UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

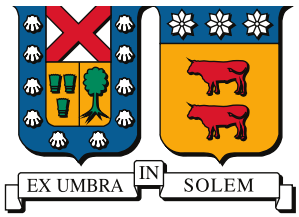
2019-03

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR LINEAL

CABRERA ESPINOZA, FERNANDO ALONSO

https://hdl.handle.net/11673/49960

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Memoria de Título

Diseño y Construcción de un Generador Lineal

Memoría de titulación para optar al título de
Ingeniero Civil Electrónico

Alumno
Fernando Alonso Cabrera Espinoza

Profesor Supervisor
Dr. Marcelo Pérez Leiva

Comisión
Dr.César Silva Jiménez Universidad Técnica Federico Santa María
Dr. Wener Jara Montecinos Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

6 Marzo, 2019, Valparaíso, Chile

RESUMEN

Dado al incremento del consumo energético per cápita en el mundo producto del aumento de la población y de la producción de las industrias basados en combustibles fósiles, el medio ambiente se ha visto perjudicado por el calentamiento global y el derretimiento de los polos. En respuesta a esto en los últimos años ha surgido la necesidad de generar energía a partir de recursos renovables y de bajos niveles de polución, como la radiación solar, el movimiento del viento y la temperatura y movimiento de los océanos.
Una de las alternativas de solución a este problema es la energía undimotriz, la cual consiste en la conversión de la energía mecánica proveniente del movimiento de las olas a energía eléctrica. De modo que se da la aplicación de generadores lineales en boyas donde se aprovecha el movimiento periódico de elevación y caída de la superficie marítima que es generada por el viento.
En este trabajo se realiza un diseño de un generador lineal a pequeña escala para esta aplicación, se fabricó una maqueta de este generador para el uso de estudios y experimentación. Se programó además un microcontrolador para efectuar el control del movimiento de un motor lineal para emular movimientos periódicos tales como el de las olas. Además se creó una estructura de montaje en el cual se desarrollará las pruebas experimentales de la maqueta del generador lineal.

Palabras Claves

Generador Lineal, Campos Magnéticos, Diseño 3D, Control PI, Imanes Permanentes.

ABSTRACT

IN VIEW the increase in per capita energy consumption in the world, due to the increase in population and production of industries, the environment has been damaged by the use of fossil fuels as raw material resources for the generation of energy causing global warming and the melting of the poles. In response to this has emerged in recent years the need to generate energy from renewable resources and free of pollution, such as solar radiation, wind speed and temperature and movement of the oceans.
One of the alternative solutions to this problem is the application of linear generators in buoys where the periodic movement of elevation and fall of the maritime surface that is generated by the wind, in others words, the ocean waves, to extract energy .
This work is about a simple design of a small scale linear generator for this application, a model of this generator will be manufactured, for the use of study and experimental tests. A motion controller of a linear motor will also be created to emulate periodic movements such as the waves in order to be a study and research material.

Keywords

Lineal Generator, Magnetic Fields, 3D Design, PI Control, Permanent Magnet.

ÍNDICE

RESUMEN i

ABSTRACT ii

ÍNDICE DE FIGURAS iv

ÍNDICE DE TABLAS v

1. INTRODUCCIÓN 1
- 1.1. Estado del Arte . . . 2
- 1.2. Objetivos . . . 5
- 1.3. Alcances del Trabajo . . . 5
- 1.4. Resumen del Trabajo . . . 6

2. TEORíA DE MÁQUINAS LINEALES 7
- 2.1. Circuito Magnéticos . . . 7
  - 2.1.1. Limitaciones del Análisis de Circuito Magnético . . . 9

3. MODELO DEL GENERADOR LINEAL 11
- 3.1. Circuito Magnético del Generador Lineal . . . 11
- 3.2. Principio de Funcionamiento del Generador Lineal . . . 15
- 3.3. Resultados Esperados . . . 17
  - 3.3.1. Configuración 1x1 . . . 17
  - 3.3.2. Configuración 2x1 Misma Polaridad . . . 22
  - 3.3.3. Configuracion 2x1 Polarización Contraria . . . 22
  - 3.3.4. Voltaje Inducido a Velocidad Constante . . . 23
- 3.4. Simulaciones en Comsol . . . 25

4. DISEÑO DE LA MAQUETA DEL GENERADOR LINEAL 32
- 4.1. Diseño de Piezas . . . 32
  - 4.1.1. Traslador A . . . 32
  - 4.1.2. Traslador B . . . 33
  - 4.1.3. Tapa del Traslador . . . 34
  - 4.1.4. Estator . . . 35
  - 4.1.5. Tapa Sostenedora del Riel Metálico . . . 36
  - 4.1.6. Adaptador del Eje del Motor Actuonix y Riel . . . 36

4.1.7. Soporte de Motor Actuonix 37

5. DESARROLLO Y CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO 38
5.1. Instrumentos y Recursos Utilizados 38
5.1.1. Hardware 38
5.1.2. Software 42
5.1.3. Materiales 42
5.2. Control sobre el Motor Lineal 42
5.2.1. Control por Histéresis 43
5.2.2. Control PI en Tiempo Discreto 44
5.2.3. Pruebas de los Controladores 47
5.3. Pruebas Experimentales 49
5.3.1. Voltaje Inducido en Distintas Configuraciones 50

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 55

7. CONCLUSIONES 62
7.1. Conclusiones 62
7.2. Trabajo a Futuro 63

A. CÓDIGOS DE CONTROL 64
A.1. Control por Histéresis 64
A.2. Control PI 65

B. PRUEBAS EXPERIMENTALES 72

C. TRABAJO A FUTURO 78

BIBLIOGRAFÍA 80

Índice de figuras

1.1. Planta Limpet 3
1.2. Pelamis 3
1.3. Generador lineal de la Universidad Upsala 4
1.4. Generador lineal de la Universidad de Oregon 5
1.5. PowerBuoy en España año 2008 5

