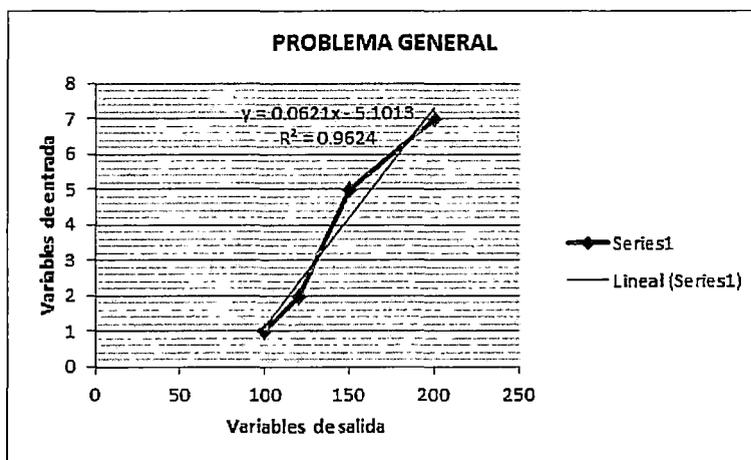


Figura 1.3 Relación de variables dependientes y variables independientes.

Fuente: *Elaboración Propia.*

1.10.2. Técnicas de Investigación y Procesamiento de Datos.

Las técnicas como herramientas procedimentales y estratégicas para cumplir el objetivo propuesto y la comprobación de la hipótesis son las siguientes:

- ✓ Recolección de información documentada referente al motor lineal en su caracterización, operación y comportamiento en su evolución histórica como libros, textos, papers, informes y proyectos científicos, páginas de internet.
- ✓ Documentación bibliográfica histórica de todo el equipamiento, implementación e instrumental científico técnico empleado para consolidar la operación eficiente del motor lineal.
- ✓ Análisis e interpretación de la documentación o información bibliográfica para establecer inferencias sobre las relaciones entre las variables definidas para extraer las conclusiones y recomendaciones.
- ✓ Técnicas de laboratorio para procesar todas las pruebas y experimentos de forma sistemática, controlada y ordenada de acuerdo a Normas y Recomendaciones nacionales e internacionales
- ✓ Uso del software propio del motor lineal para fines de simulación, control, mando y regulación.

1.11. Matriz de Consistencia

| PROBLEMA | HIPÓTESIS | ALCANCES, RESTRICCIONES Y LIMITACIONES |
|---|---|--|
| FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | HIPÓTESIS GENERAL | |
| ¿Es necesario identificar, describir y operar el motor síncrono lineal para aplicaciones académicas e industriales en el laboratorio de Maquinas Eléctricas? | Al identificar y describir apropiadamente la maquina lineal modelo LMS-23, permitirá el análisis y operación del motor síncrono lineal para fines académicos que enmarca la investigación y aplicación práctica de la maquina | |
| OBJETIVO GENERAL | HIPÓTESIS ESPECÍFICAS | |
| Estructurar y sistematizar propuestas experimentales de laboratorio en la operación del motor síncrono lineal, mediante la mejora en la programación del software para controlar las variables y condiciones operativas. | <ul style="list-style-type: none"> La interpretación correcta del principio de funcionamiento del motor síncrono lineal nos permitirá tener criterios para analizar y operar adecuadamente la máquina. El conocimiento y manipulación del software del motor síncrono lineal (L-Force Engineer HighLevel - LENZE 9400) nos facilitara programar y ordenar el tipo de secuencia que debe realizar la máquina. Con la programación en el L-Force Engineer nos permitirá operar y configurar los parámetros del Motor Lineal. La implementación de manuales de laboratorio permitirá usar adecuadamente el Motor Síncrono Lineal | El alcance de este proyecto de tesis se enmarca fundamentalmente en la identificación, descripción y operación del motor síncrono lineal, modelo LMS-23, que cuenta actualmente el laboratorio de máquinas eléctricas de la carrera profesional de ingeniería eléctrica. Además realizar pruebas para la mejor formación de los estudiantes de ingeniería eléctrica. |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | VARIABLES E INDICADORES | |
| <ul style="list-style-type: none"> Fundamentar teóricamente el comportamiento del motor síncrono lineal. Describir, operar y configurar los diferentes parámetros del motor síncrono lineal haciendo uso del software. Puesta en marcha del motor síncrono lineal con la programación propuesta en el software. Elaborar manuales de laboratorio del Motor síncrono lineal. | <p>Variables independientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Conocimiento y análisis del motor síncrono lineal LMS-23 <p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Tensión de entrada. ✓ Corriente de entrada. ✓ Perdidas. ✓ Potencia. ✓ Rendimiento. <p>Variables dependientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Operación del motor síncrono lineal LMS-23 con fines académicos <p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Arranque y parada. ✓ Variación de la frecuencia. ✓ Regulación de la velocidad. ✓ Programas de laboratorio. | Con respecto a las restricciones, cabe mencionar que en nuestro medio no existen motores lineales ya que el costo de dicho motor es muy caro, por la cual tomaremos el modulo del motor síncrono lineal instalado en el laboratorio de Maquinas eléctricas Rotativas situado en el pabellón de Ingeniería Eléctrica de la UNSAAC. |
| CONTENIDO DE LA TESIS | METODOLOGÍA | |
| <pre> graph LR C1[CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES] --> C2[CAPÍTULO II MARCO REFERENCIAL Y TEÓRICO] C2 --> C3[CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO LINEAL] C3 --> C4[CAPÍTULO IV DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SOFTWARE L-FORCE ENGINEER] C4 --> C5[CAPÍTULO V PROGRAMACIÓN EN EL SOFTWARE Y PUESTA EN OPERACIÓN DEL MSL] </pre> | <p>El tipo de diseño definido para este proyecto de Tesis es de tipo EXPLICATIVA, porque está dirigida a explicar y responder a las causas de las características operativas de la maquina lineal.</p> <p>En consecuencia el método a utilizar será el EXPLICATIVO, que contiene las estrategias para lograr los objetivos, expresa el procedimiento para comprobar las hipótesis para dar respuesta al problema planteado.</p> | El software L-Force Engineer HighLevel - LENZE 9400, es un software complejo y de alto nivel, con un lenguaje de programación nueva en nuestro medio lo cual no permite programar fácilmente. Además el osciloscopio que trae este software no muestra en tiempo real los resultados, tampoco nos permite lecturar todos los parámetros. |

CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL Y TEORICO.

2.1. Introducción.

Los motores eléctricos en general son máquinas utilizadas en transformar energía eléctrica en mecánica. Son los motores utilizados en la industria, pues cambian las ventajas del uso de energía eléctrica (bajo costo, facilidad de transporte, limpieza y simplicidad de la puesta en marcha, etc.) con una construcción relativamente simple, costo reducido y buena adaptación a los diversos tipos de operación.

El motor lineal como concepto básico al igual que la mayoría de las máquinas eléctricas data de fines del siglo pasado. Existe una patente de motor lineal fechada en el año 1889.

Pese a tener antecedentes tan remotos no ha tenido un desarrollo muy significativo en la primera mitad de este siglo y esto se debe a que si bien posee algunas ventajas significativas existen algunos inconvenientes que desalientan su utilización. Básicamente el motor lineal está formada por una parte fija y una parte móvil de construcción adaptada a las características a obtener, la cual transmitirá la fuerza requerida entre ellas sin intervención de transmisiones.

El principio de funcionamiento del motor lineal permite obtener una forma de conversión de la energía cuyas ventajas se imponen en forma determinante en todos los sectores en donde están en juego fuerzas para traslación; el motor lineal provee por sí mismo un esfuerzo de propulsión sin ningún medio de transmisión mecánica y con solamente el vínculo electromagnético entre las partes fijas y móviles. De esta forma se elimina el recurso clásico de transformar el movimiento de rotación del motor convencional en un movimiento lineal eliminando los conocidos problemas de los sistemas de transmisión y de adherencia en las ruedas motrices.

El principal inconveniente radica en el hecho de que es más difícil mantener las distancias entre inductor e inducido que en los motores rotativos, y vale la pena recordar que el entrehierro es lo que demanda la mayor intensidad de campo para lograr la inducción necesaria. Los motores lineales tienen por lo general mayor tamaño y menor rendimiento que los motores rotantes de igual potencia.

Es fácil deducir que a pesar de su costo todavía demasiado elevado, estos tipos de motores permiten resolver diversos problemas ya sea en el campo del transporte como en de las máquinas herramientas.

2.2. Conceptos Electromagnéticos.

En esta parte del trabajo se realiza una explicación de los fenómenos físicos involucrados con el funcionamiento de esta máquina; esto se hace con el fin de mostrar la base del análisis, del cual se partió para poder realizar el modelo eléctrico del motor, y por ende, poder conocer posteriormente el comportamiento de la máquina.

2.2.1. Ley de Ampere.

En la mayoría de las situaciones prácticas que se suelen dar en el estudio de las máquinas eléctricas, el camino elegido para aplicar la ley de Ampere coincide con la trayectoria media seguida por las líneas de campo magnético, por otro lado si el material es homogéneo e isótropo la magnitud del campo magnético es la misma en todo el recorrido:

$$H \cdot l = F = N \cdot i \quad (2.1)$$

Siendo:

H : Intensidad de campo magnético (medida del "esfuerzo" de una corriente por establecer un campo magnético).

l : Longitud magnética media de las líneas de H .

F : Fuerza magneto motriz.

N : Número de espiras.

i : Intensidad de corriente.

En los materiales homogéneos e isótropos se cumple la relación modular:

$$B = \mu \cdot H \quad (2.2)$$

Siendo:

B : Inducción magnética.

μ : Permeabilidad magnética del material.

Ya que B y H son uniformes y los campos vectoriales correspondientes tienen la misma dirección y sentido. En los materiales ferromagnéticos μ , tiene un valor elevado y no es uniforme, lo que significa que su magnitud depende del módulo de H . Para los demás materiales, sean aislantes o conductores, la permeabilidad es prácticamente la del vacío.

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [H/m]$$

La permeabilidad de cualquier material se compara con la permeabilidad del vacío.

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2.3)$$

Siendo:

μ_r : Permeabilidad relativa.

μ_0 : Permeabilidad en el vacío.

2.2.2. Ley de Faraday.

Si un flujo variable atraviesa una espira, se inducirá en ésta una tensión directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo, lo que se expresa mediante la ecuación:

$$e_{ind} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

Siendo:

e_{ind} : Tensión inducida en la bobina.

N : Número de vueltas de conductores en la bobina.

Φ : Flujo que atraviesa la bobina.

2.2.3. Fuerza de Lorentz.

Un efecto importante de un campo magnético sobre su entorno es el que ejerce una fuerza sobre un conductor que porta corriente y se encuentra dentro del campo. Si el conductor mide "l" metros y porta una corriente de "i" amperios. La fuerza sobre el conductor está dada por:

$$\vec{F} = i \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) = i \cdot l \cdot B \cdot \text{sen}\theta_1 \quad (2.5)$$

Siendo:

I : Magnitud de la corriente del conductor.

l : Longitud del conductor, con la dirección de "l" definida como el sentido de la circulación de la corriente.

B : Inducción magnética

θ_1 : Ángulo comprendido entre el conductor y el valor de inducción magnética.

Regla nemotécnica: regla de la mano izquierda.

2.2.3.1. Análisis de la fuerza.

Trataremos de entender en detalle cómo se produce la fuerza de nuestro motor lineal.

Empezaremos analizando el campo de los dos componentes principales que producen la fuerza en un motor lineal, tomando, en primer lugar, el campo del imán permanente¹.

Los objetos magnéticos siempre poseen dos polos opuestos denominados "norte" y "sur".

Las líneas del campo magnético de un imán de barra describen líneas cerradas. Por convención, se asume que la dirección del campo sale del polo norte y se dirige hacia el polo sur del imán. En la imagen, se emplean flechas para indicar la dirección del campo.

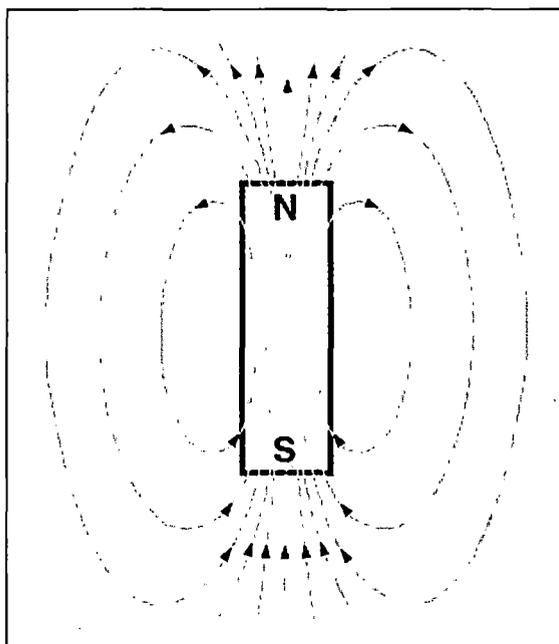


Figura 2.1 Líneas de fuerza del campo magnético.

Fuente: LUCAS – NULLE, *UniTrain-I*, Segunda edición.

Al igual que lo que ocurre con las cargas eléctricas, los polos de igual signo se repelen, mientras que los de signo contrario se atraen.

1. Permanente significa que el material mantiene su campo magnético sin necesidad de excitación externa.

El elemento secundario de un motor lineal consta de un número de imanes permanentes emplazados sobre una placa de acero. La placa de acero conduce las líneas del campo magnético por debajo de los imanes permanentes.

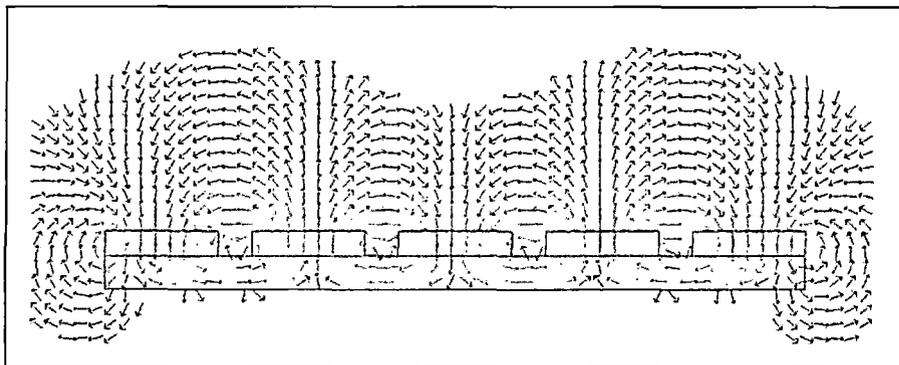


Figura 2.2 Campo magnético producido por una hilera de estos imanes.

Fuente: LUCAS – NULLE, UniTrain-I, Segunda edición.

Las flechas indican la dirección del campo en cualquier punto del espacio, mientras que el color de las flechas indica la intensidad del campo. La intensidad es más elevada en las áreas de color rojo, y baja en las áreas de color azul. En la imagen también se puede observar la alternancia de la magnetización.

2.2.3.2. Campo magnético producido por un devanado.

Si un conductor por el que fluye corriente forma parte de un bucle, que es parte de los bucles que forman una bobina, se genera un campo magnético que fluye por el centro del bucle o bobina, a lo largo de su eje longitudinal y que retorna por la parte externa del devanado o bobina. El campo magnético que circunda cada bucle o alambre, se combina con los campos de los otros bucles para producir un campo que se concentra en el centro de la bobina. La figura siguiente muestra la interacción del campo magnético a partir de una bobina arrollada, cuyos extremos no se han cerrado. El campo magnético es esencialmente uniforme a lo largo de la bobina si el arrollamiento es más estrecho. Se debe mencionar que la intensidad del campo es proporcional a la corriente que fluye por el devanado.

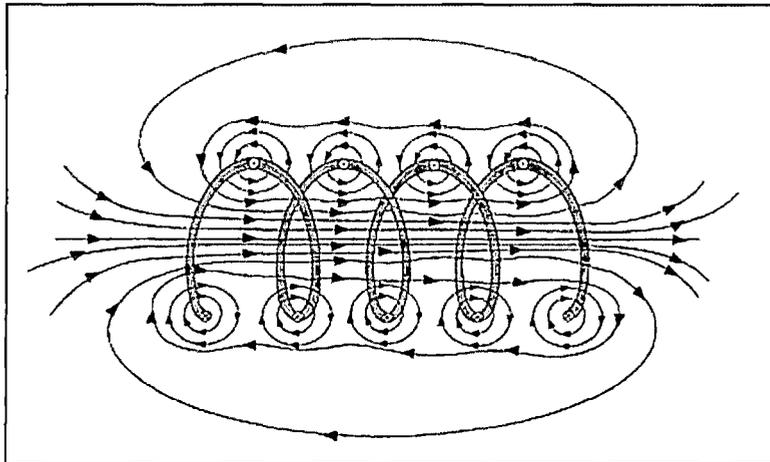


Figura 2.3 Interacción del campo magnético a partir de una bobina arrollada.

Fuente: LUCAS – NULLE, UniTrain-I, Segunda edición.

Comparemos este campo con el campo de un imán permanente. Las líneas de campo están nuevamente cerradas. La forma de esas líneas es similar a la forma del imán permanente. El campo tiene un polo norte en el lado derecho y un polo sur en el izquierdo.

La siguiente figura muestra una representación bidimensional del campo generado por una bobina empleada en un motor lineal. Se trata del resultado de un cálculo numérico del campo magnético.

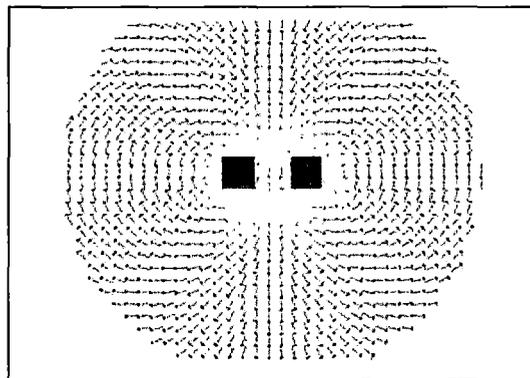


Figura 2.4 Representación bidimensional del campo generado por una bobina empleada en un motor lineal.

Fuente: LUCAS – NULLE, UniTrain-I, Segunda edición.

Las áreas rectangulares corresponden al devanado de cobre de la bobina, el cual se corta a lo largo de la línea central. La suma total del flujo de corriente de las áreas rectangulares está dada por el número de espiras, multiplicado por la corriente de

cada alambre. La corriente sale por el área izquierda y se dirige hacia el área derecha. La intensidad del campo se eleva en el interior de la bobina, y decrece en función de la distancia a la que se encuentre en relación con la bobina.

En la figura siguiente, la bobina se encuentra sobre la superficie del conjunto de imanes permanentes. Se omite el campo producido por los imanes. Se puede observar que el campo de las bobinas también atraviesa la placa, por debajo de los imanes. El polo norte de este campo se orienta en la dirección de los imanes.

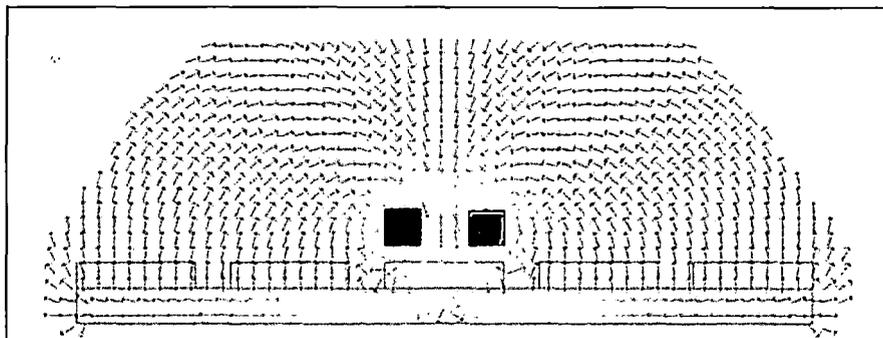


Figura 2.5 Bobina se encuentra sobre la superficie del conjunto de imanes permanentes.

Fuente: LUCAS – NULLE, UniTrain-I, Segunda edición.

Se puede observar que si el devanado se encuentra en la posición indicada en la figura, ambos campos se encuentran en la misma dirección. El polo norte del campo de la bobina se opone al polo sur del imán central. Los polos opuestos se atraen, por lo que se encuentra presente una fuerza vertical de atracción. No existe una fuerza horizontal capaz de desplazar el imán de esta posición. Por tanto, existe un punto de equilibrio estable en términos de la posición horizontal de las bobinas. Para que el motor funcione, la fuerza horizontal es importante puesto que es la que mueve el elemento primario y el secundario si se los articula entre sí.

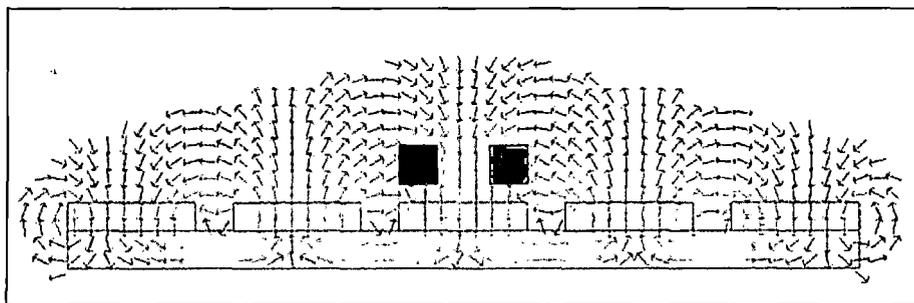


Figura 2.6 Superposición de los campos magnéticos de las bobinas y de los imanes.

Fuente: LUCAS – NULLE, UniTrain-I, Segunda edición.

2.2.4. Ley de Biot Savart.

Otro efecto importante de interacción entre un campo magnético y su entorno es, si un conductor orientado de manera adecuada se desplaza a través de un campo magnético, se induce una tensión en él. La tensión inducida en el conductor está dada por:

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot l = v \cdot B \cdot l \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (2.6)$$

Siendo:

v : Velocidad del conductor.

B : Inducción magnética.

θ_2 : Ángulo comprendido entre el vector velocidad y el vector densidad de campo magnética. Regla nemotécnica de la mano derecha.

2.2.5. Onda Viajera.

Supóngase la disposición trifásica de conductores, como los mostrados en la figura 2.7; a continuación se mostrará cómo esta disposición genera campos de polaridad norte sur, desplazándose a lo largo de la superficie del devanado.

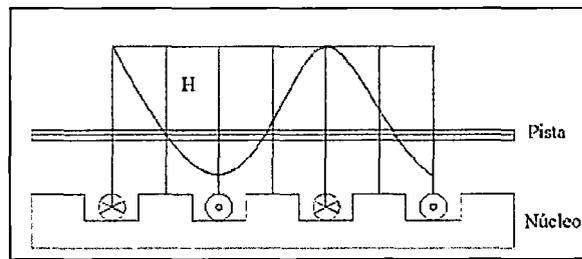


Figura 2.7 Conductores portadores de corriente y onda de campo para L1

Fuente: José D. Rairan A., Alexander Rodríguez G. y Roberto Bedoya S.; *Motor Lineal de Inducción, Principios de Diseño y Construcción Primera Edición*; Bogotá DC - 2012.

La disposición de las corrientes es la siguiente:

$$i_1(t) = I_m \text{sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \text{ [A]} \quad (2.7)$$

$$i_2(t) = I_m \text{sen}(\omega t) \text{ [A]} \quad (2.8)$$

$$i_3(t) = I_m \text{sen} \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \text{ [A]} \quad (2.9)$$

Cada una de ellas, y de acuerdo con la ley de Ampere, producirá una distribución de campo magnético en todo el espacio circundante alrededor de los conductores. Si se supone un instante de tiempo particular en que la corriente por L_1 sea máxima, resulta un concepto importante, y es que cada conjunto de devanados por fase produce una distribución de campo a lo largo del primario, como se observa en la figura 2.8.

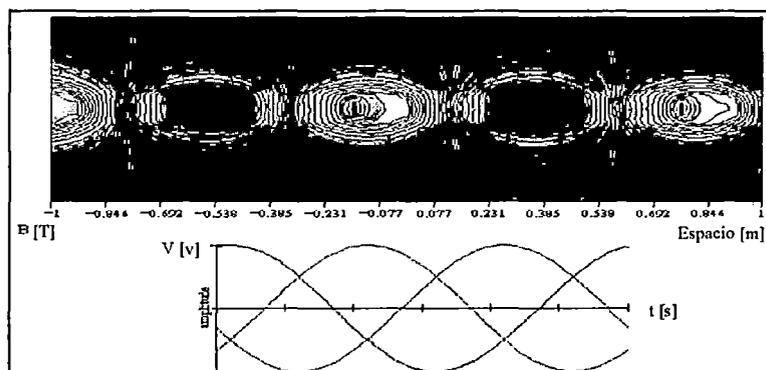


Figura 2.8 Distribución del campo a lo largo del primario.

Fuente: José D. Rairan A., Alexander Rodríguez G. y Roberto Bedoya S.; *Motor Lineal de Inducción, Principios de Diseño y Construcción Primera Edición*; Bogotá DC - 2012.

De la misma manera que se analizó para el conductor L_1 , se puede hacer para L_2 y L_3 , con lo que se concluye que la distribución de campo magnético sobre la superficie de la pista es función del tiempo y la posición "x".

Para generalizar una fórmula, solo resta tener en cuenta que debe haber una correspondencia exacta en el campo para un instante y punto en el espacio definido, como se explica a continuación: para el instante $t=0$, $i_2=0$, por lo tanto el campo sobre la superficie del devanado justo sobre L_2 debe ser cero, coincidiendo, de esta manera, la distribución espacial y temporal; con esto en mente resulta:

$$\vec{B}_1(t, x) = B_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{x \cdot 180}{\tau} - \frac{2\pi}{3}\right) \quad [\text{T}] \quad (2.10)$$

$$\vec{B}_2(t, x) = B_{\max} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{x \cdot 180}{\tau}\right) \quad [\text{T}] \quad (2.11)$$

$$\vec{B}_3(t, x) = B_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{x \cdot 180}{\tau} + \frac{2\pi}{3}\right) \quad [\text{T}] \quad (2.12)$$

Para las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8) se debe tener en cuenta que un paso polar "τ" es el espacio ocupado por tres conductores, es decir, que una variación completa de

la onda de campo en el espacio, como lo muestra la figura 2.8 es 2τ , que equivale a 2π radianes, por ser la variación de un periodo completo de la señal. Ahora solo resta sumar los campos individuales generados por cada fase y encontrar así el campo total. Luego de hacer operaciones vectoriales se llega a:

$$\vec{B}_{\text{neto}} = (t, x) = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 \quad [\text{T}] \quad (2.13)$$

$$\vec{B}_{\text{total}}(t, x) = 1.5 \cdot B_{\text{max}} \text{sen} \left(\omega t + \frac{x \cdot 180}{\tau} \right) \quad [\text{T}] \quad (2.14)$$

Únicamente hace falta encontrar una expresión para la velocidad con que este campo se desplaza.

$$v = \frac{d}{t} \quad [\text{m/s}] \quad (2.15)$$

Para un único periodo esa distancia recorrida es 2τ , mientras que el tiempo que toma es igual al periodo de la onda sinusoidal, vista en el tiempo, es decir, "T", con lo que la expresión (2.15) se convierte en:

$$v = 2 \cdot \tau \cdot f \quad [\text{m/s}] \quad (2.16)$$

La ecuación (2.14) representa una señal senoidal que varía en dos dimensiones; de una parte el tiempo, debido al sistema trifásico de corriente; y de la otra el espacio, debido a la configuración espacial del devanado sobre el núcleo de la máquina.

2.3. Aspectos Fundamentales de los Motores Lineales.

El motor eléctrico lineal es una particularidad del motor rotativo. No presenta diferencias en su principio de funcionamiento ni en sus topologías, siendo todas comunes a ambos tipos de motor. De hecho, se puede definir un motor eléctrico lineal como aquel que produce de forma directa, mediante interacciones entre campos magnéticos, una fuerza de desplazamiento longitudinal de su parte móvil, en lugar de un par y un giro que correspondería a los motores eléctricos rotativos.

De una manera descriptiva, un motor lineal proviene de un motor rotativo, como el de la figura 2.9, donde se ve una sección lateral de un motor rotativo síncrono de imanes.

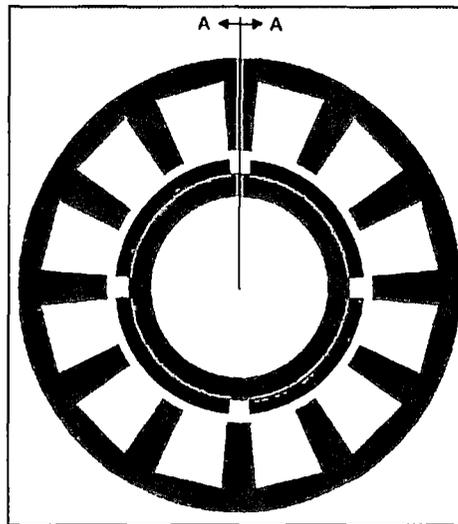


Figura 2.9 Sección Transversal de un Motor Rotativo Síncrono.

Fuente: Jorge Jiménez Pérez; Diseño de Motores Lineales Síncronos Miniaturizados para el Accionamiento de Puertas Automáticas. Tesis Doctoral.; Universidad de Navarra; España - 2013.

Realizando un corte radial a lo largo de una generatriz en cada uno de los elementos cilíndricos, y desarrollando posteriormente los elementos cortados, se obtienen un motor lineal síncrono, como el de la figura 2.10. Uno de los dos elementos será fijo, mientras el otro se desplazará longitudinalmente sobre el primero. Para que el desplazamiento sea posible, lo normal es que la parte fija deberá ser de mayor longitud que la parte móvil, aunque puede darse lo contrario. Se pueden desplazar tanto el primario del motor como el secundario, debiendo estudiarse en el diseño del motor qué configuración es más adecuada.

Un motor lineal puede ser síncrono, en el que el campo del secundario se desplaza en sincronismo, es decir, a la vez que el del primario, o de inducción, en el que el campo del secundario no está en sincronismo con el del primario. Cabe destacar que la nomenclatura tradicional de rotor y estator no es aplicable a los motores lineales, puesto que no hay ninguna parte que tenga movimiento rotativo. Para estos motores, la nomenclatura más adecuada, y la que se utilizará es la de primario, para la parte que tiene bobinado y secundario, para la parte con el campo magnético constante.

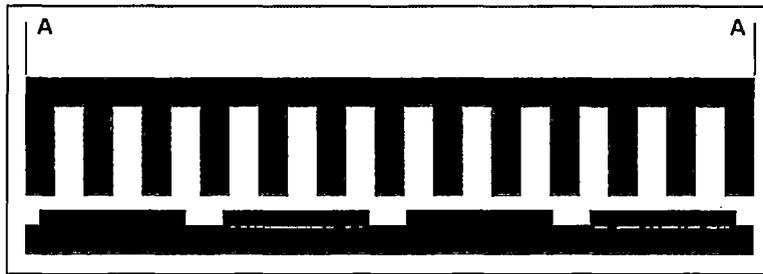


Figura 2.10 Motor Lineal Síncrono Obtenido del Desarrollo del Motor Rotativo.

Fuente: Jorge Jiménez Pérez; *Diseño de Motores Lineales Síncronos Miniaturizados para el Accionamiento de Puertas Automáticas. Tesis Doctoral.; Universidad de Navarra; España - 2013.*

2.4. Transformación Topológica de un Motor Rotativo en un Motor Lineal.

La forma más sencilla de entender un motor lineal es imaginarse un motor rotativo al cual se le practica un corte en sentido axial, por una generatriz, cuya profundidad llega hasta el centro del eje del motor. A continuación se desarrolla el motor (estator y rotor) por el corte y se extiende hasta dejarlo en un plano, obteniendo así dos elementos paralelos. Uno de ellos estará destinado a permanecer estático y por consiguiente se le denominará estator, el otro elemento se moverá en forma lineal y paralela al estator y se le denominará deslizador.

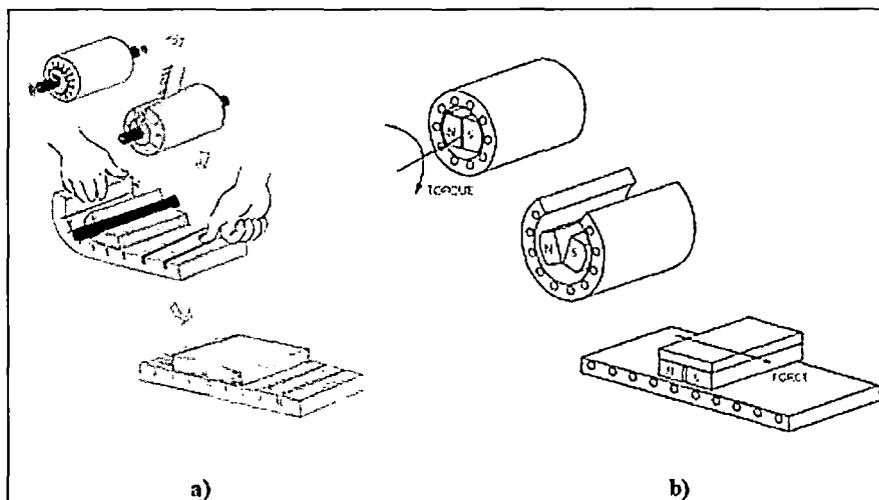


Figura 2.11 Transformación de un Motor Rotativo en Motor Lineal.

a) Motor de inducción b) Motor de imanes permanentes

Fuente: <http://pretel.korea.ac.kr> y <http://www.baldor.com>

En la figura 2.11 se muestran dos ejemplos donde se puede apreciar el procedimiento descrito previamente. En la figura 2.11 a) se representa el caso de un motor lineal asíncrono en el que se aprecia que se conforma una jaula de ardilla

mediante una placa conductora, normalmente de aluminio, no estando representado el cierre del circuito magnético o culata del deslizador y en la figura 2.11 b) el de un motor síncrono lineal, en el que se ha representado la culata que hace el cierre del circuito magnético entre los dos polos de imanes permanentes.

Una vez lograda la disposición lineal de los componentes del motor, en uno de ellos queda alojado el devanado que produce un campo magnético que se desplaza en un sentido determinado, a esta pieza del motor lineal se le denomina armadura.

En la otra pieza, se ubica una lámina conductora en el caso de los motores lineales de inducción o en el caso de los MSLs, se ubican los imanes permanentes que reaccionan ante la presencia del campo magnético variable de la armadura. A esta pieza se le denomina riel de reacción o excitación.

2.5. Clasificación y Topologías de los Motores Lineales.

Los motores lineales forman parte de los tipos especiales de motores eléctricos y se incluyen dentro de la clasificación general de los mismos, sin embargo, dentro de los motores lineales también se pueden distinguir varios.

Como el tipo de motor lineal a estudiar es síncrono, se establece una nueva clasificación en su grupo que incluye los de flujo transversal y longitudinal, los de reluctancia y los de imanes permanentes o PMLSMs.

Finalmente, se puede realizar una clasificación dentro de la categoría de los PMLSMs que depende de las características constructivas de la armadura. Así, se tienen PMLSMs de armadura con ranuras en el núcleo magnético (en inglés: slotted), armadura sin ranuras en el núcleo magnético (slotless) y armadura sin núcleo magnético (en inglés: coreless). En todos los casos, los imanes de la excitación pueden ser superficiales (en inglés: surface PM); incrustados (en inglés: buried PM); en el interior del núcleo magnético (en inglés: interior PM); o en disposición Halbach (en inglés: Halbach array). En la figura 2.12 se muestran diferentes formas de disponer los imanes permanentes.

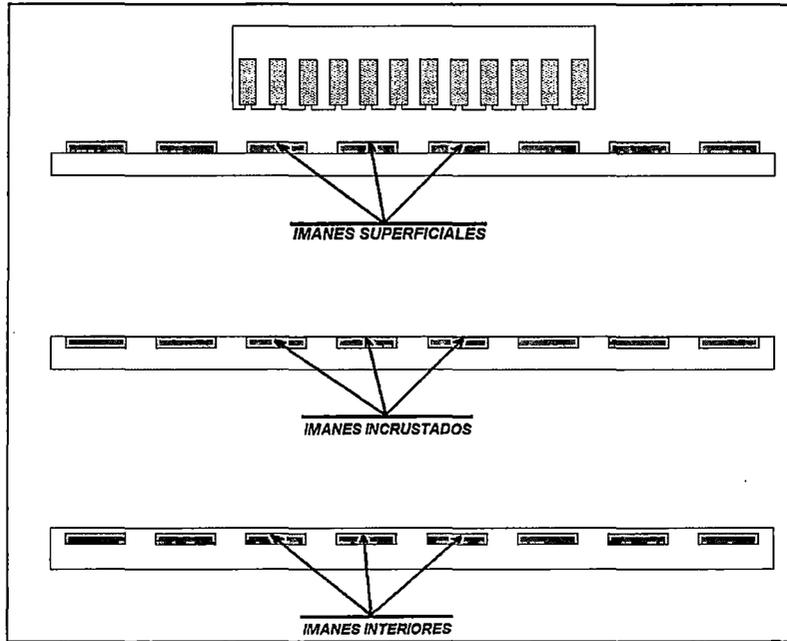


Figura 2.12 Diferentes tipos de Disposición de los Imanes.

Fuente: Gabriel Gonzales Palomino.; *Optimización del Empuje y las Fuerzas de Diente en Dos Modelos de Motores Lineales Síncronos de Imanes Permanentes. Tesis Doctoral;* Universidad Carlos III de Madrid; España - 2012.

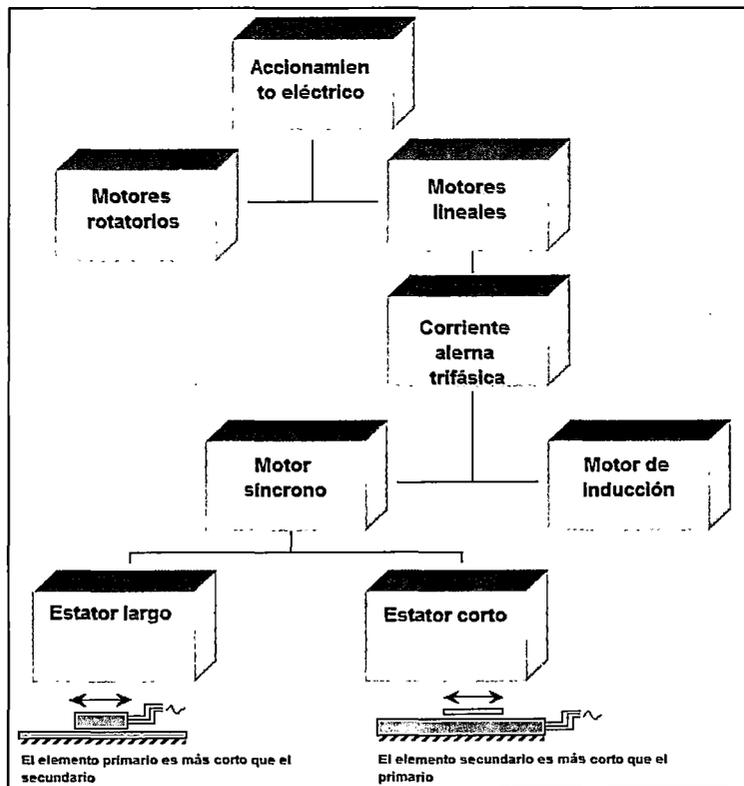


Figura 2.13 Esquema de Clasificación de los Motores Lineales.

Fuente: LUCAS – NULLE, *UniTrain-I*, Segunda edición.

También es posible diferenciar los PMLSMs por varios aspectos constructivos o de apariencia. A continuación se hará una descripción de varias de ellas.

2.5.1. De acuerdo con la longitud de sus componentes:

Teniendo en cuenta este parámetro se pueden diferenciar en los de estator largo, lo que indica que el estator o parte fija, tiene mayor longitud que el deslizador o parte móvil y otra posibilidad es la del estator corto, donde el estator tiene menor longitud que el deslizador.

Se debe tener en cuenta que tanto en el estator como en el deslizador, pueden estar ubicadas la armadura o la excitación indistintamente.

2.5.2. De acuerdo con la forma geométrica de sus componentes:

Se pueden tener dos tipos básicos de PMLSMs que son: Los planos y los tubulares.

En el primer caso, el motor se compone de dos placas paralelas en una de las cuales se ubica el bobinado de armadura y en el otro los imanes de excitación. Además una de las placas será estática (estator) y la otra móvil (deslizador).

En el segundo caso, tanto el estator como el deslizador son cilindros coaxiales y normalmente la pieza interna es donde se ubica el deslizador y, además en la pieza externa o estator, se ubica la armadura debido a la facilidad de construcción del devanado, de conexión y de alimentación.

La figura 2.14 muestra imágenes de los dos tipos de motores descritos (plano y tubular).

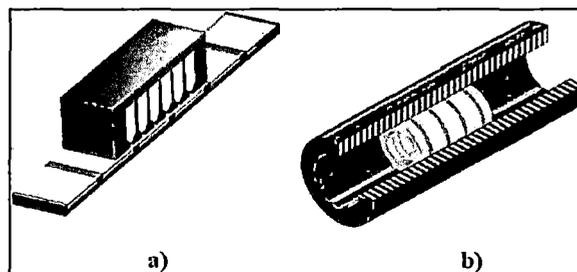


Figura 2.14 Tipos de PMLSMs.

a) Planos.

b) Tubulares.

Fuente: Manual operativo para el Sistema de Posicionamiento HIWIN

2.5.3. De acuerdo con el número de lados activos.

En el caso de los motores lineales planos, estos pueden ser monoláteros o biláteros, es decir, que el estator puede tener un solo lado o dos. En el caso monolátero, se tiene una sola fila de imanes y un solo devanado que se enfrentan y que son separados por un entrehierro único. En un motor bilátero, el estator es doble para un único deslizador, el cual se ubica entre los dos lados del estator, separándolos un entrehierro doble. En la figura 2.15 se muestran ejemplos de PMLSMs monoláteros y biláteros.

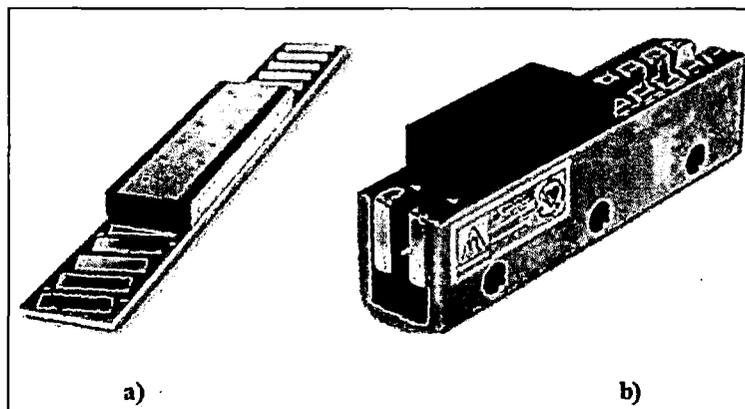


Figura 2.15 Tipos de PMLSMs.