2.1. Curva B-H 10

3.1. Vista Superior: Largos de las Relectancias 12
3.2. Vista Lateral: Líneas de Campo Magnético en el Traslador 12
3.3. Circuito Magnético 12
3.4. Radios de las Reluctancias 15
3.5. Módulo de Traslador Vista Superior 16
3.6. Módulo de Traslador vista Lateral 17
3.7. Configuración 1x1 del Generador Lineal 18
3.8. Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_{-2} 18
3.9. Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_{-1} 19
3.10. Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_0 19
3.11. Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_1 20
3.12. Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_2 20
3.13. Voltaje inducido en la Configuración 2x1 NN 22
3.14. Voltaje Inducido en la Configuracipon 2x2 NS 23
3.15. Vista Superior del Generador Lineal en FEMM 24
3.16. Voltaje Inducido Teórico 24
3.17. Representación en 2D del Generador Lineal 2x2 en Comsol 25
3.18. Líneas del Flujo Magnético en Configuración 2x2 NN 25
3.19. Líneas del Flujo Magnético en Configuración 2x2 NS 26
3.20. **2x2 NN:** Voltaje Inducido por Referencias de Posición Sinusoidales . . 27
3.21. **2x2 NN:** Voltaje Inducido por Referencias de Posición Triangulares . . 28
3.22. **2x2 NS:** Voltaje Inducido por Referencias de Posición Sinusoidales . . 28
3.23. **2x2 NS:** Voltaje Inducido por Referencias de Posición Triangulares . . 29
3.24. **2x2 NN:** Comparación de los Voltajes Inducidos por Referencias de Posición Sinusoidales 29
3.25. **2x2 NN:** Comparación de los Voltajes Inducidos por Referencias de Posición Triangulares 30

3.26. **2x2 NS:** Comparación de los Voltaje Inducido por Referencias de Posición Sinusoidales 30
3.27. **2x2 NS:** Comparación de Voltajes Inducidos por Referencias de Posición Triangulares 30
3.28. **2x1 NN:** Voltaje Inducido por Referencia de Posición Triangular . . . 31
3.29. Representación en 2D del Generador Lineal 2x1 en Comsol 31

4.1. Esquema del Traslador A 33
4.2. Traslador A Impreso y con Imanes 33
4.3. Esquema de Traslador B 34
4.4. Traslador B Impreso y con Imanes Incrustados 34
4.5. Esquema de las Tapas del Estator 35
4.6. Esquema del Estator 35
4.7. Estator Bobinado 36
4.8. Esquema de la Tapa Sostenedora del Riel Metálico 36
4.9. Esquema del Adaptador Motor-Riel 37
4.10. Esquema del Soporte del Motor Actuonix 37

5.1. Motor Lineal Actuonix Modelo P16-P 39
5.2. Señales del Motor Actuonix 39
5.3. MD1.3 2A Dual Motor Controller SKU DRI0002 39
5.4. Conexiones del Driver 40
5.5. Conexiones entre el Driver y el Motor Actuonix 40
5.6. Fuente de voltaje 12[V] Weho MS-15-12] 41
5.7. Arduino UNO R3 41
5.8. Generador de señales BK Precision 4055 42
5.9. Diagrama de Control de Histéresis 44
5.10. Ejemplo del PWM de una actuación de y[k]=0.3 46
5.11. Diagrama de Control 46
5.12. Seguimiento de la Referencia del Controlador del Fabricante 47
5.13. Seguimiento de la Referencia del Controlador por Histéresis 47
5.14. Seguimiento de la Referencia del Controlador PI en Tiempo Discreto . . 48
5.15. Generador Lineal 49
5.16. **1x1:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s] 51
5.17. **1x2:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s] 52
5.18. **2x1 NN:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s] . . 52
5.19. **2x2 NN:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s] . . 53
5.20. **2x1 NS:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s] . . . 53
5.21. **2x2 NS:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s] . . . 54

6.1. **1x1:**Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos 56
6.2. **1x2:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos 56
6.3. **2x1 NN:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos 56
6.4. **2x2 NN:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos 57
6.5. **2x1 NS:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos 57

6.6. **2x2 NS:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos 57
6.7. Comparación del Voltaje Inducido con Referencia Sinusoidal de las Configuraciones **1x2** y **1x1** 58
6.8. Comparación del Voltaje Inducido con Referencia Triangular de las Configuraciones **1x2** y **1x1** 58
6.9. Voltaje Inducido por una Referencia Sinusoidal de Frecuencia 450[mHz] . 59
6.10. Voltaje Inducido por una Referencia Triangular de Frecuencia 450[mHz] . 59
6.11. Comparación del Voltaje Inducido con la Velocidad del Traslador con Desplazamiento Sinusoidal 60
6.12. Comparación del Voltaje Inducido con la Velocidad del Traslador con Desplazamiento Triangular 60
6.13. Comparación del Voltaje Inducido 60

B.1. **1x1:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s] 72
B.2. **1x2:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s] 73
B.3. **2x1 NN:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s] . . 73
B.4. **2x1 NS:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s] . . . 74
B.5. **2x2 NS:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s] . . . 74
B.6. **2x2 NN:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s] . . 75
B.7. **1x1:**Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos 75
B.8. **1x2:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos 76
B.9. **2x1 NN:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos 76
B.10. **2x2 NN:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos 76
B.11. **2x1 NS:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos 77
B.12. **2x2 NS:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos 77

C.1. Anillo de Imanes 78
C.2. Piezas del Traslador 78
C.3. Traslador Armado 79
C.4. Configuración Halbach 79

Índice de tablas

3.1. Variables presentes en el circuito magnético 13

5.1. Lógica del Motor 41
5.2. Valores de Acción 46
5.3. Espacio que ocupan las componentes en el trayecto de las pruebas . . . 50
5.4. Recorrido del traslador que realiza en cada sentido de desplazamiento . . 50

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El incremento de la industrialización iniciada a mediados del siglo XIX junto con el aumento de la población, ha generado un incremento en el consumo energético diez veces mayor comparado con los siglos XIX e inicios del siglo XX. Debido a la necesidad de encontrar una solución económica este problema, se inicia la generación de energía por medio de la quema de combustibles fósiles, que han provocado contaminación y daño al medio ambiente por la utilización y explotación masiva de estos recursos en estos últimos siglos.

En la necesidad de encontrar una solución a este nuevo problema y ayudar con el medio ambiente se ha optado por el uso de recursos renovables y poco contaminantes como materiales de fuentes energéticos, como la radiación solar, movimiento del viento y el movimiento y temperatura de los océanos. En los últimos años se ha estudiado y se ha logrado un gran progreso en la investigación del uso de energía solar y eólica, logrando incrementar el número de instalaciones de granjas eólicas y solares.

A pesar de que el océano cubre el 70 % del planeta y posea una gran densidad energética, no se ha explotado este recurso debido al que el desarrollo de tecnología para la extracción de energía desde esta fuente está en una temprana edad, sometida a altos costo de desarrollo y operación. Pero la tendencia emergente en estos últimos años apunta a que esta tecnología se desarrolle en el futuro.

Se puede extraer energía desde el océano de cuatro formas:

Movimiento de las olas: La idea se basa en convertir el movimiento de las olas a energía eléctrica por medios de generadores o sistemas hidráulicos. Es también conocido como energía undimotriz o WEC (Wave Energy Conversion), este tipo de extracción de energía es una de la más estudiadas últimamente y presenta enormes ventajas ya que es fácil de predecir condiciones óptimas que permitan mayor eficiencia en sus procesos debido a que los oleajes no poseen mucha variación como las ráfagas de viento. Existen diversos prototipos y dispositivos tales como el Wave Dragon, Pelamis y dispositivos

oscilantes como boyas acopladas a un motor o turbina hidráulica o a un generador eléctrico lineal con imanes permanentes.

Corrientes marinas: Las corrientes marinas son causadas principalmente por las interacciones gravitacionales entre la tierra, la luna y el sol, que provocan la circulación de las corrientes en el mar. La energía cinética de las corrientes marinas se pueden convertir en su mayor parte, de la misma forma que una turbina eólica extrae energía del viento, utilizando varios tipos de rotores de flujo abierto. El potencial de generación de energía eléctrica a partir de las corrientes marinas de la marea es enorme pero pueden intervenir con la vida submarina ya que muchos de los seres vivos se trasladan en estas corrientes y pueden ser resultados heridos por las aspas de los generadores.

Movimiento de mareas: Este principio se basa en aprovechar las diferencias de alturas entre mareas bajas y mareas altas, generando energía a medida que la marea entra y sale de un embalse construido.

Maremotérmica: Consiste en aprovechar las diferencias de temperatura del océano de las aguas heladas de las profundidades, y las aguas más tibias de la superficie para hacer funcionar un motor térmico. Hasta el momento existe una sola planta operando bajo estos principios y está ubicado en Japón supervisado por la Universidad de Saga.

Este trabajo trata de la creación de una maqueta de pruebas de un WEC que funciona bajo el principio de un generador lineal con imanes permanentes y la construcción de una estructura para hacer las pruebas del generador. Además, la programación de un motor Actuonix para experimentar con el movimiento del traslador del generador lineal.

1.1. Estado del Arte

Existe una variedad de tecnología WEC que se desarrollan para adaptarse a diferentes localidades cercanas a las costas o en alta mar. Estas tecnologías WEC se pueden clasificar de la siguiente manera.

1. **Columna de Agua Oscilatoria:** Es la primera generación de WEC, estos aparatos se instalan en lugares cercanos y a lo largo de la costa. Pueden estar instalados en el fondo del mar o estar fijados en superficies rocosas de acantilados. Estos WEC consisten en una estructura de hormigón o acero que está parcialmente sumergida y abierta bajo la superficie del agua, donde queda aire atrapado en la superficie del mar. El movimiento oscilatorio de la superficie del agua hacen mover el aire capturado que circula a través de una turbina que acciona a un generador eléctrico. Las ventajas que tiene esta tecnología es que son más fáciles de instalar y de realizar mantenciones, además de no utilizar cables largos a nivel debajo del mar. Algunas de las instalaciones en funcionamiento han sido instalados en India (Trivandrum, Kerala state, 1990 [1]), Portugal (Pico, Azores, 1999 [2]) y Reino Unido (planta LIMPET en Isla Islay [3] 1.1).

2. **Dispositivos Articulados:** Estos dispositivos utilizan los movimientos rotacionales relativos para la conversión de energía. El WEC más exitoso entre estos dispositivos es el Pelamis 1.2. El Pelamis consiste en cuatro secciones cilíndricas unidos por articulaciones que se alinean con la dirección de las olas, el movimiento inducido por las

Figura 1.1: Planta Limpet

Figura 1.2: Pelamis

olas en las articulaciones son resistidos por pistones hidráulicos , los cuales bombean aceite a alta presión a través de motores hidráulicos que accionan a tres generadores eléctricos. Un conjunto de tres Pelamis fueron instalados en las costas de Portugal en el año 2008 siendo la primera granja de olas en conectarse a la red internacionalmente.

3. **Dispositivos Oscilantes:** Los dispositivos oscilantes consisten en boyas de gran peso que flotan en superficie de mar. El principio de estos WEC se basan en la utilización del movimiento perpendicular al fondo marino inducido por el movimientos de las olas del mar, para transformarla a energía eléctrica. En esta categoría se divide en dos tipos de boyas.

   Boyas de un Solo Cuerpo: Esta tecnología se considera como la tercera generación de WEC, estas boyas tienen un marco de referencia lo profundo del mar o una estructura fija en una profundidad fija. El principio de funcionamiento de las boyas de un solo cuerpo se basa en el movimiento relativo que existe entre la estructura fija en el océano y la boya. Una de las primera tecnología en desarrollarse fue en Dinamarca en el año 1990, donde el movimiento relativo entre las componentes de la estructura

era aprovechada por una bomba de pistón que suministra agua a alta presión a una turbina hidráulica [4]. Luego un avance para esta tecnología surgió en la Universidad de Uppsala 1.3, Suecia, donde se instala un generador lineal en el fondo del mar reemplazando la bomba de pistón, donde una guía une la estructura en el fondo marino con la boya. Otra tecnología que hace uso del generador lineal fue desarrollado por la Universidad de Oregon [5] 1.4, Estados Unidos, donde la libertad del movimiento de la boya está restringido, solo moviéndose de forma vertical, de manera que la velocidad relativa entre la boya y la estructura anclada se convierta en energía eléctrica por medio del generador lineal de imanes permanentes. Por otro lado existen diversos estudio asociada a esta tecnología en la que se investiga la geometría del estator y la distribución de los imanes y bobinas [6]. El Septiembre de 2008 un prototipo de 10[kW] fue implementado y probado en Newport, Oregon.