- a) Monolateral.
- b) Bilateral.

Fuente: Manual operativo para el Sistema de Posicionamiento HIWIN - 2012

2.5.4. De acuerdo con la forma constructiva de la armadura.

En este caso los PMLSM se pueden clasificar en: los de armadura ranurada, donde el bobinado se aloja en ranuras hechas en el núcleo ferromagnético; los de armadura sin ranuras en el núcleo ferromagnético, donde los bobinados se adhieren al núcleo por medio de pegantes o adhesivos especiales y por lo tanto los bobinados son superficiales y por último están aquellos cuya armadura carece de núcleo ferromagnético, es decir, tienen núcleo de aire y el bobinado es preformado y revestido de una resina amagnética que le proporciona consistencia mecánica.

La figura 2.16 muestra ejemplos de dos de los tres tipos de armaduras en los PMLSMs.

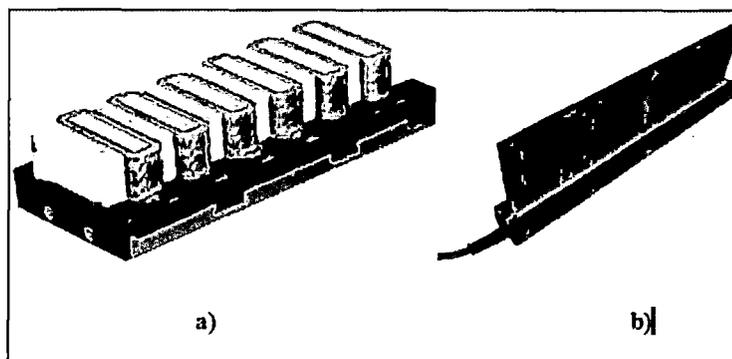


Figura 2.16 Tipos de PMLSMs.

- a) Armadura Ranurada.
- b) Armadura sin Núcleo de Hierro.

Fuente: <http://www.beikimco.com/> y <http://torque-drives.com/html/>

2.5.5. De acuerdo con el sentido de circulación del flujo magnético.

Esta clasificación se refiere a la dirección de las líneas del campo magnético formado con respecto a la dirección de movimiento del deslizador. De tal forma que, en los motores lineales de flujo longitudinal, las líneas de flujo magnético se cierran en planos paralelos al eje longitudinal o al movimiento del deslizador tendrán líneas de flujo magnético paralelas al movimiento del deslizador y los motores lineales de flujo transversal, las líneas de campo magnético se cierran en planos perpendiculares al movimiento del deslizador. Tienen líneas de flujo que van en sentido perpendicular al movimiento del deslizador. La figura 2.17 muestra ejemplos de motores de flujo longitudinal y de flujo transversal.

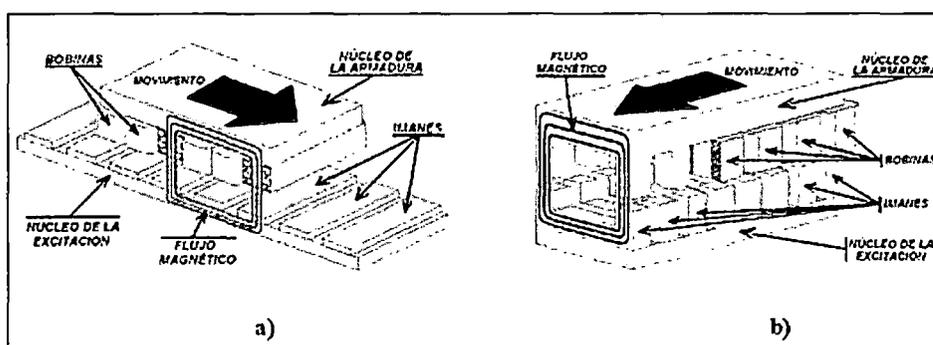


Figura 2.17 Tipos de PMLSMs.

- a) De Flujo Longitudinal.
- b) De Flujo Transversal.

Fuente: Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Bronislaw Tomczuk; *Linear Synchronous Motors*; 2nd Edition – 1999.

2.6. Principio de funcionamiento de los Motores Síncronos Lineales.

Los MSL tienen dos componentes mecánicos o piezas, el estator y el deslizador, en una de las piezas se ubican los devanados de la excitación que se alimentan con una tensión alterna trifásica que produce un campo magnético móvil; a este elemento se le llama armadura. En el otro elemento se ubican los imanes, y se le denomina sistema de excitación de campo.

Existe una serie de ecuaciones que representan las características más importantes del MSL y que se describen a continuación.

2.6.1. Velocidad del deslizador.

El motor lineal se puede desarrollar a partir de un motor rotativo y por ello se puede deducir la velocidad lineal del MSL a partir de la velocidad tangencial de un motor síncrono rotativo puesto que son equivalentes, por lo cual se hará el planteamiento a partir de esta definición.

$$v_t = v_s = \omega_m \cdot r \quad (2.17)$$

Dónde:

| | |
|-------------|--|
| $v_t = v_s$ | Velocidad tangencial en el motor rotativo, equivalente a la velocidad síncrona lineal en el PMLSM. |
| ω_m | Velocidad angular mecánica en el motor rotativo. |
| r | Radio exterior del motor rotativo. |

La relación entre el ángulo eléctrico θ_e y el ángulo mecánico θ_m en un motor eléctrico es.

$$\theta_e = p\theta_m \quad (2.18)$$

Donde p es el número de pares de polos del motor.

Si se deriva (2.18) con respecto al tiempo, se obtiene.

$$\omega_e = p\omega_m \quad (2.19)$$

Despejando ω_m y reemplazando en (2.17)

$$v_s = \frac{\omega_e}{p} r \quad (2.20)$$

El número de polos en la circunferencia del motor es.

$$2p = \frac{2\pi r}{\tau} \quad (2.21)$$

Donde τ es el paso polar en la excitación.

Despejando p y reemplazando en (2.20), se tiene.

$$v_s = \frac{\omega_e \tau}{\pi r} r = \frac{\omega_e \tau}{\pi} \quad (2.22)$$

Teniendo en cuenta que.

$$\omega_e = 2\pi f \quad (2.23)$$

Entonces, la velocidad tangencial de un motor síncrono rotativo que es igual a la velocidad del deslizador del MLS, estará definida por la ecuación.

$$v = v_s = 2f\tau = \frac{\omega}{\pi} \tau \quad (2.24)$$

Dónde:

f : Frecuencia de la fuente de alimentación en corriente alterna de la armadura.

Como se puede observar, la velocidad del deslizador de un MLS solo depende de la frecuencia de la fuente de alimentación y del paso polar y no depende del número de polos $2p$.

2.6.2. Fuerza Electromotriz inducida.

La fuerza electromotriz inducida (FEM) en vacío, en una fase del devanado de la armadura producida por el flujo de excitación de los imanes Φ_f , es:

$$E_f = \pi\sqrt{2}fN_1k_{w1}\Phi_f \quad (2.25)$$

Donde N_1 es el número de espiras de la armadura y por fase, k_{w1} es el coeficiente del devanado de armadura.

El armónico fundamental de la inducción magnética de la excitación es:

$$\Phi_{f1} = L_i \int_0^\tau B_{mg1} \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) dx = \frac{2}{\pi}\tau L_i B_{mg1} \quad (2.26)$$

Similarmente, la tensión inducida E_{ad} por el flujo de reacción de la armadura en el eje d , Φ_{ad} , y la tensión inducida E_{aq} por el flujo de reacción de armadura en el eje q , Φ_{aq} , son:

$$E_{ad} = \pi\sqrt{2}fN_1k_{\omega 1}\Phi_{ad} \quad (2.27)$$

$$E_{aq} = \pi\sqrt{2}fN_1k_{\omega 1}\Phi_{aq} \quad (2.28)$$

Las FEM E_f , E_{ad} , E_{aq} y los flujos Φ_f , Φ_{ad} , Φ_{aq} son usados en la construcción de los diagramas fasoriales y los circuitos equivalentes.

La FEM E_i por fase tomando en cuenta la reacción de armadura es:

$$E_i = \pi\sqrt{2}fN_1k_{\omega 1}\Phi_g \quad (2.29)$$

Donde Φ_g es el flujo magnético en el entrehierro bajo carga, es decir, el flujo magnético resultante incluyendo el efecto del flujo magnético de la reacción de armadura. En vacío la corriente de armadura es muy pequeña y por tanto $\Phi_g \approx \Phi_f$.

Si se incluye la saturación del circuito magnético.

$$E_i = 4\sigma_f f N_1 k_{\omega 1} \Phi_g \quad (2.30)$$

El factor de forma σ_f de las FEM, depende de la saturación magnética de los dientes de la armadura, es decir, la suma de las caídas de potencial magnético en la culata, el entrehierro y los dientes, dividido por la caída de potencial magnético en el entrehierro.

Para construir el diagrama fasorial del MSL, es necesario tener en cuenta si la corriente de fase está adelantada o atrasada con respecto a la tensión de línea, puesto que esto definirá la condición de operación del motor.

Si la corriente está atrasada, se dice que el motor está sub-excitado y tiene un comportamiento inductivo, es decir, consume potencia reactiva de la red donde está conectado. Si por el contrario la corriente está adelantada, el motor tendrá un comportamiento capacitivo y entregará potencia reactiva a la red.

En la figura 2.18, se muestran los diagramas fasoriales de un MSL.

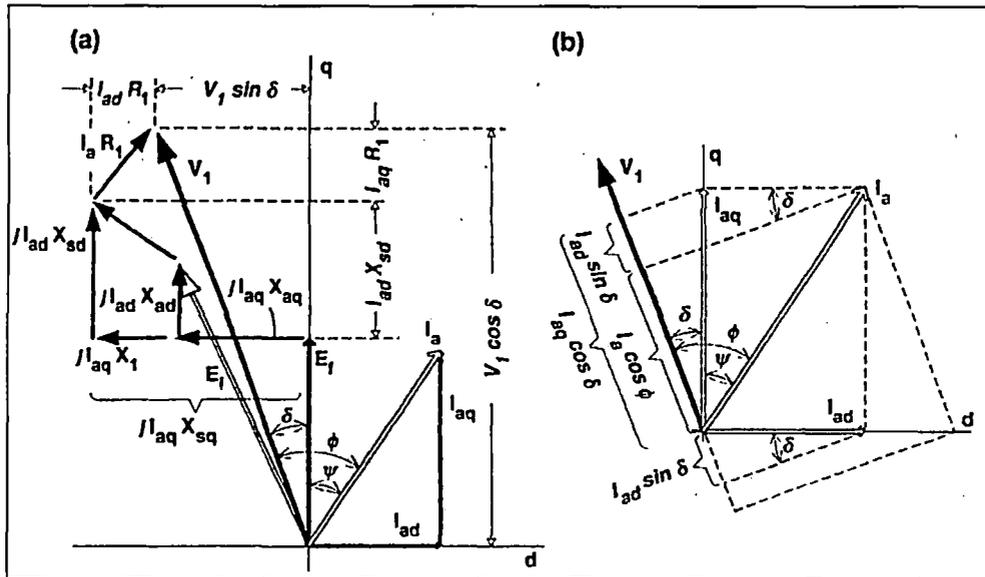


Figura 2.18 Diagrama Fasorial de un MSL.

Fuente: J. F. Gieras and M. Wing, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, New York, Marcel Dekker, Inc., 2002

2.6.3. Potencia Electromagnética y empuje.

A partir del diagrama fasorial de la figura 2.18 a), se pueden deducir las siguientes ecuaciones: numeración coherente de las figuras en todo el documento.

$$V_1 \sin \delta = -I_{ad} R_1 + I_{aq} X_{sq}$$

$$V_1 \cos \delta = -I_{aq} R_1 + I_{ad} X_{sd} + E_f \quad (2.31)$$

De los diagramas fasoriales de la 2.18, se puede observar un ángulo entre la FEM E_f y la tensión de fase en los bornes de la máquina (δ), es claro que dicho ángulo depende de las caídas de tensión producidas en la resistencia y la reactancia del devanado de la armadura y a su vez, éstas caídas de tensión dependen de la corriente de carga I_a , de tal modo que si la corriente es igual a cero (carga nula), el ángulo δ también será cero y por tanto $E_f = V_1$. Es por ello que a δ se le denomina el ángulo de carga del PMLSM.

Ahora bien, las corrientes en eje directo y cuadratura se obtienen resolviendo el conjunto de ecuaciones de la ecuaciones (2.31) y se expresan como.

$$I_{ad} = \frac{V_1 (X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta) - E_f X_{sq}}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2}$$

$$I_{aq} = \frac{V_1(R_1 \cos \delta + X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \quad (2.32)$$

La corriente eficaz de la armadura expresada en función de V_1 , E_f , X_{sd} , X_{sq} , δ y R_1 , es:

$$I_a = \sqrt{I_{ad}^2 + I_{aq}^2} = \frac{V_1(X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta)}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \times \sqrt{[(X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta) - E_f X_{sq}]^2 + [(R_1 \cos \delta - X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1]^2} \quad (2.33)$$

La potencia de entrada también se puede deducir de la siguiente forma.

$$P_{in} = m_1 V_1 I_a \cos \phi = m_1 V_1 (I_{aq} \cos \delta - I_{ad} \sin \delta) \quad (2.34)$$

Reemplazando (2.31) en (2.34).

$$P_{in} = m_1 [I_{aq} E_f + I_{ad} I_{aq} X_{sd} + I_{aq}^2 R_1 - I_{ad} I_{aq} X_{sq} + I_{ad}^2 R_1]$$

$$P_{in} = m_1 [I_{aq} E_f + R_1 I_a^2 + I_{ad} I_{aq} (X_{sd} - X_{sq})] \quad (2.35)$$

Puesto que las pérdidas en el núcleo de la armadura han sido despreciadas, la potencia electromagnética es la potencia del motor menos las pérdidas en el devanado de la armadura.

$$\Delta P_{1w} = m_1 I_a^2 R_1 = m_1 (I_{ad}^2 + I_{aq}^2) R_1 \quad (2.36)$$

$$P_{elm} = P_{in} - \Delta P_{1w} = m_1 [I_{aq} E_f + I_{ad} I_{aq} (X_{sd} - X_{sq})] \quad (2.37)$$

Por lo cual.

$$P_{elm} = \frac{m_1 [V_1 (R_1 \cos \delta + X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1]}{(X_{sd} X_{sq} + R_1^2)^2} \times$$

$$[V_1 (X_{sd} \cos \delta - R_1 \sin \delta) (X_{sd} - X_{sq}) + E_f (X_{sd} X_{sq} + R_1^2) - E_f X_{sq} (X_{sd} - X_{sq})] \quad (2.38)$$

Tomando $R_1 = 0$, la ecuación (2.31) se simplifica de la siguiente forma.

$$P_{elm} = m_1 \left[\frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \sin \delta + \frac{V_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \right] \quad (2.39)$$

En el caso de motores pequeños, la resistencia R_1 es grande y comparable con las reactancias X_{sd} y X_{sq} , por lo cual la ecuación (2.38) es aplicable para este tipo de

motores. En cambio los motores grandes tienen devanados con resistencias pequeñas y en estos casos se puede utilizar la ecuación (2.39) para calcular la potencia electromagnética.

Si se quiere determinar el empuje electromagnético desarrollado por un MSL, entonces se parte de la siguiente expresión:

$$F_{dx} = \frac{P_{elm}}{v_s} \quad (2.40)$$

Despreciando la resistencia de la armadura ($R_1 = 0$).

$$F_{dx} = \frac{m_1}{v_s} \left[\frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \text{sen} \delta + \frac{V_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \text{sen} 2\delta \right] \quad (2.41)$$

De la ecuación (2.41) se deduce que el empuje electromagnético tiene dos componentes.

$$F_{dx} = F_{dx_sinc} + F_{dx_rel} \quad (2.42)$$

Donde el primer término es.

$$F_{dx_sinc} = \frac{m_1 V_1 E_f}{v_s X_{sd}} \text{sen} \delta \quad (2.43)$$

Representa el empuje síncrono y es función de la tensión de entrada y de la fem de excitación, además tiene una variación sinusoidal con respecto al ángulo de carga δ .

El segundo término es.

$$F_{dx_rel} = \frac{m_1 V_1^2}{2v_s} \left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \text{sen} 2\delta \quad (2.44)$$

Representa el empuje de reluctancia² y depende solamente de la tensión de entrada y existe aun si la maquina no está excitada ($E_f = 0$), siempre y cuando $X_{sd} \neq X_{sq}$. Este empuje también varía sinusoidalmente con respecto al ángulo de carga δ , pero tiene el doble de la frecuencia del empuje síncrono.

En la figura 2.19, se representan las curvas de los empujes síncronos, de reluctancia y resultante de un MSL de polos salientes.

2. La reluctancia está vinculada a la resistencia que ejerce un circuito o un material en cuestión resiste el paso al flujo magnético, oponiendo su fuerza magnetomotriz.

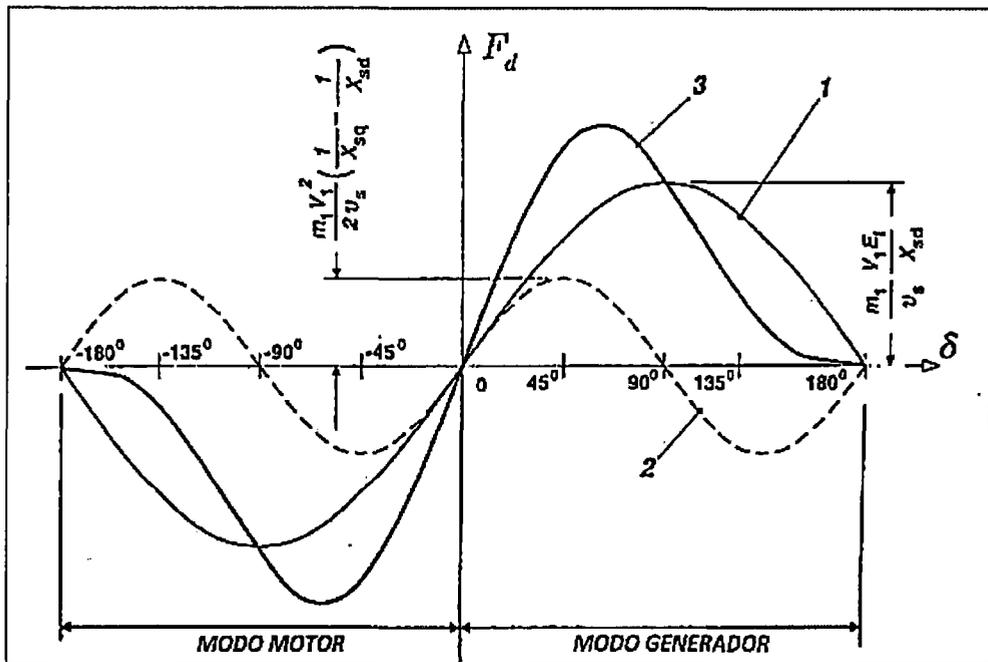


Figura 2.19 Diagramas de los empujes en un PMLSM.

Fuente: J. F. Gieras and M. Wing, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, New York, Marcel Dekker, Inc., 2002.

La reactancia síncrona

La reactancia síncrona del motor lineal, tiene dos componentes fundamentales:

- a) La reactancia por reacción de armadura y
- b) La reactancia por dispersión

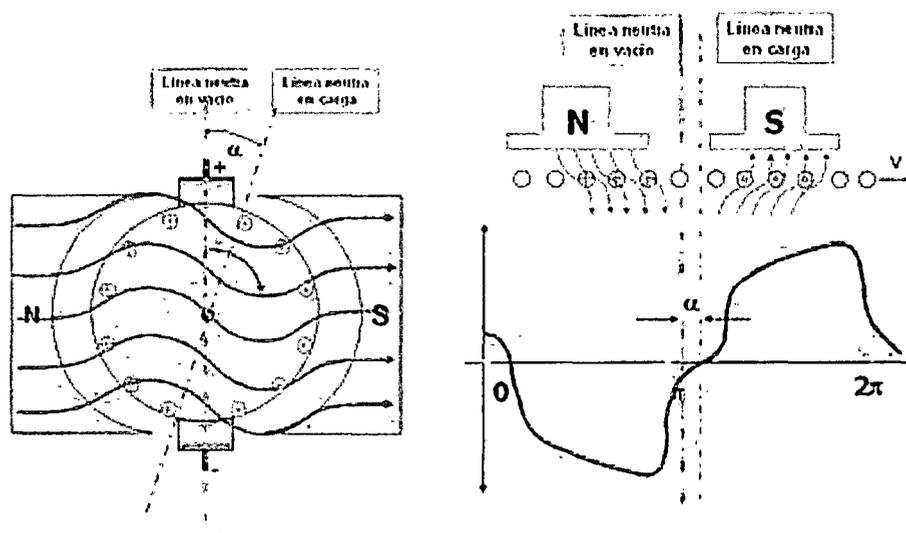
a) La reacción de armadura

Se denomina reacción de la armadura a un fenómeno magnético presente en las máquinas eléctricas, y que consiste en la modificación del campo magnético existente entre el sistema de deslizamiento y el estator de dicha máquina, dependiendo de cómo sea la carga que tiene que mantener dicha máquina eléctrica.

A similitud de lo que ocurre en generadores de Corriente Continua, estando el alternador de una máquina de C.A. en vacío, el único flujo presente es el del campo magnético inductor. Pero al cargarse al alternador la corriente inducida que recorre a los conductores (Generalmente ubicados en el estator) también crean un campo magnético giratorio al cual el sistema de deslizamiento debe vencer para que se desplace.

El resultado es que con carga el flujo principal resulta disminuido y deformado por este fenómeno magnético al que se llama reacción de la armadura.

La gráfica muestra la reacción del inducido en una máquina rotativa y para el caso lineal.



b) La reactancia de dispersión

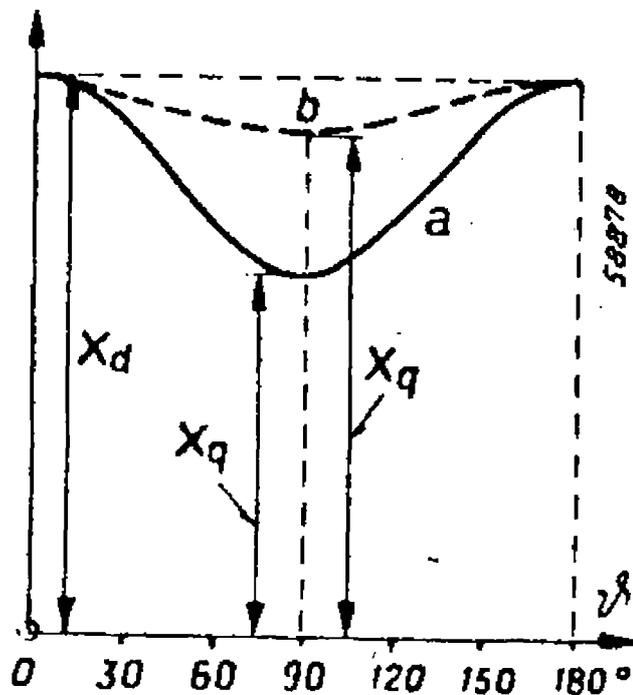
Este parámetro es una componente inherente de las máquinas eléctricas y está presente en el motor lineal síncrono, se la utiliza en la construcción de Blondel y de Potier, para determinar la corriente de excitación en carga y las variaciones de tensión, como así también para determinar la amplitud máxima de la corriente transitoria de cortocircuito o la corriente de arranque de los motores síncronicos.

Es cierto que esta reactancia de dispersión presentaba algunos inconvenientes y en general conduce a corrientes de cortocircuito netamente superiores a aquellas que después se encontraban en la realidad.

Muchos aceptaban como compromiso adoptar, en vez de la reactancia correspondiente a la efectiva dispersión de inducido, aquella medida solamente en el estator, utilizando fórmulas semiempíricas que conducían a resultados bastante aproximados.

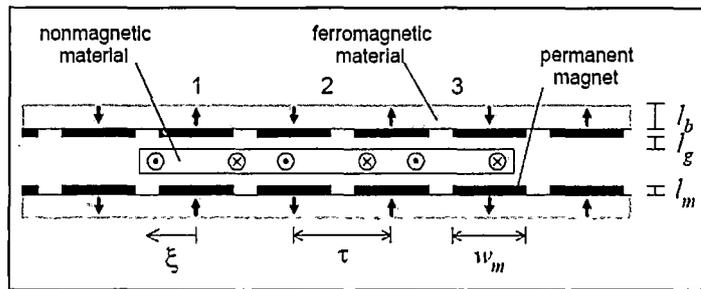
La configuración del estator y las estructuras de desplazamiento lineal complican los cálculos de estos flujos de dispersión, pero también con el continuo desarrollo de la técnica surgieron nuevos problemas y se agravaron otros que parecían despreciables. El cálculo de esta reactancia se complica con la configuración de sus componentes pero que sin embargo utilizando técnicas modernas de medición, es posible cuantificar sus valores.

En general se calculan las reactancias síncronas en el eje directo y las reactancias síncronas en el eje en cuadratura.

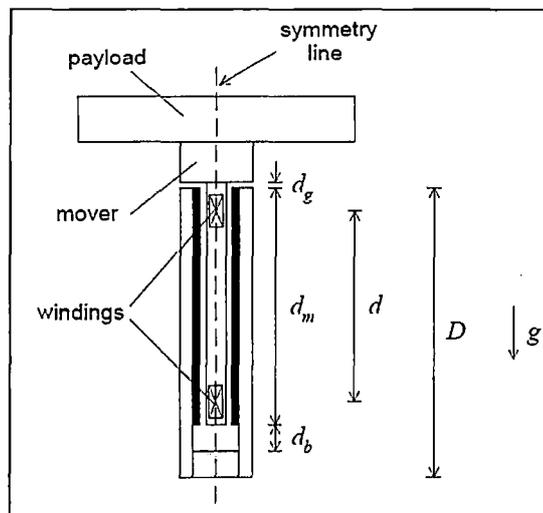


2.7. Modelo Matemático de un Motor Síncrono Lineal.

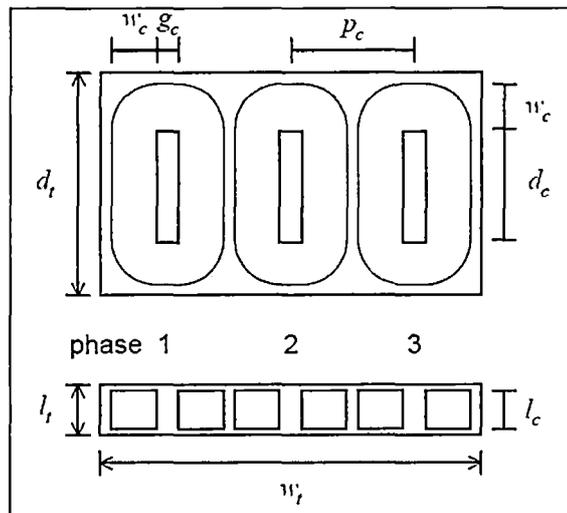
El motor síncrono lineal considerado se muestra en la figura 2.20; el estator consta de un material ferromagnético, formando un bastidor en forma de U en los pares de los imanes permanentes se colocan con polaridad alterna, la carga útil está unida al conjunto de bobina móvil que consta de tres devanados de las bobinas concentradas, encapsuladas en una envoltura de material no magnético (resina epoxi), lo que resulta en la fuerza de reluctancia cero. La distancia entre bobinas P_c y distancia entre imanes τ están relacionadas por $P_c = \frac{4}{3}\tau$. La posición ξ se define tal que $\xi = 0$ es una posición de equilibrio impuesto por la corriente positiva en la fase 1 y el aumento de ξ corresponde a un movimiento hacia la izquierda.



a) Vista superior, con carga útil eliminada.



b) Vista frontal, con carga útil adjunta.



c) Devanados encapsulados en epoxi concentrado.

Figura 2.20 Aire del núcleo del Motor Síncrono lineal con Arrollamientos Concentrados.

Fuente: G. Kang, J. Hong and G. Kim, *Design and analysis of slotless-type permanent-magnet linear brushless motor by using equivalent magnetizing current*, IEEE

Transaction on Industry Applications.

2.7.1. Ecuación de Poisson.

La descripción clásica de los campos magnéticos estáticos es proporcionada por las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times H = J \quad (2.45)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.46)$$

Dónde:

H : Intensidad del campo magnético.

B : Densidad de flujo magnético.

J : Densidad de corriente.

B y H satisfacen la relación constitutiva.

$$B = \mu H \quad (2.47)$$

Donde μ denota la permeabilidad del material. Las condiciones de contorno que se deben cumplir entre dos regiones son.

$$\hat{n} \times (H_1 - H_2) = K \quad (2.48)$$

$$\hat{n} \cdot (B_1 - B_2) = 0 \quad (2.49)$$

Donde \hat{n} es un vector unitario a la superficie límite dirigida de la región 2 a la región 1 y K representa la superficie de densidad de corriente.

Dado que la divergencia del enroscamiento de cualquier vector A siempre debe ser cero, se sigue de la ecuación (2.46) que existe un llamado vector magnético potencial A tal que.

$$B = \nabla \times A \quad (2.50)$$

Sustituyendo (2.47) y (2.50) en (2.45) se tiene.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (2.51)$$

Si $J = J\hat{z}$, entonces $A = A\hat{z}$, y la ecuación (2.50) se reduce a.

$$-\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla A \right) = J \quad (2.52)$$

Que puede estar escrito en forma expandida.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \quad (2.53)$$

La ecuación (2.53) es la ecuación de Poisson en forma escalar.

2.7.2. Cálculo del Campo de los Imanes Permanentes.

De acuerdo con la figura 2.21, el campo magnético estático establecido por la matriz de imán permanente es plana aproximadamente en la zona donde se encuentran las bobinas, y por lo tanto se puede aproximar con precisión mediante la resolución de la ecuación (2.52). La derivación se basa en la figura 2.21 (a) que define las dos regiones de interés, la figura 2.21 (b) que modela los imanes permanentes de excitación de las corrientes equivalentes, y la 2.21 (c) que representa estas corrientes equivalentes como un tren periódico de funciones de impulso. Esta formulación supone que.

- El estator es infinitamente largo en la dirección X.
- Los efectos finales son insignificantes en la dirección Z.
- La permeabilidad del material del imán permanente es igual a la permeabilidad en vacío μ_0 .
- La permeabilidad del material de hierro es infinito.

La ecuación (2.53) bajo estas suposiciones se muestra.

$$\frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} = 0 \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} = -\mu_0 J_2 \quad (2.55)$$

Donde los sub índices identifican las regiones y la densidad de corriente equivalente a la selección de imanes permanentes es la fuente; con las condiciones de contorno que se muestran en las ecuaciones (2.48) y (2.49) se tienen las siguientes ecuaciones.

$$\begin{cases} H_{1x} = 0 & , & y = g_s \\ H_{1x} = 0 \text{ y } B_{1y} = B_{2y} & , & y = l_m \\ H_{2x} = 0 & , & y = 0 \end{cases} \quad (2.56)$$

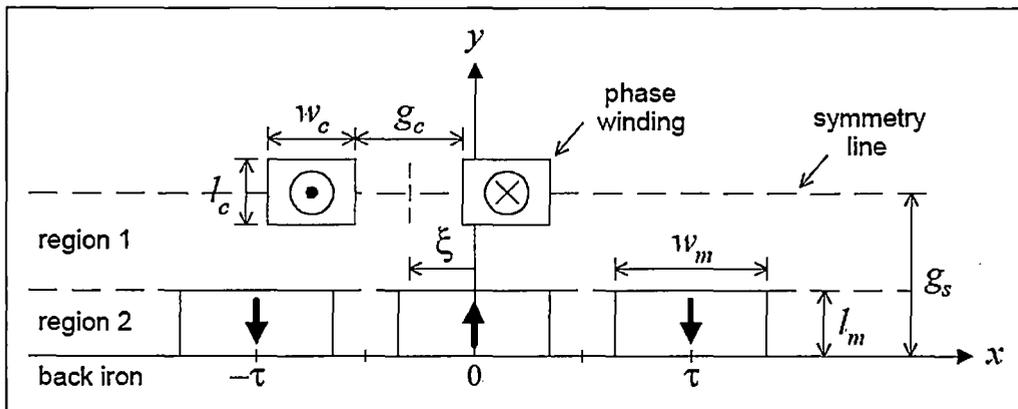
Teniendo en cuenta que la región del espacio completo de aire, incluyendo la región ocupada por el conjunto de bobinas que se mueven, es no magnético.

La densidad de corriente equivalente de la matriz de Imanes Permanentes se puede expresar como la Serie de Fourier.

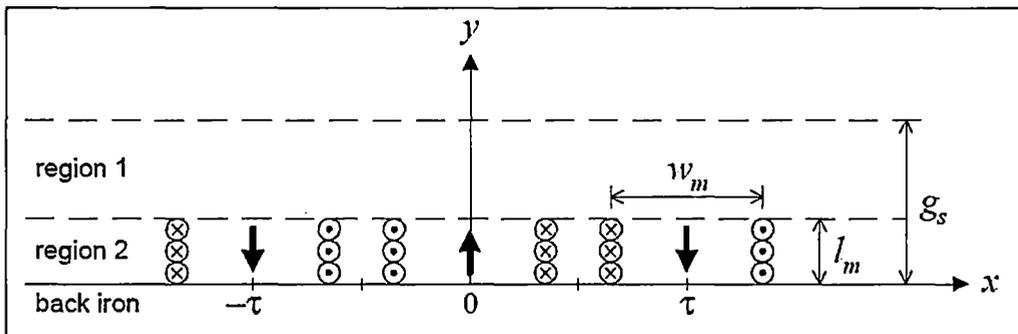
$$J_z = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \alpha_n \sin(nkx) \quad (2.57)$$

Con coeficientes:

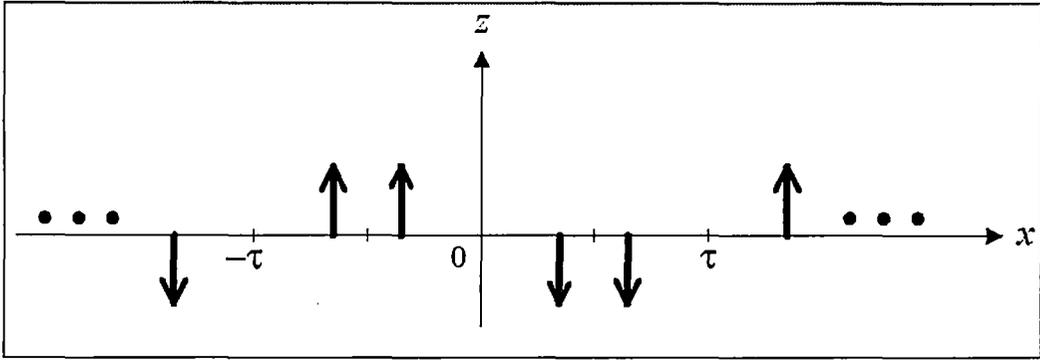
$$\alpha_n = -\frac{4B_r}{\tau\mu_0} \sin\left(\frac{1}{2}nkw_m\right) \quad (2.58)$$



a) Las dos regiones que definen el dominio del problema.



b) Distribución actual equivalente para la matriz de imanes permanentes (x, y) del plano.



c) Distribución actual equivalente para las matrices de imanes permanentes (x, z) del plano.

Figura 2.21 Diagramas esquemáticos, utilizan para derivar el modelo de fuerza del Motor Lineal Síncrono

Fuente: G. Kang, J. Hong and G. Kim, *Design and analysis of slotless-type permanent-magnet linear brushless motor by using equivalent magnetizing current*, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 37, no. 5, pp., 2001.

Donde B_r es la densidad de flujo residual del material de los imanes permanentes y $k = \pi/\tau$ es la frecuencia espacial. Dada esta excitación, la solución de (2.54) y (2.55), satisface la ecuación (2.56) y se obtiene.

$$A_1 = \mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\alpha_n}{(nk)^2} \cdot \left(\frac{\sinh(nkl_m)}{\sinh(nkg_s)} \cosh(nk(g_s - y)) \right) \cdot \sin(nkx) \quad (2.59)$$

$$A_2 = \mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\alpha_n}{(nk)^2} \cdot \left(1 - \frac{\sinh(nk(g_s - l_m))}{\sinh(nkg_s)} \cosh(nky) \right) \cdot \sin(nkx) \quad (2.60)$$

Siguiendo la ecuación (2.50), el rizo de la ecuación (2.59) proporciona la densidad de flujo en el entrehierro en la forma.

$$B_{1x} = -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\alpha_n}{nk} \cdot \frac{\sinh(nkl_m)}{\sinh(nkg_s)} \cdot \sinh(nk(g_s - y)) \cdot \sin(nkx) \quad (2.61)$$

$$B_{1y} = -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\alpha_n}{nk} \cdot \frac{\sinh(nkl_m)}{\sinh(nkg_s)} \cdot \cosh(nk(g_s - y)) \cdot \cos(nkx) \quad (2.62)$$

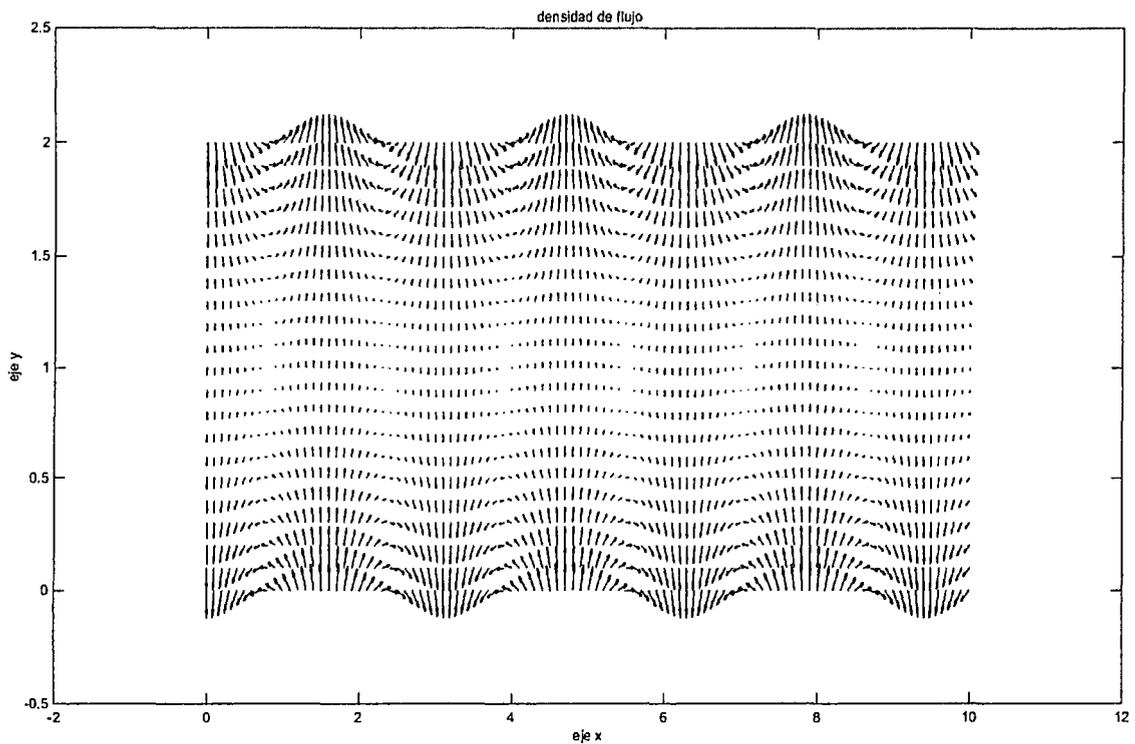


Figura 2.22 Densidad de Flujo Magnético del MSL.

Fuente: Elaboración Propia.

La densidad de flujo en el entrehierro juega un papel crítico en la determinación de la fuerza producida en el conjunto de la bobina.

2.7.3. La fuerza de Lorentz.

La fuerza ejercida por un campo magnético estático originada por los imanes permanentes con densidad de flujo B en conductores portadores de corriente J es la densidad de la llamada fuerza de Lorentz F dada por.

$$F = \int_v J \times B \, dv \quad (2.63)$$

Que también se expresa de esta manera.

$$F = - \int_v J_z \times B_y \, dv \quad (2.64)$$

Si la corriente está dirigida en el eje z y el movimiento en el eje x . Para una sola bobina de N vueltas con una longitud L en la dirección z que lleva una corriente I , entonces la ecuación (2.64) se reduce a.

$$F = -NILB_{avg} \quad (2.65)$$

Con

$$B_{avg} = \frac{1}{A_c} \left(\int_{a^+} B_y da - \int_{a^-} B_y da \right) \quad (2.66)$$

Donde las áreas a^+ y a^- que se realiza en la integración coincide con las secciones transversales de la zona de $A_c = \omega_c l_c$ de los dos lados de la bobina. Tenga en cuenta que las ecuaciones (2.65) y (2.66) se extiende a los conjuntos multi-bobina utilizando superposición rígida, donde B_{avg} se calcula directamente solo del campo del imán permanente. Aunque las corrientes de la bobina inducen contribuciones aditivas al campo de los imanes permanentes, no induce ninguna contribución neta a la fuerza; todas esas fuerzas inducidas actuales suman cero.