Boyas de dos Cuerpos: Las tecnologías de boya de un solo cuerpo pueden ser complejas debido a las grandes distancias entre la boya y la estructura en el fondo del mar o por la oscilaciones de las mareas. De modo que se presenta dos cuerpos flotantes en la cual se extrae energía a partir de las diferencias del movimiento oscilatorio entre las estructuras flotantes. Se han desarrollados diversas WEC de boyas de dos cuerpos, uno de esto fue desarrollado por la empresa Ocean Power Technologies, llamada PowerBuoy 1.5, donde el prototipo de este fue probado en las costas norteñas de España en Septiembre del año 2008, sin ninguna conexión a red [7].

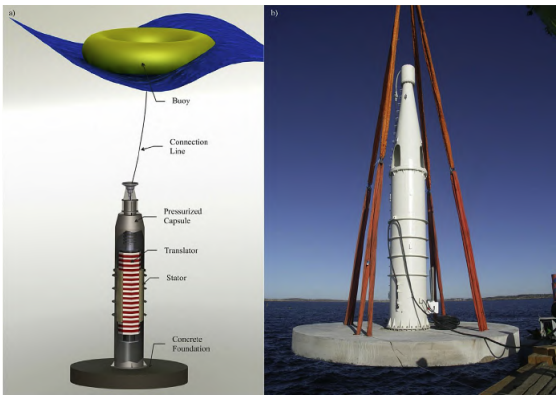


Figura 1.3: Generador lineal de la Universidad Upsala

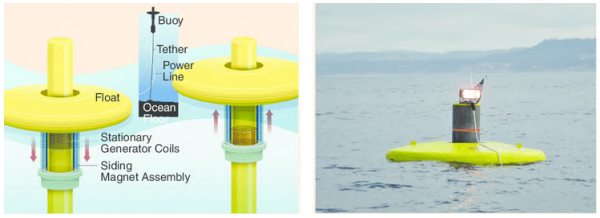


Figura 1.4: Generador lineal de la Universidad de Oregon

Figura 1.5: PowerBuoy en España año 2008

1.2. Objetivos

Para poder hacer pruebas experimentales y estudio al generador lineal se necesita primero diseñar y fabricar una maqueta de pruebas, también tener las herramientas necesarias para realizar las pruebas pertinentes al generador lineal tales como generar movimientos oscilatorios en el traslador para imitar algunos movimientos del mar y la creación de una estructura para el desarrollo de los experimentos. Los objetivos específicos son:

- Diseñar un modelo 3D en el software Autodesk Inventor de un generador lineal.
- Diseñar un control sobre un motor lineal, para transladar el eje del motor según a una señal de referencia deseada.
- Analizar el generador lineal.
- Crear una plataforma para realizar las pruebas.
- Analizar y comparar el voltaje inducido por el generador lineal por la variación de la velocidad del traslador.

1.3. Alcances del Trabajo

En este trabajo se considera el diseño de la construcción y modelado de una maqueta de generador lineal. Por lo tanto no se considera la creación de un prototipo funcional, tampoco se considerará en el diseño y la implementación de un convertidor para el generador lineal; de

igual manera tampoco se investigará sobre un algoritmo MPPT para la máxima extracción de energía proveniente del movimiento de las olas.

1.4. Resumen del Trabajo

El capítulo dos de este trabajo se detalla el principio básico del funcionamiento de un generador lineal y una introducción a los circuitos magnéticos. En el capítulo tres se deducirá el circuito magnético del generador lineal, además de explicar la física detras del generador lineal y que se espera de los experimentos al variar las componentes de la estructura del generador lineal por medio de simulaciones. El capítulo cuatro trata del diseño de las piezas del generador. El capítulo cinco se específica la construcción de la estación de pruebas, como se preparó el experimento y la programación del motor Actuonix, además de exponer los resultados experimentales. En el capítulo seis se analisa los resultados experimentales y se realiza comparaciones con los resultados esperados. Finalmente, el capítulo siete se presentan las conclusiones y las mejoras que se puede realizar en un trabajo futuro.

Capítulo 2

TEORÍA DE MÁQUINAS LINEALES

Este capítulo tratará sobre las teorías en las cuales se basan los generadores lineales, como la representación del generador lineal a circuitos magnéticos, lo cual es un análisis similar a la representación de un circuito eléctrico pero con una base en las leyes de Maxwell sobre el electromagnetismo.

2.1. Circuito Magnéticos

Es importante enfatizar que el campo magnético es un fenómeno que se distribuye por toda una región del espacio. De modo que se requieren de análisis rigurosos dado al uso de variables de distancia contenidas en divergencias y rotacionales. Como en las siguientes ecuaciones.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2.1}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2.2}$$

Sin embargo, bajo ciertas condiciones, es posible aplicar análisis de parámetros agrupados para ciertos problemas de campos magnéticos como si fueran aplicados a un análisis de circuitos eléctricos. Este tipo de análisis que hace referencia a los circuitos eléctricos se denomina como análisis de circuitos magnéticos.

El análisis de circuito magnético sigue con la idea de un circuito eléctrico en circunstancia de un alimentación de una señal DC. Su utilidad radica en dimensionar las componentes magnéticas de un sistema electromagnético durante las etapas de diseño, calcular inductancias, y determinar la densidad de flujo en el entrehierro para los cálculos de potencia y fuerza. Para esto se realizan las siguientes definiciones.