Evaluación de la primera integral de la ecuación (2.66) con la ecuación (2.62) y la posición de la bobina relativa $\xi_j = \xi - (j - 1) \frac{4}{3} \tau$, donde $j = 1,2,3$, rendimientos.

$$\begin{aligned} \int_{a^+} B_y da &= 2 \int_{(g_s - \frac{l_c}{2})}^{g_s} \int_{(-\frac{g_c}{2} - w_c - \xi_j)}^{(-\frac{g_c}{2} - \xi_j)} B_{1y} dx dy \\ &= -2\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\alpha_n}{(nk)^3} \cdot \frac{\sinh(nkl_m)}{\sinh(nkg_s)} \cdot [\sinh(nk(g_s - y_s))]_{(g_s - \frac{l_c}{2})}^{g_s} \\ &\quad \cdot [\sinh(nkl_m)]_{(-\frac{g_c}{2} - w_c - \xi_j)}^{(-\frac{g_c}{2} - \xi_j)} \\ &= -2\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\alpha_n}{(nk)^3} \cdot \frac{\sinh(nkl_m)}{\sinh(nkg_s)} \cdot \left[-\sinh\left(\frac{1}{2}nk w_c\right) \right] \\ &\quad \cdot \left[2 \cos\left(\frac{1}{2}nk(g_c - w_c - 2\xi_j)\right) \sin\left(\frac{1}{2}nk w_c\right) \right] \\ &= 4\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \beta_n \cos\left(\frac{1}{2}nk(g_c - w_c - 2\xi_j)\right) \end{aligned}$$

Donde.

$$\beta_n = \frac{\alpha_n}{(nk)^3} \cdot \frac{\sinh(nkl_m)}{\sinh(nkg_s)} \cdot \sinh\left(\frac{1}{2}nkl_c\right) \cdot \sin\left(\frac{1}{2}nk w_c\right) \quad (2.67)$$

Del mismo modo, la evaluación de la segunda integral de la ecuación (2.66) se tiene.

$$\begin{aligned} \int_{a^-} B_y da &= 2 \int_{(g_s - \frac{l_c}{2})}^{g_s} \int_{(\frac{g_c}{2} - \xi_j)}^{(\frac{g_c}{2} + w_c - \xi_j)} B_{1y} dx dy \\ &= 4\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \beta_n \cos\left(\frac{1}{2}nk(g_c + w_c - 2\xi_j)\right) \end{aligned}$$

Se obtiene.

$$B_{avg} = 8\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \beta_n \sin\left(\frac{1}{2}nk(g_c + w_c)\right) \cdot \sin(nk\xi_j) \quad (2.68)$$

Y por lo tanto, la fuerza producida por cada fase de acuerdo con la ecuación (2.65) es.

$$f_j = -\frac{8\mu_0 N d i_j}{A_c} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \beta_n \sin\left(\frac{1}{2}nk(g_c + w_c)\right) \cdot \sin(nk\xi_j) \quad (2.69)$$

En última instancia la función de la fuerza total se obtiene por la suma de las fuerzas de las tres fases.

$$f(\xi, i) = \sum_{j=1}^3 K_j(\xi) i_j \quad (2.70)$$

Donde las características espaciales de las fases se resumen por la serie de Fourier.

$$K_j(\xi) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \gamma_n \sin\left(nk\left(\xi - (j-1)\frac{4}{3}\tau\right)\right) \quad (2.71)$$

Con coeficientes.

$$\begin{aligned} \gamma_n &= -\frac{18Ndp_c^2 B_r}{w_c l_c (n\pi)^3} \cdot \frac{\sinh(nkl_m)}{\sinh(nkg_s)} \cdot \sinh\left(\frac{1}{2}nkl_c\right) \cdot \sin\left(\frac{1}{2}nkw_m\right) \cdot \sin\left(\frac{1}{2}nkw_c\right) \\ &\quad \cdot \sin\left(\frac{1}{2}nk(g_c + w_c)\right) \end{aligned} \quad (2.72)$$

Un cambio de signo se ha hecho para tener en cuenta el hecho de que la posición ξ aumente en la dirección x negativa. El enfoque basado en la física para el desarrollo de las ecuaciones (2.70) y (2.72) tiene un valor evidente desde el punto de vista de

diseño del motor, ya que el modelo de fuerza exhibe explícitamente la influencia de cada parámetro de la dimensión y del material crítico.

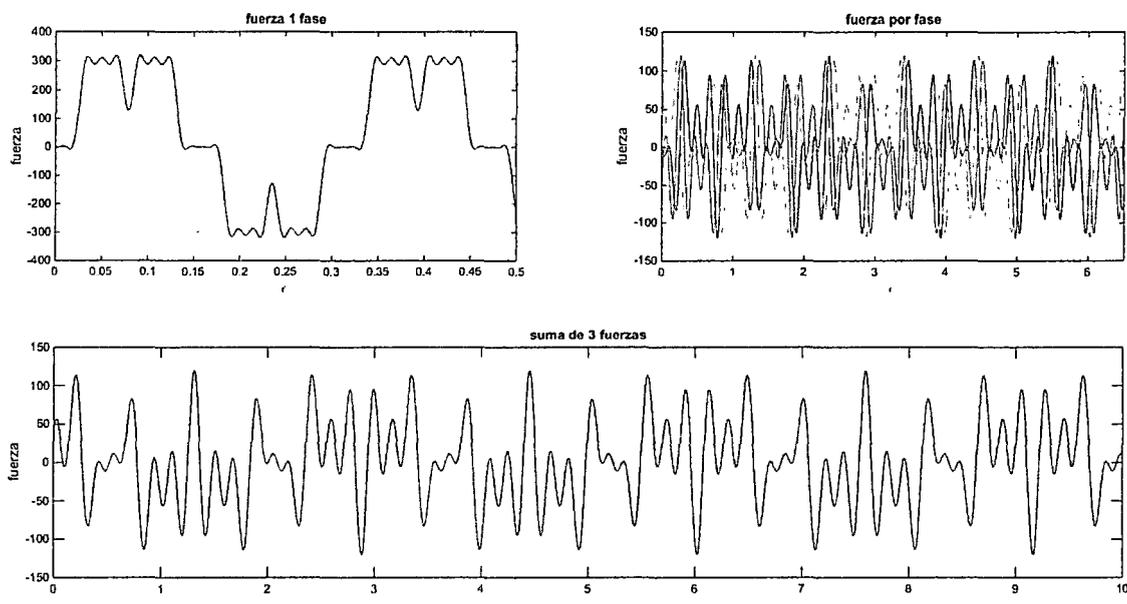


Figura 2.23 Grafica del comportamiento de la fuerza.

Fuente: Elaboración Propia

2.8. Efectos que Presentan en los Motores Síncronos Lineales.

2.8.1. Rizado en el Empuje de un Motor Síncrono Lineal.

El rizado en el empuje de los MSL es un efecto en forma de oscilación o variación en el tiempo, que se presenta en el empuje electromagnético. Este efecto es indeseable, puesto que produce vibraciones, ruido y además hace que sea muy difícil determinar la posición del deslizador en cada instante de tiempo y por consiguiente se complica mucho el diseño y operación del sistema de control.

En general se ha encontrado que el rizado en el empuje se debe a la presencia de dos tipos de fuerzas que se adicionan al empuje electromagnético del motor; ellas son:

2.8.1.1. Fuerzas por Armónicos en el Empuje de Reluctancia.

Es la denominada fuerza de diente, que en inglés se le conoce como "cogging Force" y es debida a la presencia de ranuras en la armadura, que en el caso de los MSL normalmente son mucho más abiertas que en los motores rotativos.

En forma más detallada, la fuerza de diente se produce por la interacción de los imanes permanentes y la estructura de material magnético de la armadura, es así como los bordes de los imanes de la excitación tratan de alinearse con los bordes de los dientes de la armadura, generando así una fuerza que es llamada fuerza de diente la cual tiene componentes perpendicular y longitudinal.

La fuerza de diente depende únicamente de la estructura física del MSL y es independiente de la alimentación del motor, por lo cual existe aún en el caso que no se haya excitado el motor y tiene una variación periódica con respecto a la posición del deslizador. La figura 2.23 muestra la gráfica típica de la fuerza de diente obtenida en un MSL.

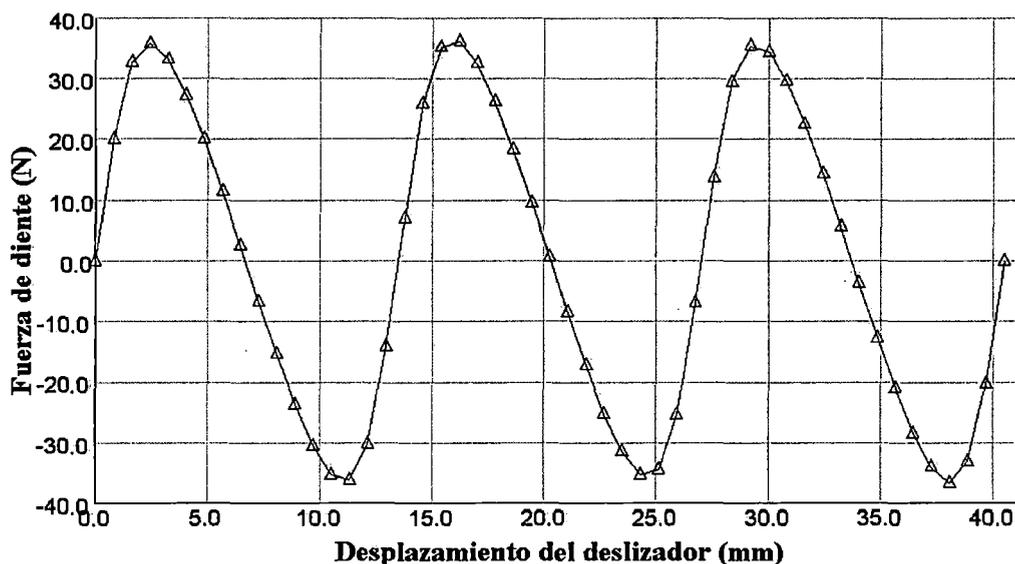


Figura 2.24 Fuerza de Diente en un MSL.

Fuente: Jaime Montoya, Juan Daniel Marín, *Diseño de Motores Síncronos Lineales de imanes Permanentes en Disposición Halbach*, Editorial Universidad Carlos III de Madrid - 2010.

La fuerza de diente puede ser calculada mediante el método de la variación de la energía con respecto a la posición del deslizador, mediante la siguiente expresión:

$$F = \frac{\partial W}{\partial X} \quad (2.73)$$

Donde.

$$W = \frac{1}{2} \phi^2 \mathcal{R} \quad (2.74)$$

En el caso de los motores, se busca que el flujo magnético en el entrehierro sea constante para mantener una potencia también constante; por lo tanto, la variación de la energía se produciría solamente por una variación de la reluctancia con respecto a la posición del deslizador. Así pues, la expresión (2.73) queda así.

$$F = \frac{1}{2} \varphi^2 \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial X} \quad (2.75)$$

Teniendo en cuenta este planteamiento, una forma de minimizar el efecto de la fuerza de diente sobre el empuje electromagnético, consiste en diseñar el MSL de tal forma que la variación de la reluctancia con respecto a la posición sea mínima y esto se logra usando un ancho de los imanes optimizado con respecto al número de dientes de la armadura o utilizando la técnica de inclinación de los imanes. Otras técnicas utilizadas consisten en utilizar ranuras semicerradas, inclinar las ranuras, cambiar el ancho de los imanes o desplazando los mismos.

2.8.1.2. Fuerzas por Armónicos en el Empuje Síncrono.

Estas fuerzas se producen por la presencia de armónicos en la forma de onda de la inducción magnética, las cuales a su vez se producen por la presencia de asimetrías o cambios en el circuito magnético tanto en la armadura como en la excitación. Estas asimetrías son debidas por ejemplo, a la presencia de ranuras en la armadura y la presencia de imanes en la excitación, a la forma geométrica de esos imanes y a los efectos de borde.

Existen fundamentalmente dos tipos de fuerzas que influyen en los armónicos del empuje síncrono de un MSL:

a) Fuerzas por efecto de borde.

Se deben a la longitud finita de los núcleos magnéticos del estator y del deslizador, los cuales introducen efectos de borde en la distribución del campo magnético, pero en el caso en que el deslizador tiene una longitud muy inferior a la del estator, como es el caso de los motores analizados en esta tesis, el efecto de borde sobre el rizado no es muy significativo, puesto que el borde de la excitación en la mayor parte del recorrido está muy lejos del borde de la armadura y sólo será significativo cuando la armadura se acerque a uno de los extremos de la excitación.

b) Fuerzas por los armónicos en la inducción magnética.

Estas fuerzas se producen por los armónicos contenidos en la forma de onda de la f.m.m. en el entrehierro, y dichos armónicos a su vez se deben a la forma no sinusoidal y por tanto a los armónicos de la inducción magnética en el entrehierro, lo cual es originado en gran parte por la forma geométrica de los imanes permanentes que generalmente son rectangulares y a la presencia de las ranuras en la armadura. La figura 2.24 muestra las formas de onda de la inducción magnética en el entrehierro de un MSL de bobinado concentrado.

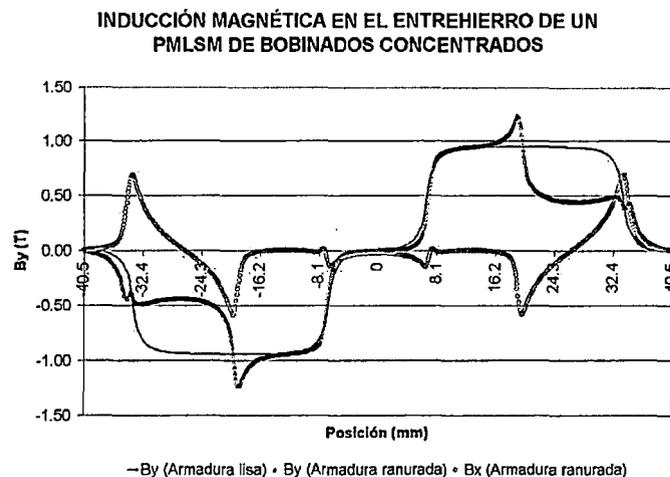


Figura 2.25 Señales de las inducciones magnéticas longitudinal y perpendicular en el entrehierro de un MSL de bobinado concentrado con armadura lisa y Ranurada.

Fuente: Gabriel Gonzales Palomino.; Optimización del Empuje y las Fuerzas de Diente en Dos Modelos de Motores Lineales Síncronos de Imanes Permanentes. Tesis Doctoral; Universidad Carlos III de Madrid; España - 2012.

2.9. Posicionamiento de un motor lineal.

Un motor rotatorio no tiene barreras mecánicas que limiten el número de revoluciones que pueda realizar. Ésta es la razón por la que estos motores se emplean generalmente en aplicaciones que incluyen un control de velocidad.

Por el contrario, las posiciones que un motor lineal puede adoptar, están limitadas mecánicamente. Las partes móviles de un motor lineal no pueden ir más allá de las fronteras establecidas en las limitaciones mecánicas; es más, si esto ocurriera, se destruiría el motor. Por esta razón, un motor lineal siempre se emplea con un controlador de posición que registra todo el tiempo la posición del motor.

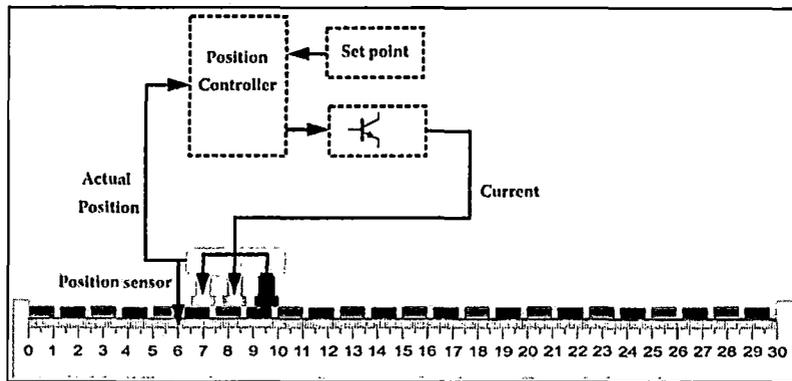


Figura 2.26 Escala que se emplea para determinar la posición del motor.

Fuente: LUCAS – NULLE, *UniTrain-I*, Segunda edición.

La señal de entrada del controlador es el valor de consigna, el cual determina la posición deseada del motor. Se necesita comparar el valor de consigna con la posición actual del motor, y el resultado es procesado por el controlador de manera que el valor actual tienda a aproximarse al valor de consigna. La señal de salida del controlador de posición, es el valor de consigna del controlador de corriente, de manera que la fuente de alimentación del motor alimenta las tres fases del motor con la corriente que se requiera. El signo y la intensidad de la corriente se escogen de manera que las tres fases del motor contribuyan a su propulsión.

2.9.1. Determinación de la posición por medio de un codificador.

El controlador de posición necesita conocer la actual posición del motor. Para determinarla, se dispone de varios tipos de sensores.

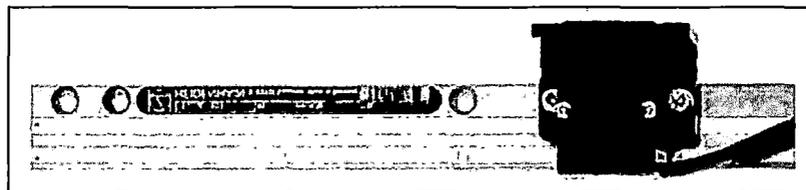


Figura 2.27 Sensor de posicionamiento.

Fuente: LUCAS – NULLE, *UniTrain-I*, Segunda edición.

La selección del tipo de codificador de posición ejerce una influencia decisiva sobre las prestaciones de los accionamientos directos, y los accionamientos directos plantean elevadas exigencias a la calidad de las señales que indican la posición.

Señales óptimas de medición

- ✓ Incrementan la calidad de las superficies de trabajo.
- ✓ Reducen la vibración en el marco de la máquina.
- ✓ Previenen el exceso de ruido producido por la velocidad del motor.
- ✓ Previenen la generación adicional de calor en el motor

Los codificadores son ideales para las máquinas fresadoras, tensadoras, perforadoras, torneadoras y rectificadoras.

Este tipo de sensor (codificador) usa una escala de medición con un código absoluto. La mayor ventaja de este sensor es que se conoce la actual posición del motor directamente después de la puesta en marcha del sistema. Por otra parte, este tipo de sensores presentan complicaciones y tienen un alto precio.

Otro tipo de sensor emplea una escala de medición con un código incremental. Esta escala tiene marcas colocadas a intervalos regulares, las cuales son leídas por la electrónica del codificador y suministradas en forma de señal al controlador de posición. Ésta es la razón por la que este sensor sólo puede determinar el cambio de posición del motor y no la posición absoluta, por lo que se vuelve necesario definir una posición de referencia cuando un motor equipado con este tipo de sensor arranca.

Por esto, es necesario definir un punto de referencia cuando se pone en marcha el motor.

2.9.2. Determinación de la posición por medio de sensores de campo magnético.

El controlador de posición necesita saber la posición actual del motor. Para determinarla, se dispone de tipos diferentes de sensores.

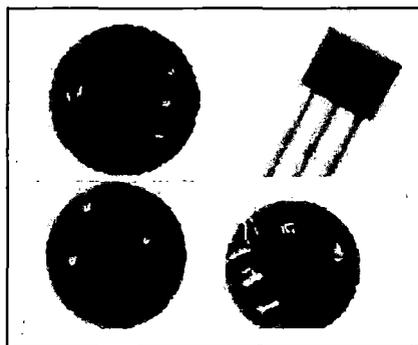


Figura 2.28 Sensor de efecto hall.

Fuente: LUCAS – NULLE, UniTrain-I, Segunda edición.

El elemento secundario de un motor lineal posee imanes magnetizados alternativamente, de ancho y separación conocidos (distancia entre polos). Midiendo este campo magnético se puede determinar la posición del motor como ocurre cuando se emplea un codificador incremental. La medición del campo magnético se consigue empleando un sensor de campo magnético, también denominado sensor de efecto Hall. Éste trabaja de acuerdo con el principio de que el movimiento de un electrón se ve desplazado de su ruta en un campo magnético.

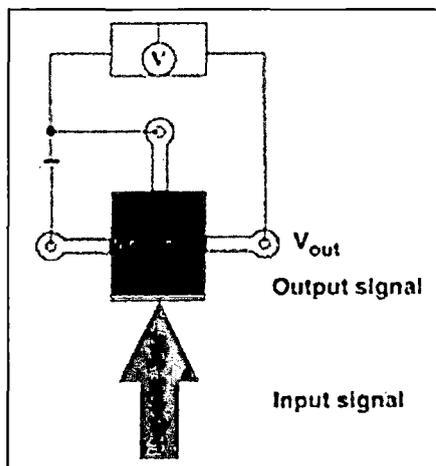


Figura 2.29 Esquema de un sensor de efecto hall.

Fuente: LUCAS – NULLE, *UniTrain-I*, Segunda edición.

La figura siguiente muestra que cuando un sensor de efecto Hall se mueve sobre un imán de barra, la tensión de salida producida es proporcional a la intensidad del campo magnético.

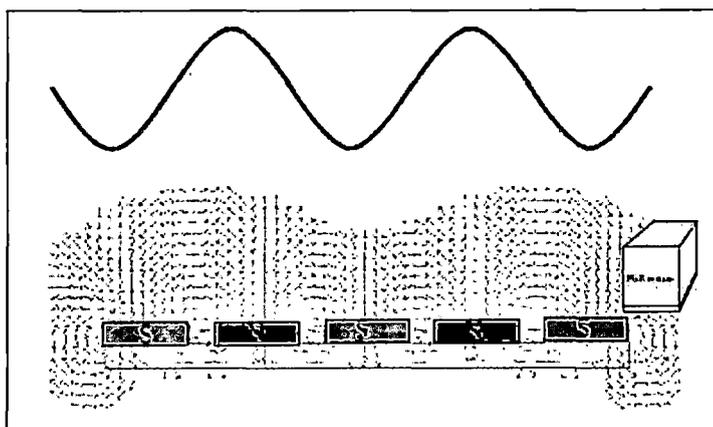


Figura 2.30 Movimiento de un sensor de efecto hall.

Fuente: LUCAS – NULLE, *UniTrain-I*, Segunda edición.

2.9.3. Punto de referencia.

Los sensores de campo magnético miden el campo magnético de los imanes del motor. Por medio de los sensores de efecto Hall, la posición se puede determinar únicamente dentro del tramo cubierto por cada par de polos. Durante el tránsito al siguiente par de polos, la señal se repite a sí misma, lo cual significa que no se puede determinar en qué par de polos se encuentra ubicado actualmente el motor. Esta clase de sistema de medición es de tipo incremental, esto es, se detecta el movimiento pero no se puede determinar la posición absoluta.

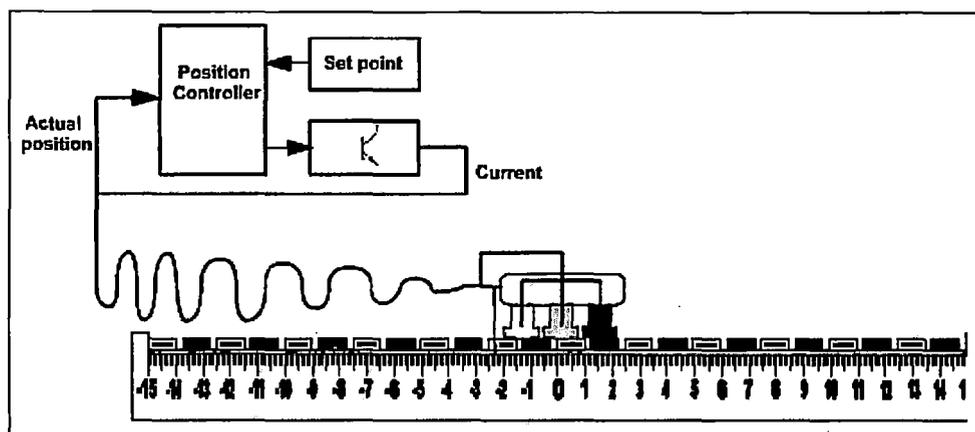


Figura 2.31 Control para determinar el punto de referencia.

Fuente: LUCAS – NULLE, *UniTrain-I*, Segunda edición.

Para el control de la posición, el cual necesita ser efectivo para todo el tramo disponible, se debe diseñar una escala apropiada. Por esta razón, es necesario definir un punto de referencia. Dicho punto se puede posicionar en la pista magnética del motor por medio de una marca extra. En función de este punto de referencia, la dirección sólo se puede definir como positiva o negativa. Para fines de control de posición, las posiciones finales de la pista se pueden definir como valores límite.

Otra posibilidad consiste en fijar un punto de referencia de manera dinámica. En este método, se define una posición arbitraria como posición de referencia. El máximo movimiento posible, tanto en el sentido positivo como en el negativo, es desconocido y se lo debe determinar de manera relativa al punto de referencia definido previamente. Éste es el método que usaremos en este curso y es necesario definir cada uno de sus pasos:

- ✓ Antes que nada, el punto de referencia se define como un punto arbitrario (el mejor lugar, normalmente, se encuentra en la mitad de la pista magnética del motor).
- ✓ A continuación se mueve el motor manualmente hasta el tope izquierdo. El controlador analiza el recorrido y lo reconoce como la máxima distancia que se puede recorrer hacia la izquierda.
- ✓ El controlador recibe una señal una vez que la distancia ha sido cubierta.
- ✓ Ahora se realiza el desplazamiento manual a lo largo de todo el recorrido, hacia la derecha, hasta el tope, y esta distancia también se emite como señal al controlador.

2.9.4. Aplicaciones de posicionamiento.

Los motores lineales se emplean para el posicionamiento de herramientas, o de cargas, además de muchas otras aplicaciones industriales, el motor lineal opera usando un control de posición. Esto significa que el control determina el trayecto del motor dentro de un rango predefinido, en el cual el motor puede desplazarse. Este rango se define claramente una vez que se fija la posición de referencia.

Esto significa que, antes de iniciar la programación, el usuario que programa el controlador debe tener conocimiento del rango de movimiento disponible del motor.

Por esta razón, es necesario fijar una posición de referencia en estos experimentos.

Un motor lineal con control de posición se controla por medio de lo que se denomina valor de consigna.

Este valor de consigna puede ingresar continuamente al controlador. En este caso, el motor lineal se encuentra en una posición definida y espera por el próximo valor de consigna. Si este valor de consigna ingresa en intervalos muy cortos, casi se observa un movimiento continuo y sin vacilaciones.

En muchas aplicaciones, se conoce de antemano el instante en que el motor se debe mover hacia una posición específica y cuánto tiempo debe permanecer en dicha posición.

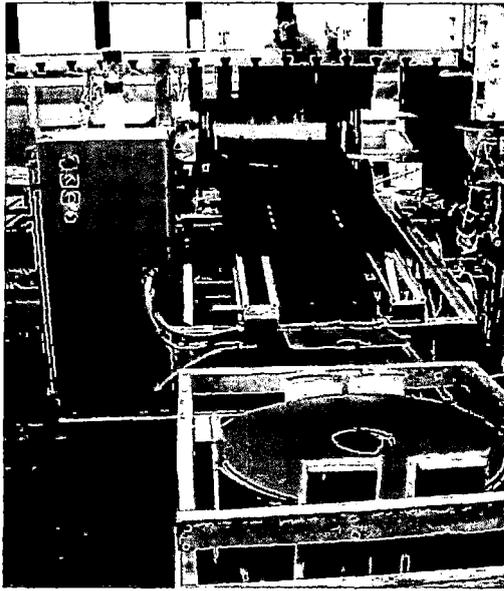


Figura 2.32 Ejemplo para determinar el punto de referencia.

Fuente: LUCAS – NULLE, UniTrain-I, Segunda edición.

2.10. Principales Ventajas e Inconvenientes de Los Motores Lineales.

Los motores lineales son máquinas impulsoras cuya fuerza de accionamiento es lineal. Ello proporciona una serie de ventajas sobre los accionamientos tradicionales basados en transmisiones mecánicas:

- ✓ Reducción de los niveles de vibración sin comprometer el grado de prestaciones.
- ✓ Bajo nivel de ruido incluso con altas tensiones de alimentación (no existe fricción entre los componentes).
- ✓ Ningún efecto de holgura o de muelle asociado a los componentes de transmisión mecánica.
- ✓ Elevados valores de velocidad máxima. Típicamente varios m/s.
- ✓ El sistema es más preciso cuando se desplaza a altas velocidades.
- ✓ Mayores valores de aceleración, lo que es muchas veces es más importante que el valor de la velocidad máxima.
- ✓ Mayor eficacia en periodos de aceleración, frenado y tramos con pendientes elevadas, incluso vertical (no dependen de la fricción).
- ✓ Al no producirse fricción, se abaratan los costes de mantenimiento. Lo que supone una larga vida de servicio y fiabilidad del sistema.

A su vez, tal y como se esperaba, este tipo de motores presenta algunos inconvenientes:

- ✓ Necesidad de disponer de sistemas de refrigeración y/o aislamientos térmicos para disipar el calor generado. (Pérdida de precisión y prestaciones si no se refrigeran adecuadamente).
- ✓ Incremento del coste de las soluciones basadas en motores lineales por lo expuesto en el punto anterior.
- ✓ Incremento del coste de las soluciones basadas en motores lineales por lo expuesto en el punto anterior.

2.11. Aplicaciones del Motor Lineal.

En la actualidad, con el aumento de las exigencias de eficiencia y de excelencia en los productos y procesos, la utilización de la tecnología de los motores lineales está en auge, sustituyendo accionamientos basados en motores rotativos con mecanismos más o menos complejos que transforman el giro del motor en movimiento lineal. Con esto se obtiene una mejora en las prestaciones y sobre todo en la fiabilidad, al haber menos partes intermedias susceptibles de tener una avería.

Debido a las características especiales de los motores lineales, sus aplicaciones son muy específicas. Para que un motor lineal funcione de manera óptima en una aplicación, ha de ser diseñado específicamente para la misma.

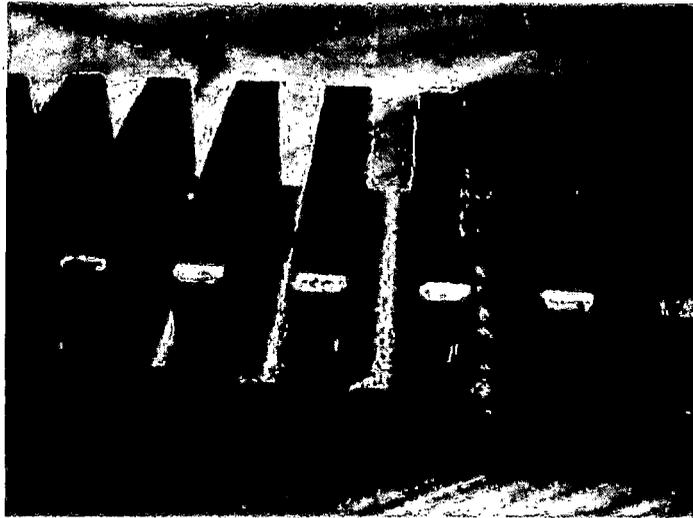
La utilización de motores lineales comerciales, que tienen precios bastante competitivos, no resultará la solución más adecuada, debido a que estos no cumplirán perfectamente con las especificaciones requeridas, pues normalmente estarán sobredimensionados.

2.11.1. Motores Lineales de Bajas Velocidades.

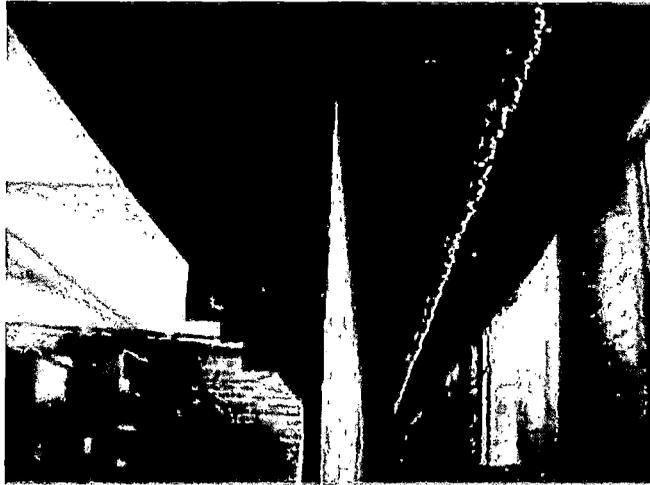
2.11.1.1. Bandas Transportadoras.

En el transporte de materiales, materias primas, minerales y diversos productos se han creado diversas formas; pero una de las más eficientes es el transporte por medio de bandas y rodillos transportadores, ya que estos elementos son de una gran sencillez de funcionamiento, que una vez instaladas en condiciones suelen dar pocos problemas mecánicos y de mantenimiento.

Las bandas y rodillos transportadoras son elementos auxiliares de las instalaciones, cuya misión es la de recibir un producto de forma más o menos continua y regular para conducirlo a otro punto. Son aparatos que funcionan solos, intercalados en las líneas de proceso y que no requieren generalmente de ningún operario que manipule directamente sobre ellos de forma continuada. Figura 2.32 y Figura 2.33.



a)



b)

Figura 2.33 Estator de motor síncrono lineal. a) Ubicación del núcleo y b) Ubicación de los estatores.

Fuente: Danilo Rairan Antolines; Diseño y construcción de una banda transportadora utilizando levitación magnética; Colombia.

2.11.1.2. Funcionamiento.

En la construcción del vehículo se consideraron las condiciones mecánicas a plena carga, las dimensiones de la pista y la ubicación que tendrían los imanes que conforman el campo que interactúa con el estator. Se desplaza y se soporta sobre la pista por rodillos; adicionalmente, en la parte superior tiene una lámina de polietileno sobre la que se ubica el peso a transportar. En el vehículo se ubica una línea de imanes para cada lado del estator, cada una de ellas con imanes de ferrita

magnética, se ubicaron enfrentados con cada polo magnético del estator, en forma consecutiva y con polaridades contrarias. La magnitud de la fuerza que produce el movimiento depende de la intensidad de los campos magnéticos en la máquina; la capacidad de arrastre depende de la magnitud de esta fuerza.

La eficiencia se conoce como el cociente entre la potencia mecánica de salida con respecto a la eléctrica de entrada; para su determinación se deben realizar experimentos para la medición de cada uno de los parámetros expresados en las siguientes ecuaciones:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elec}} \times 100\% \quad (2.76)$$

$$P_{mec}(t) = m \cdot \frac{dx(t)}{dt} \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} [W] \quad (2.77)$$

$$P_{elec} = \sqrt{3} \cdot v_1(t) \cdot i_1(t) \cdot \cos(\theta) [W] \quad (2.78)$$

Dónde:

m : Masa del vehículo más la carga.

$x(t)$: Posición del vehículo.

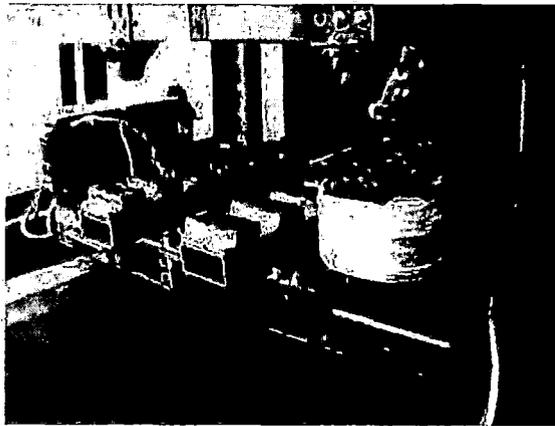
$v_1(t)$: Voltaje de línea en el estator.

$i_1(t)$: Corriente de línea.

$\cos(\theta)$: Factor de potencia del estator.



a)



b)

Figura 2.34 Vehículo del motor. a) Vista general y b) detalle de la ubicación de los imanes.

Fuente: Danilo Rairan Antolines; Diseño y construcción de una banda transportadora utilizando levitación magnética; Colombia.

Muchos de los sistemas transportadores utilizan cintas flexibles en ángulo de manera que al pasar sobre cada rodillo conductor los lados de la cinta se curvan hacia arriba. Para formar una especie de canal que tenga el material suelto e incluso polvo para constituir un rotor suficiente para el motor de manera que no exista fallas en las curvaturas y en enderezamientos repetidos asociados al paso sobre rodillos conductores.

Si la cinta pueda permanecer en una dirección podría construirse de alambres trenzados con barras de espesor relativamente gruesos, que servirán de soporte sin doblarse, mientras que la trenza delgada de cobre permitiría darle flexibilidad al conjunto. Cabe aclarar que podrían obtener mejores resultados con motores más anchos y usando frecuencias menores a los 60 Hz y 50 Hz de alimentación con lo cual se incidiría en el menor rendimiento de las máquinas.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA EFICIENCIA η

La eficiencia básicamente es la relación entre la potencia de salida P_s y la potencia de entrada P_E :

$$\eta = \frac{P_s}{P_E}$$

O también:

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + P_{\text{perdidas}}}$$

Ampliando:
$$\eta = \frac{P_s}{P_s + P_{FE} + P_{CU}}$$

P_{FE} = Pérdidas en el núcleo

P_{CU} = Pérdidas en el cobre

Donde:

$$P_{CU} = P_{CU(E)} + P_{CU(r)}$$

$P_{CU(E)}$ = Pérdidas en el cobre del estator

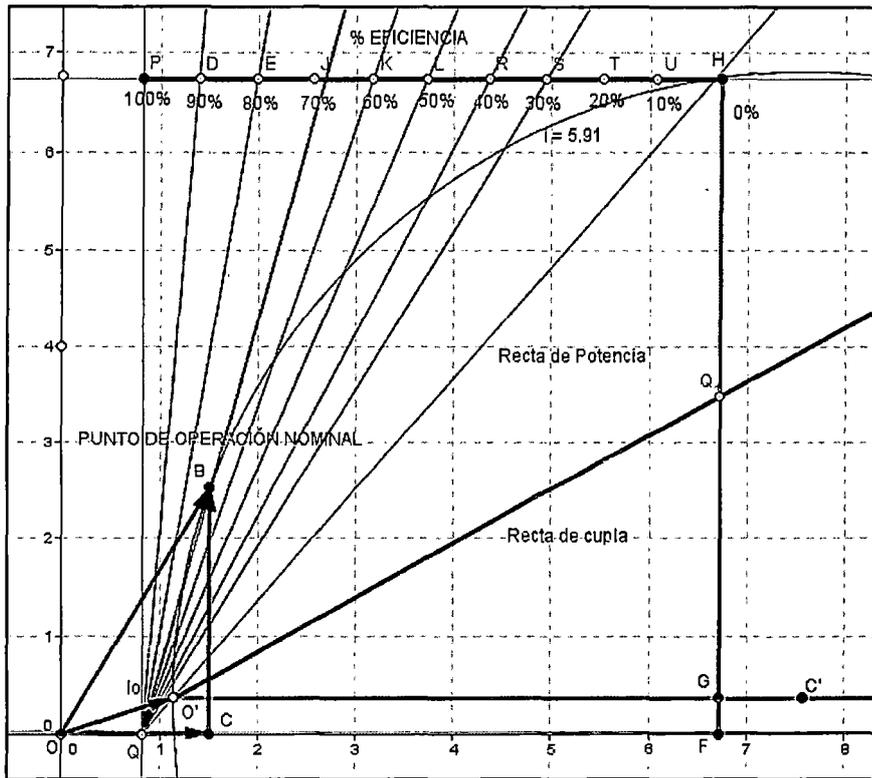
$P_{CU(r)}$ = Pérdidas en el cobre del rotor

Cada una de estas pérdidas pueden ser graficadas en un diagrama circular, luego la eficiencia es la relación de los segmentos que representan a la pérdida de salida B-E con respecto al segmento B-C que representa a la potencia de entrada.

$$\eta = \frac{B-E}{B-C}$$

Pero con la finalidad de conocer la variabilidad de la eficiencia del motor en general cuando varía de carga es posible graficar los rangos de eficiencia para diferentes puntos de operación, para este efecto se prolonga la recta de potencia hasta que intersecte con el eje horizontal "Q" a partir de este punto se traza una paralela al eje vertical; posteriormente se traza una recta que sea paralela al eje horizontal pero que este por encima del círculo a una distancia apropiada para posteriormente segmentar en tramos proporcionales la recta intersectada entre "P" y "H" de 0 al 100% , la eficiencia nominal será la recta trazada entre los puntos "Q" y "B" de operación nominal.

La gráfica del diagrama del círculo muestra el procedimiento indicado, así como la escala correspondiente.



Variabilidad de la eficiencia η en diversos puntos de carga.

Los cuadros comparativos siguientes muestra la relación existente entre la configuración de la armadura, la carrera, fuerza, el costo, empuje/área, Potencia/Peso y la eficiencia.

| CONFIGURACIÓN | CARRERA | FUERZA | COSTO | EFICIENCIA |
|--------------------------|---------|----------|-------|------------|
| PRIMARIO CORTO MOVIBLE | LARGAS | MODERADA | BAJO | MODERADA |
| PRIMARIO CORTO FIJO | LARGAS | MODERADA | BAJO | ALTA |
| SECUNDARIO CORTO MOVIBLE | CORTAS | ALTAS | ALTO | ALTA |

| TIPO DE MOTOR | | EMPUJE / ÁREA (Libra/Pulgada) | EFICIENCIA | POTENCIA/PESO |
|---|-----------|-------------------------------------|------------|---------------|
| Motor Síncrono de campo excitado o permanente | Lineal de | 5.5 | MEDIA | MEDIA |
| Motor Homopolar Síncrono | Lineal | 2.4 | ALTA | ALTA |
| Motor Síncrono de reluctancia | Lineal de | 2.5 | MEDIA | MEDIA |

2.11.1.3. Otras Aplicaciones

Los motores lineales, se pueden aplicar como actuadores en una puerta automática de ascensor. Un motor lineal normal de 21cm de largo y 9 cm de ancho se puede usar también como actuador para abrir y cerrar ventanas en un edificio inteligente. También los motores lineales son usados en máquinas herramientas, los centros de mecanizado verticales de precisión DMC 105 V y DMC 75 V, de la serie DMC V lineal de DMG América, cuentan con motores lineales en todos los ejes para alcanzar aceleraciones hasta de 2g y velocidades de recorrido hasta de 3.543ipm. Son usados en la fabricación de herramientas y moldes. Estas máquinas tienen una estructura robusta en fundición y sistemas de medición directa del patrón, lo que entrega gran precisión de los contornos y alta calidad de la superficie.

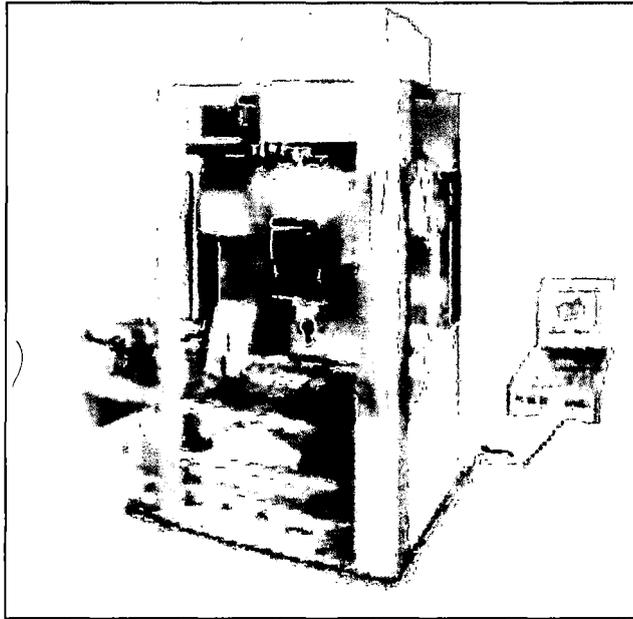


Figura 2.35 Un centro de maquinado que utiliza 5 motores lineales.

Fuente: HIWIN, Linear Technology, Positioning systems.

Los motores lineales también se aplican en automatización, creación de diversos robots para diversos tipos de aplicaciones, como el ensamble de tarjetas electrónicas; la ejecución de procesos de muestreo en procesos de calidad; o en la producción de proteínas, hormonas, etc. Uno de esos robots es el Megamation, que es un robot diseñado para la industria farmacéutica y realiza un proceso de HTS (high-throughput screening) y utiliza dos motores lineales bidimensionales para posicionar las cepas y el otro para posicionar los instrumentos. Enseguida se presenta una fotografía de ese sistema.

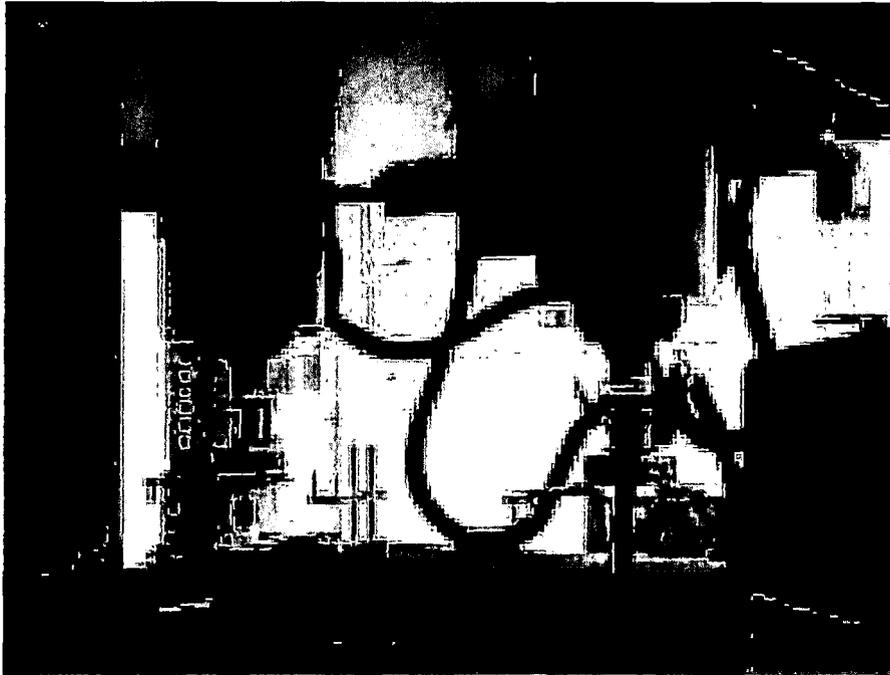


Figura 2.36 Un Robot Megamation, diseñado para la industria farmacéutica y realiza un proceso de HTS, utiliza dos motores lineales bidimensionales para posicionar las cepas y el otro para posicionar los instrumentos.

Fuente: HIWIN, Linear Technology, Positioning systems.

2.11.2. Motores Lineales de Alta Velocidad

Las aplicaciones a alta velocidad de los motores lineales son principalmente en sistemas de propulsión y levitación para transportación terrestre a alta velocidad. Los motores rotatorios escasamente son seleccionados para servir en altas velocidades tales como 250 Km/h a causa de la fricción y otras causas mecánicas. Por otro lado, un motor lineal ofrece un medio de propulsión que es idealmente adecuado para velocidades que excedan esos 250 km/h. Para esas altas velocidades en las cuales el contacto mecánico es indeseable, se recomienda el uso de una máquina de levitación cuyo sistema de suspensión electromagnética sea capaz de levantar por completo el objeto a transportar.

En aplicaciones de alta velocidad, los motores lineales proveen el empuje y la fuerza de levitación para suspender el vehículo. En algunas otras ocasiones los motores lineales solo son usados solamente para propulsión y el vehículo es soportado sobre un riel común o un cojinete de aire. Para asegurar la propulsión correcta al vehículo, el motor lineal otorga el empuje y la aceleración necesaria para impulsar el vehículo a grandes velocidades. Además como ventaja adicional el motor lineal colabora en el frenado del vehículo. Para ambos propósitos la propulsión y suspensión de vehículos

terrestres de alta velocidad se han realizado experimentos con motores lineales y los resultados de las pruebas han resultado muy buenos.

Dentro de todos los tipos de motores lineales existentes se ha demostrado experimentalmente que, en la actualidad, el motor lineal más indicado para un vehículo de transporte terrestre de alta velocidad es un motor síncrono lineal o un motor de inducción lineal. Esto es debido a que para la transportación terrestre de alta velocidad se recorren grandes distancias y se requiere de una gran potencia, eficiencia, factor de potencia y alto voltaje, así como un bajo peso y volumen. Estos puntos son, los factores críticos que los diseñadores de estos vehículos consideran en la selección y diseño de los motores lineales.

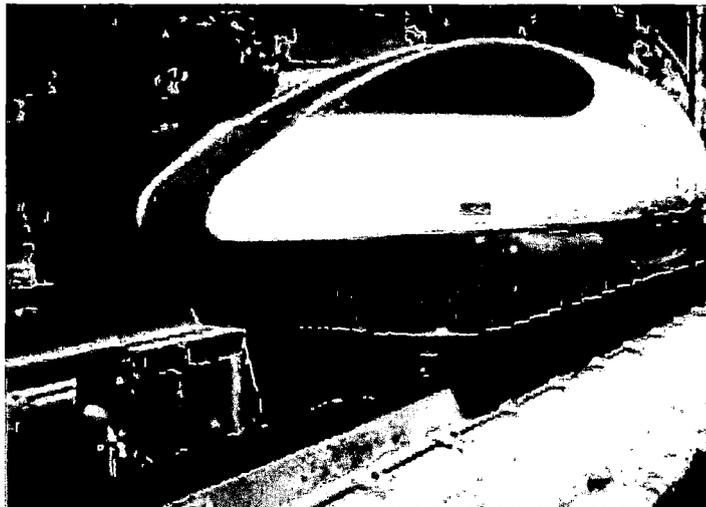


Figura 2.37 Fotografía de un transporte terrestre de alta velocidad que utiliza un motor síncrono lineal.

Fuente: Kanji Wako / Kazuo Sawada. Magnetic Levitation (MAGLEV) Technologies.

Los países que más han desarrollado estas aplicaciones se encuentran Japón, Alemania y Estados Unidos. Dentro de los alcances que han tenido cabe resaltar que en la extinta Alemania del Este se ha probado un sistema de suspensión del tipo atracción. La fuerza de atracción entre el electroimán abordo y los rieles guía de acero producen la elevación y conducción.

Un espacio de 15mm puede mantenerse entre el polo y la vía con una potencia de salida al rededor de 2Kw por tonelada de peso suspendido. Un sistema de retroalimentación monitorea el espacio y ajusta la corriente en el electroimán para superar la inestabilidad inherente a un sistema de atracción.

Un sistema de suspensión del tipo repulsión es considerado prometedor. El primario corto de un Motor Lineal se coloca sobre un vehículo (con un panel como fuente de

potencia a bordo) con una guía de aluminio (o vía) como el secundario, así fue probado y parece ser una de las soluciones.

Un Motor Lineal de cara sencilla con un primario corto sobre el vehículo y un secundario de aluminio con respaldo de hierro también ha sido propuesto para altas velocidades, pero no hay ningún problema de potencia en el vehículo que se reporte para que se construya. Algunas pruebas a gran escala en vehículos han sido realizadas usando los MSL para propulsión.

Los vehículos con un MSL como propulsor son muy prometedores para los TTAV. Polos semiconductores alojados sobre el vehículo son usados como excitación de campo del motor y la vía consiste de una armadura polifásica con un núcleo de aire, de esta forma un MSL puede ser usado para producir un empuje así como una fuerza de levitación. Por otro lado una máquina de levitación puede usarse para proveer la suspensión de un vehículo de alta velocidad.

A continuación se mencionan algunos lugares donde se usas esta tecnología. Las aplicaciones están en tránsito rápido.

Bombardier ART:

- ✓ Airport Express en Beijing.
- ✓ AirTrain JFK en Nueva York.
- ✓ Detroit People Mover Detroit abrió en 1987.
- ✓ Sistema de Tránsito Rápido Everline en Yongin.
- ✓ Kelana Jaya Line en Kuala Lumpur.
- ✓ Scarborough RT en Toronto.
- ✓ UTDC ICTS pista de pruebas en Millhaven, Ontario.
- ✓ SkyTrain en Vancouver.
- ✓ Metro de Beijing Capital Airport Track

Varios trenes subterráneos en Japón y China, construidos por Kawasaki Heavy Industries:

- ✓ Limtrain en Saitama.
- ✓ Nagahori Tsurumi-ryokuchi Line en Osaka.
- ✓ Toei Oedo Line en Tokio.
- ✓ Kaigan Line en Kobe.
- ✓ Nanakuma Line en Fukuoka.
- ✓ mazatosuji Line en Osaka.
- ✓ Línea Verde en Yokohama.

- ✓ Sendai metro Tozai en Sendai, Japón.
- ✓ Línea 4 del Metro de Guangzhou en Guangzhou, China.
- ✓ Línea 5 del Metro de Guangzhou en Guangzhou, China.
- ✓ Línea 6 de Metro de Guangzhou en Guangzhou, China.
- ✓ Transrapid: primera utilización comercial en Shanghai

Tanto los trenes de Kawasaki y ART de Bombardier tienen la parte activa del motor de los coches y el uso de cables aéreos o de un tercer carril para transferir el poder al tren.

2.11.3. Aplicaciones como Maquinas de Energía.

Una de las aplicaciones más antiguas de los Motores Lineales fue como una máquina de energía para lanzar aeronaves. En los portaaviones existe la necesidad de impulsar los aviones cazas a grandes velocidades, debido a que la pista es demasiado corta y los aviones no pueden alcanzar la velocidad necesaria para elevarse. Para dotar de toda esa energía a los aviones se utilizó un motor lineal. El devanado primario fue montado sobre un carro, y el secundario consistía de un devanado en ranuras en una estructura ferromagnética (ver Figura 5.17). Se construyeron dos vías con una longitud de 5/8 de milla. La colección de corriente fue por medio de escobillas colocadas a lo largo de los miembros secundarios. El motor desarrolló 10,000 HP y alcanzó velocidades que exceden los 225 mph. Un jet de 10,000 lb. De peso fue acelerado a 117 mph a una distancia de 540 pies en 4.2 seg. Desde el reposo. El sistema finalmente fue abandonado por su alto costo.

Actualmente se están desarrollando varios proyectos de desarrollo de una catapulta electromagnética, EMCAT por sus siglas en inglés. Hoy en día esa tecnología está en proceso de ser trasladado de los laboratorios de física a un problema de ingeniería. Los sistemas EMCAT tienen un gran costo beneficio ya que tienen una larga vida y requieren de poco mantenimiento, pero hasta este momento han presentado la necesidad de mejorar el desempeño de empuje y habrá que reducir el peso, volumen y logística necesaria para su funcionamiento. La compañía DERA ha probado un motor lineal de 90MW y 300 pies; y ha acelerado un avión de 100,000 libras a 130 nudos en 45 segundos.

Otro sistema de propulsión de aviones es el sistema electromagnético de despegue de aviones, EMALS (Electromagnetic Aircraft Launch System). Se visualiza que los EMALS tengan un mejor desempeño y control de lanzamiento. Podrán acelerar aviones de entre 4.5 a 45 toneladas a una velocidad de entre 100 y 370 km/h. El corazón de este sistema es su motor lineal de 103 metros de longitud, que impulsa al

deslizador con la aeronave amarrada a éste. La energía es suministrada por los generadores internos del portaaviones, la cual pasa por un inversor que utiliza modulación PWM, para suministrar una corriente de alta frecuencia al motor lineal. Este sistema tiene un controlador que opera en un lazo cerrado asegurándose de dar las condiciones de empuje y velocidad indicadas para cada tipo de aeronave propulsada.



Figura 2.38 Los sistemas EMALS utilizan motores lineales para impulsar a las aeronaves por la borda del portaaviones.

Fuente: Kanji Wako / Kazuo Sawada. Magnetic Levitation (MAGLEV) Technologies.

Como ventaja los sistemas EMALS tienen una gran flexibilidad en cuestión del control de las condiciones, además de que tienen casi la mitad de peso y peso que las catapultas impulsadas por vapor. También se espera que para el mantenimiento a los sistemas eléctricos y electrónicos de los EMALS se requieran cerca del 70% de los que son requeridos para los sistemas de vapor.

Otra de las aplicaciones de los Motores lineales es como máquinas de energía incluyendo los aceleradores para proyectiles a muy altas velocidades y desconectores en circuitos de alto voltaje.

Los Motores Lineales también se han desarrollado para disimular las condiciones de choque de los automóviles. Un Motor lineal es capaz de acelerar vehículos no más pesados de 10,000 lb. Hasta velocidades de 40 mph. O menores, las cuales han sido usados como fuerza motriz para impulsar el vehículo.

Un impacto típico de un auto contra un muro donde se utiliza un motor lineal como motor de energía para impactar el automóvil en contra de una pared. El primario de ese motor tiene una estructura en forma de "U" invertida conteniendo los dos

devanados de los bloques, a uno y otro lado del secundario. La corriente es alimentada al primario por medio de escobillas de carbón, las cuales recolectan de los rieles la energía a todo lo largo del recorrido, además de ser montadas y aisladas sobre el primario. A nivel del piso sobre la parte alta del componente en movimiento, está un enganchador con el cual el vehículo de prueba es atado.

Otra de las aplicaciones Los primarios de las máquinas de energía se usan para dar forma a metales conductores en la parte final del proceso. Por ejemplo, en los listones fusibles de plata limitadores de grandes corrientes, los fusibles son unidos al casquillo por contracción magnética al rededor del cilindro.

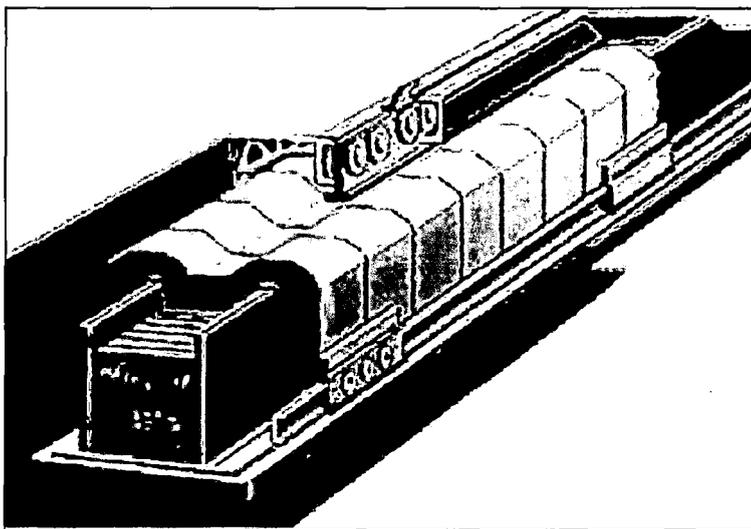


Figura 2.39 Esquema de un motor lineal utilizado como catapulta en los portaaviones.

Fuente: Kanji Wako / Kazuo Sawada. Magnetic Levitation (MAGLEV) Technologies.

CAPITULO III DESCRIPCION DEL MOTOR SINCRONO LINEAL.

3.1. Descripción.

El motor lineal síncrono modelo LMS-23 es de núcleo de hierro, se caracteriza por la capacidad de desarrollar alta potencia y una buena uniformidad de movimiento. El modulo consta de un motor lineal y un amplificador ajustado servo accionamiento.

El motor lineal trifásico está dimensionado para tensión intermedia de los bobinados de hasta un máximo de 600 V DC y por lo tanto está indicado para todos los amplificadores de la orden con la tensión de alimentación de hasta 3 x 400 V AC.

El dispositivo se caracteriza por las siguientes propiedades:

- ✓ Construcción robusta
- ✓ Cubierta transparente
- ✓ Alta dinámica
- ✓ Construido en finales de carrera y de referencia
- ✓ Construido en la medición de distancia
- ✓ Conmutación segura del sistema de cable
- ✓ Amplia parametrización usando un paquete de software para PC.

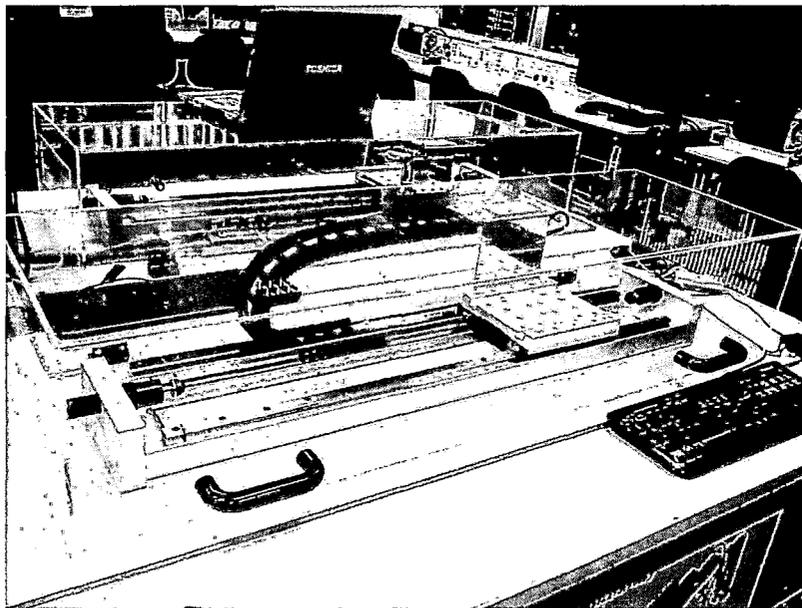


Figura 3.1 Modulo del Motor Síncrono Lineal.

Fuente: Elaboracion Propia

3.2. Partes del Motor.

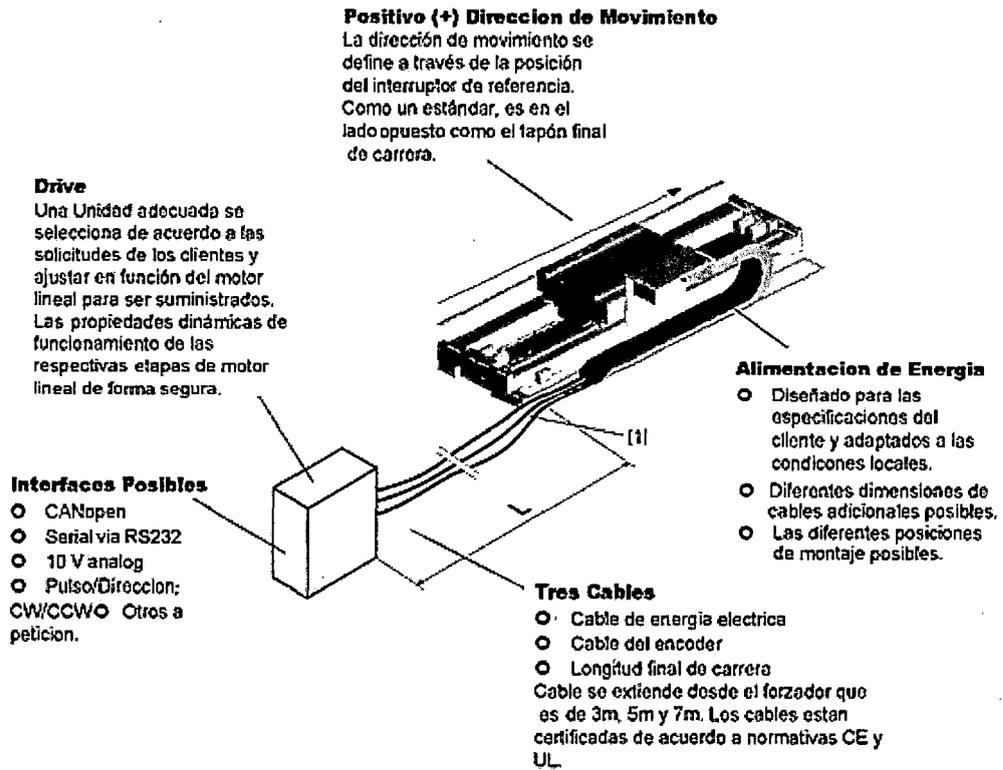


Figura 3.2 Esquema general del Motor Lineal.

Fuente: Linear Motors System

3.3. Módulo de las piezas del Motor Lineal

La composición del sistema de posicionamiento es básicamente el mismo, la siguiente figura ilustra las diversas partes.

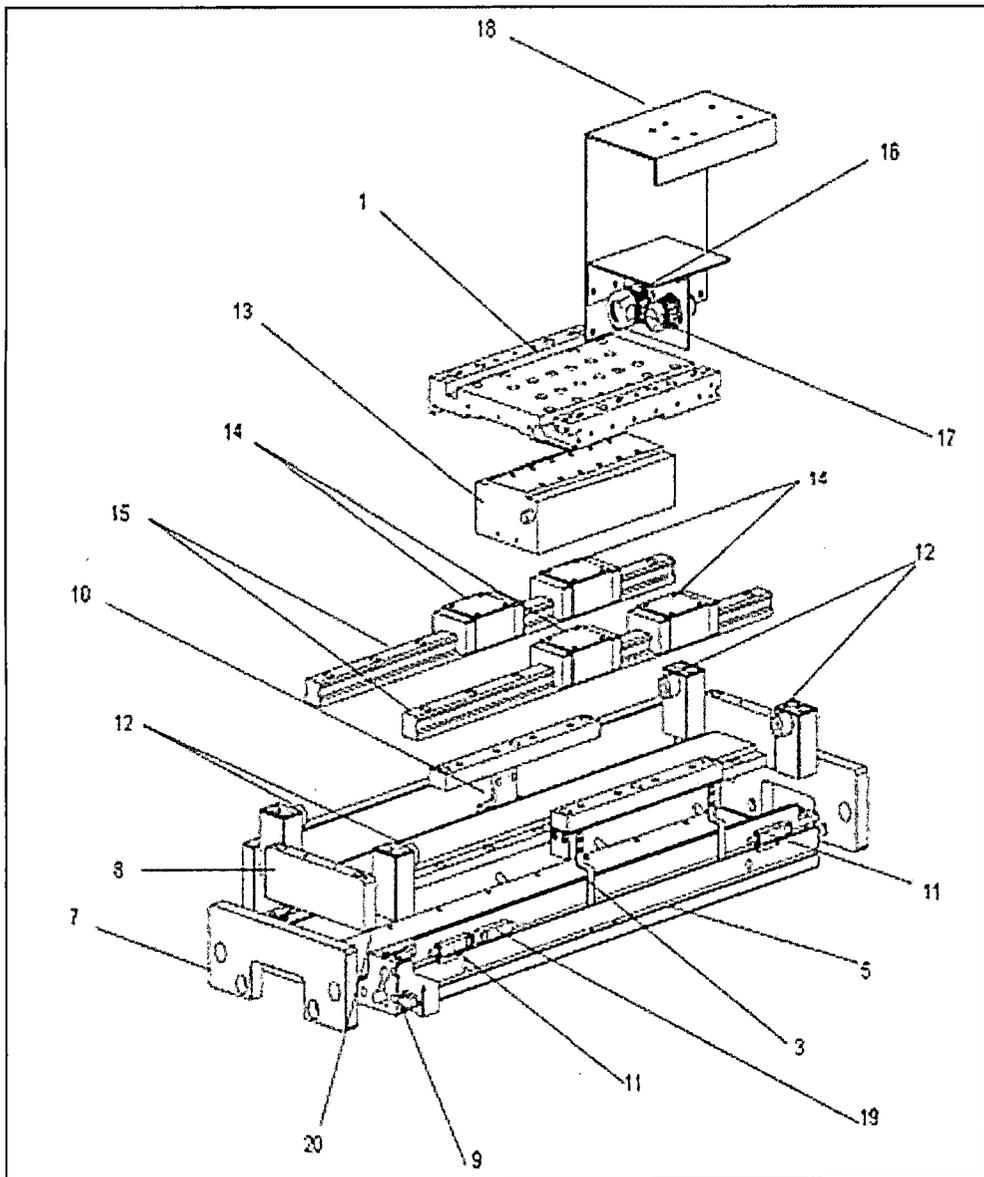


Figura 3.3 Partes del Motor Lineal

Fuente: Linear Motors System

1. Placa del vehículo.
2. Distancia solo para protección metálica.
3. Detección de placa para sensores.
4. Soporte del cable.
5. Perfil de soporte.
6. Terminales (obligatoriamente para amortiguadores)
7. Placa final.
8. Construcción de placa.
9. Apoyo para el conector del sensor de proximidad.

10. Equipo para fijación del sistema de sensores para detectar la posición.
11. Sensor de final de carrera.
12. Límite de la compuerta del amortiguador.
13. Fuerza.
14. Riel
15. Guías lineales.
16. Conector del motor.
17. Conector del encoder.
18. Apoyo a la cadena de cable.
19. Sensor de referencia.

3.4. Elementos de manejo y visualización de los dispositivos de control.

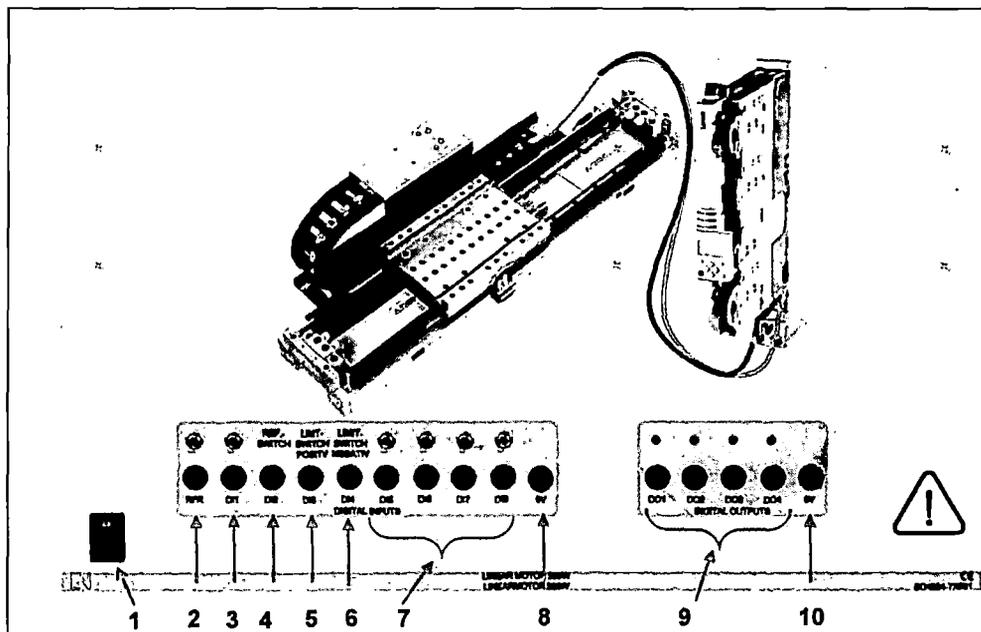


Figura 3.4 Entradas y salidas digitales.

Fuente: Manual de Instrucciones del Motor Lineal, LUCAS NULLE.

- 1 Botón de encendido (Amplificador de accionamiento)

Todas las entradas digitales pueden ser controladas a través de interruptores con una señal de 24V.

- 2 (RFR) Activación del controlador de entrada.
- 3 Entrada digital DI1, libremente programable.
- 4 Entrada digital DI2, conmutador de referencia de entrada, esta entrada está conectada al sensor de referencia.

- 5 Entrada digital DI3, interruptor de entrada positiva, esta entrada está conectada al interruptor de límite positivo.
- 6 Entrada digital DI4, interruptor de entrada negativo, esta entrada está conectada al interruptor de límite negativo.
- 7 Entradas digitales DI5, DI6, DI7 y DI8 libremente programables.
- 8 Conector 0V, potencial de referencia para el control externo.
- 9 Salidas digitales DO1, DO2, DO3 y DO4, tensión de salida 24V DC/15mA.
- 10 Conector 0V, potencial de referencia para las todas las salidas digitales.

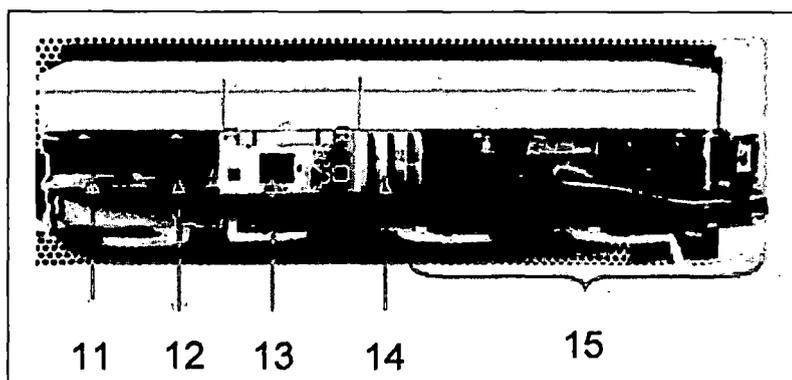


Figura 3.5 Vista posterior del amplificador de energía.

Fuente: Manual de Instrucciones del Motor Lineal, LUCAS NULLE.

- 11 Conexión de medición de longitud lineal del motor.
- 12 Conector para el encóder.
- 13 Interface de diagnóstico.
- 14 Indicador de estado del amplificador de potencia RF.
- 15 Cableado interno.

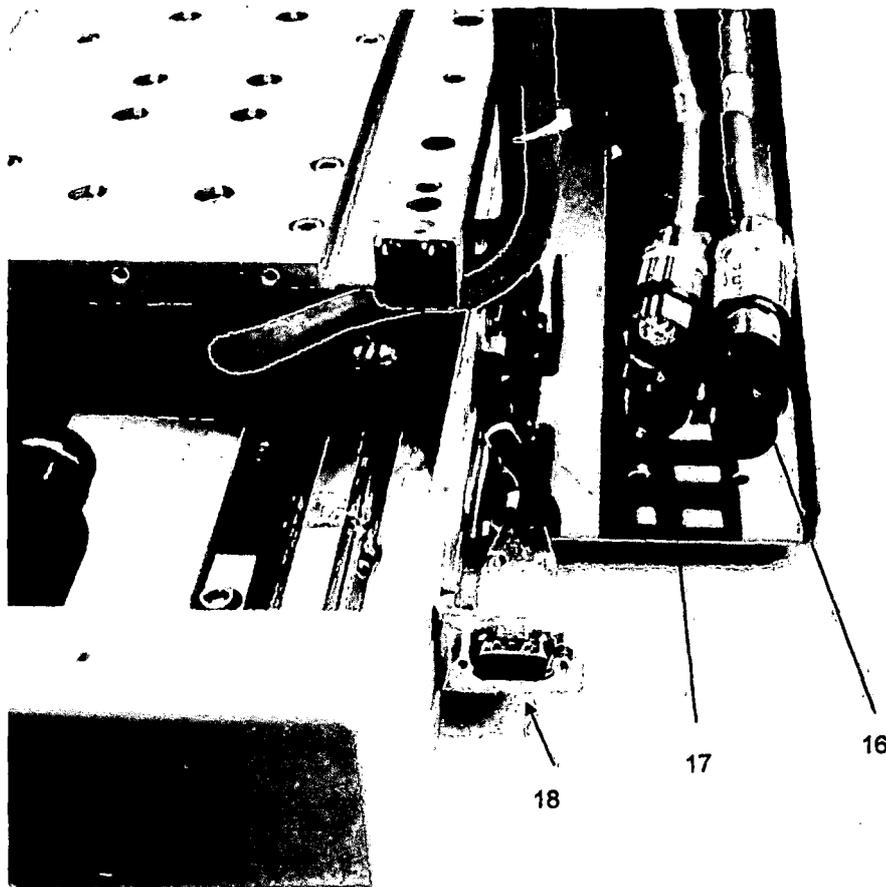


Figura 3.6 Terminales de conexión del motor.

Fuente: Manual de Instrucciones del Motor Lineal, LUCAS NULLE.

- 16 Cable de alimentación del motor.
- 17 Cable para el encoder.
- 18 Conexión del interruptor de límite.

3.5. Sistemas de Detección de Posición

El tipo de módulo, puede ser óptico o magnético. Está equipado con un sistema de detección de la posición instalada en el módulo se suministra listo para su uso, con conexiones y conectado con el control a través de una conexión especial.

3.5.1. Sistema óptico para detectar la posición

El sistema óptico para detectar la posición de trabajo sin contacto. Está disponible con diferentes resoluciones y está equipado con la banda lectura y punto de referencia. La lectura de banda se trata con el dorado resistente a los arañazos común, pero que puede que sea dañado.

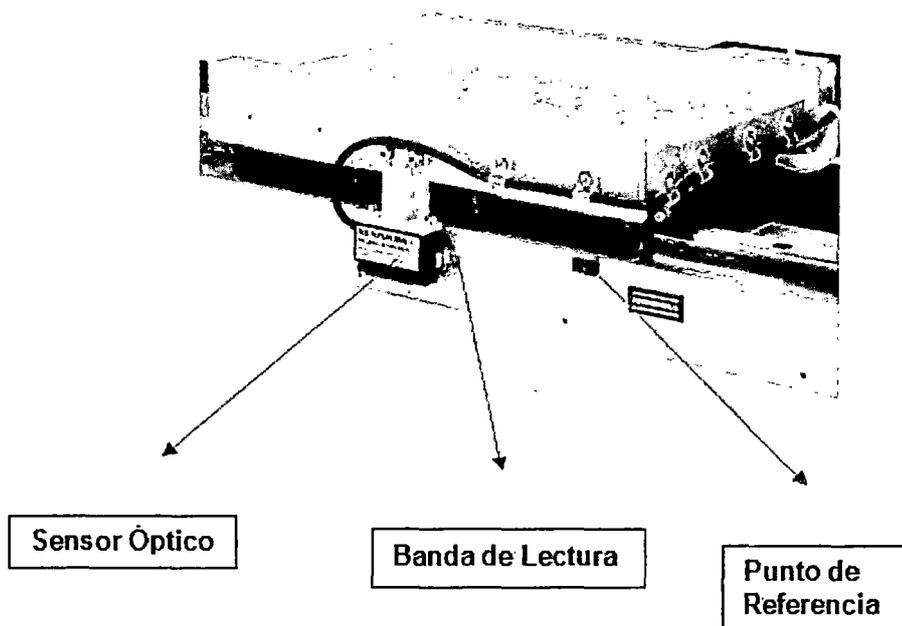


Figura 3.7 Detección de Posición

Fuente: Manual de Instrucciones del Motor Lineal, LUCAS NULLE

3.6. USB diagnostic adapter.

Los diagnósticos se pueden realizar a través de un PC utilizando el USB de diagnóstico adaptador. Un cable de conexión, que puede ser conectado a la interfaz USB del PC, se suministra con el adaptador.

Conexión de cables, se pueden comprar por separado para conectar el USB de diagnóstico adaptador al módulo de eje.

Los controladores de software necesarios para el funcionamiento del adaptador se instalan automáticamente cuando el software Lenze (por ejemplo, el L-Force Engineer) está instalado.

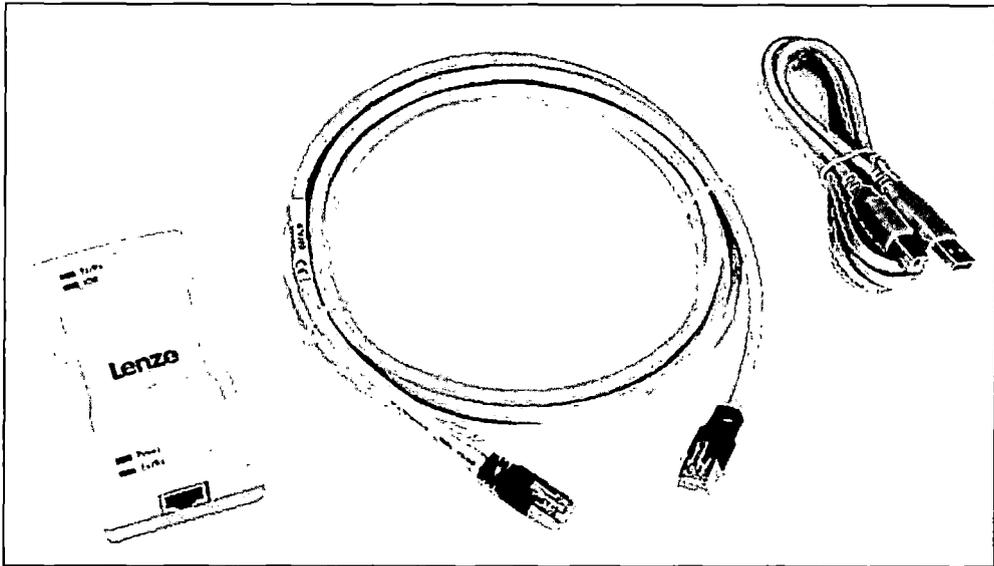


Figura 3.8 USB diagnostic adapter.

Fuente: L-Force Inverter Drives 9400, 2011

Características

- ✓ Suministro de voltaje del lado de entrada a través de la conexión USB en la PC.
- ✓ Suministro de voltaje del lado de salida f través de interfaz de diagnóstico de la inversor.
- ✓ LED de diagnóstico.
- ✓ El aislamiento eléctrico de las PC y el convertidor.
- ✓ Hot-pluggable.

3.7. Materiales empleados en la armadura.

Todos los materiales conductores actuales de alta conductividad eléctrica y los materiales que conducen el flujo magnético con alta permeabilidad magnética, se llaman materiales activos. Sirven para la excitación de la fuerza electromotriz y la fuerza magneto motriz. Los mismos que concentran el flujo magnético en el lugar o dirección deseado para maximizar las fuerzas electrodinámicas.

3.7.1. Núcleo ferromagnético o yugo.

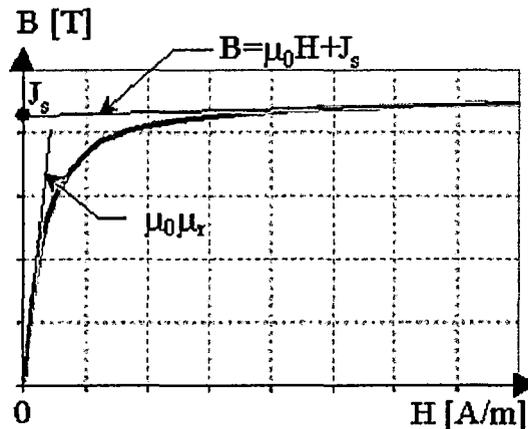
Como cualquier máquina eléctrica, el estudio de los materiales magnéticos integrantes de los motores lineales, debe entenderse desde el nivel atómico, la mecánica cuántica define un parámetro denominado susceptibilidad magnética. Este coeficiente adimensional expresa la proporcionalidad de imanación M y la intensidad

de campo magnético H . De acuerdo a este valor los materiales se clasifican en: Diamagnéticos, Paramagnéticos y ferromagnéticos.

El tipo más importante de magnetismo lo presentan los materiales ferromagnéticos, como primera aproximación, se diría que reciben esta denominación aquellas sustancias que tienen imanaciones grandes aún en presencia de campos magnéticos muy débiles.

Así, un material ferromagnético está dividido en pequeñas regiones (dominios magnéticos), de forma que cada una de ellas esta magnetizada en un determinado sentido.

Para que aparezca la magnetización deberá existir una dirección predominante en la orientación de los dominios, los dominios cuya orientación este más próxima a la de un campo magnético externo experimentan un crecimiento independiente de sus vecinos. Si se sigue incrementando el valor de H , los procesos de alineación continua gradualmente, de tal forma que cuando los dominios estén alineados totalmente se dice que el material se ha saturado. Este comportamiento queda reflejado en la curva de la imanación.



Los dominios magnéticos se alinean en la misma dirección que el campo aplicado. Si se modifica la orientación del campo, estos dominios no se reorientan automáticamente según la nueva dirección del campo, sino que experimentan una cierta resistencia a cambiar la orientación, por lo que la rama de magnetización no es la misma que la rama de des magnetización. Cuando el campo magnético externo se anula, no hay fuente alguna que ayude a que los dominios regresen a sus posiciones. Al valor en ese punto se le conoce con el nombre de magnetismo o inducción remanente. Si se disminuye el campo hasta alcanzar un mínimo y después se invierte el sentido de cambio de H , llegamos a formar una curva cerrada denominada ciclo de histéresis.

CAPITULO IV: DESCRIPCION GENERAL DEL SOFTWARE L-FORCE ENGINEER.

4.1. Introducción.

Antes de empezar a hablar sobre la programación es necesario conocer los elementos físicos que permiten la automatización de la máquina.

Para la programación de la máquina, y para poder llevar a cabo su funcionamiento el motor ha sido necesario configurar desde el interface CANopen.

Los equipos de frecuencia mediante su propio entorno L-Force Engineer, por el cual se realizan todas las acciones de movimiento y parametrización de los equipos.

La programación del L-Force Engineer – High Level es la parte esencial del proyecto ya que tiene que comunicar los equipos de frecuencia, los responsables de las acciones y el PLC³, el equipo que permitirá la ejecución de ellas. Es por ello que a continuación se dispone a describir las características del L-Force Engineer – High Level para poder controlar el motor lineal.

Así pues, desde el Engineer podemos parametrizar todas las entradas y salidas del equipo, las características físicas del motor y podemos programar la función que queremos que desarrolle.

El entorno Enginner tal y como antes explicábamos se utiliza para el control de movimientos repetitivos, ya sea de posición, velocidad o finales de carrera. El hecho de que controlen acciones concretas limita su control a un solo motor.

4.2. Alcances del Software.

4.2.1. L-Force 9400 Servo Drives.

Los servoposicionadores Servo Drives 9400, ofrecen una inteligencia en el accionamiento y han sido concebidos para aplicaciones de movimiento de control descentralizadas.

Además satisface buena parte de las condiciones previas para el buen funcionamiento de la línea, y ser uno de los pocos equipos con la potencia necesaria para mover sus respectivos motores, tiene un buen sistema de comunicación que

3. Control lógico programable, es un dispositivo que ejecuta operaciones lógicas de acuerdo con lo que establece un programa, esto es, según una lista de instrucciones.

nos da una amplia gama de posibilidades como son: CANopen, Ethernet o PROFIBUS, también tiene una arquitectura de software muy compacta a la par que flexible, con el Servo Drive 9400 podemos resolver fácilmente tareas de movimiento y procesos así como funciones de máquinas de forma sencilla y universal.