- **Potencial Magnético:** Para regiones en cuales no hay presencia de densidades de corriente eléctrica, la intensidad de campo magnético **H** puede ser definido en términos de escalar de potencial magnético **F**, como se muestra a continuación.

$$\mathbf{H} = \nabla \mathbf{F} \tag{2.3}$$

$$\mathbf{F} = \int \mathbf{H} \cdot dl \tag{2.4}$$

Las dimensiones de F corresponde Amper por vuelta **A/v**. Para un incremento potencial o fuente de energía magnética, el término de fuerza magnetomotriz **fmm** es frecuentemente usado. Como a la caída potencial, donde se le denomina como **caída de reluctancia**. Existen 2 tipos de fuentes de **fmm** en circuitos magnéticos; corrientes eléctricas e imanes permanentes. La **fmm** proveniente de corrientes eléctricas usualmente consiste en una bobina con cierta cantidad de vueltas **N**, en la cual circula una corriente llamada como **corriente de excitación**.

- **Flujo Magnético:** El flujo de líneas proveniente de un campo magnéticos dentro de un área determinado se denominan **líneas de flujo magnético** ϕ, teniendo como unidad de medida Weber. Se denota con la siguiente ecuación.

$$\phi = \int_S B \cdot ds \tag{2.5}$$

- **Reluctancia:** La reluctancia una componente de impedanca magnética, tal como son las resistencias para los circuitos eléctricos, excepto que la reluctancia no genera pérdida energética. Es definido de manera análogo a la ley de Ohm de la siguiente manera.

$$\phi = \frac{F}{\Re} \tag{2.6}$$

Se mide en Henry^{-1}, H^{-1}. Por otro lado un material magnético que es homogéneo e isotrópico y además una densidad de flujo magnético uniforme y con una sola componente de dirección **B**, que cruza sobre un área determinada A de manera perpendicular, ϕ se transforma en $\phi = B \cdot A$. Considerando también que la intensidad del campo magnético **H** es constante en el largo **l** en dirección de **B**, la ecuación 2.6 se define como.

$$\Re = \frac{F}{\phi} = \frac{H \cdot l}{B \cdot A} = \frac{l}{\mu A} \tag{2.7}$$

- **Permeancia:** La permeancia $\wp$ es el reciproco de la reluctancia y se mide en Henry **H**. La reluctancia y permeancia son utilizados para describir características geométricas de los campos magnéticos, principalmente para el cálculo de inductancias.

$$\wp = \frac{1}{\Re} \tag{2.8}$$

- **Flujo Magnético de Dispersión (Magnetic Leakage Flux):** En dos puntos del espacio que presentan diferentes potenciales magnéticos, existe un campo magnético.En el caso de una bobina enlazada a un material ferromagnético, gran parte del flujo magnético que genera la bobina fluye a través del material de gran permeabilidad, pero parte de este campo circula por el aire, u otra parte de la estructura del material. Este campo que se desvía se denomina flujo magnético de dispersión, y no se puede determinar con las ecuaciones del circuito magnético ya que no cumple con las reglas, y se requiere de métodos matemáticos de mayor precisión para obtener una aproximación aceptable.

- **Efecto Marginal:** El efecto marginal es un efecto similar a la fuga de flujo magnético, este efecto se le denomina a la dispersión que ocurre en un espacio que separa al material ferromagnético, como el entrehierro. Estos flujos de campos se dispersan de tal manera que no se puede aplicar el concepto de circuito magnético, es muy difícil de estimar excepto en configuraciones sencillas. Una manera de estimar el efecto marginal es agrandar el área en el cual el flujo magnético cruza, que también esta relacionado con la distancia de la separación del entrehierro.

2.1.1. Limitaciones del Análisis de Circuito Magnético

El propósito de introducir los circuitos magnéticos es para establecer algunos principios y definiciones fundamentales que son necesarios para comprender los sistemas electromagnéticos. Las limitaciones de la teoría de circuitos electromagnéticos residen principalmente en la naturaleza de los materiales magnéticos en contraste con conductores, aislantes y materiales dieléctricos. La mayoría de estas limitaciones están implicados con los supuestos en cuales se basa los circuitos magnéticos. Estos supuestos son:

1. **Material Magnético Homogéneo:** La mayoría de los materiales empleados en prácticas de sistemas electromagnéticos son considerados homogéneas sobre la finita región del espacio en donde se realiza el análisis, permitiendo el uso de las formas integrales de las ecuaciones de Maxwell y cálculos de reluctancias.

2. **Material Magnético Isotrópico:** Muchas láminas de aceros y de ferrita están orientadas debido al proceso metalúrgico que se realiza durante la producción. Materiales orientados favorecen la dirección en estructuras granuladas, dado propiedades magnéticas superiores cuando se magnetiza a lo largo de esta dirección orientada.

3. **No linealidad:** Esta es una propiedad inherente de todo material de fierro y ferromagnético. Sin embargo, existen muchas maneras de tratar analíticamente esta clase de no linealidad.

   a) Como se puede curva **B-H**, figura 2.1, una porción considerable de la curva de estos materiales (región II) se puede aproximar como una recta, y muchos de máquinas electromagnéticas operan en esta región.

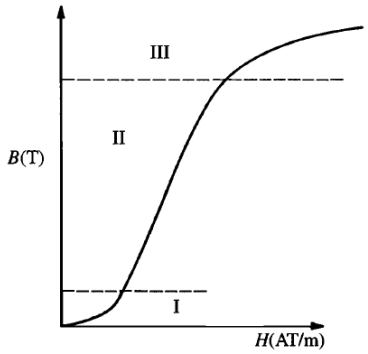


Figura 2.1: Curva B-H

b) Una gran cantidad de técnicas de análisis y numéricas han sido desarrollados para describir la curva B-H y otros efectos magnéticos no lineales.

c) La característica no lineal de la curva B-H de los materiales magnéticos se manifiesta a través de la relación entre el flujo y la corriente de excitación de los sistemas electromagnéticos; la relación entre el flujo y el voltaje inducido es lineal, que está dada por la ley de Faraday. Es posible tratar estas excitaciones no lineales de forma separada en diversos sistemas, tales como son hecho en los circuitos equivalentes que realizan una estimación de los transformadores y los motores de inducción.

d) Una inductancia cuyo circuito magnético es compuesto de un material magnético es un elemento no lineal de un circuito eléctrico, tales como las bobinas enrolladas a un toroide magnético, sin embargo, con un entrehierro en el toroide el efecto de no linealidad en la inductancia disminuye. Los actuadores tienen entrehierros en sus circuitos magnéticos, que permiten la teoría básica de estos aparatos para ser descrita por ecuaciones lineales.

4. **Saturación:** Es la zona en la cual la curva B-H deja de comportarse de forma lineal (zona III de la figura 2.1), donde **B** se incrementa de manera levemente independiente de que tan grande sea el incremento de **H**.

5. **Flujo de Dispersión y Efecto Marginal:** Es una propiedad presente en todos los circuitos magnéticos. Esto es mejor tratado como una parte de las soluciones generalizadas de la distribución del campo magnético en el espacio, llamado problema de frontera. En muchos circuitos de actuadores magnéticos, la frontera entre las regiones de espacio que contiene distintos tipos de materiales magnéticos (usualmente entre la frontera de un material ferromagnético y aire) son superficie planas o cilíndricas, que, en una sección transversal bidimensional, se convierten en líneas rectas o en círculos. Las inductancias de fuga pueden determinarse frecuentemente en tales regiones mediante el cálculo de la reluctancia o permeancia de la región utilizando simples formulaciones integrales.

Capítulo 3

MODELO DEL GENERADOR LINEAL

Esta sección trata sobre la representación del generador lineal en circuito magnético, además de explicar el principio del funcionamiento del generador lineal y de simular las pruebas de la maqueta del generador por medio del software Comsol Multiphysics.

3.1. Circuito Magnético del Generador Lineal

El circuito magnético asociado al generador se obtiene con la trayectoria de las líneas de flujo magnético, en la cual fluyen de manera radial como se muestra en las figuras 3.5 y 3.6. Donde la mayor concentración de las líneas de flujo magnético está presente en la estructura del traslador.

Cabe mencionar que en este caso en específico el material del generador (traslador y estator) está compuesto por plástico, siendo un material paramagnético, o sea su permeabilidad magnética se considera como aire ($\mu_r = 1$). De modo que existe un considerable flujo del campo magnético que se dispersa, como se muestra en la figura 3.6, lo que limita de gran manera el análisis de circuito magnético, por lo que se realizará el análisis simple considerando la permeabilidad magnética de los materiales como una variable.

En las figuras 3.5 y 3.2 se muestran imágenes que ilustran el recorrido de la concentración del campo magnético en una sola dimensión, en una vista superior y lateral respectivamente.

En la figura 3.2 se observa que las líneas del flujo magnético ubicados en torno a bobinas fluyen a través de estas y por las tapas del estator. De modo que es por esto que se forma una reluctancia en paralelo como se muestra en la siguiente figura 3.3.

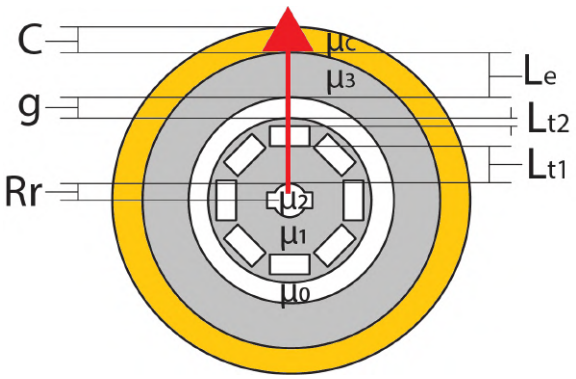


Figura 3.1: Vista Superior: Largos de las Relectancias

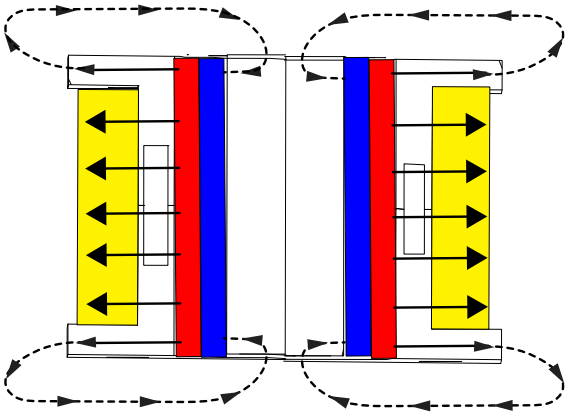


Figura 3.2: Vista Lateral: Líneas de Campo Magnético en el Traslador

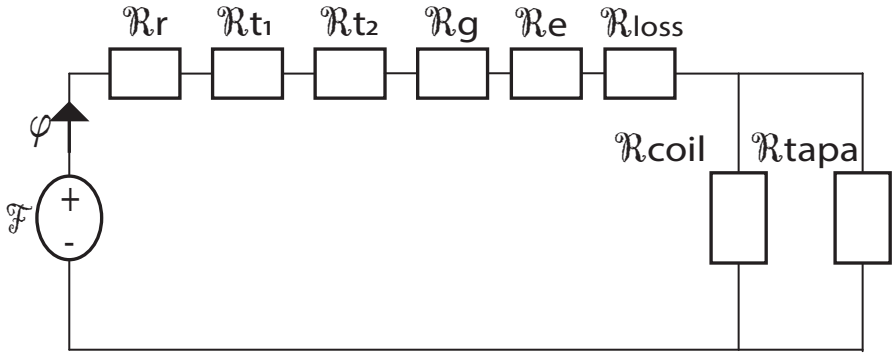


Figura 3.3: Circuito Magnético

$\Re_r$	Reluctancia del riel metálico
$\Re_{t1}$	Reluctancia del traslador en el tramo Lt1
$\Re_{t2}$	Relucatancia del traslador en el tramo Lt2
$\Re_g$	Reluctancia del entrehierro
$\Re_e$	Reluctancia del estator
$\Re_{loss}$	Reluctancia de dispersión del campo magnético
$\Re_{coil}$	Reluctancia de la bobina
$\Re_{tapa}$	Reluctancia de la tapa del estator
$\mathcal{F}$	Fuerza magnetomotriz del circuito
ϕ	Flujo magnético del circuito