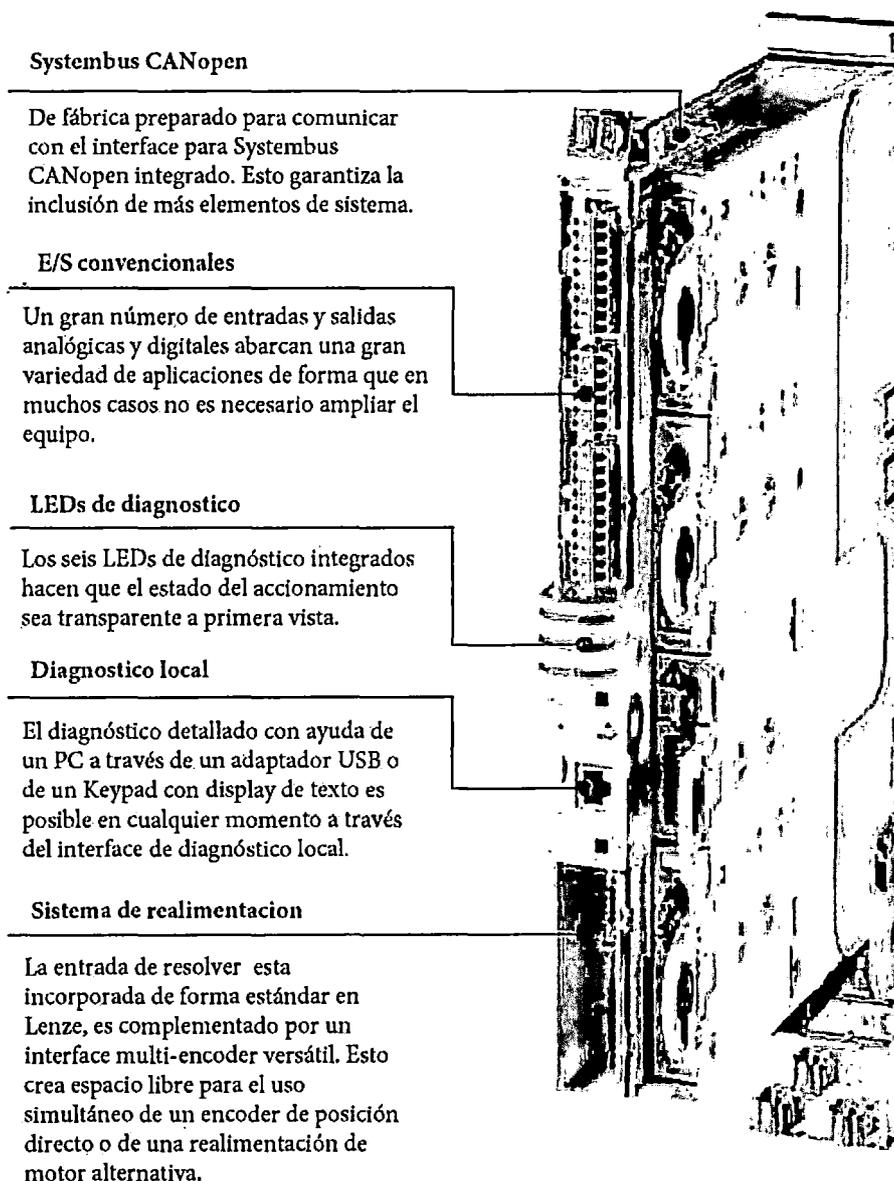


Figura 4. 1 Convertidor de frecuencia HighLine 9400

Fuente: L-Force Inverter Drives 9400 - 2011

4.2.2. Definición del CANopen.

La red CANopen es una red basada en CAN, lo que significa decir que ella utiliza telegramas CAN para intercambios de datos en la red.

El protocolo CAN es un protocolo de comunicación serial que describe los servicios de la camada 2 del modelo ISO/OSI (camada de enlace de datos). En esta camada, son definidos los distintos tipos de telegramas (frames), el modo de detección de errores, validación y arbitración de los mensajes.

Solamente la definición de cómo detectar errores, crear y transmitir un frame no son suficientes para definir un significado para los datos que son enviados vía red. Es necesario que haya una especificación que indique como el identificador y los datos deben ser montados y como las informaciones deben ser intercambiadas. De este modo los elementos de la red pueden interpretar correctamente los datos que son transmitidos. En este sentido, la especificación CANopen define justamente como intercambiar datos entre los equipamientos y como cada dispositivo debe interpretar estos datos.

4.2.2.1. Frame de Datos.

Los datos en una red CAN son transmitidos a través de un frame de datos. Este tipo de frame es formado principalmente por un campo identificador de 11 bits (arbitration field), y un campo de datos (data field), que puede contener hasta 8 bytes de datos.

| | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Identificador | 8 bytes de datos | | | | | | | |
| 11 bits | byte 0 | byte 1 | byte 2 | byte 3 | byte 4 | byte 5 | byte 6 | byte 7 |

4.3. L-force Engineer – High Level.

El L-Force Engineer – High Level es el software de control del motor síncrono a usar, por el cual se realizan todas las acciones de movimiento y parametrización de dicho motor. Así pues desde el Engineer podemos parametrizar todas las entradas y salidas del equipo, las características físicas de los motores y podemos programar la función que queremos que desarrolle.

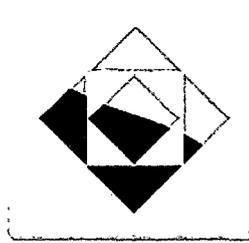
El entorno Engineer tal y como antes explicábamos se utiliza para el control de movimientos repetitivos, ya sea de posición, velocidad o finales de carrera. El hecho de que controle acciones concretas limita su control a un solo motor.

4.3.1. Programación Convertidores de Frecuencia.

Los convertidores de frecuencia tienen la función de variar la velocidad de un motor modificando la frecuencia, tal y como su nombre indica, es decir, con los convertidores de frecuencia podemos variar la velocidad del motor, el sentido de giro o pararlo en un punto en concreto.

Esta es una de las variables que tenemos que tener en cuenta a la hora de crear un nuevo proyecto. Para la creación de una nueva aplicación en el Engineer, tenemos que saber de antemano la acción que queremos realizar, los datos del motor a accionar, la presencia o no de un reductor y el modo de comunicación.

Para empezar la aplicación apretaremos el botón del Engineer que nos abrirá directamente la primera pantalla.



L- Force Engineer High Level.

La primera pantalla, figura 3.2, que nos aparece una vez hemos clicado el icono del Engineer, es el de la recuperación de archivos o la creación de un proyecto nuevo.

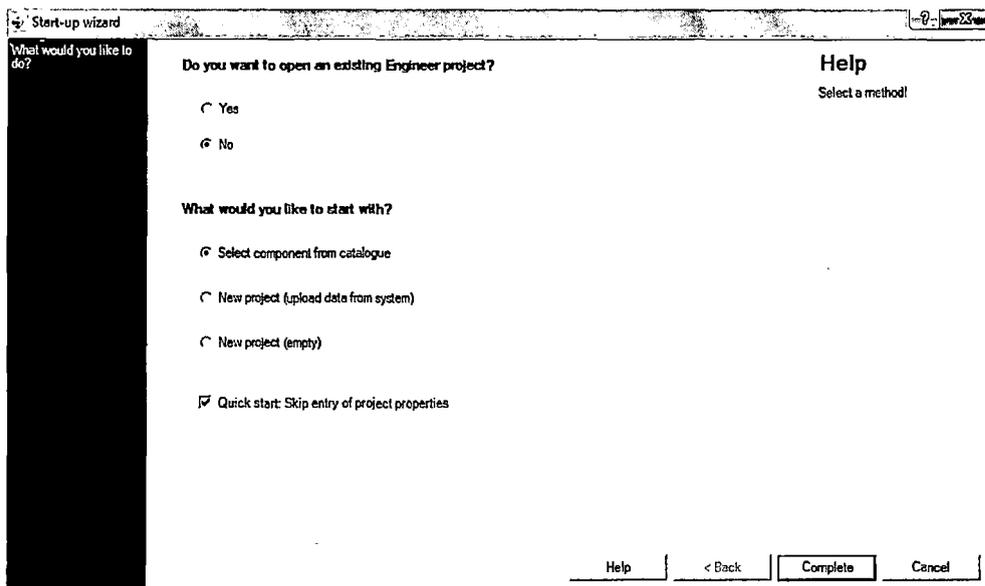


Figura 4. 2

Fuente: Elaboración propia.

En nuestro caso seleccionaremos la opción de crear un nuevo proyecto, seleccionando los componentes a programar directamente, también existe la opción de hacerlo más tarde, en el caso que no sepamos las necesidades a automatizar, el motor o la comunicación que utilizaremos.

Asignamos un nombre al proyecto, PROGRAMA 01, juntamente con parámetros que servirán posteriormente para salvarlo.

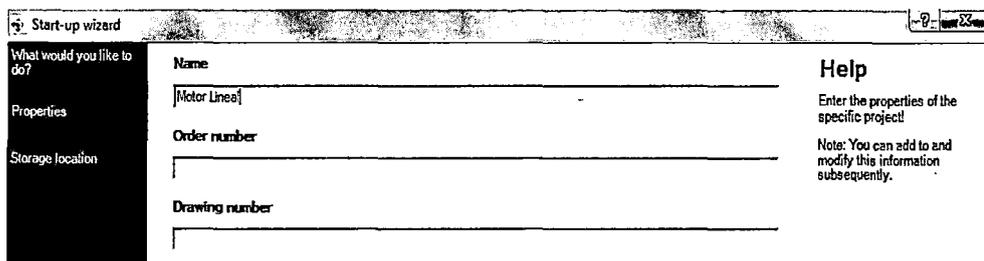


Figura 4. 3

Fuente: Elaboración propia.

Acto seguido aparece en la pantalla, una nueva ventana donde nos da a escoger todos los variadores de frecuencia existentes, con las diferentes versiones, en nuestro ejemplo escogeremos un 9400 HighLine V11. Este modelo a diferencia del resto, viene con el módulo de seguridad incorporado, elemento necesario cuando trabajamos con más de un convertidor de frecuencia en línea.

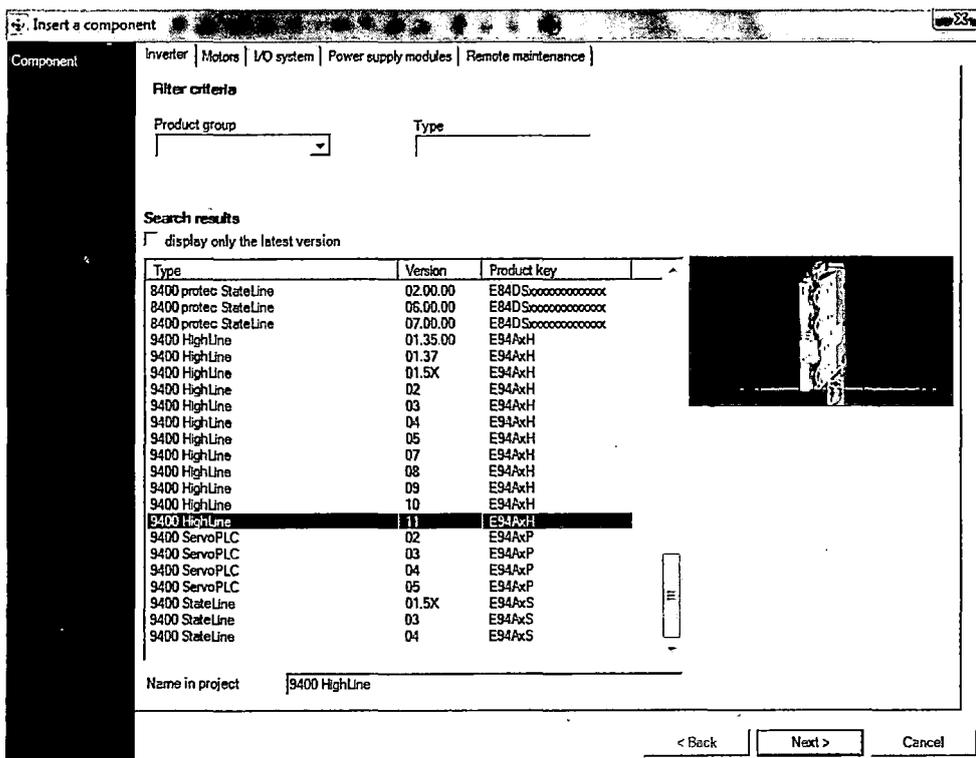


Figura 4. 4

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente pantalla tenemos que escoger el modo de comunicación del equipo, este modelo nos permite la comunicación mediante CANopen.

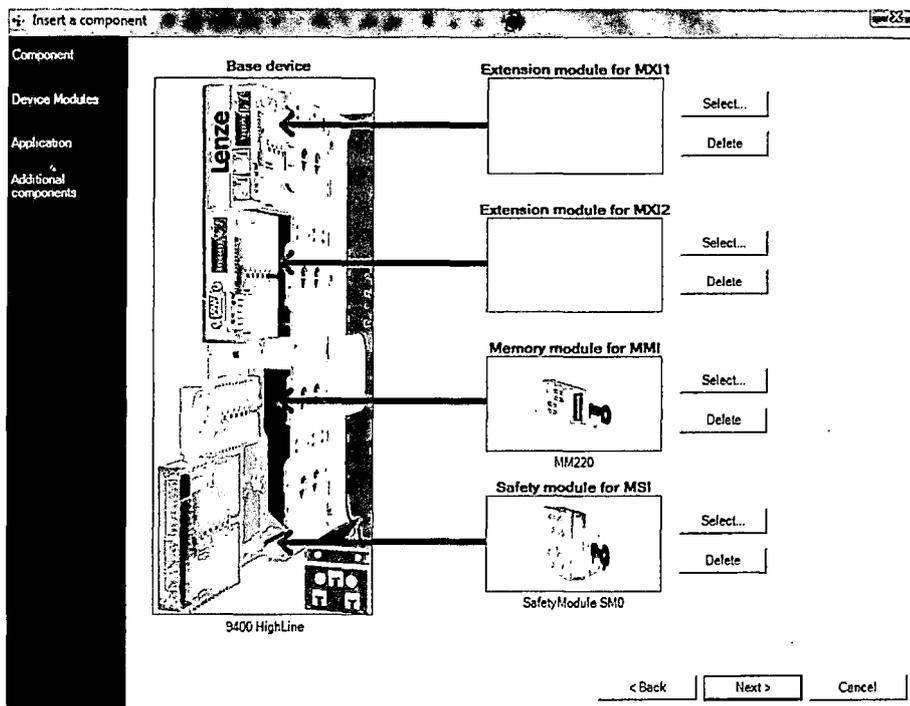


Figura 4. 5

Fuente: Elaboración propia.

En este momento tenemos escogido el variador de frecuencia y el módulo de comunicación. En la siguiente pantalla, tendremos que escoger la función a realizar. Este modelo nos ofrece dos opciones: o bien un seguidor de velocidad o un posicionado. Para nuestro ejemplo escogeremos un seguidor de velocidad.

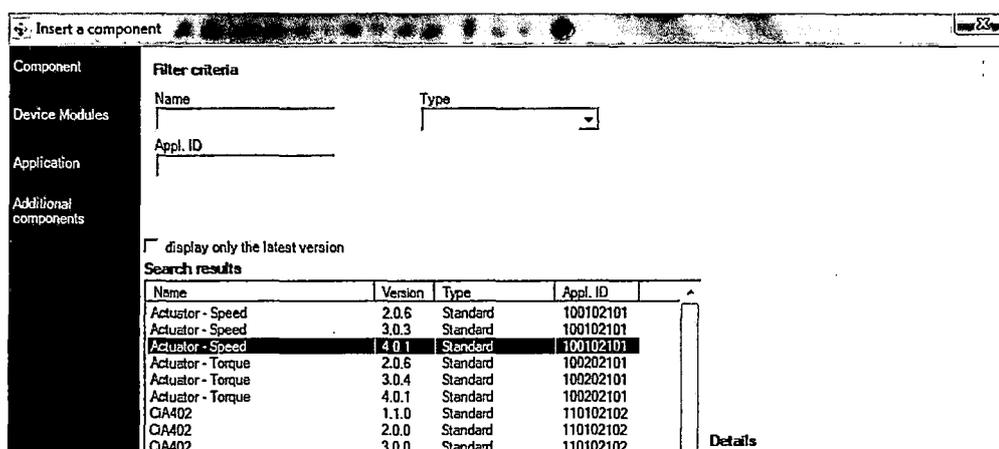


Figura 4. 6

Fuente: Elaboración propia.

Ahora ya sólo nos falta asignar el motor que queremos controlar y lo haremos en la siguiente ventana donde podremos escoger si necesitamos motor y reductor o únicamente motor.

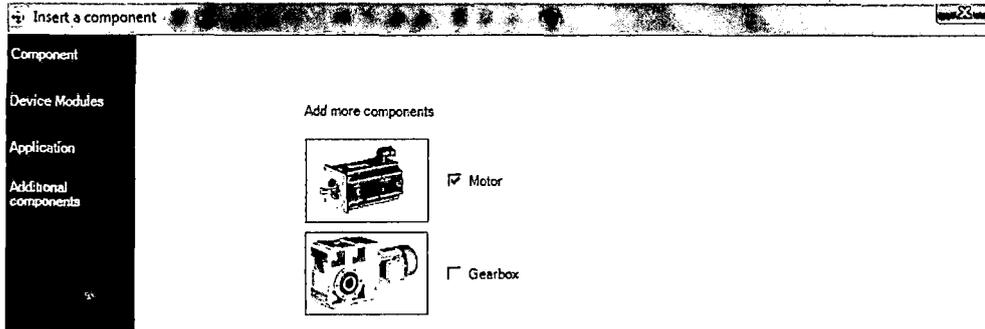


Figura 4. 7

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente ventana concretamos exactamente el motor que moveremos. Para nuestro ejemplo escogemos el motor que mejor se adapta a este variador de frecuencia.

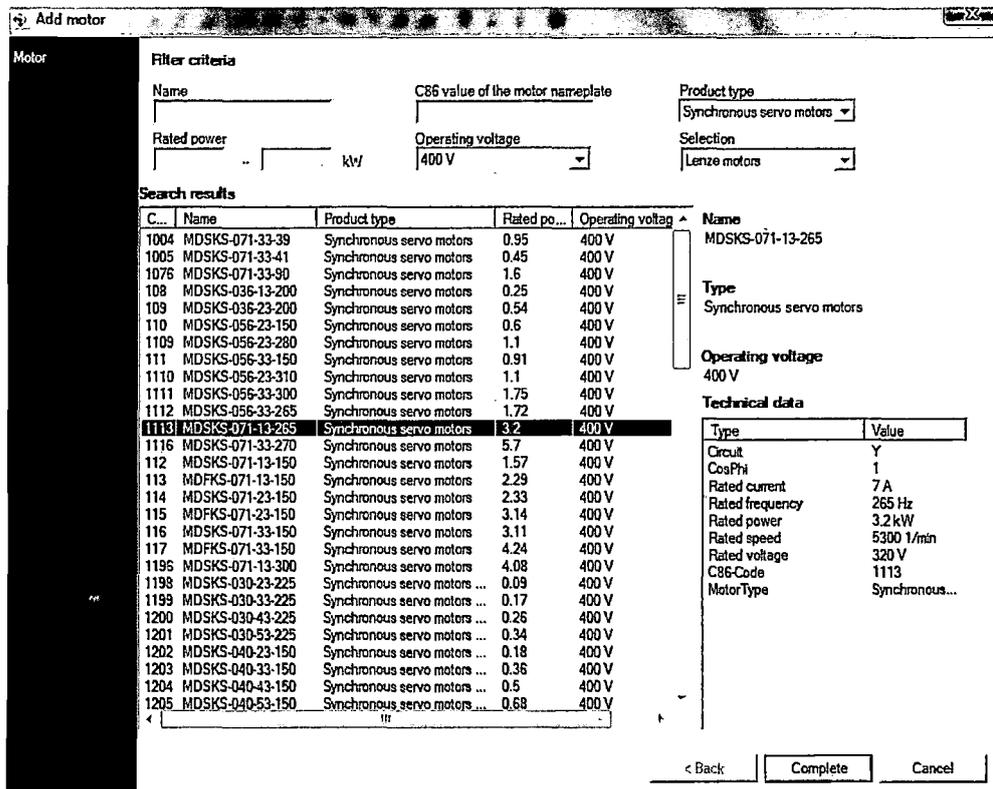


Figura 4. 8

Fuente: Elaboración propia.

En este momento ya tenemos asignadas todas las variables del equipo y es el momento de la programación real de este. Nada más asignar el motor nos sale la interface de trabajo del Engineer.

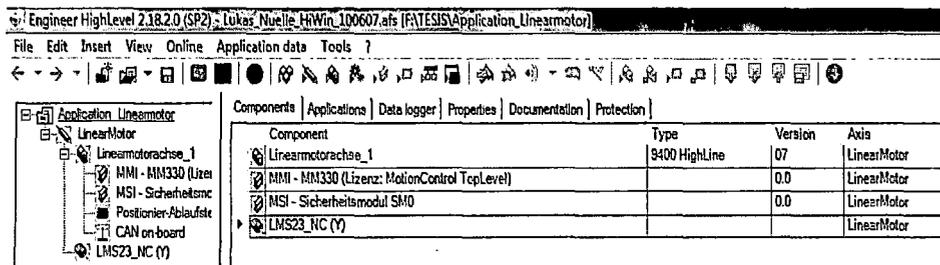


Figura 4. 9

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Interfaz de usuario.

La interfaz de usuario es el medio por el cual el usuario se comunica con la máquina, comprende todo los puntos de contacto entre el usuario y el equipo.

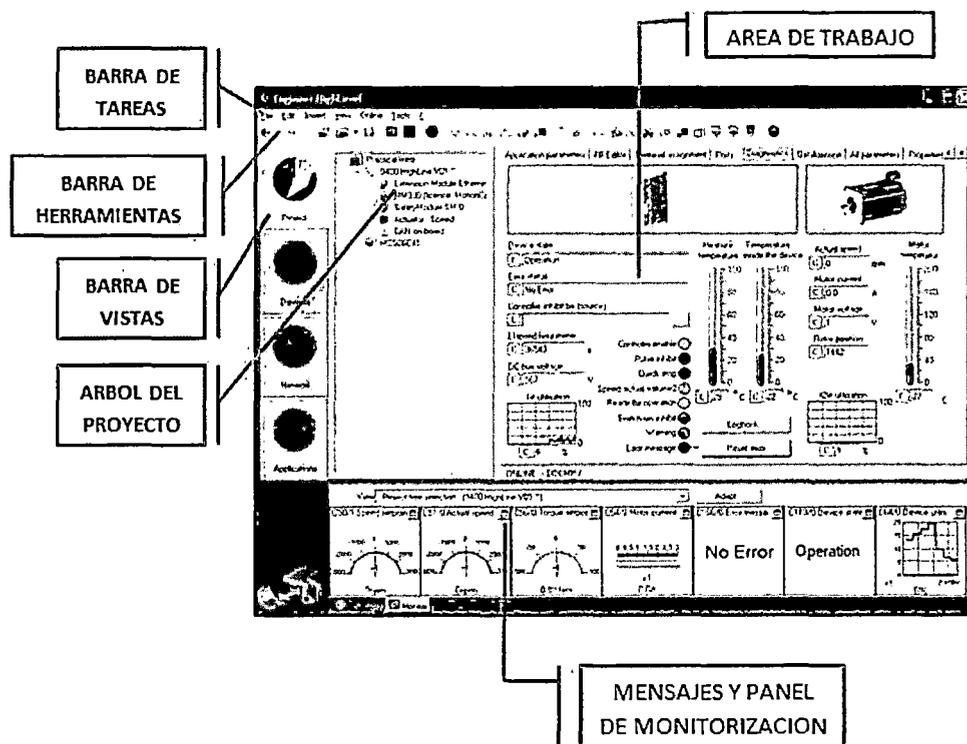
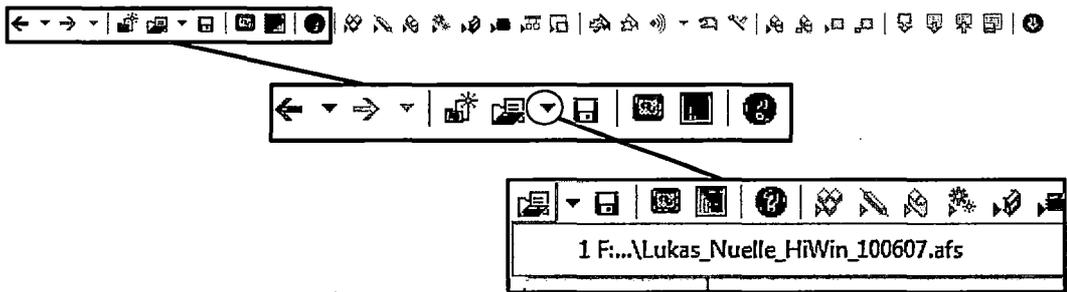


Figura 4. 10

Fuente: Elaboración propia.

A través de los iconos de la barra de herramientas se puede llevar a cabo una de las funciones que requiere la mayoría de las veces de una manera sencilla sin tener que ir al modo indirecto a través de la barra de menús. Si está en la vista del proyecto, se muestra toda la barra de herramientas.

Haga clic en un icono para ejecutar la función correspondiente:



Botones para navegar.



Crear un nuevo proyecto.



Abrir un proyecto existente.



Guardar Proyecto.



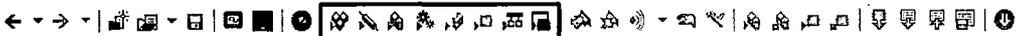
Configurar la ventana de monitorización.



Maximizar o minimizar el área de trabajo.



Visualizar la ayuda.



Insertar módulo de sistema.



Insertar eje.



Insertar componente.



Insertar caja de engranajes.



Insertar módulo de dispositivo.



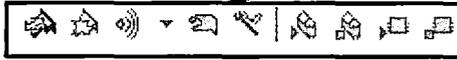
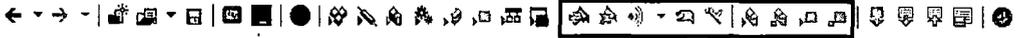
Insertar aplicación.



Insertar red.



Insertar aplicación de Maquina.



Ir online.



Ir offline.



Habilitar driver.



Inhibir driver.



Iniciar programa de PLC.



Detener programa de PLC.



Descargar el Programa.



Descargar los parámetros del driver.



Leer los parámetros del driver.



Guardar conjunto de parámetros.



Actualizar proyecto y descargar.

Tenemos el interfaz de trabajo del Engineer que se divide en los siguientes apartados.

Application Parameters | FB Editor | Terminal assignment | Ports | User menu | Diagnostics | Data logger | Oscilloscope | All parameters |

← Back → Overview

400/415 V

Basic functions

All basic functions →

Type: [C] -

Mounting direction: [C] Motor rotating CCW

Reference speed: [C] 7500 rpm

Reference torque: [C] 1.280 Nm

Gearbox factor numerato.: [C] 1 Z2

Gearbox factor denom.: [C] 1 Z1

Feed constant: [C] 32.0000 mm/rev.

Max. presentable speed: [C] 214748.3647 mm/s

Positionier-Ablaufsteuerung

Parameterisable application blocks

| Instance | Task | Type |
|---------------------------|------------------|----------------|
| ActualSpeedScaling | Application Task | L_TbNormal... |
| ApplErr_LinearDrive | Application Task | L_DevApplErr |
| ApplicationError1 | Application Task | L_DevApplErr |
| ApplicationError2 | Application Task | L_DevApplErr |
| Comp_Monit_DC_BusV... | Application Task | L_TbCompa... |
| Comp_Monit_Electronic... | Application Task | L_TbCompa... |
| FollowingErrorScaling | Application Task | L_TbNormal... |
| HysteresisFollowingError1 | Application Task | L_SdSetPos... |
| HysteresisFollowingError2 | Application Task | L_SdSetPos... |
| L_DevReadParC00060 | Application Task | L_DevRead... |
| L_DevReadParC2772_x | Application Task | L_DevRead... |
| L_PosPositionerTable1 | Application Task | L_PosPosi... |
| L_PosSequencer1 | Application Task | L_PosSequ... |
| L_SdPosToUnit1 | Application Task | L_SdPosTo... |
| L_SdSpeedToUnit1 | Application Task | L_SdSpeed... |
| L_SdSwitchPoint1 | Application Task | L_SdSwitch... |
| L_SdUnitToPos2 | Application Task | L_SdUnitTo... |
| L_SdUnitToSpeed1 | Application Task | L_SdUnitTo... |
| L_TbCompare1 | Application Task | L_TbCompare |
| L_TbDelay1 | Application Task | L_TbDelay |
| L_TbTransition1 | Application Task | L_TbTransit... |
| L_TbTransition2 | Application Task | L_TbTransit... |
| L_TbTransition3 | Application Task | L_TbTransit... |
| LimitFollowingerror1 | Application Task | L_SdSetPos... |
| LimitFollowingerror2 | Application Task | L_SdSetPos... |
| LS_AnalogInput | Application Task | LS_AnalogI... |
| LS_AnalogOutput | Application Task | LS_Analog... |
| LS_Brake | Application Task | LS_Brake |
| LS_TripAllow | Application Task | LS_TripAll... |

Figura 4. 11

Fuente: Elaboración propia.

La primera, superior de la mano izquierda consta de las funciones básicas donde encontramos el modo de operación en el cual asignamos la comunicación con el motor, en este caso mediante un encóder, para así poder tener una respuesta más rápida de lectura.

Basic functions

All basic functions →

Figura 4. 12

Fuente: Elaboración propia.

En el icono All basic functions, encontramos la ejecución de las diversas funciones básicas que es controlada de forma interna a través de una máquina de estado, que puede asumir los siguientes estados de función.

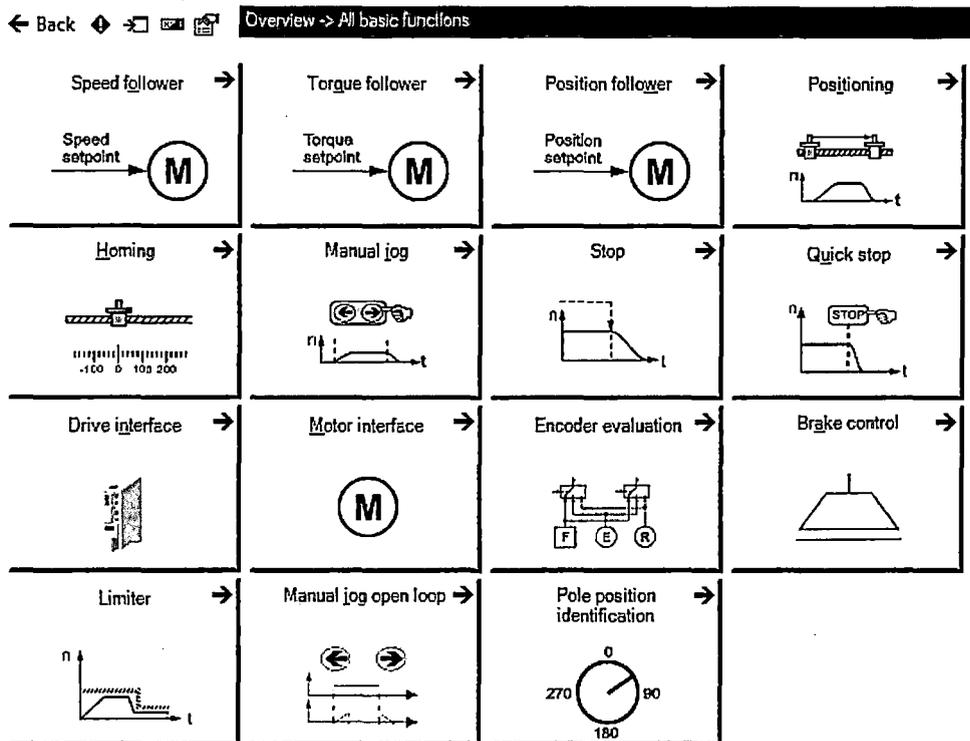


Figura 4. 13

Fuente: Elaboración propia.

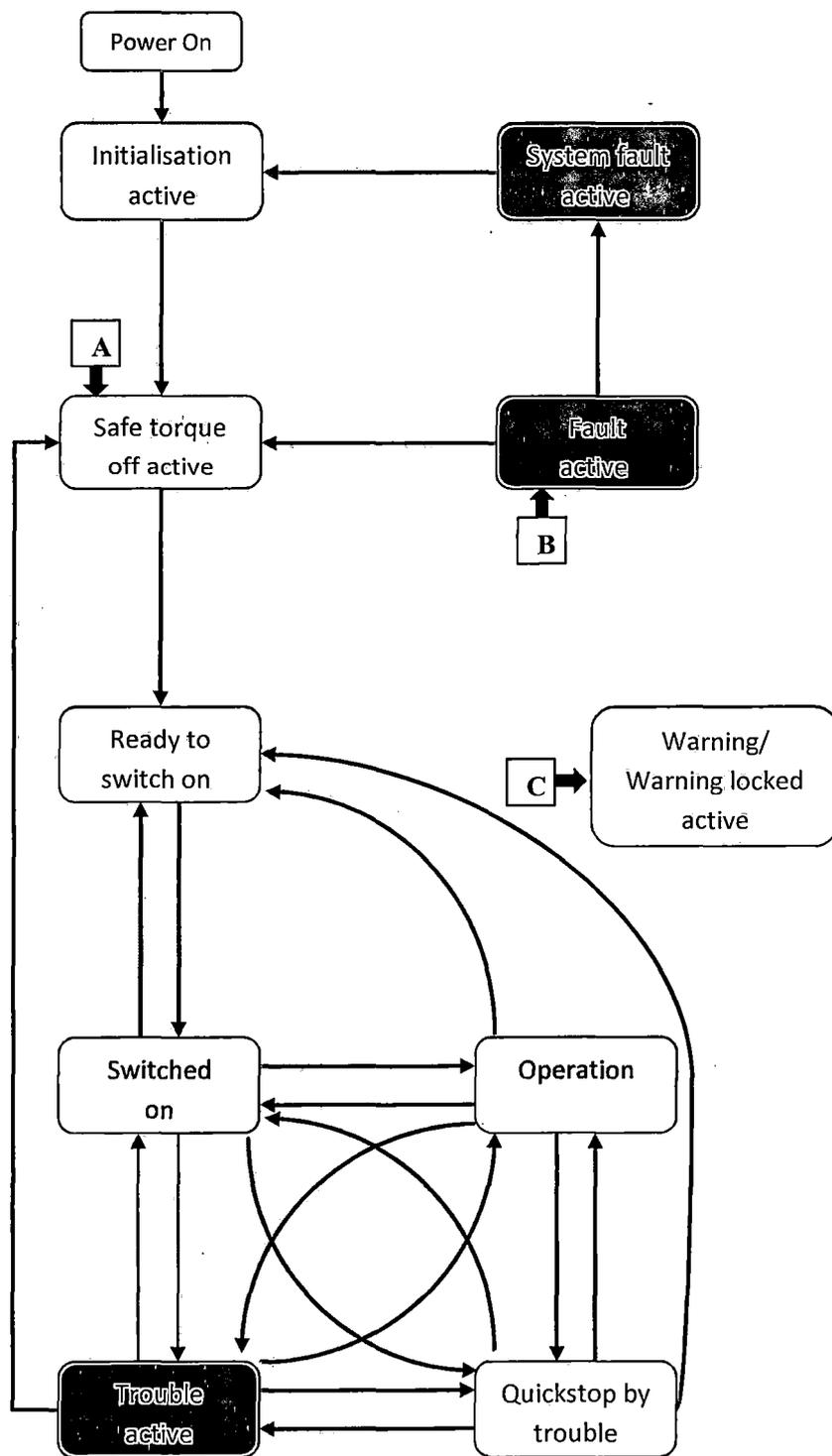
La máquina de estado garantiza que:

- ✓ En cada momento solo una función básica se haga cargo del control del accionamiento.
- ✓ Si se activan varias funciones básicas al mismo tiempo, solo se ejecute la función básica con la prioridad más alta.
- ✓ En caso de fallo, al igual que en el caso normal, el accionamiento siempre se encuentre en un estado definido.

A los estados de función se les han asignado prioridades, de forma que al activar varias funciones básicas al mismo tiempo, siempre se realiza el cambio al estado de función con la prioridad más alta.

| Prioridad | Estado de función | Función básica ejecutable |
|---|---|---------------------------|
| 1 | Inicialización | - |
| 2 | Error | - |
| 3 | Convertidor no preparado | - |
| 4 | Paro rápido activo | Paro rápido |
| 5 | Avance manual activo | Avance manual |
| 6 | Homing activo | Homing |
| 7 | Posicionamiento activo | Posicionar |
| 8 | Seguidor de consigna (posición) activo | Seguidor de posición |
| 9 | Seguidor de consigna (velocidad) activo | Seguidor de velocidad |
| 10 | Seguidor de consigna (par) activo | Seguidor de par |
| 10 | Prueba de frenos | Control de frenos |
| 12 | Accionamiento está siendo detenido | Parada normal |
| 1 ≡ prioridad más alta; 12 ≡ prioridad más baja | | |

Encontramos el icono con la representación del equipo en el podemos observar el estado del equipo de una forma más visual y comprensible.



- A, B** Desde todos los estados
- C** El estado "Advertencia activa"/"Advertencia bloqueada activa" puede aparecer en paralelo a otros estados.

Figura 4. 14 Estados de equipo de la máquina de estado para el control del equipo

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software, Parametrización & Configuración.

En el segundo apartado, justo debajo de las funciones básicas encontramos el icono de las especificaciones del motor, ya bien por una equivocación en la creación del proyecto o por la modificación de este, en este apartado tenemos la opción de volver a escoger el motor o modificarlo.

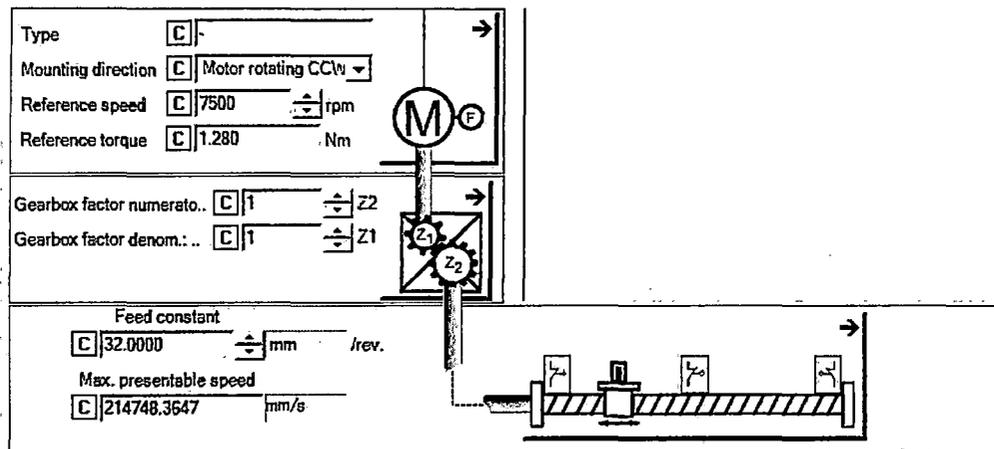


Figura 4. 15

Fuente: Elaboración propia.

El tercer apartado, se encuentra a la derecha de la interfaz principal y en el podemos encontrar, todo los parámetros utilizados en el editor de funciones, ya sean sistemas de bloques, función de bloques y variables.

Positionier-Ablaufsteuerung

| Parameterisable application blocks | | Parameterise |
|------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Instance | Task | Type |
| ActualSpeedScaling | Application Task | L_TbNormal... |
| ApplErr_LinearDrive | Application Task | L_DevApplErr |
| ApplicationError1 | Application Task | L_DevApplErr |
| ApplicationError2 | Application Task | L_DevApplErr |
| Comp_Monit_DC_BusV... | Application Task | L_TbCompa... |
| Comp_Monit_Electronic... | Application Task | L_TbCompare |
| FollowingErrorScaling | Application Task | L_TbNormal... |
| HysteresisFollowingError1 | Application Task | L_SdSetPos... |
| HysteresisFollowingError2 | Application Task | L_SdSetPos... |
| L_DevReadParC00060 | Application Task | L_DevRead... |
| L_DevReadParC2772_x | Application Task | L_DevRead... |
| L_PosPositionerTable1 | Application Task | L_PosPositi... |
| L_PosSequencer1 | Application Task | L_PosSequ... |
| L_SdPosToUnit1 | Application Task | L_SdPosTo... |
| L_SdSpeedToUnit1 | Application Task | L_SdSpeed... |
| L_SdSwitchPoint1 | Application Task | L_SdSwitch... |
| L_SdUnitToPos2 | Application Task | L_SdUnitTo... |
| L_SdUnitToSpeed1 | Application Task | L_SdUnitTo... |
| L_TbCompare1 | Application Task | L_TbCompare |
| L_TbDelay1 | Application Task | L_TbDelay |
| L_TbTransition1 | Application Task | L_TbTransiti... |
| L_TbTransition2 | Application Task | L_TbTransiti... |
| L_TbTransition3 | Application Task | L_TbTransiti... |
| LimitFollowingerror1 | Application Task | L_SdSetPos... |
| LimitFollowingerror2 | Application Task | L_SdSetPos... |
| LS_AnalogInput | Application Task | LS_Analogl... |
| LS_AnalogOutput | Application Task | LS_Analog... |
| LS_Brake | Application Task | LS_Brake |
| LS_DigitalInput | Application Task | LS_Digital... |

Figura 4. 16

Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizado la parametrización del equipo ya solo queda asignar las entradas y las salidas y posterior mente la programación del equipo mediante el programador de bloques.

Para la asignación de las entradas y las salidas, tenemos q apretar en la pestaña de Terminal assignment, en la cual mediante una interface muy gráfica iremos asignando cada entrada y salida con la acción a realizar.

Pin connection **Digital terminals**

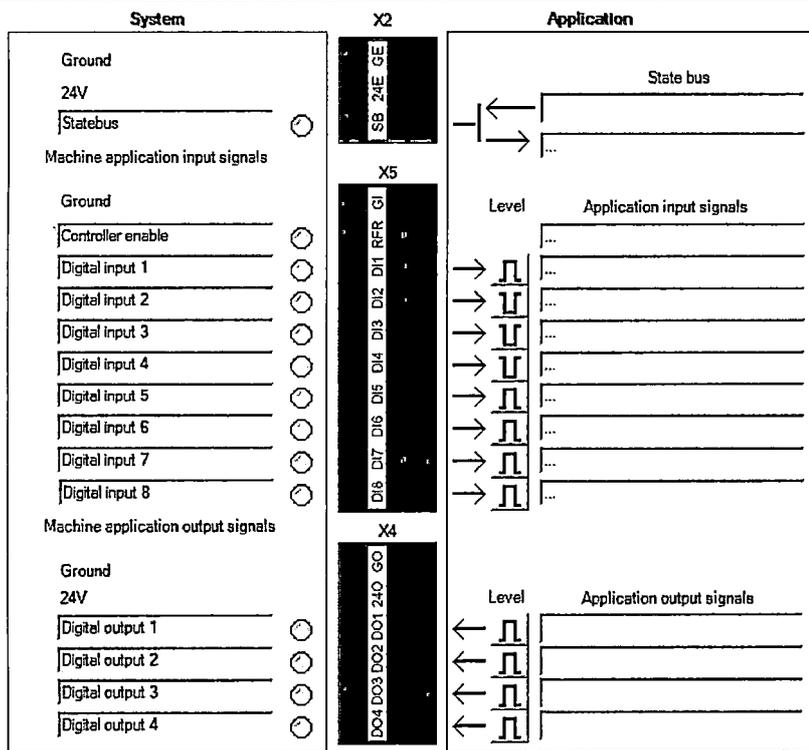


Figura 4. 17

Fuente: Elaboración propia.