Tabla 3.1: Variables presentes en el circuito magnético

$$\mathcal{F} = \phi \cdot \Re_{eq} \tag{3.1}$$
$$\Re_{eq} = \Re_r + \Re_{t1} + \Re_{t2} + \Re_g + \Re_e + \Re loss \tag{3.2}$$
$$\Re_r = \frac{R_r}{\mu_2 A_r} \tag{3.3}$$
$$\Re_{t1} = \frac{L_{t1}}{\mu_1 A_{t1}} \tag{3.4}$$
$$\Re_{t2} = \frac{L_{t2}}{\mu_1 A_{t2}} \tag{3.5}$$
$$\Re_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \tag{3.6}$$
$$\Re_e = \frac{L_e}{\mu_3 A_e} \tag{3.7}$$
$$\Re_{loss} = \frac{L_{loss}}{\mu_0 A_{loss}} \tag{3.8}$$
$$\Re_{coil} = \frac{C}{\mu_{coil} A_{coil}} \tag{3.9}$$
$$\Re_{tapa} = \frac{C}{\mu_3 A_{tapa}} \tag{3.10}$$

El área de las variables está dado por:

$$A_r = 2\pi R_r \cdot h_t \tag{3.11}$$
$$A_{t1} = 2\pi \int_{R_r}^{R_{t1}} dr \cdot h_t \tag{3.12}$$
$$A_{t2} = 2\pi \int_{R_{t2}}^{Rt_{ext}} dr \cdot h_t \tag{3.13}$$
$$A_g = 2\pi \int_{Rt_{ext}}^{Re_{int}} dr \cdot h_e \tag{3.14}$$
$$A_e = 2\pi \int_{Re_{int}}^{Re_{ext}} dr \cdot h_e \tag{3.15}$$
$$A_{coil} = 2\pi \int_{Re_{ext}}^{R_{coil}} dr \cdot h_{coil} \tag{3.16}$$
$$A_{tapa} = 2\pi \int_{Re_{ext}}^{R_{coil}} dr \cdot h_{tapa} \tag{3.17}$$
$$A_{loss} = \textbf{Indeterminable} \tag{3.18}$$

Donde h_t y h_e son las alturas de 20[mm] del traslador y estator respectivamente, la altura de la bobina h_{coil} es de 18[mm] y la altura total que forman las tapas h_t es de 2[mm]. Los radios descritos en las ecuaciones de y las áreas se visualizan en la figura 3.4.

Ahora determinando los valores de las reluctancia se toman en consideración las medidas reales de las dimensiones descritas en las figuras 3.4 y 3.5.

$$Rr = 4{,}2 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.19}$$
$$L_{t1} = 9{,}285 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.20}$$
$$L_{t2} = 2{,}015 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.21}$$
$$g = 2 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.22}$$
$$L_e = 6 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.23}$$
$$C = 8{,}5 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.24}$$
$$R_{t1} = 13{,}485 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.25}$$
$$R_{t2} = 18{,}485 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.26}$$
$$Rt_{ext} = 20{,}5 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.27}$$
$$Re_{int} = 22{,}5 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.28}$$
$$Re_{ext} = 28{,}5 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.29}$$
$$R_{coil} = 37 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.30}$$

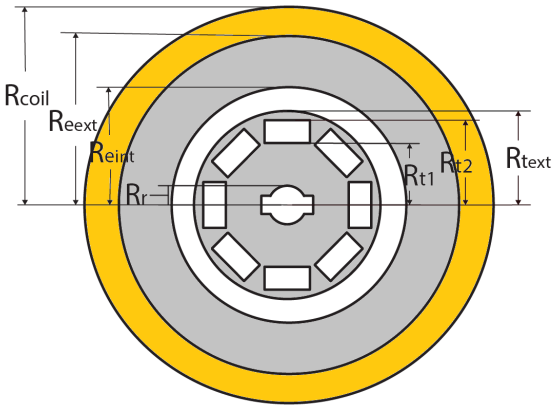


Figura 3.4: Radios de las Reluctancias

Usando la permeabilidad real del plástico ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}[NA^{-2}]$) y considerando una permeabilidad relativa del riel metálico de 1000, se obtiene las siguientes reluctancias.

$$\Re_r = 6{,}3326 \cdot 10^3[H^{-1}] \tag{3.31}$$
$$\Re_{t1} = 6{,}3326 \cdot 10^6[H^{-1}] \tag{3.32}$$
$$\Re_{t2} = 6{,}3326 \cdot 10^6[H^{-1}] \tag{3.33}$$
$$\Re_g = 6{,}3326 \cdot 10^6[H^{-1}] \tag{3.34}$$
$$\Re_e = 6{,}3326 \cdot 10^6[H^{-1}] \tag{3.35}$$
$$\Re_{coil} = 7{,}0361 \cdot 10^6[H^{-1}] \tag{3.36}$$
$$\Re_{tapa} = 1{,}2665 \cdot 10^8[H^{-1}] \tag{3.37}$$
$$\Re_{loss} = \textbf{Indeterminable} \tag{3.38}$$

Cabe mencionar que este circuito magnético representa una configuración 1x1 del generador, de modo que ha distintas configuraciones el circuito magnético varía, como en el caso de una configuración 2x2 NS o 2x1 NS, en la cual gran parte del circuito magnético se cierra entre las caras de los imanes del traslador y se presenta una disminución en el campo magnético de dispersión.

3.2. Principio de Funcionamiento del Generador Lineal

El principio con el cual se basa el generador lineal diseñado, es la idea de la ley de Faraday, la cual indica que el voltaje inducido en un material conductor es proporcional a la variación con respecto al tiempo del flujo magnético el cual el material está sometido. Ahora bien, esta variación del flujo magnético es producido por el **corte de flujo** en el material conductor, que es dado por el movimiento de los imanes permanentes incrustados en el traslador. Para realizar un análisis más simple consideremos que el estator solo consiste en una única espira conductora, si el imán posee un campo magnético uniforme en su espacio y se acerca hacia la espira, la espira presenciará un crecimiento del flujo magnético debido

al aumento de la cantidad de las líneas de flujo que cortan a la superficie de esta espira, elevando de esta manera el voltaje que se induce en la espira. Luego una vez que el imán este ubicado en el centro de la espira, cruzarán por la espira el máximo de flujo magnético proveniente del imán y se producirá un máximo en el voltaje inducido. Finalmente, cuando el imán salga de la espira alejándose de esta, la espira presenciará una disminución del flujo magnético a través de esta lo que provocará la disminución del voltaje inducido. Cabe mencionar que este fue un ejemplo sencillo ya que no se especifica la polaridad del imán, ni el sentido del desplazamiento del traslador ya que esto influye en la polarización del voltaje inducido.