Haremos lo mismo con las entradas analógicas en caso de que fueran necesarios y con las salidas del equipo.

Pin connection **Analog terminals**

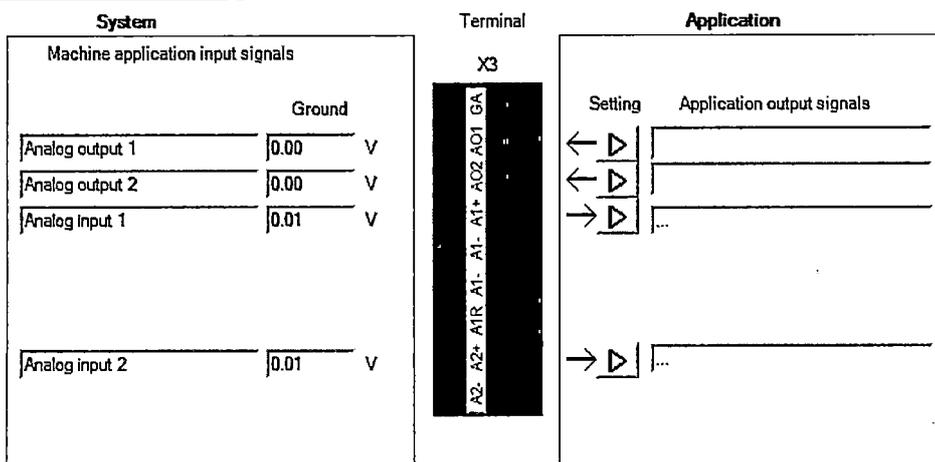


Figura 4. 18

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. El Establecimiento de una Conexión de Bloques de Función.

Las aplicaciones de los dispositivos específicos de Lenze no sólo se pueden parametrizar, pero también se pueden reconfigurar por medio de una conexión de bloques de función correspondiente.

Para estos dispositivos se proporciona la ficha editor FB en el rango de funcionamiento:

Después de haber seleccionado la pestaña editor FB en el rango de funcionamiento, se puede activar el editor de FB a través del botón Habilitar editor.

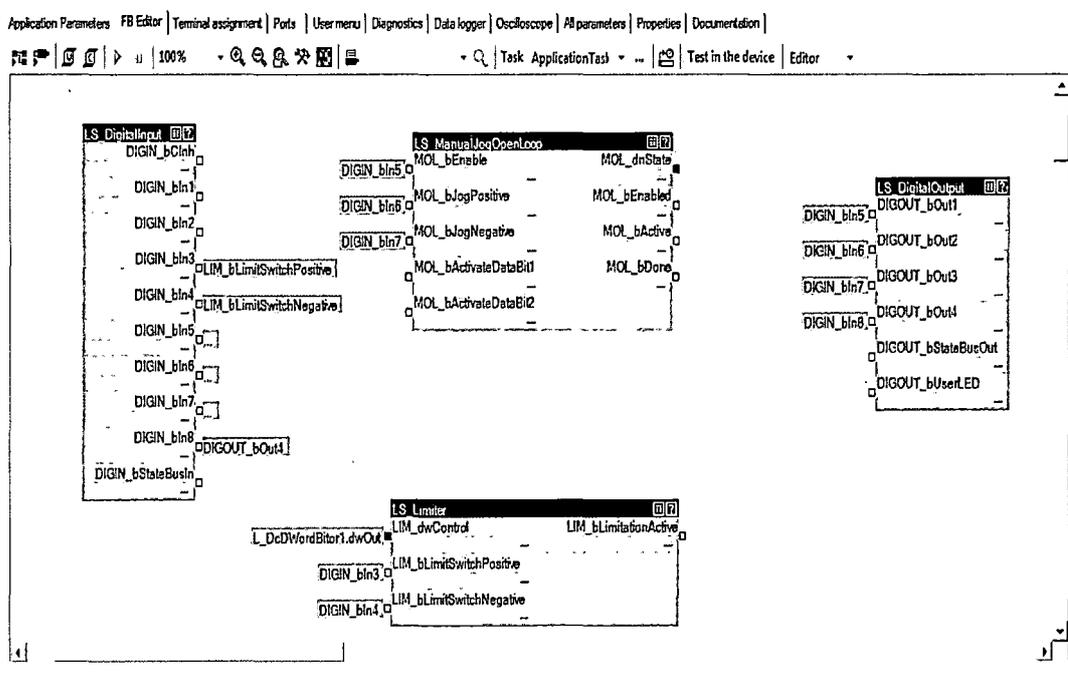


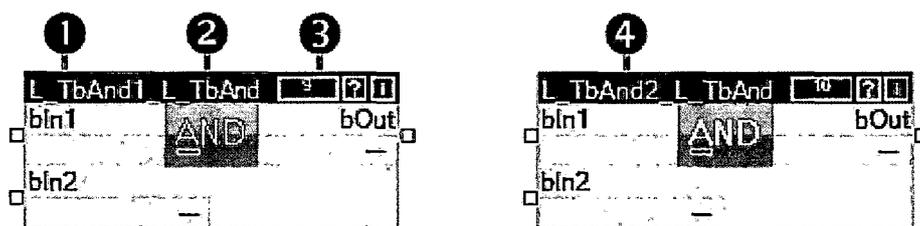
Figura 4. 19

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.1. Terminología Usada en el Bloque de Función (FB).

Un bloque de función (FB) se puede comparar con un circuito integrado que contiene una cierta lógica de control y entrega de uno o varios valores cuando se está ejecutando.

- ✓ Bloques de función se clasifican en las bibliotecas de funciones de acuerdo a sus funciones.
- ✓ Una entidad (reproducción, copia) del bloque de función siempre se inserta en el circuito.
- ✓ También es posible insertar varias entidades de un bloque de función en un circuito.
- ✓ Cada entidad tiene un identificador inequívoco (el nombre de la entidad) y un número de referencia que define la posición del bloque de función se calcula en tiempo de ejecución.



- ① Nombre de la instancia (de libre elección)
- ② Nombre del bloque de funciones (no se puede cambiar)
- ③ Número de Procesamiento
- ④ Otros instancia del bloque de funciones

Figura 4. 20

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.2. Bloques de Función Parametrizables.

Algunos bloques de funciones tienen parámetros por medio de la cual, si es necesario, los ajustes particulares se pueden cambiar durante la operación o que muestran los valores reales y la información de estado.

Al hacer clic en el símbolo  la lista de parámetros de un bloque de funciones se puede abrir.

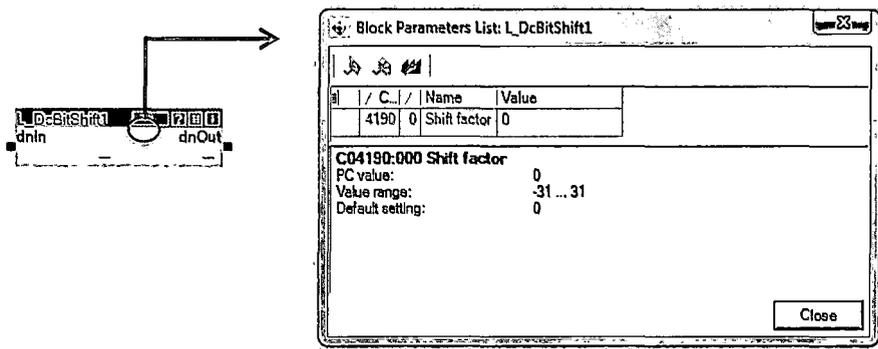


Figura 4. 21

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.3. Bloque de Sistema (SB).

Bloques del sistema pueden ser considerados como una variante específica de un bloque de función.

- ✓ En contraste con los bloques de función, bloques de sistema están integrados de forma fija en el tiempo de ejecución de sistema del controlador o del control y por lo tanto no son cambiables.
- ✓ Bloques de sistema activan en parte hardware real, ejemplo las entradas/salidas digitales y analógicas y el control del motor.
- ✓ Los bloques de sistema que se proporcionan para un dispositivo dentro del editor de FB dependen del dispositivo correspondiente.

Ejemplo: LS_DigitalInput y LS_DigitalOutput del HighLine 9400 para la representación de las entradas / salidas digitales.

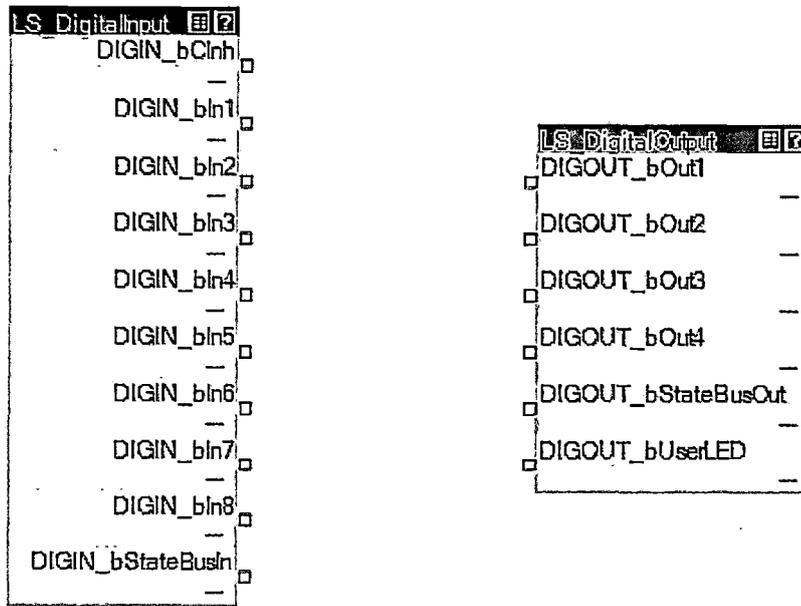


Figura 4. 22

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.4. Bloque de Puerto.

Si los puertos de entrada o salida se han definido para una aplicación, puede insertar estos puertos en la interconexión en forma de bloques de puerto y como éste leer o escribir el asociado a variables de elemento.

Ejemplo: Puerto de entrada de LPortAxisIn1 y puerto de salida LPortAxisOut1.

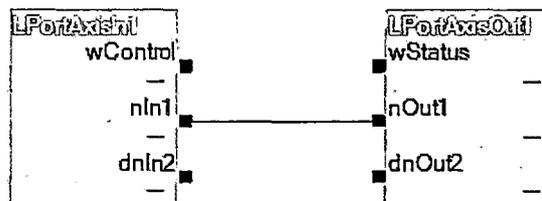


Figura 4. 23

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.5. Variables.

Puede definir las variables para la interconexión y, por ejemplo aplicar estas variables para códigos, con el fin de ser capaz de parametrizar los puntos de ajuste y las funciones de la interconexión a través del teclado.

Para el tipo de datos de los tipos de datos enteros variable de acuerdo con IEC61131-3 son proporcionales.

Ejemplo: TRUE_b variable del tipo de datos BOOL (a la izquierda: la asignación a la variable, a la derecha: la asignación por el variable)



Figura 4. 24

Fuente: Elaboración propia.

El código de usuario puede definir los códigos de usuario para la interconexión y así asignar las entradas de la función de bloques.

4.3.4. Diagnóstico del Accionamiento.

Con el Engineer se puede realizar en conexión online con el convertidor un diagnóstico del convertidor conectado y ver estados reales importantes del convertidor a través de una visualización clara:

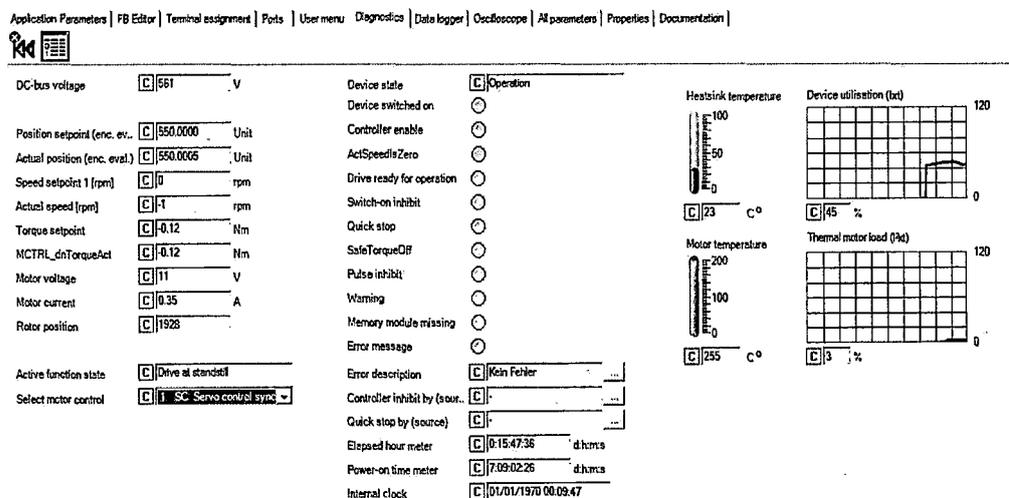


Figura 4. 25

Fuente: Elaboración propia.

Realizando el diagnóstico del accionamiento.

- ✓ En la Vista del proyecto, seleccionar el convertidor 9400 HighLine que se ha de diagnosticar.

- ✓ Clicar sobre el símbolo  o seleccionar la orden Online (Conectar), para establecer una conexión online con el convertidor.
- ✓ Seleccionar opción Diagnóstico. En la opción Diagnóstico con la conexión online establecida, se muestran informaciones de estado actuales sobre el convertidor.

4.3.5. Osciloscopio.

La función de osciloscopio integrada en el 9400 HighLine se puede utilizar como apoyo para la puesta en marcha, el mantenimiento y la detección de errores.

Aplicaciones típicas

- ✓ Presentación gráfica de todo tipo de magnitudes (ejm. consigna de velocidad, valor actual de la velocidad y par).
- ✓ Registro de magnitudes de proceso sin equipos de medición adicionales (como ejm. osciloscopio, medidor de voltaje y corriente).
- ✓ Documentación confortable para el ajuste exacto de circuitos de regulación o modificaciones de parámetros del convertidor.
- ✓ Documentación de la calidad de fabricación en relación con la responsabilidad de productos y el aseguramiento de la calidad.

Características especiales

- ✓ Registro y memorización de los valores de medición en el convertidor.
- ✓ Medición simultánea en ocho canales independientes.
- ✓ Medición de señales rápidas y lentas mediante una velocidad de escaneo configurable.
- ✓ Activación en un canal, una variable o un mensaje de error.
- ✓ Registro de valores de medición antes y después del evento de activación (pre/post-triggering).
- ✓ Presentación gráfica y evaluación de los valores de medición en un PC.
- ✓ Función de cursor y zoom para el análisis de la medición.
- ✓ Guardar y cargar configuraciones del osciloscopio.
- ✓ Exportación de los valores de medición a través de una memoria intermedia para el posterior procesamiento.

4.3.5.1. Interface de Usuario.

El interfaz de usuario del osciloscopio contiene los siguientes elementos de control y función.

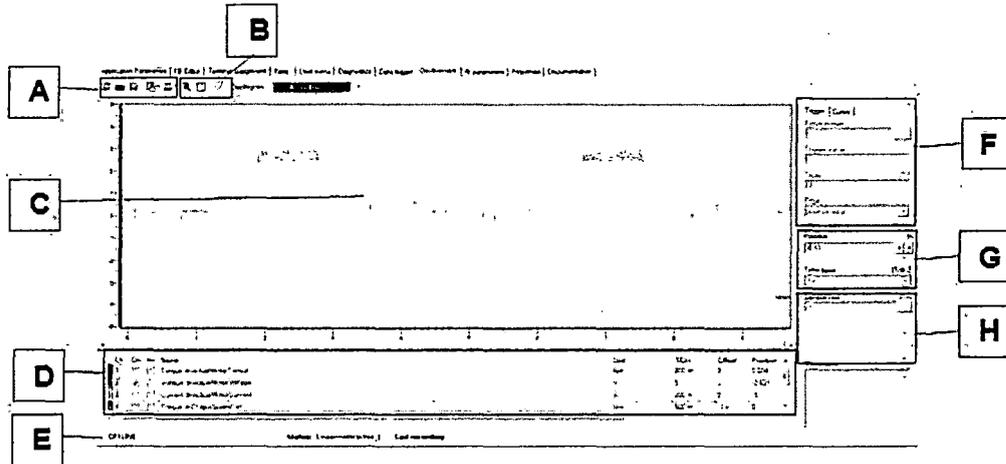


Figura 4. 26

Fuente: Elaboración propia.

- A : Barra de herramientas del osciloscopio.
- B : Barra de funciones del osciloscopio.
- C : Oscilógrafo.
- D : Configuraciones verticales.
- E : Barra de estado.
- F : Configuraciones de activación/cursor.
- G : Configuraciones horizontales.
- H : Configuraciones para el registro.

CAPITULO V: PROGRAMACION EN EL SOFTWARE Y PUESTA EN OPERACIÓN DEL MOTOR SINCRONO LINEAL.

5.1. Introducción.

El estudio de las máquinas eléctricas requiere la comprensión de los fundamentos de construcción y principios físicos de los motores.

Para comprender el comportamiento del motor lineal, es necesario realizar prácticas de la operación a fin de obtener las relaciones de parámetros contra un parámetro o variable independiente. Por lo cual realizamos las pruebas experimentales de los parámetros fundamentales a fin de entender el funcionamiento y operación del motor.

5.2. Aspectos generales para la operación del motor.

5.2.1. Flujo de señal básico.

El núcleo funcional del posicionamiento multiuso está creado por la tabla de secuencias y la gestión de datos de perfil, que le proporcionan a la función básica de accionamiento "Posicionar" las señales de control y datos de perfil necesarios.

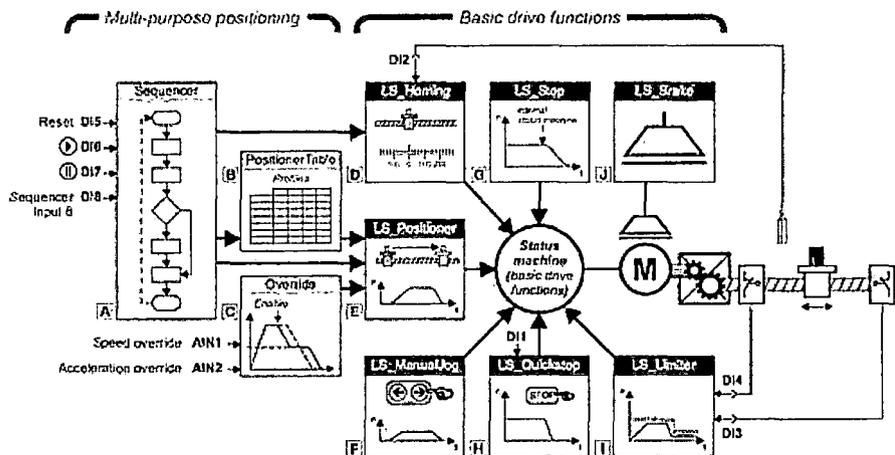


Figura 5. 1 Flujo de señales de la TA, posicionamientos multiuso.

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software”, Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

- A Tabla de secuencias
- B Gestión de datos de perfil
- C Override de velocidad/aceleración
- D Homing
- E Posicionar

| | |
|---|------------------------------|
| F | Avance manual |
| G | Parada normal |
| H | Paro rápido |
| I | Limitador |
| J | Control de frenos (opcional) |

5.2.2. Descripción de las funciones básicas.

5.2.2.1. Bloque de sistema LS_Stop.

El bloque de sistema LS_Stop recrea la función básica "Parada normal" en el editor de bloques de función.

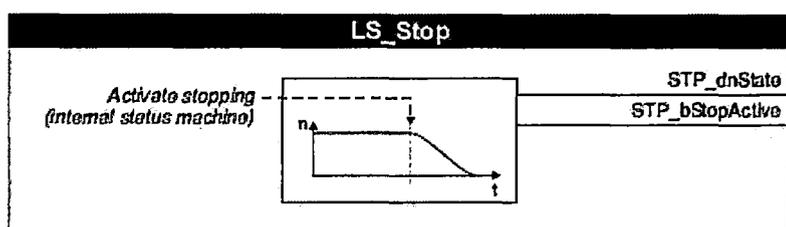


Figura 5. 2 Sistema de bloque LS_Stop.

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software”, Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

La parada normal del accionamiento se activa automáticamente por la máquina de estado interna, cuando se desactiva una función básica y el accionamiento aún no se ha detenido.

- ✓ El accionamiento es detenido con una rampa de deceleración parametrizable, mientras el accionamiento está siendo detenido, la máquina de estado se encuentra en el estado de función Accionamiento está siendo detenido.

Si entretanto se activa otra función básica, esta función básica asume el control del accionamiento desde la velocidad actual y se abandona el estado de función "Accionamiento está siendo parado".

Si el accionamiento está detenido, pasa automáticamente al estado básico "Accionamiento detenido".

- ✓ La parada normal tiene en cuenta una fase de aceleración activa en el momento de la activación del proceso de parada, es decir que la

aceleración actual es llevada primero a "0" con el tiempo de rampa en S parametrizado, antes de empezar con el proceso de deceleración en sí.

- ✓ Si estado el eje girando libre el convertidor es habilitado (se elimina la inhibición del convertidor y la inhibición de impulsos), el accionamiento es detenido desde la velocidad actual hasta la parada.

5.2.2.2. Bloque de sistema LS_Quickstop.

El bloque de sistema LS_Quickstop recrea la función básica "Paro rápido" en el editor de bloques de función.

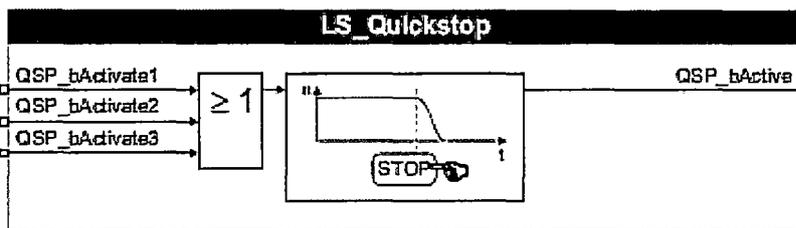


Figura 5. 3 Sistema de bloque LS_Quickstop.

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software", Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

Al contrario de la parada normal el paro rápido (QSP) por definición está previsto para la parada en caso de existir un error. Si se activa el paro rápido, en accionamiento es detenido independientemente de la consigna predeterminada dentro de un tiempo de deceleración previsto.

5.2.2.3. Bloque de sistema LS_ManualJog.

El bloque de sistema LS_ManualJog recrea la función básica "Avance manual" en el editor de bloques de función.

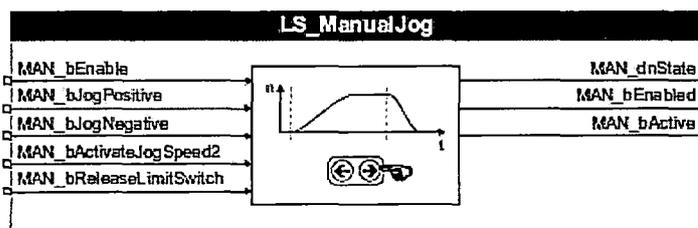


Figura 5. 4 Sistema de bloque LS_ManualJog.

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software", Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

Con la función básica "Avance manual" el accionamiento puede ser movido manualmente, por ejemplo para limpiar o cambiar las herramientas.

- ✓ Como opción, durante el avance se puede cambiar a una segunda velocidad para el avance manual.
- ✓ También es posible "abandonar" interruptores de final de carrera activados, en tal caso también es posible avanzar en la correspondiente dirección de abandono.

En el modo de avance manual, se realiza una monitorización del rango de avance mediante finales de carrera y posiciones finales de software a través de la función básica Limitador.

5.2.2.4. Bloque de sistema LS_Homing.

El bloque de sistema LS_Homing recrea la función básica "Homing" en el editor de bloques de función.

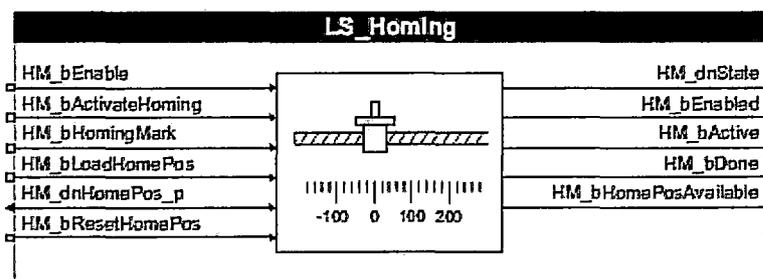


Figura 5. 5 Sistema de bloque LS_Homing.

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software", Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

Con la función básica "Homing" se realiza la transferencia del sistema de medición de la máquina dentro del rango de desplazamiento físico posible al convertidor.

- ✓ La referencia (por ejemplo la posición cero del eje de accionamiento dentro del sistema de medición de la máquina) se puede definir mediante la búsqueda de referencia o mediante una determinación de referencia.
- ✓ En la búsqueda de referencia el accionamiento avanza según el modo de homing configurado para determinar la referencia en el sistema de medición por sí mismo.
- ✓ La posición del encoder es guardada en el módulo de memoria, asegurado contra fallos de red y por ello sigue siendo reconocido por el control del accionamiento después de conectar y desconectar la red.

5.2.2.5. Bloque de sistema LS_Positioner.

El bloque de sistema LS_Positioner recrea la función básica "Posicionamiento" en el editor de bloques de función.

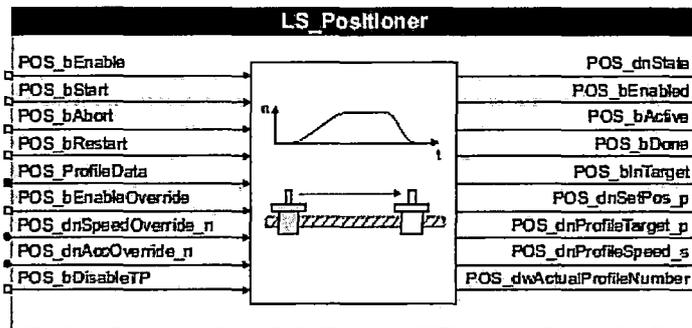


Figura 5. 6 Sistema de bloque LS_Positioner.

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software”, Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

La función básica "Posicionamiento" pone a disposición la funcionalidad para el recorrido de perfiles de avance y soporta además un "Override" de la velocidad y de la aceleración.

Un perfil describe un pedido de movimiento que luego puede ser convertido en un movimiento de rotación por el sistema de bloque LS_Positioner.

Un perfil es descrito a través de los parámetros de perfil modo (tipo de posicionamiento), posición, velocidad, aceleración, deceleración, tiempo de rampa en S, velocidad final, perfil secuencial estándar, perfil secuencial TP, posición inicial y final de ventana TP, así como fuentes de señal Touch Probe.

5.2.2.6. Bloque de sistema LS_Limiter.

El bloque de sistema LS_Limiter recrea la función básica "Limitador" en el editor de bloques de función.

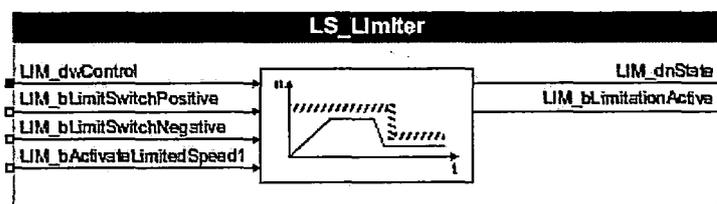


Figura 5. 7 Sistema de bloque LS_Limiter.

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software”, Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

Las posiciones finales de software sirven para la limitación del rango de desplazamiento mediante software y evitan que se ejecuten órdenes de avance que tendrían como consecuencia que se abandone el rango de desplazamiento.

La monitorización de los límites del rango de recorrido mediante interruptores de final de carrera se realiza a través de las entradas *LIM_bLimitSwitchPositive* y *LIM_bLimitSwitchNegative* del sistema de bloque LS_Limiter. Ambas entradas reaccionan ante el estado TRUE y se han de conectar con las entradas digitales que estén conectadas a los interruptores de final de carrera:

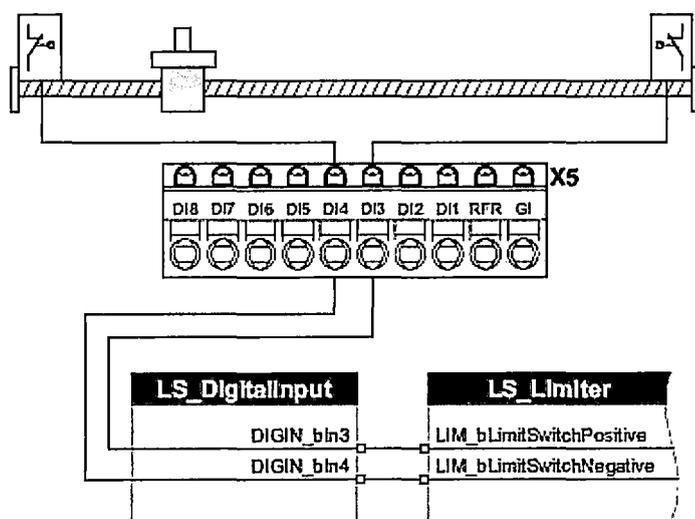


Figura 5. 8 Conexión de los interruptores de final de carrera a las entradas digitales 3 y 4.

Fuente: *L-Force Servo Drives 9400, manual de software*, Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

- ✓ Estando los interruptores de final de carrera activos, el eje de accionamiento se detiene automáticamente y se ejecuta un cambio pasando por el estado de función "Accionamiento está siendo detenido" al estado de función "Error".
- ✓ A través de un interface de sistema interno se genera un error y se anota en el libro de registro del convertidor, el accionamiento puede volver a arrancar cuando el error haya sido confirmado.

5.2.2.7. Bloque de sistema LS_Brake.

El bloque de sistema LS_Brake recrea la función básica "Control de freno" en el editor de bloques de función.

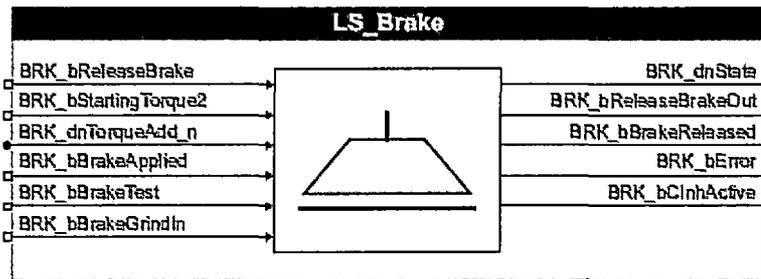


Figura 5. 9 Sistema de bloque LS_Brake.

Fuente: L-Force Servo Drives 9400, manual de software”, Parametrización & Configuración. GmbH, 2007.

Esta función básica sirve para el control sin desgaste y la monitorización de un freno de parada que para ello, en el caso más simple está conectado al módulo de frenado opcional. Como alternativa, el freno de parada también se puede controlar y monitorizar a través de entradas/salidas digitales.

Los frenos de parada de motor se utilizan para detener ejes en caso de inhibición de controlador o de impulsos. Esto es de especial importancia en el caso de ejes verticales no equilibrados.

5.3. Operaciones básicas del motor.

Conocido las partes del motor, el software de control y las funciones básicas comenzaremos a operar dicho motor lineal, para esto comenzamos con operaciones básicas.

5.3.1. Contrastación de entradas y salidas digitales.

Para realizar este proceso se hizo un programa simple en el engineer utilizando solamente las entradas digitales (LS_DigitalInput) y salidas digitales (LS_DigitalOutput), adicionalmente agregamos una función de bloque (L_TbOscillator).

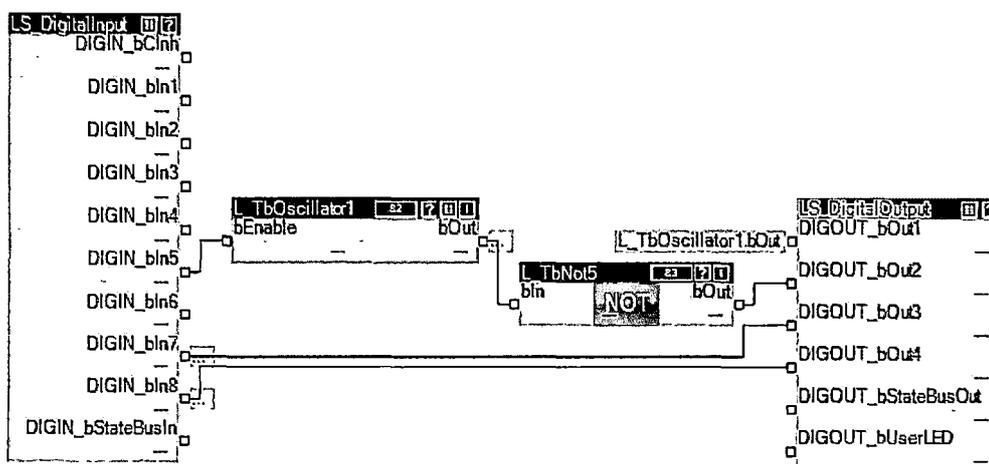


Figura 5. 10

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento.

- 1 Asegúrese de que todos los interruptores estén en la posición central.
- 2 Activar los interruptores DI7 y DI8, verificar las salidas DO3 y DO4 en la parte del controlador y revisar los Led.
- 3 Activar el interruptor DI5, verificar salidas DO1 y DO2, los led estarán oscilando.

5.3.2. Programación básica para el funcionamiento del motor.

En esta parte se hizo un programa para poner en marcha el motor lineal de forma básica, aunque se podrá observar que el motor no trabaja adecuadamente.

Primero. Utilizando algunos bloques en el editor hacemos que el motor realice movimientos de derecha a izquierda y viceversa. Pero con este programa aún no se activan los finales de carrera.

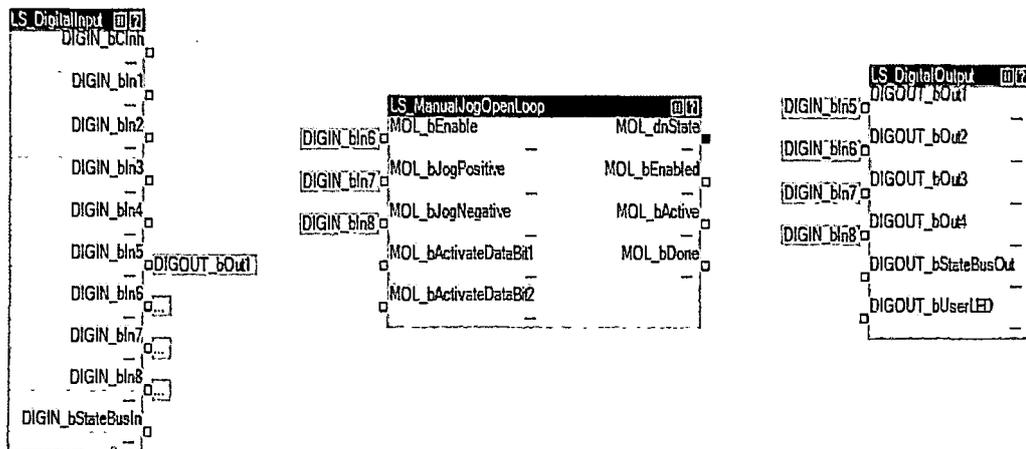


Figura 5. 11

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento.

- 1 Encienda el amplificador de accionamiento.
- 2 Asegúrese que todos los interruptores estén en la posición central.
- 3 Activar el interruptor RFR.
- 4 Activar el controlador con el interruptor DI6.
- 5 Activar interruptor DI7 para movimiento Positivo, después ponga interruptor a la parte central.
- 6 Activar interruptor DI8 para movimiento negativo, después ponga interruptor a la parte central.
- 7 Active interruptores DI7 y DI8 para movimientos en ambas direcciones.

Al realizar este proceso vemos que el motor no tiene un límite en donde detenerse y trata de seguir avanzando a pesar de llegar al final de carrera.

Para lo cual usaremos un bloque para poder detener en los finales de carrera.

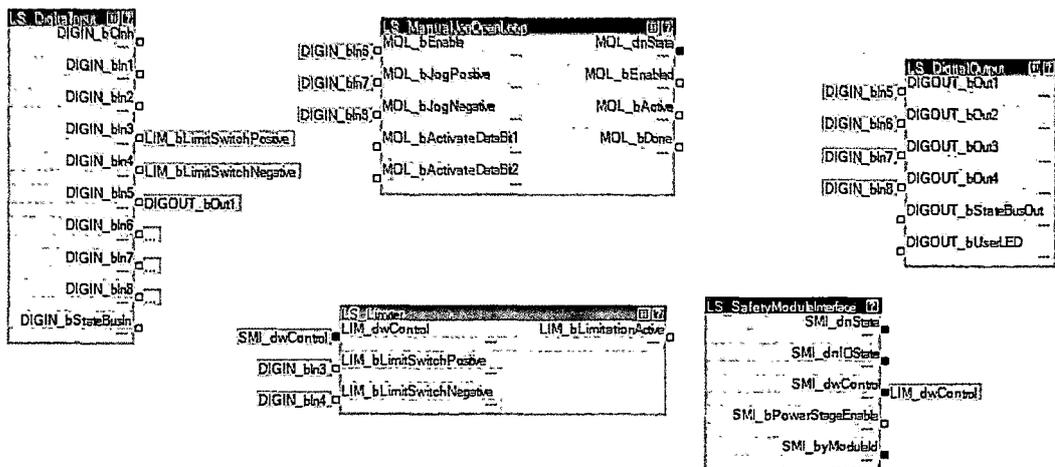


Figura 5. 12

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento.

- 1 Encienda el amplificador de accionamiento.
- 2 Asegúrese que todos los interruptores estén en la posición central.
- 3 Activar el interruptor RFR.
- 4 Activar el controlador con el interruptor DI6.
- 5 Activar interruptor DI7 para movimiento Positivo, después ponga interruptor a la parte central.
- 6 Activar interruptor DI8 para movimiento negativo, después ponga interruptor a la parte central.
- 7 Active interruptores DI7 y DI8 para movimientos en ambas direcciones.

Al realizar este proceso podemos ver que al llegar a los finales de carrera se detiene el motor y no obedece otra acción es decir no puede abandonar el fin de carrera. Lo cual impide que sigamos con el procedimiento establecido anteriormente.

Por lo cual en este caso agregamos algunos bloques en la programación para que el motor pueda detenerse en el fin de carrera, pero pueda abandonar y poder obedecer la siguiente acción.

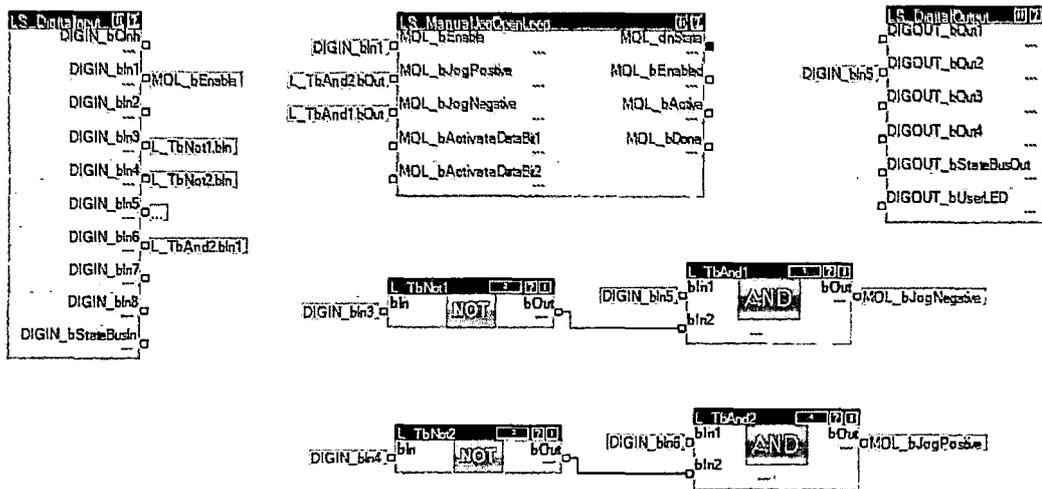


Figura 5. 13

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento.

- 1 Encienda el amplificador de accionamiento.
- 2 Asegúrese que todos los interruptores estén en la posición central.
- 3 Activar el interruptor RFR.
- 4 Activar el controlador con el interruptor DI1.
- 5 Activar el interruptor DI5 para el movimiento negativo. Después ponga interruptor a la parte central.
- 6 Activar el interruptor DI6 para movimiento positivo. Después ponga interruptor a la parte central.
- 7 Active interruptores DI5 y DI6 para movimientos en ambas direcciones.

Al realizar este proceso aún podemos ver que el motor no puede trabajar adecuadamente, ya que en los finales de carrera no se detiene instantáneamente lo cual nos causaría serios problemas en el motor, para lo cual tendremos que hacer una programación avanzada.

5.3.3. Programación avanzada para el funcionamiento del motor.

En esta parte mostraremos la operación adecuada del motor lineal, utilizando un programa de nivel avanzado con variaciones en el tipo de movimiento que realizara la máquina.

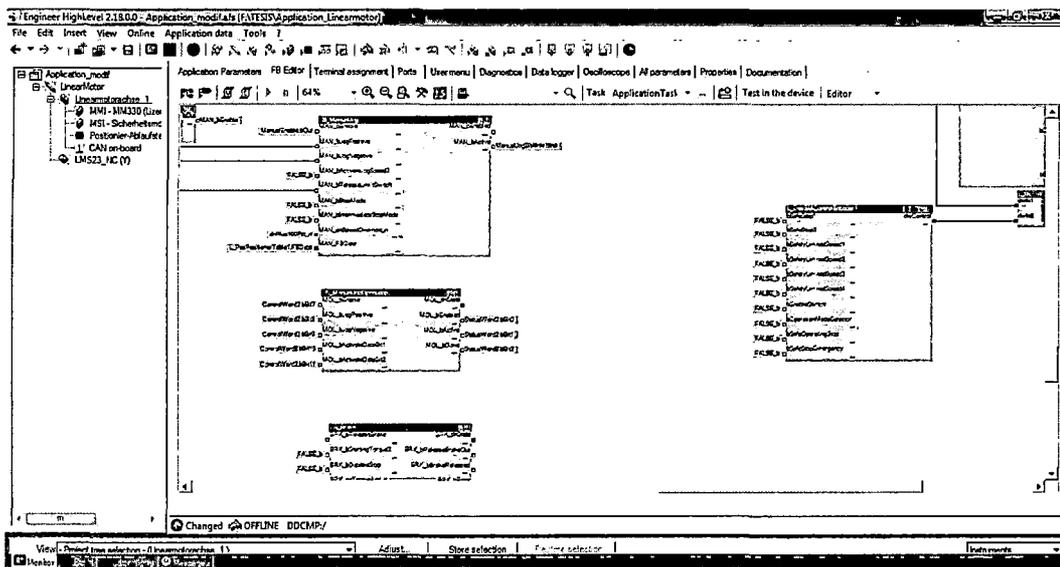


Figura 5. 14

Fuente: Elaboración propia.

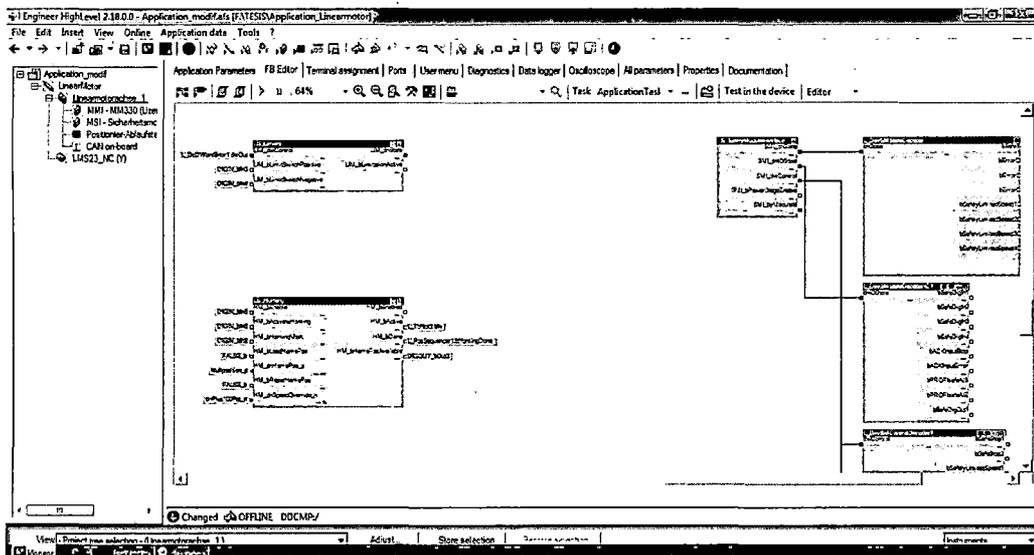


Figura 5. 15

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento.

- 1 Cargar el programa realizado en el L- Force Engineer High Level, desde el computador al controlador del motor lineal.
- 2 Encienda el amplificador de accionamiento.
- 3 Asegúrese que todos los interruptores estén en la posición central.
- 4 Activar el interruptor RFR.
- 5 Activar interruptor DI1, activa el controlador. después ponga interruptor DI1 a la parte central.
- 6 Activar el interruptor de homing con DI5, con este interruptor la maquina parte hacia el sensor de referencia y se detiene allí, después ponga el interruptor DI5 a la parte central.
- 7 Active interruptor DI6 con el cual comienza una secuencia de primer posicionamiento.
- 8 Active interruptor DI7 con el cual comienza una secuencia de segundo posicionamiento, un perfil de secuencia adicional se procesa, después ponga el interruptor DI7 a la parte central.
- 9 Active interruptor DI8 con el cual comienza una secuencia de tercer posicionamiento, un perfil de secuencia adicional se procesa, después ponga interruptor DI8 a la parte central.
- 10 Para parar el motor ponga interruptor DI6 a la parte central.
- 11 Ahora ponemos el interruptor RFR en la parte central, con la cual la maquina deja de estar energizada. Pudiendo ya apagar el amplificador de accionamiento.

Con este procedimiento observaremos que ya no existen dificultades como vimos en la programación básica, ya que podemos decir que el funcionamiento es de forma adecuada respetando las características de la máquina.

5.4. Pruebas experimentales en el Motor Lineal.

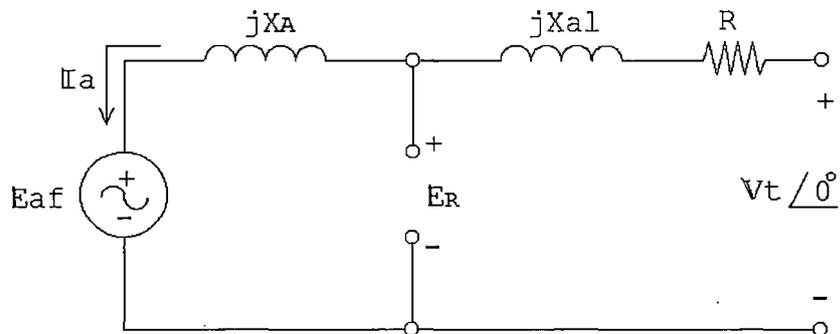
5.4.1. Experimento I: Secuencia de movimiento de ciclo completo.

➤ Objetivo.

El objetivo en esta secuencia de movimiento es mostrar de forma sencilla el funcionamiento de los sensores de fines de carrera del motor lineal, haciendo un desplazamiento uniforme de la máquina en diferentes direcciones.

➤ **Circuito equivalente del MSL.**

Aquí se muestra el circuito equivalente de la maquina a usar para realizar los experimentos requeridos, este motor está conectado a un servoposicionador, que se manipula a partir de un computador a través del software L- Force Engineer High Level.



➤ **Procedimiento.**

Para realizar las pruebas en secuencia de movimiento de ciclo completo tenemos que seguir los siguientes procedimientos.

- 1 Cargar el programa realizado en L- Force Engineer High Level, que está diseñado para realizar la secuencia requerida.
- 2 Encienda el amplificador de accionamiento.
- 3 Asegúrese que todos los interruptores estén en la posición central.
- 4 Activar el interruptor RFR.
- 5 Activar interruptor DI1, activa el controlador. después ponga interruptor DI1 a la parte central.
- 6 Activar el interruptor de homing con DI5, con este interruptor la maquina parte hacia el sensor de referencia y se detiene allí, después ponga el interruptor DI5 a la parte central.
- 7 Active interruptor DI6 con el cual comienza una secuencia de primer posicionamiento requerida para realizar el movimiento requerido.

En esta parte configuramos la tabla de variables de la velocidad. Para lo cual ingresamos al FB editor del software L- Force Engineer High Level, en esta buscamos el bloque L_PosPositionerTable, en seguida entramos a la lista de parámetros para realizar la configuración requerida para esta secuencia. A continuación se muestra en la figura la lista de parámetros en donde se configura los datos requeridos.

Block Parameters List: L_PosPositionerTable1

Application Parameters | All parameters |

← Back L_PosPositionerTable

Traversing range Limited

time n

| Variables table comment | Variables table value | Unit |
|-------------------------|-----------------------|-------------------|
| PS1 Prof1 Abs | 650.0000 | mm |
| vmax PS1 Prof1 | 3000.0000 | mm/s |
| amax PS1 Prof1 | 10000.0000 | mm/s ² |
| amax PS1 Prof1 | 10000.0000 | mm/s ² |
| ps PS1 Prof1 | 0.100 | s |
| | 0 | s |
| | 0 | mm/s |
| | 0 | mm |
| | 0 | mm |

Call sequence profile with TP

Call sequence profile without TP

Each Probe

Close

VT Speed

Variables table for speeds

| Name | Value | Comment |
|--------------------|-----------|----------------|
| Table: Speed x 001 | 3000.0000 | vmax PS1 Prof1 |
| Table: Speed x 002 | 1000.0000 | vmax PS1 Prof2 |
| Table: Speed x 003 | 1500.0000 | vmax PS2 Prof1 |
| Table: Speed x 004 | 2000.0000 | vmax PS2 Prof2 |
| Table: Speed x 005 | 2000.0000 | vmax PS2 Prof3 |
| Table: Speed x 006 | 1000.0000 | vmax PS2 Prof4 |
| Table: Speed x 007 | 500.0000 | vmax PS3 Prof1 |
| Table: Speed x 008 | 500.0000 | vmax PS3 Prof2 |
| Table: Speed x 009 | 500.0000 | vmax PS3 Prof3 |
| Table: Speed x 010 | 1000.0000 | 1m/s |
| Table: Speed x 011 | 1100.0000 | 1.1m/s |

C04702:001 Table: Speed x 001

PC value: 3000.0000 Unit/s

Device value: 3000.0000

30000000 [Raw value decimal]

0x1C9C380 [Raw value hexadecimal]

Value range: -214748.3647 ... 214748.3647

Default setting: 0.0000

Close

Figura 5. 16 Vista de tabla de variables de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Con esta secuencia de movimiento que realiza el motor lineal procederemos a realizar las siguientes pruebas experimentales.

Resultados a obtener.

5.4.1.1. Velocidad del motor.

En un motor lineal no es tan simple como la de un motor rotativo. En estos se define la velocidad nominal de trabajo como su velocidad en régimen permanente, es decir, que la velocidad de giro se mantiene la mayor parte del tiempo.

En cambio, en los motores lineales no se puede hacer esta hipótesis, puesto que al ser un movimiento trasnacional sobre un riel, tiene una carrera limitada, siendo su movimiento por ciclos, en los que hay fases de aceleración, de mantenimiento de la velocidad y de desaceleración. También puede tener fases de parada. El signo no es significativo para el proceso de medición, simplemente indica el sentido de movimiento del motor.

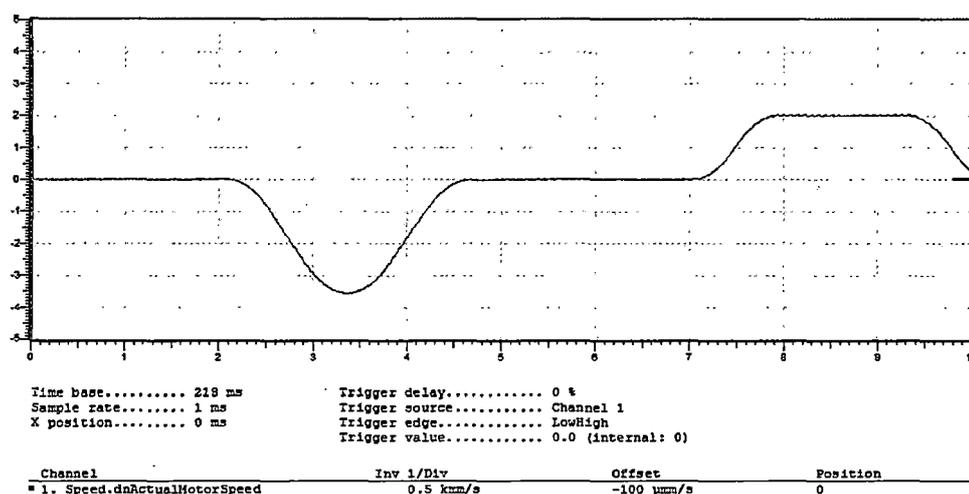


Figura 5. 17 Ciclo de velocidad del MSL.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.17 se puede apreciar el comportamiento de la velocidad del motor en diferentes direcciones esto debido al cambio de sentido de movimiento.

Podemos ver que la velocidad en sentido positivo llega a un pico máximo de 1.012 m/s y en sentido negativo llega a un pico máximo de 1.78 m/s.

5.4.1.2. Tensión del motor.

Del mismo modo que la velocidad, la tensión del motor lineal se define mediante ciclos. Para nuestro caso la tensión presenta picos en los momentos de aceleración y frenadas, y es más sostenida en los de velocidad constante.

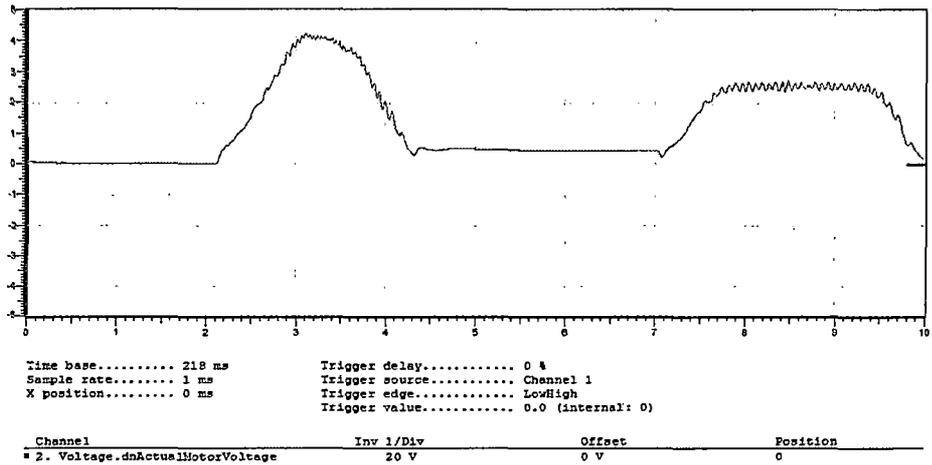


Figura 5. 18 Voltaje actual de MSL.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.18 se aprecia el comportamiento de la tensión actual del motor en dos direcciones de movimiento uniforme.

Podemos ver que la tensión en dirección negativa llega a un pico máximo de 85.55 V, mientras que en la dirección positiva llega a un pico máximo de 54.58 V. pero no es uniforme a lo largo del proceso que recorre, además en el momento de cambio de sentido la tensión baja significativamente, pero nunca llega a 0 V.

5.4.1.3. Corriente del motor.

Así como en los casos anteriores la corriente del motor lineal se define mediante ciclos, ya que la maquina tiene un movimiento traslacional.

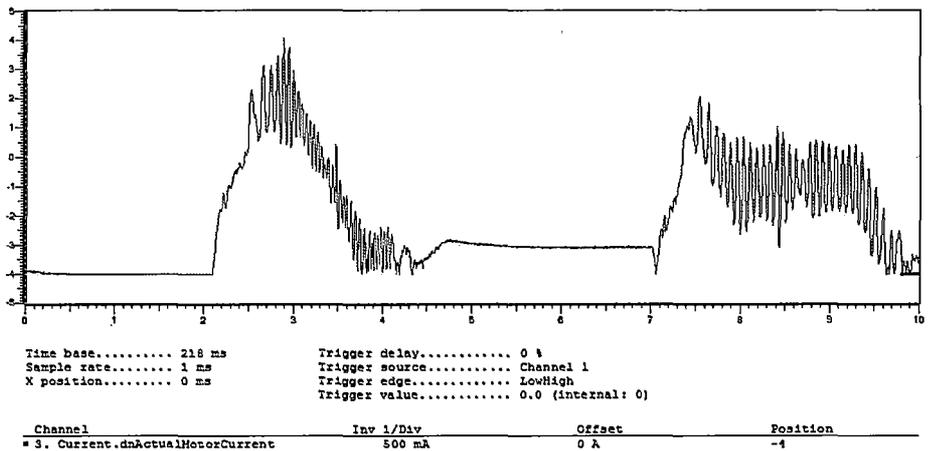


Figura 5. 19 Corriente actual del MSL.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.19 se aprecia el comportamiento de la corriente del motor en dos direcciones de movimiento uniforme.

Podemos ver que la corriente en dirección negativa llega a un pico máximo de 4.04 A, mientras que en la dirección positiva llega a un pico máximo de 3.05 A. pero vemos que la corriente no es uniforme a lo largo de todo el proceso que recorre, sino tiene variaciones, además en el momento del cambio de sentido la corriente llega a su valor mínimo de 0 V.

5.4.1.4. Aplicación práctica del movimiento de ciclo completo.

➤ Puertas deslizables automáticas.

La puerta está diseñada para que se deslice de manera horizontal la cual es accionada por diversos sensores y otros dispositivos que envían la señal al controlador, este recibe la señal y acciona el motor el cual hará que la puerta abra y cierre de manera automática cuando esté totalmente abierta o totalmente cerrada.

Como algunas de las aplicaciones de las puertas automáticas podemos mencionar que son utilizadas en supermercados, hospitales, cines, restaurantes; como algunas de sus ventajas podemos mencionar que estas facilitan el acceso a personas que tienen sus manos ocupadas o sufren de alguna incapacidad motriz, también son muy utilizadas para los garajes de autos.

Materiales que se pueden usar en una puerta automática.

- Puerta (vidrio, acrílico, etc.)
- Motor lineal síncrono.
- Sensores de presencia.
- Sensores de posición.
- Servoposicionador (Servo Drives 9400)

A continuación se presenta el diagrama en bloques del sistema de la puerta automática, donde nuestra variable de entrada es la posición de la puerta, es decir si está abierta ó cerrada.

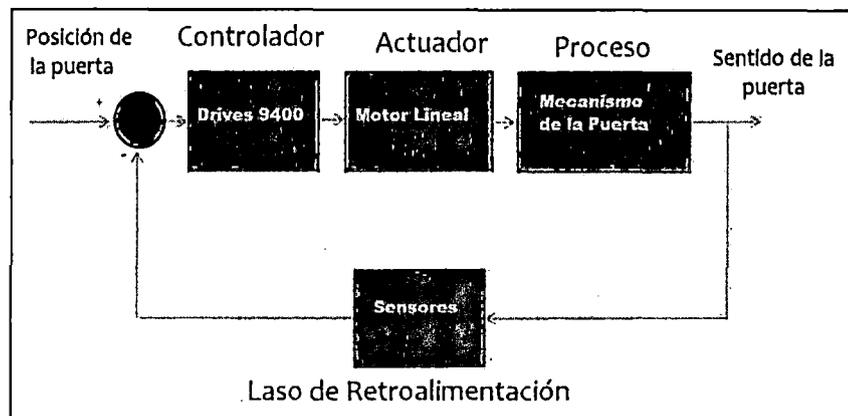


Figura 5. 20 Diagrama de Bloques

Fuente: Elaboración propia.

El controlador del sistema es el servoposicionador que es el encargado de recibir la señal de los sensores de presencia y de posición, y enviar una señal determinada hacia el motor que es el encargado de mover el mecanismo móvil.

Nuestro actuador es el motor lineal síncrono, su función es corregir la posición de la puerta de acuerdo al estado de las variables de control.

Por último la señal de realimentación depende de los sensores de posición o de presencia que son los que detectan la presencia de cualquier objeto y envía la señal al servoposicionador y de esta manera realizar una acción específica con la puerta.

5.4.1.5. Cuestionario.

1. Interpretar las gráficas obtenidas en el experimento.
2. Cuáles son las diferencias entre un Motor síncrono lineal con Motor síncrono rotativo.
3. Complementar teóricamente sobre compuertas lógicas para la programación en el software.
4. Que funciones cumplen los terminales de entrada y salida del equipo de control del motor.
5. Buscar aplicaciones prácticas referidas a este tipo de movimiento que realiza el motor.

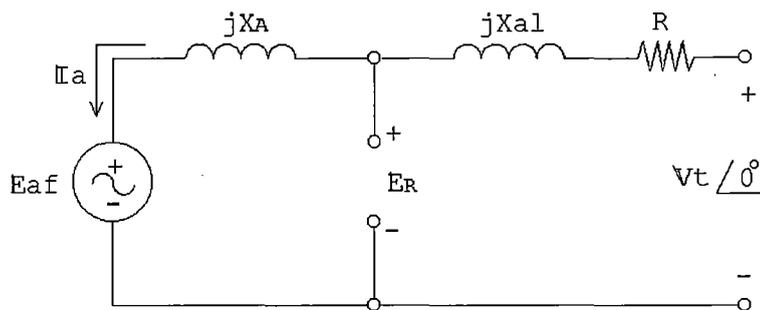
5.4.2. Experimento II: Secuencia de movimiento de ciclo compuesto.

➤ **Objetivo.**

El objetivo en esta secuencia de movimiento es mostrar la precisión que podemos obtener con la máquina, utilizando los finales de carrera y los sensores de posición.

➤ **Circuito equivalente del MSL.**

Aquí se muestra el circuito equivalente de la máquina a usar para realizar los experimentos requeridos, este motor está conectado a un servoposicionador, que se manipula a partir de un computador a través del software L- Force Engineer High Level.

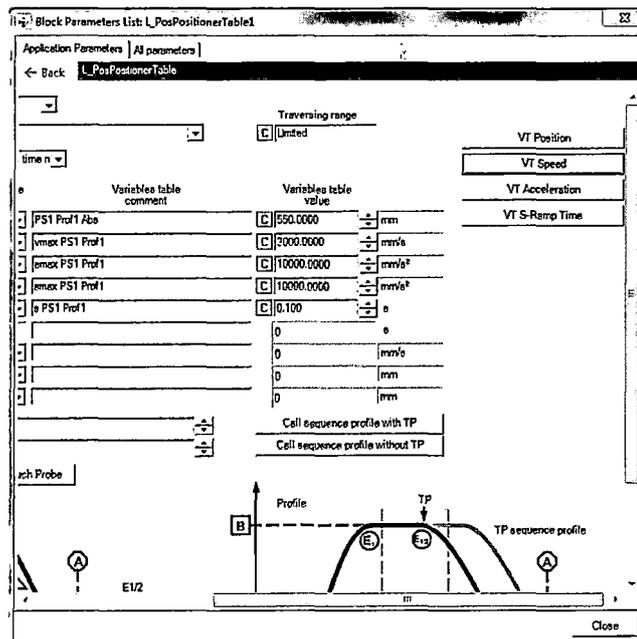


➤ **Procedimiento.**

Para realizar las pruebas en secuencia de movimiento de ciclo compuesto tenemos que seguir los siguientes procedimientos.

- 1 Cargar el programa realizado en L- Force Engineer High Level, que está diseñado para realizar la secuencia requerida.
- 2 Encienda el amplificador de accionamiento.
- 3 Asegúrese que todos los interruptores estén en la posición central.
- 4 Activar el interruptor RFR.
- 5 Activar interruptor DI1, activa el controlador. después ponga interruptor DI1 a la parte central.
- 6 Activar el interruptor de homing con DI5, con este interruptor la máquina parte hacia el sensor de referencia y se detiene allí, después ponga el interruptor DI5 a la parte central.
- 7 Active interruptor DI6 con el cual comienza una secuencia de primer posicionamiento requerida para realizar el movimiento requerido.
- 8 Active interruptor DI7 con el cual comienza una secuencia de segundo posicionamiento, un perfil de secuencia adicional se procesa, después ponga el interruptor DI7 a la parte central.

En esta parte configuramos la tabla de variables de la velocidad. Para lo cual ingresamos al FB editor del software L- Force Engineer High Level, en esta buscamos el bloque L_PosPositionerTable, en seguida entramos a la lista de parámetros para realizar la configuración requerida para esta secuencia desde la tabla de velocidad 003 hasta tabla de velocidad 005, ya que con esto podemos diferenciar los parámetros a medir. A continuación se muestra en la figura la lista de parámetros en donde se configura los datos requeridos.



VT Speed

Variables table for speeds

| Name | Value | Comment |
|--------------------|-----------|----------------|
| Table: Speed x 001 | 500.0000 | vmax PS1 Prof1 |
| Table: Speed x 002 | 1000.0000 | vmax PS1 Prof2 |
| Table: Speed x 003 | 1000.0000 | vmax PS2 Prof1 |
| Table: Speed x 004 | 500.0000 | vmax PS2 Prof2 |
| Table: Speed x 005 | 500.0000 | vmax PS2 Prof3 |
| Table: Speed x 006 | 500.0000 | vmax PS2 Prof4 |
| Table: Speed x 007 | 500.0000 | vmax PS3 Prof1 |
| Table: Speed x 008 | 500.0000 | vmax PS3 Prof2 |
| Table: Speed x 009 | 500.0000 | vmax PS3 Prof3 |
| Table: Speed x 010 | 1000.0000 | 1m/s |
| Table: Speed x 011 | 1100.0000 | 1,1m/s |

C04702:001 Table: Speed x 001
 PC value: 500.0000 Unit/s
 Device value: 500.0000
 500.0000 [Raw value decimal]
 0xC4B4D [Raw value hexadecimal]
 Value range: -214748.3647 ... 214748.3647
 Default setting: 0.0000

Close

Figura 5. 21 Vista de tabla de variables de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Para visualizar de mejor manera los gráficos a mostrarse en el osciloscopio, tenemos que diferenciar la variación de velocidades en cada cambio de dirección que realiza el móvil.

5.4.2.1. Velocidad del motor.

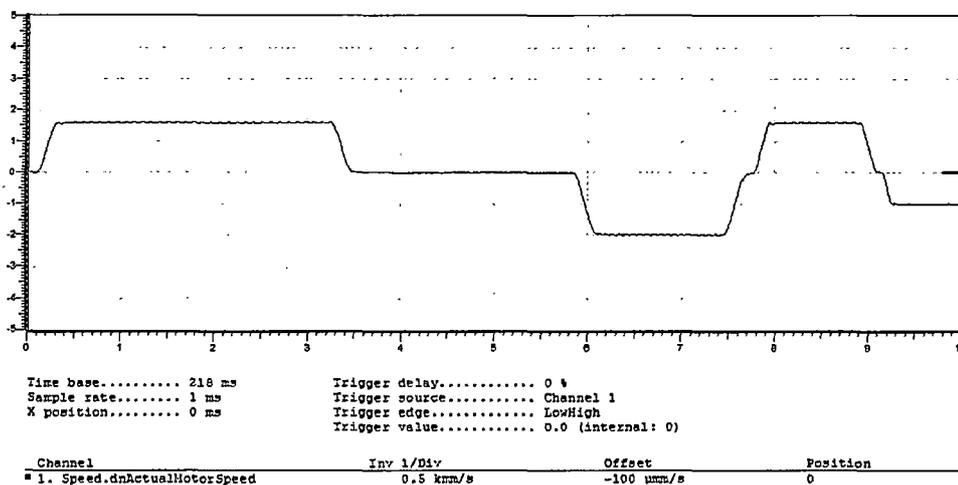


Figura 5. 22 Ciclo de velocidad del MSL.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.21 apreciamos la variación de velocidad en 4 rampas de tiempo, como podemos ver los ciclos de velocidad son diferentes en cada rampa.

5.4.2.2. Tensión del motor.

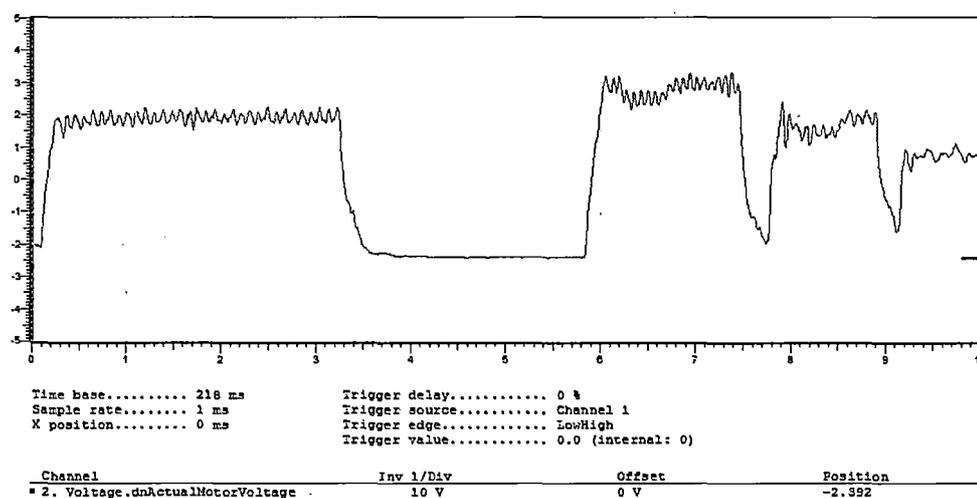


Figura 5. 23 Voltaje actual de MSL.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.22 se ve la variación de voltaje por la misma razón que de la figura 5.21, cada pico de tensión que vemos es debido a la rampa de tiempo y esta tiene diferentes velocidades.

5.4.2.3. Corriente del motor.

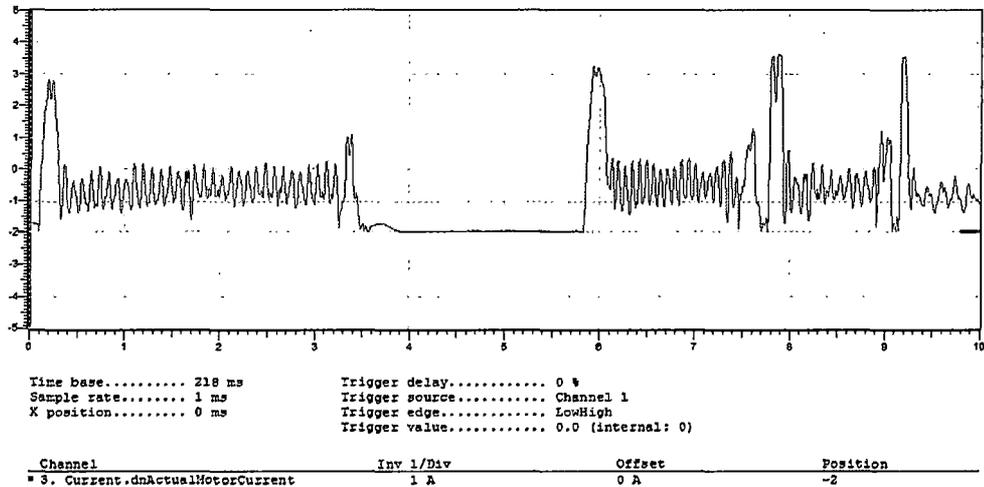


Figura 5. 24 Corriente actual del MSL.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.23 se ve los picos de corriente que se mide en el proceso de todas las rampas de tiempo mencionadas en las pruebas anteriores.

5.4.2.4. Aplicación práctica del movimiento de ciclo compuesto.

➤ Etiquetadora y Selladora de Botellas

La máquina etiquetadora y selladora de botellas, puede ser usada individualmente, o usada con otros equipos para formar una línea de producción, su sistema de alimentación de materiales es ajustable, la etiquetadora y selladora de botellas tiene un ojo eléctrico de alta velocidad que puede apuntar de forma precisa a las etiquetas.

Materiales

Servoposicionador (Servo Drives 9400)

Sistema de control PLC

Motor Síncrono Lineal

Sensor Fotoeléctrico

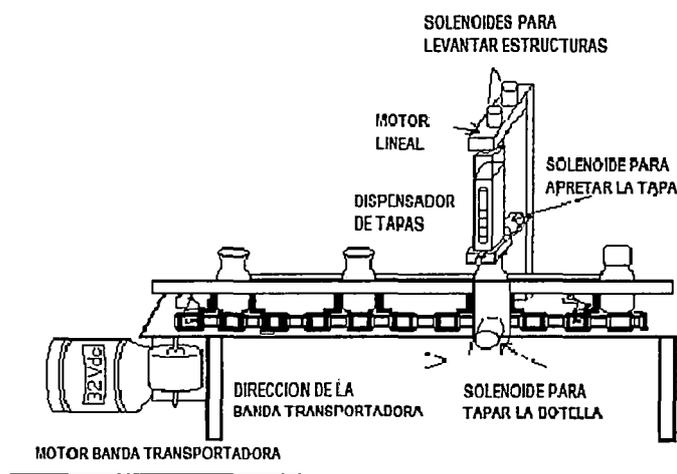


Figura 5. 25 Modulo para Embotellado y Etiquetado

Fuente: Elaboración propia.

La línea de producción para embotellado y etiquetado está controlada con un servoposicionador y sistema automático de balance de protección. La máquina detiene su funcionamiento de manera automática, en caso de que no existan botellas o estén bloqueadas por alguna razón. En el momento que el problema se haya solucionado, la maquina iniciara de manera automática su funcionamiento normal.

5.4.2.5. Cuestionario.

1. Interpretar las gráficas obtenidas en el experimento.
2. Cuáles son las funciones básicas en la programación para poner en movimiento el motor lineal.
3. ¿Qué es un servoposicionador? y que función cumple en el control de las maquinas eléctricas.
4. ¿Existe perdidas en el motor lineal?. si fuera el casos que pérdidas se presentan en esta máquina.
5. Buscar aplicaciones prácticas referidas a este tipo de movimiento que realiza el motor.

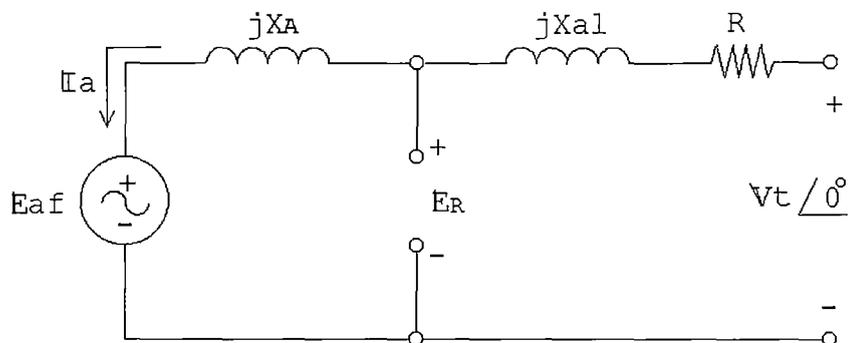
5.4.3. Experimento III: Secuencia de movimiento de ciclo continuo.

➤ **Objetivo.**

El objetivo en esta secuencia de movimiento es mostrar la utilización de las rampas de tiempo y detallar la variación de las distancias de recorrido del móvil.

➤ **Circuito equivalente del MSL.**

Aquí se muestra el circuito equivalente de la maquina a usar para realizar los experimentos requeridos, este motor está conectado a un servoposicionador, que se manipula a partir de un computador a través del software L- Force Engineer High Level.



➤ **Procedimiento.**

Para realizar las pruebas en secuencia de movimiento de ciclo compuesto tenemos que seguir los siguientes procedimientos.

- 1 Cargar el programa realizado en L- Force Engineer High Level, que está diseñado para realizar la secuencia requerida.
- 2 Encienda el amplificador de accionamiento.
- 3 Asegúrese que todos los interruptores estén en la posición central.
- 4 Activar el interruptor RFR.
- 5 Activar interruptor DI1, activa el controlador. después ponga interruptor DI1 a la parte central.
- 6 Activar el interruptor de homing con DI5, con este interruptor la maquina parte hacia el sensor de referencia y se detiene allí, después ponga el interruptor DI5 a la parte central.
- 7 Active interruptor DI6 con el cual comienza una secuencia de primer posicionamiento requerida para realizar el movimiento requerido.

- 8 Active interruptor DI7 con el cual comienza una secuencia de segundo posicionamiento, un perfil de secuencia adicional se procesa, después ponga el interruptor DI7 a la parte central.
- 9 Active interruptor DI8 con el cual comienza una secuencia de tercer posicionamiento, un perfil de secuencia adicional se procesa, después ponga interruptor DI8 a la parte central.

Para realizar las diferentes pruebas experimentales en este caso también usaremos la programación de nivel avanzada con diferente secuencia de posicionamiento que en los casos anteriores.

En esta parte configuramos la tabla de variables de la velocidad. Para lo cual ingresamos al FB editor del software L- Force Engineer High Level, en esta buscamos el bloque L_PosPositionerTable, en seguida entramos a la lista de parámetros para realizar la configuración requerida para esta secuencia desde la tabla de velocidad 006 hasta tabla de velocidad 009, ya que con esto podemos diferenciar los parámetros a medir. A continuación se muestra en la figura la lista de parámetros en donde se configura los datos requeridos.

The screenshot displays the 'Block Parameters List: L_PosPositionerTable1' window. The 'Application Parameters' section is active, showing 'L_PosPositionerTable'. The 'Traversing range' is set to 'Limited'. The 'Variables table' is as follows:

| comment | value | unit |
|----------------|------------|-------|
| PS1 Prof1 Abs | 550.0000 | mm |
| vmax PS1 Prof1 | 3000.0000 | mm/s |
| amax PS1 Prof1 | 10000.0000 | mm/s² |
| amax PS1 Prof1 | 10000.0000 | mm/s² |
| as PS1 Prof1 | 0.100 | a |
| | 0 | a |
| | 0 | mm/s |
| | 0 | mm |
| | 0 | mm |

Additional parameters include 'Call sequence profile with TP' and 'Call sequence profile without TP'. The diagram at the bottom shows a velocity profile with a trapezoidal shape, labeled 'Profile' and 'TP sequence profile', with points A, B, C, and TP marked.

VT Speed

variables table for speeds

| Name | Value | Comment |
|--------------------|------------|----------------|
| Table: Speed x 001 | 500.0000 | vmax PS1 Prof1 |
| Table: Speed x 002 | 1000.0000 | vmax PS1 Prof2 |
| Table: Speed x 003 | 1000.0000 | vmax PS2 Prof1 |
| Table: Speed x 004 | 800.0000 | vmax PS2 Prof2 |
| Table: Speed x 005 | 500.0000 | vmax PS2 Prof3 |
| Table: Speed x 006 | 800.0000 | vmax PS2 Prof4 |
| Table: Speed x 007 | 100.0000 | vmax PS3 Prof1 |
| Table: Speed x 008 | 400.0000 | vmax PS3 Prof2 |
| Table: Speed x 009 | 20000.0000 | vmax PS3 Prof3 |
| Table: Speed x 010 | 500.0000 | 1m/s |
| Table: Speed x 011 | 200.0000 | 1.1m/s |

C04702:001 Table: Speed x 001
 PC value: 500.0000 Unit/s
 Device value: 500.0000
 5000000 [Raw value decimal]
 0x4C4B40 [Raw value hexadecimal]
 Value range: -214748.3647 ... 214748.3647
 Default setting: 0.0000

Close

Figura 5. 26 Vista de tabla de variables de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia

5.4.3.1. Velocidad del motor.

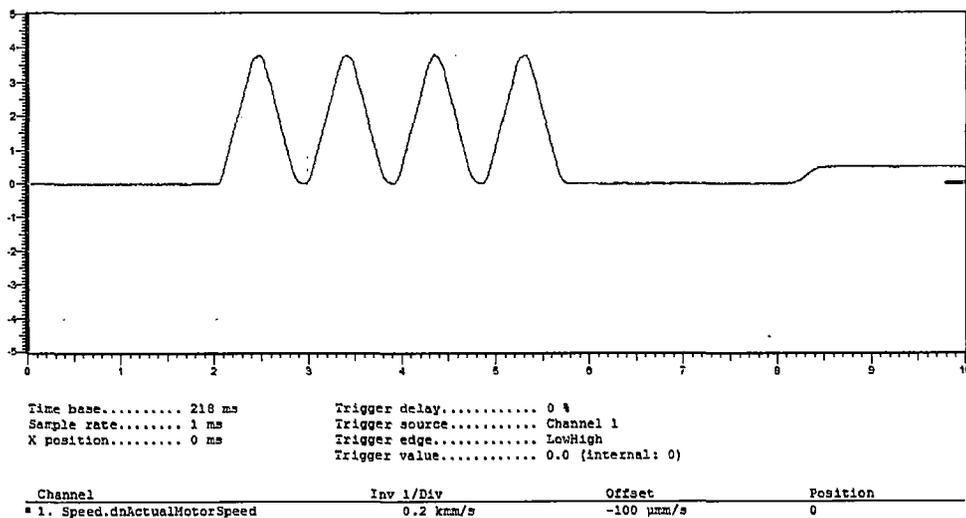


Figura 5. 27 Ciclo de velocidad del MSL en sentido positivo.

Fuente: Elaboración propia.

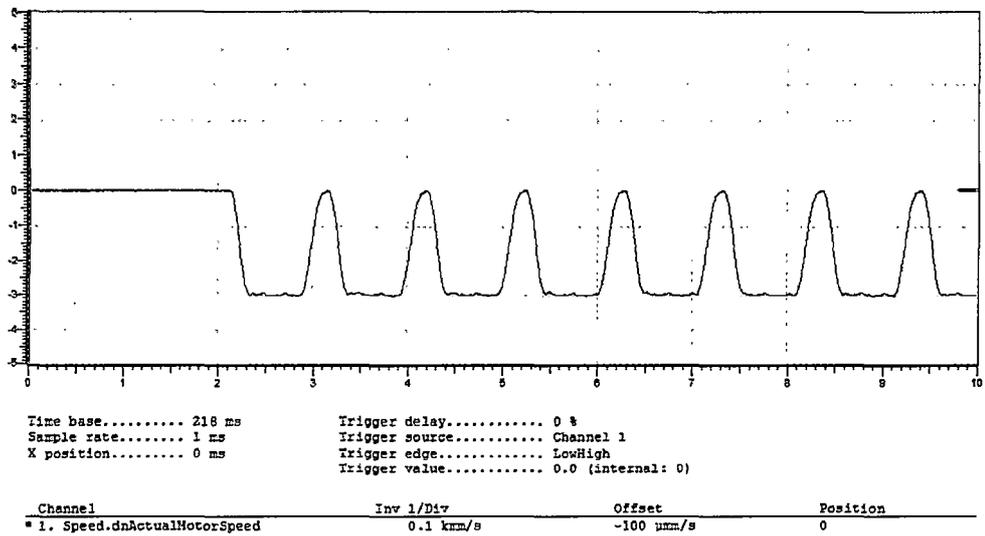


Figura 5. 28 Ciclo de velocidad del MSL en sentido negativo.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.2. Tensión del motor.

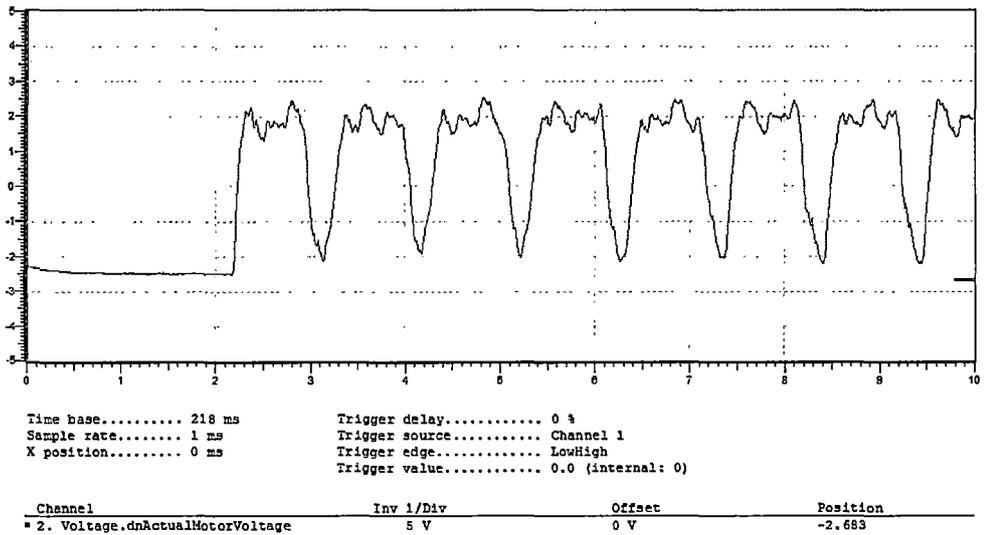


Figura 5. 29 Voltaje actual de MSL.

Fuente: Elaboración propia

5.4.3.3. Corriente del motor.

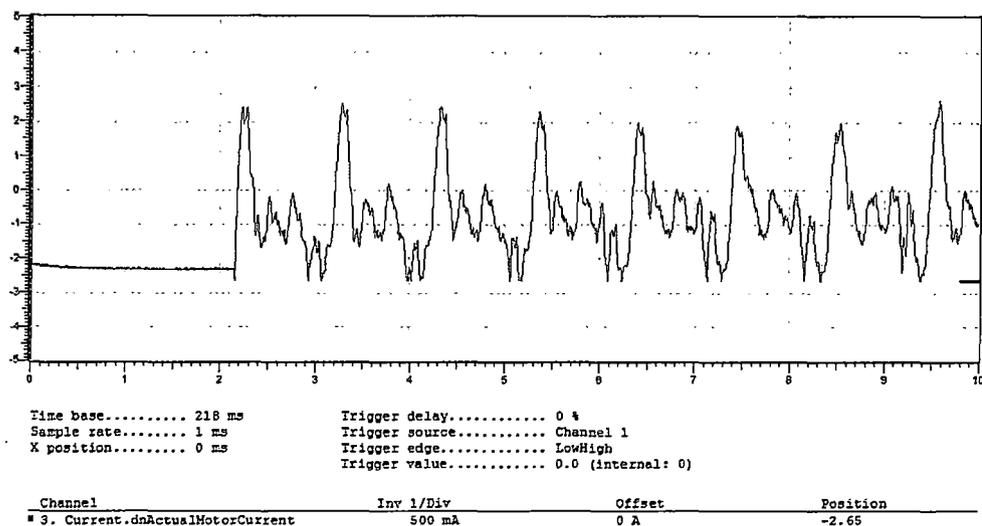


Figura 5. 30 Corriente actual del MSL.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.4. Corrientes de fase del motor.

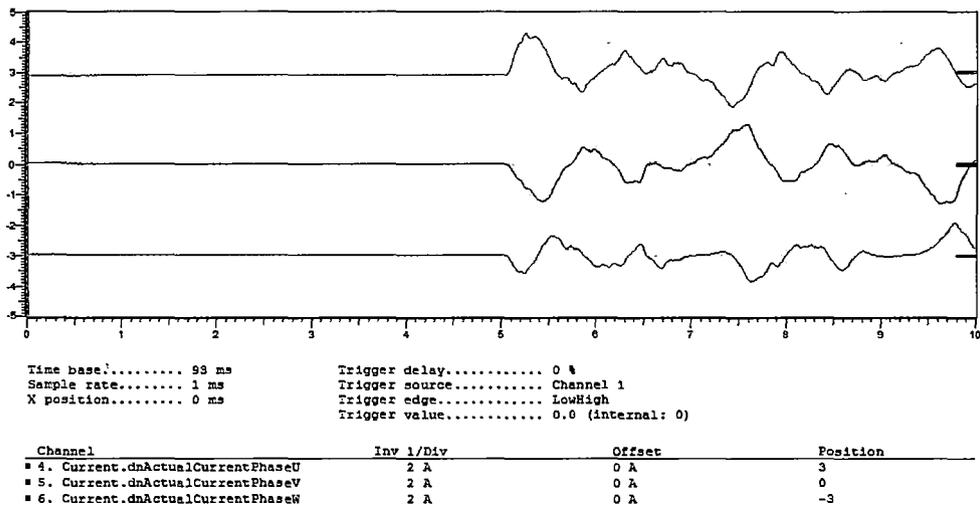


Figura 5. 31 Corrientes de fase del MSL.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.29 podemos apreciar el desfase que existe entre las corrientes del motor, este desfase entre las corrientes es de 120° .

En las pruebas realizadas anteriormente observamos que las mediciones que obtuvimos son diferentes tanto en velocidad, tensión y corriente, esto se debe que

5.4.3.6. Cuestionario.

1. Interpretar las gráficas obtenidas en el experimento.
2. Programar una secuencia de movimiento usando funciones básicas.
3. ¿Se puede usar otro PLC para controlar este módulo?; que software usted propone y que beneficios tendría respecto al existente.
4. ¿Qué es el efecto hall?
5. Buscar aplicaciones prácticas referidas a este tipo de movimiento que realiza el motor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones.

Luego de haber realizado el presente estudio sobre la Evaluación Experimental del Motor Síncrono Lineal, se presentan las siguientes conclusiones.

1. El estudio de los motores lineales es similar al de los motores rotativos ya que tienen el mismo principio de funcionamiento, el motor lineal se obtiene simplemente cortando y estirándolo, donde el ordenamiento cilíndrico de las bobinas se transforma en una estructura plana, y la interacción de los campos magnéticos de los imanes permanentes con la corriente que circula en las bobinas produce una fuerza que tiende a hacer un movimiento lineal.
2. Mediante la programación en el software L-Force Engineer HighLevel 9400 podemos controlar el motor, configurar los diferentes parámetros para que esta realice diferentes secuencias de movimiento y poder medir las variables requeridas para su análisis y evaluación, además desde la programación se logró variar la velocidad, el posicionamiento y la aceleración.
3. La velocidad del motor en la mayoría de los casos tanto en aceleración y desaceleración son funciones lineales de tiempo. Por lo tanto, la curva velocidad – tiempo que se obtuvo en las pruebas se aproxima más a menudo por una función trapezoidal, además el signo no es significativo, simplemente indica el sentido de movimiento del motor.
4. La curvas tensión - tiempo y corriente – tiempo del motor no son uniformes debido a que en el controlador hay un variador de frecuencia la cual convierte la alimentación de la red a otra frecuencia basándose en la rectificación y posterior conmutación de la frecuencia, por lo tanto esta hace que las señales de salida no sea senoidal sino distorsionadas.

Recomendaciones.

Luego de haber realizado el presente estudio sobre la Evaluación Experimental del Motor Síncrono Lineal, se presentan las siguientes conclusiones.

1. Se recomienda realizar un análisis más completo del motor síncrono lineal. en el cual se tomen en cuenta todos los parámetros del motor lineal, principalmente para cuantificar las pérdidas eléctricas del motor, puesto que estas no fueron estudiadas en el análisis del MSL debido a que no cuenta con especificaciones técnicas completas.
2. Es necesario para el uso y manipulación del motor lineal, profundizar los temas de control y automatización, puesto que para operar se usa un software de programación de PLC de nivel avanzado, y este es el único medio para poner en funcionamiento el motor.
3. Se recomienda usar otro software de programación en PLC más simple y conocida en nuestro medio para el control del motor en forma sencilla, debido a que el software que contamos no es comercial y es muy restringida al acceso de sus librerías.
4. Adicionalmente, se recomienda incluir en los silabus de máquinas eléctricas el tema de motores lineales, puesto que esto forma parte de las maquinas eléctricas especiales y es base fundamental para profundizar el estudio de la levitación magnética (Maglev).

BIBLIOGRAFIA

LIBROS.

- [1] MSC. Roberto Hernández Sampieri, Dr. Carlos Fernández Collado, Dra. Pilar Baptista Lucio. Metodología de la Investigación. Tercera Edición. Mc Graw Hill. 2003.
- [2] CHAPMAN, S. Máquinas Eléctricas. Tercera Edición. Mc Graw Hill. 2000.
- [3] J. F. Gieras and Z. J. Piech. Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems. Boca Raton, FL: CRC Press. 2nd. Edition 1999.
- [4] J. F. Gieras and M. Wing. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications. Marcel Dekker. 2002.
- [5] WILLIAM H. HAYT JR., JHON A. BUCK. Teoría Electromagnética. Sexta Edición McGraw-Hill. Interamericana Editores S.A. 2006.
- [6] José D. Rairan A., Alexander Rodríguez G. y Roberto Bedoya S. Motor Lineal de Inducción, Principios de Diseño y Construcción. Primera Edición. Editorial UD. 2012.
- [7] Danilo Rairan Antolines. Diseño y construcción de una banda transportadora utilizando levitación magnética. Editorial Universidad Distrital de Bogota.2003.
- [8] Jorge Jiménez Pérez; Diseño de Motores Lineales Síncronos Miniaturizados para el Accionamiento de Puertas Automáticas. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra. España. 2013.
- [9] Gabriel Gonzales Palomino. Optimización del Empuje y las Fuerzas de Diente en dos Modelos de Motores Lineales Síncronos de Imanes Permanentes. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. España. 2012.
- [10] Jaime Montoya, Juan Daniel Marín, Diseño de Motores Síncronos Lineales de Imanes Permanentes en Disposición Halbach, Editorial Universidad Carlos III de Madrid - 2010.

PAPER.

- [1] G. Kang, J. Hong and G. Kim, Design and analysis of slotless-type permanent-magnet linear brushless motor by using equivalent magnetizing current. IEEE Transaction on Industry Applications. Vol. 37, nro. 5, pp. 1241-1247. Setiembre 2001.

- [2] José D. Rairan A., Alexander Rodríguez G. y Roberto Bedoya S. Motor Lineales Síncronos, Una experiencia de Diseño y Construcción. TECNURA. Nro. 12, pp.73-84. Bogotá. 2003.

CATALOGOS.

- [1] LUCAS – NULLE, UniTrain–I. Segunda edición. Copyright 2000-2010 GmbH.
- [2] HIWIN. Manual operativo para el Sistema de Posicionamiento. 2012.
- [3] L-Force Servo Drives 9400, manual de software”, Parametrización & Configuración. GmbH, Germany - 2007.
- [4] L-force Engineer High Level, manual de software” GmbH, Germany - 2006.
- [5] L-force Runtime Software, 9400 Function Library, Software Manual, Germany - 2010.
- [6] L-Force Inverter Drives 9400, Germany - 2011.
- [7] LUCAS NULLE. Manual de Instrucciones del Motor Lineal.
- [8] HIWIN, Linear Technology, Positioning systems.
- [9] HIWIN, Linear Motors System.
- [10] <http://pretel.korea.ac.kr> y <http://www.baldor.com>.
- [11] Kanji Wako / Kazuo Sawada. Magnetic Levitation (MAGLEV) Technologies

ANEXOS.

➤ PAPER.

Design and Analysis of Slotless-Type Permanent-Magnet Linear Brushless Motor by Using Equivalent Magnetizing Current

Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, *Member, IEEE*, and Gyu-Tak Kim, *Member, IEEE*

Abstract—This paper presents a design and steady-state analysis method of a slotless-type permanent-magnet linear brushless motor based on the equivalent magnetizing current method. The phenomena of the slotless-type motor by the variety of coil shape under the constant magnetomotive force has been analyzed and the analysis process is applied to the design and static-state analysis considering commutation thrust ripple. The validity of the proposed technique is confirmed with two-dimensional finite-element analysis and experimental results.

Index Terms—Commutation thrust ripple, electromagnetic compatibility, slotless-type permanent-magnet linear motor, two-dimensional finite element.

I. INTRODUCTION

PERMANENT-MAGNET (PM) linear motors are used extensively in speed- and position-controlled drive systems, for example, in factory automation and the equipment of a semiconductor manufacturer, for which linear brushless PM motor drives could offer significant advantages, in terms of efficiency, speed control, and positional accuracy. However, in a slotted PM linear motor, there are cogging forces, due to slotting and finite length of the moving parts, which have different wavelengths [1], [2]. In order to minimize the cogging force, an additional process, such as skewing and optimally disposing the magnets and optimizing the length of the armature coil, is required [2], [3].

For this reason, in order to improve the accuracy in the speed and position control of a linear brushless PM motor, a slotless-type PM linear brushless motor that is without cogging force is strongly required. To obtain a precise design result of a slotless type PM linear brushless motor, it is necessary to analyze magnetic field in the air gap and coil area. Recently, many numerical methods have been proposed to analyze ma-

chine performance through field analysis. As one of the numerical methods, the finite-element (FE) method allows an accurate analysis of electrical machines and can consider geometric details and the nonlinearity of magnetic material [2], [4]. However, applying FE method to magnetic field analysis requires information on magnetic circuit constructions and electric specifications, and it takes much time. In particular, it requires many repetitions of geometrical modeling, solving, and postprocessing when using the FE method for motor design according to design parameters. After all, if design parameters were increased, more analysis models would be required, so it is time consuming and unsuitable for the initial design stage and optimization from dynamic analysis.

On the other hand, the analytical method by using space harmonic field analysis cannot consider nonlinearity of magnetic materials, but this method can achieve time saving and flexible computation when performing analysis by the variation of design parameters. In this paper, therefore, an equivalent magnetizing current (EMC) method, which is to solve the Poisson equation by replacing independent sources with the distribution of EMC, is presented for magnetic field analysis because of its fast and flexible computation [5], [6].

In linear PM machines, skewing of either the magnet or armature winding is usually incorporated in order to reduce the thrust ripple as well as noise and vibration [7], [8]. The skewing effect is analyzed by two-dimensional (2-D) FE analysis or analytical method considering lumped parameters that involve formulation of expressions for air-gap permeances, magnetomotive force (MMF), and flux density distribution. The precise analysis of skewing effect using analytical method taking into account lumped parameters is difficult because the analysis of flux distribution in the air gap and coil region is different.

This paper presents a novel design process to improve design quality and a static-state analysis that is the phase commutation thrust ripple in the static state taking into account the variation of relative pole position by using EMC. In order to minimize commutation thrust ripple, magnet skewing and variation of pole ratio are applied. In the analysis of skewing effects, a novel method that substitutes the spatial distribution of EMC for skewing magnet is adopted. The proposed analysis and design process is verified by comparison with the 2-D FE analysis and experimental results.

Paper IPCSD 01-032, presented at the 2000 Industry Applications Society Annual Meeting, Rome, Italy, October 8-12, and approved for publication in the IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS by the Electric Machines Committee of the IEEE Industry Applications Society. Manuscript submitted for review May 1, 2000 and released for publication July 6, 2001. This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) through the Machine Tool Research Center, Changwon National University.

The authors are with the Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea (e-mail: kghsjw@hanmail.net; jphong@sarim.changwon.ac.kr; gtkim@sarim.changwon.ac.kr).

Publisher Item Identifier S 0093-9994(01)08309-8.

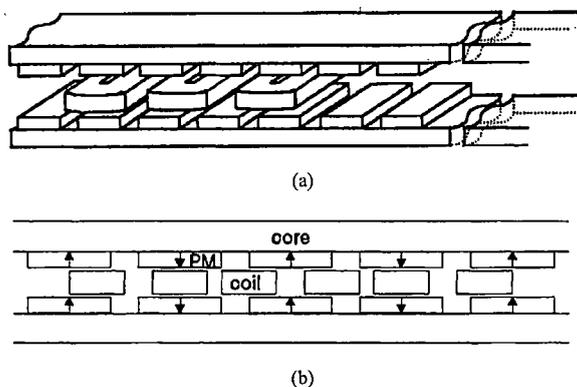


Fig. 1. Motor topology. (a) Structure of slotless-type PM linear brushless motor. (b) Cross section of slotless-type PM linear brushless motor.

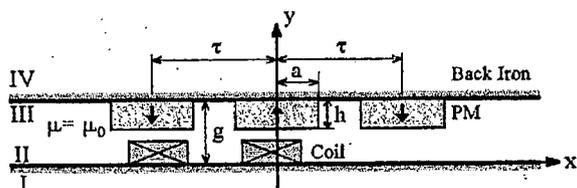


Fig. 2. Analysis model using EMC method.

II. MAGNETIC FIELD ANALYSIS BY USING EMC

A. Motor Topologies

A slotless-type PM linear brushless motor consists of a primary and secondary which are moving parts. The linear motors are usually classified into moving magnet (MM) type and moving coil (MC) type [2], [5]. Fig. 1 shows the topologies of the MC and slotless-type linear motor studied in this paper. It consists of a double-sided PM and an air-core-type moving armature which is a concentrated winding having three isolated phase sets. The cross section of the slotless-type linear motor is shown in Fig. 1(b). Three phase coils are displaced symmetrically at 120° from each other and the current waveform in the phases is a 120° square wave. Exactly two phases are conducting at any and every instant [6], [7].

B. Magnetic Field Analysis

Fig. 2 shows an analysis model for the magnetic field of the slotless-type linear PM motor using EMC method.

Since the double-sided PM linear motor has a symmetric structure along the y axis, only one side is selected as the analysis region and the following assumptions are made to simplify the 2-D analysis and compute the magnetic fields of each region [5], [6].

- All regions are extended infinitely in the $\pm x$ direction and PMs are magnetized in the $\pm y$ direction.
- Permanent magnets are periodically distributed along the x axis.
- The permeability of the back iron is infinite.
- There is no variation along the z axis.

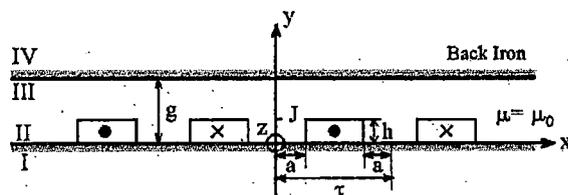


Fig. 3. Arbitrary current model.

The final whole magnetic field can be obtained by the superposition of magnetic fields produced by PM and armature current.

1) *Magnetic Field by Armature Current:* For unexcited PMs, the analysis model is divided into four regions, as shown in Fig. 3, and the governing equations of each region derived from Maxwell's equations are as follows [1], [4]:

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Regions I, III, and IV} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J(x) \quad \text{Region II} \quad (2)$$

where A is the z -axis component of magnetic vector potential and J is armature current density.

The magnetic fields induced by armature winding coils can be calculated by applying boundary conditions to the tangential components of magnetic field intensity and normal components of magnetic flux density at each boundary in appropriate regions. These are as follows [5]:

$$B_{II}^x = -\mu_0 \sum_{n=1, 3}^{\infty} \left(\sinh \right.$$

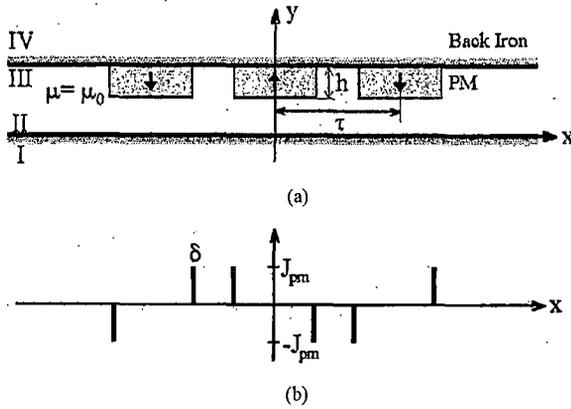


Fig. 4. Magnetic field analysis model by only magnet. (a) Magnets distribution. (b) EMC of magnets.

distribution and the characteristic equations of each region are as follows [5]:

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J_p(x) \quad \text{Region III.} \quad (7)$$

The EMC distribution by PMs, $J_p(x)$, for region III, is described as the Fourier series [5]

$$J_p(x) = \sum_{n=1,3}^{\infty} b_{pn} \cdot \sin(nkx) \quad (8)$$

where $b_{pn} = 4J_{pm}/n\pi [\cos(nka) - \cos nk(a + \delta)]$, δ indicates an arbitrary value which approaches zero and the current density of PM, and J_{pm} can be expressed by the magnetization \mathbf{M} .

By applying the boundary condition to the interfaces between different material regions, the characteristic equations given in (7) can be solved

$$B_{II}^x = \frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} - \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \sin(nkx) \quad (9)$$

$$B_{II}^y = -\frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} + \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \cos(nkx). \quad (10)$$

The resultant magnetic field is obtained by superposition of the magnetic field caused by PM and armature current.

III. DESIGN AND CHARACTERISTIC ANALYSIS

The magnet specifications such as coil area width, thickness, and MMF are important parameters to determine motor efficiency and power density per weight for all PMs. In the case of slotless-type PM motors, although a magnet specification and MMF are fixed, thrust is varied with the shape of the coil area. There is an optimal coil shape under the same MMF for generating the maximum thrust. The thrust is computed by Lorentz' force law and magnetic flux density in the air gap is calculated

with magnetic vector potential by EMC method. In computing thrust and electromotive force (EMF), the armature winding area is divided into very small regions and the flux linkage of the each element is computed by the EMC method. The EMC by PM is moving and then EMF is calculated from flux linkage and thrust is calculated by armature current with flux density in accordance with pole position. The calculation process is as follows:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \cdot S_i^{(e)} \cdot B_y^{(e)} \cdot L \quad (11)$$

$$E = \omega_e N \sum_{i=1}^n \phi_i^{(e)} \cdot \sin p\theta \quad (12)$$

where

- $S_i^{(e)}$ subdivided element of armature winding region;
- L z -axis length of machine;
- ω_e electric angular frequency;
- N turns per phase;
- p pole pair;
- θ relative electric angle of PM and armature winding.

Fig. 5 shows the design process of the slotless-type PM linear brushless motor by using EMC method. The shape variation of the armature winding coil area for computing the maximum thrust under the fixed design parameters process is shown in Fig. 6. The armature winding area is divided into very small regions, and the flux density of each subdivision region is computed by the EMC. If the cross-sectional shape of the coil area changes, the magnitude and distribution of magnetic flux density is varied in the magnetic air gap, the generated thrust would also be varied in spite of the constant MMF.

Fig. 7 shows the thrust characteristic by the variation of winding area width and height under constant MMF and armature winding area. As the width of the winding area is increased, the magnetic air gap is reduced and thrust is increased. However, thrust is found to be reduced over the specific length. The specification of the slotless-type PM linear brushless motor from the design process is shown in Table I.

IV. COMPARISON OF 2-D FE ANALYSIS AND EXPERIMENTAL RESULTS

The appropriateness of the presented analysis and design method of the slotless-type PM linear brushless motor, which is using EMC, is verified through a comparison of the 2-D FE analysis with experimental data.

A. Comparison With 2-D FE Analysis

The FE analysis is known as an accurate analysis method for electrical machines and allows consideration of geometric details and the nonlinearity of magnetic material [2], [4]. Therefore, the proposed EMC method is verified with the FE analysis result.

The equipotential distribution of the linear brushless PM motor is shown in Fig. 8. In the case of the slotless-type PM linear brushless motor, the effective air-gap length is increased since the coil winding area is considered as a magnetic air gap. Therefore, magnetic flux density in each position of the

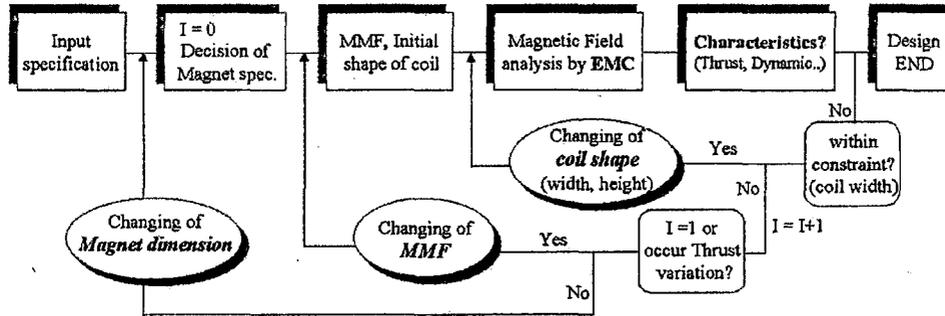


Fig. 5. Design process of slotless-type PM linear brushless motor by EMC.

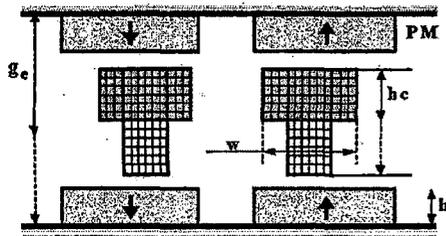


Fig. 6. Shape variation of winding coil area.

TABLE I
SPECIFICATION OF DESIGN RESULT

| | | | |
|-----------------------|----------|------------------|------------------------|
| Line voltage | 100 (V) | Current | 1.8 (A) |
| Stack length | 100 (mm) | Thrust | 100 (N) |
| Back iron thickness | 10 (mm) | Coil | |
| Magnet | | Core area | 214 (mm ²) |
| Residual flux density | 1.15 (T) | Turn number | 302 |
| Width | 35 (mm) | Coil area width | 23 (mm) |
| Thickness | 5 (mm) | Coil area height | 9.3 (mm) |

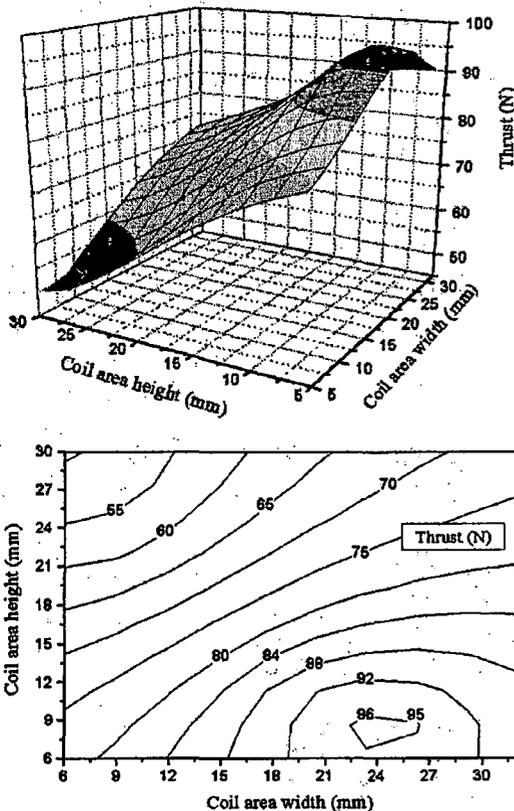


Fig. 7. Thrust characteristic according to shape variation.



Fig. 8. Equipotential distribution.

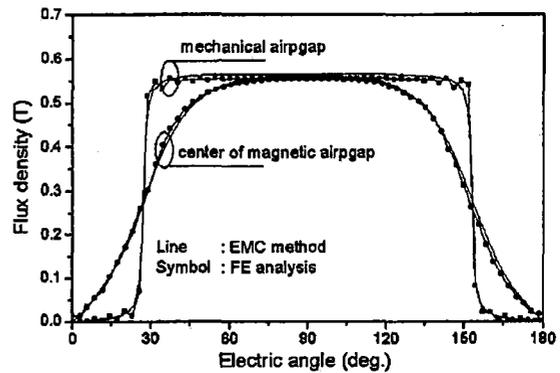


Fig. 9. Flux density distribution.

magnetic air gap which is the center of the winding coil area. The flux density in the center of the mechanical air gap has a rectangular characteristic. However, the flux density of the magnetic air-gap center has a sinusoidal waveform due to increased magnetic air-gap length. Fringing effect occurs in the magnet edge and the characteristics of flux density distribution calculated by two methods, EMC method and FE analysis, is in good agreement.

The characteristic of velocity EMF by moving the PM is shown in Fig. 10. The shape of EMF distribution in each phase is sinusoidal. It is due to flux distribution in the magnetic air gap and raises a problem of commutation thrust ripple according to the driving method in the brushless motor.

winding area is accordingly different. Fig. 9 shows the flux density distribution in the mechanical air gap and the center of

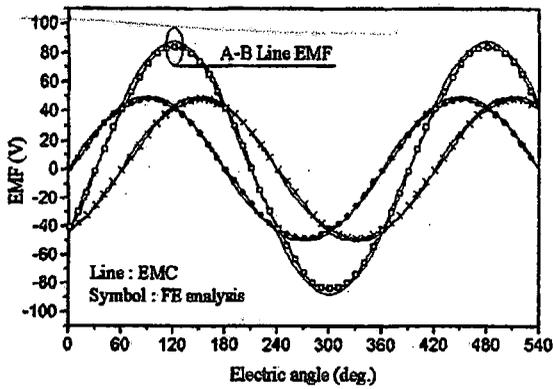


Fig. 10. Back-EMF distribution.

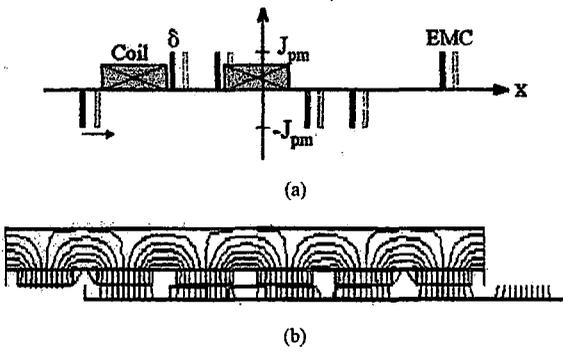


Fig. 11. Thrust calculation process during the on time. (a) Commutation thrust calculation by using EMC. (b) FE analysis by using moving line technique.

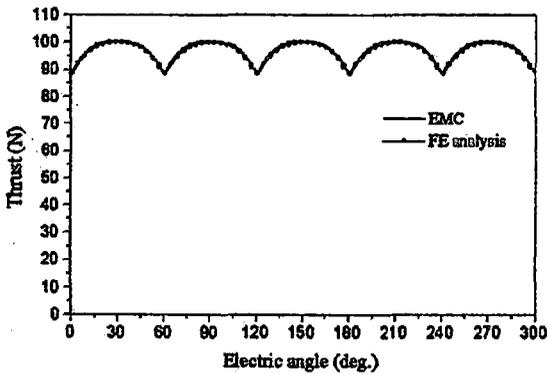
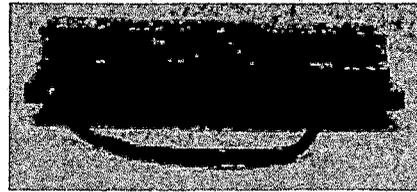


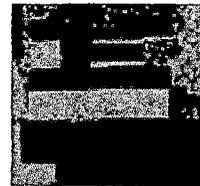
Fig. 12. Thrust distribution according to commutation period ($I = 1.8 \text{ A}$).

The thrust calculation process by using EMC is shown in Fig. 11. It is shown that EMC by PM is moving and thrust can be calculated from flux linkage and armature current. In the case of FE analysis, moving line is the applied technique; then, the on time of armature current in each phase is 120° and phase current is commutated by every 60° in the electrical angle. Exactly two phases are conducting at any and every instant [7].

The result of thrust calculation by using EMC method and FE analysis are shown in Fig. 12. The phase current is considered a square waveform, but the characteristics of flux density distribution are not perfect to square form. Therefore, thrust ripple during every 60° is generated by the characteristic of flux density distribution and the resultant thrust by FE analysis is somewhat less

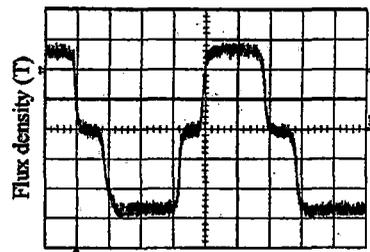


(a)

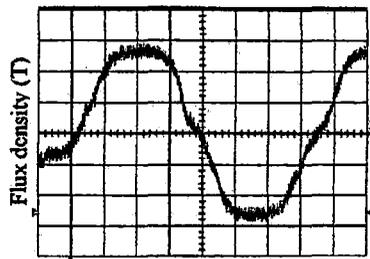


(b)

Fig. 13. System of testing machine. (a) Structure of system. (b) Side view.



(a)



(b)

Fig. 14. Flux density distribution by experiment (0.2 T/div). (a) Mechanical air-gap center. (b) Magnetic air-gap center.

than that of EMC method. In FE analysis, the nonlinear characteristic of permeability in the iron core is considered [4].

B. Comparison With Experiment

The proposed EMC method is compared with experimental results. The system structure of the slotless-type PM linear brushless motor is shown in Fig. 13.

Fig. 14 shows the flux density distribution of the test machine for different air-gap positions and Fig. 15 shows velocity EMF. It is shown that an error of flux density magnitude is within about 3%, so the proposed analysis, EMC method, is found to be in good agreement with the experimental result. The estimated result of velocity EMF is shown in Table II. The EMF constant is in good agreement with the thrust constant by EMC method.

In Fig. 16, the characteristic of thrust according to pole position is compared with the experimental results for each analysis. In the comparison, the measured thrust value is less than that of

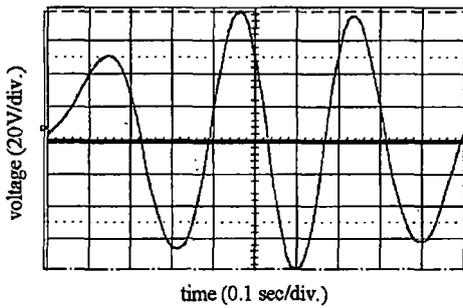


Fig. 15. Velocity EMF (20 V/div).

TABLE II
RESULT OF VELOCITY EMF

| EMF (V) (pk-pk) | Distance in a moving (mm) | Moving time (sec) | Velocity (m/sec) | EMF constant (Vsec/m) |
|--------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
| 17.34 | 100 | 0.6523 | 0.1533 | 56.56 |
| 38.12 | | 0.294 | 0.3401 | 56.04 |
| 38.3 | | 0.288 | 0.3472 | 55.16 |

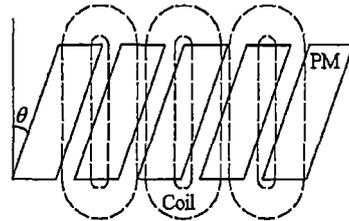


Fig. 17. Developed view of the skewed magnet.

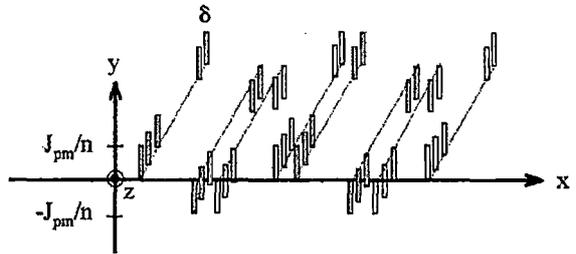


Fig. 18. Spatial distribution of skewed-segment EMC.

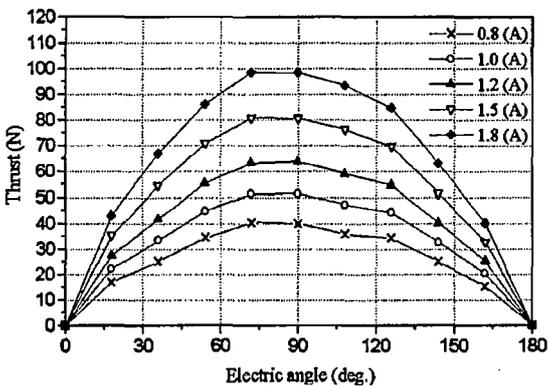


Fig. 16. Thrust distribution according to electrical angle.

two analysis results. The reason is that experimental equipment consists of a back-iron core which is not laminated, so it seems that leakage of flux is increased. The thrust ripple during 60° electric angles occurs and it is the same phenomena with the analysis result.

From the comparison with the experimental results, the proposed design and analysis process by using EMC method is found to be verified for the slotless-type PM linear brushless motor.

V. REDUCTION OF COMMUTATION THRUST RIPPLE

The variation of instantaneous thrust, which is the summation of electromagnetic and cogging forces, is generated with the moving position and it decides both the average and the ripple component [8]. In the case of the slotless-type PM linear motor, there is no cogging force because of the slotless-type structure.

The model presented in this paper tends to have a large electromagnetic force ripple that is a commutation thrust ripple. Therefore, magnet skewing and variation of pole ratio are applied in order to minimize the electromagnetic force ripple. In the analysis method of skewing effects, a novel method that substitutes the spatial distribution of EMC and EMC segment for

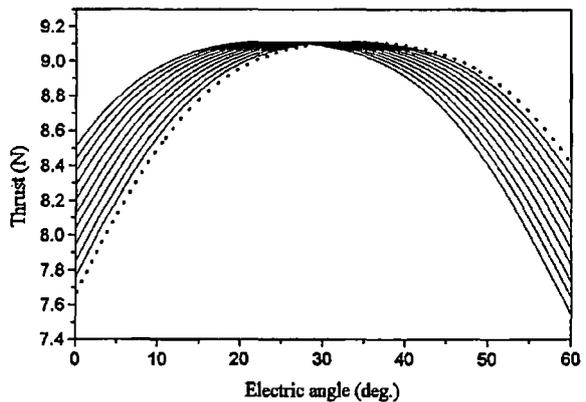


Fig. 19. Thrust distribution by using segment EMC.

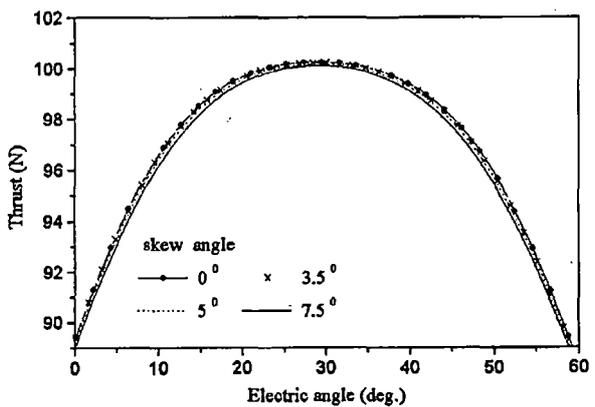


Fig. 20. Thrust ripple according to changing of skew angle.

the skewing magnet is adopted. Fig. 17 shows the spatial distribution of the skewed magnet and analysis process by the spatial distribution of the skewed segment EMC is shown in Fig. 18, where n is the segment number of the skewed magnet.

The results of skew effect by using the segment EMC method is shown in Figs. 19 and 20. If the phase current is considered entirely a square waveform, thrust distribution depends on only the

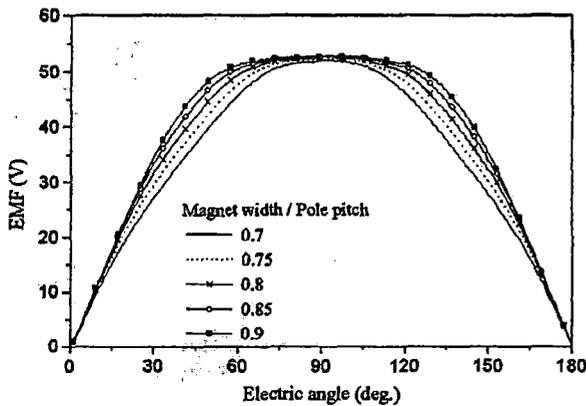


Fig. 21. EMF distribution according to pole ratio.

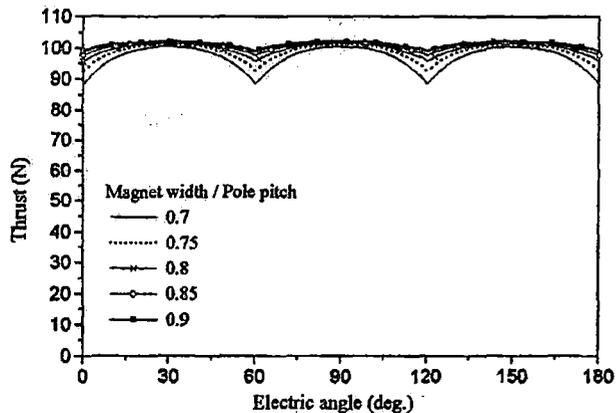


Fig. 22. Thrust distribution according to pole ratio.

back-EMF distribution. In the case of the driven to square-wave current, skew effect for minimization of thrust ripple is scarce, but the thrust ripple can be greatly reduced in the case of sinusoidal current. The analysis result of skew effect is shown in Fig. 19. Fig. 20 shows the thrust ripple during each phase on time with changing the skew angle of the PM.

Fig. 21 shows the variation of back-EMF distribution with varying pole ratio (magnet width/pole pitch). The shape of back EMF is approximated to be trapezoidal when pole ratio is increased. Fig. 22 shows thrust ripple for different pole ratios. It should be noted that the thrust ripple is slightly influenced by the skewed magnet, whereas variation of pole ratio is severely affected. This is mainly due to the combination of current waveform and back-EMF distribution.

VI. CONCLUSION

Magnetic field distribution has a very significant effect on the characteristic analysis and design process for the slotless-type PM linear brushless motor. An EMC method has been developed to aid the magnetic field analysis of slotless-type PM linear brushless motors. It is based on the calculation of the spatial distribution magnetic field when the PMs are replaced by the EMC distribution.

In this paper, a design process and characteristics analysis by using EMC method have been presented and the results were verified by the 2-D FE analysis and experimental results. The shape of the winding coil area has a significant effect on the thrust. The

effect of various coil shapes under constant MMF has been investigated and thrust ripple considering a driving manner is analyzed by EMC method using movements of magnetization.

By comparison with the experimental results, a reasonable agreement of the proposed process has been obtained by EMC method. The EMC method can gain reasonable analysis results to be an appropriate analysis tool.

REFERENCES

- [1] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, D. Howe, and P. H. Mellor, "Reduction of cogging force in slotless type linear permanent magnet motors," *Proc. IEE—Elect. Power Applicat.*, vol. 144, no. 4, pp. 277–282, July 1997.
- [2] D.-H. Im, J.-P. Hong, I.-s. Jung, and S.-B. Yoon, "The optimum design of permanent magnet linear synchronous motor," in *Proc. IEEE CEFC'96*, 1996, p. 166.
- [3] P. J. Hor, Z. Q. Zhu, D. Howe, and J. Rees-Jones, "Minimization of cogging force in a linear permanent magnet motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, pp. 3544–3547, Sept. 1998.
- [4] L. Chang, "In improved FE inductance calculation for electrical machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, pp. 3237–3245, July 1996.
- [5] K.-C. Lim, J.-P. Hong, and G.-T. Kim, "The novel technique considering slot effect by equivalent magnetizing current," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, pp. 3691–3693, Sept. 1999.
- [6] R. Akmes and J. F. Eastham, "Design of permanent magnet flat linear motors for standstill application," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, pp. 3042–3044, Sept. 1992.
- [7] R. Carlson, M. Lajoie-Mazenc, and J. C. D. S. Fagundes, "Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless dc machines," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 28, pp. 632–638, May/June 1992.
- [8] R. P. Deodhar, D. A. Staton, and T. J. E. Miller, "Modeling of skew using the flux-MMF diagram," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 32, pp. 1339–1344, Nov./Dec. 1996.
- [9] T. Ishikawa and G. R. Slemon, "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, pp. 2028–2031, Mar. 1993.



Gyu-Hong Kang was born in Korea in 1967. He received the B.E., M.E., and Ph.D. degrees from Changwon National University, Changwon, Korea, in 1992, 1994, and 2001, respectively.

From 1994 to 1998, he was an Associate Research Engineer with LG Electronics Inc. Since 2001, he has been the B. K. Professor in the Department of Electrical Engineering, Changwon National University. His fields of interest include the design of special electrical machines and servo motors and numerical analysis of electromagnetics.



Jung-Pyo Hong (M'96) was born in Korea in 1959. He received the B.Eng., M.Eng., and Ph.D. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea.

From 1990 to 1992, he was an Associate Research Engineer with LG Precision Company Ltd. He then joined Samsung Electric Company Inc. as a Senior Research Engineer. Since 1996, he has been a Lecturer in the Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea. His fields of interest include the design of special electrical machines and servo motors and numerical

analysis of electromagnetics.



Gyu-Tak Kim (M'00) was born in Korea in 1961. He received the B.Eng., M.Eng., and Ph.D. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea.

Since 1991, he has been a Lecturer in the Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea. Between 1996–2001, he was a Visiting Researcher at Waseda University, Tokyo, Japan. His fields of interest include numerical analysis of electromagnetics, design of electrical machines, special electrical machines, and energy conversion theory.