De manera que la variación del corte de flujo en la bobina, está relacionado con la variación de la distancia entre el imán y la bobina con respecto al tiempo, es decir con la velocidad en que el imán se mueve hacia la bobina. Por lo que la expresión de la ley de Faraday para un conductor que se mueve en un campo magnético es.

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \tag{3.39}$$

La magnitud del voltaje inducido se describe como:

$$|e_{ind}| = |v| \cdot |B| \cdot l \sin(\theta) \tag{3.40}$$

Donde el ángulo θ corresponde al ángulo que se genera entre las líneas del flujo magnético **B** y la velocidad en la que se mueve los imanes **v**.

En el traslador se incrustaron los imanes de neodimio de tal manera que todas caras de los imanes con el polo norte estén apuntando hacia el exterior del traslador, y con el polo sur apuntando hacia interior el de este, como se presenta en la figura 3.5. De modo que las líneas de flujo magnético salen al exterior del traslador y luego regresan al centro de este, como se ilustra a continuación en la figura 3.6.

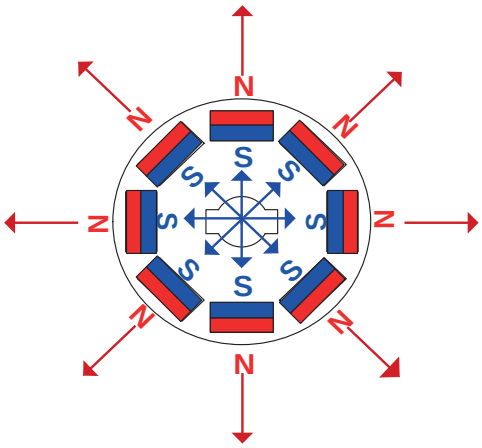


Figura 3.5: Módulo de Traslador Vista Superior

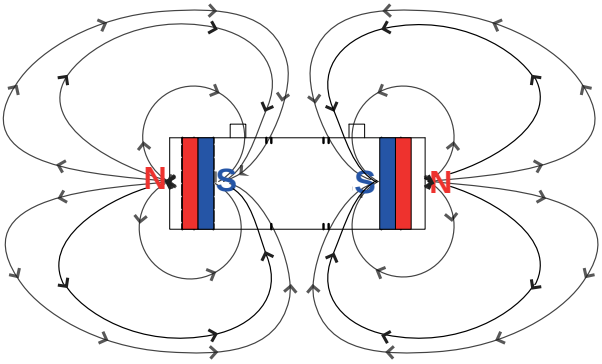


Figura 3.6: Módulo de Traslador vista Lateral

3.3. Resultados Esperados

Para las pruebas del generador lineal se toma en cuenta diversas configuraciones de este, variando el número de módulos de trasladores, como de estatores. También utilizando módulos de imanes con diferente polaridad magnética. De modo que se realizará un análisis para cada caso, considerando que el traslador se mueve a una velocidad lineal constante al entrar y salir por el estator. Cabe mencionar que el largo de cada módulo es de 2[cm], el mismo largo que los imanes de neodimio. Por otro lado, se toma en cuenta la irradiación radial uniforme de las líneas de flujo magnético que viajan desde el interior del traslador hacia el radio exterior, de modo que se visualizará el problema tomado en cuenta un solo imán.

3.3.1. Configuración 1x1

En esta configuración se considera el uso de un único módulo de traslador y de estator, de modo que por un instante muy breve los imanes de neodimio estarán en su totalidad en el interior del estator, por lo que las bobinas por un tiempo limitado presenciarán un máximo de flujo magnético. En las próximas figuras se ilustra el voltaje que se induce en el centro de la bobina con respecto a la posición del traslador en el estator.

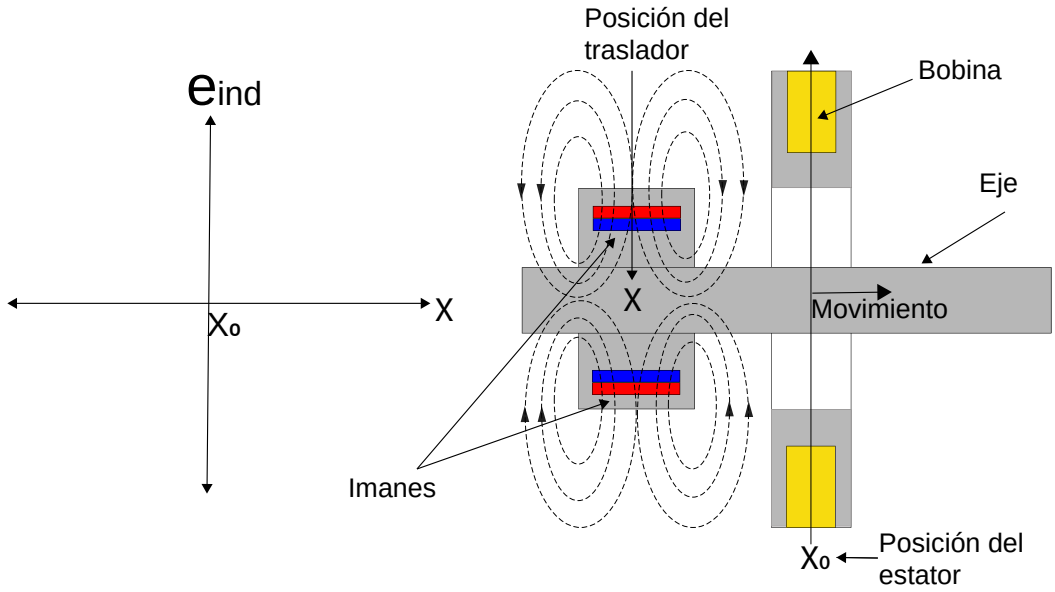


Figura 3.7: Configuración 1x1 del Generador Lineal

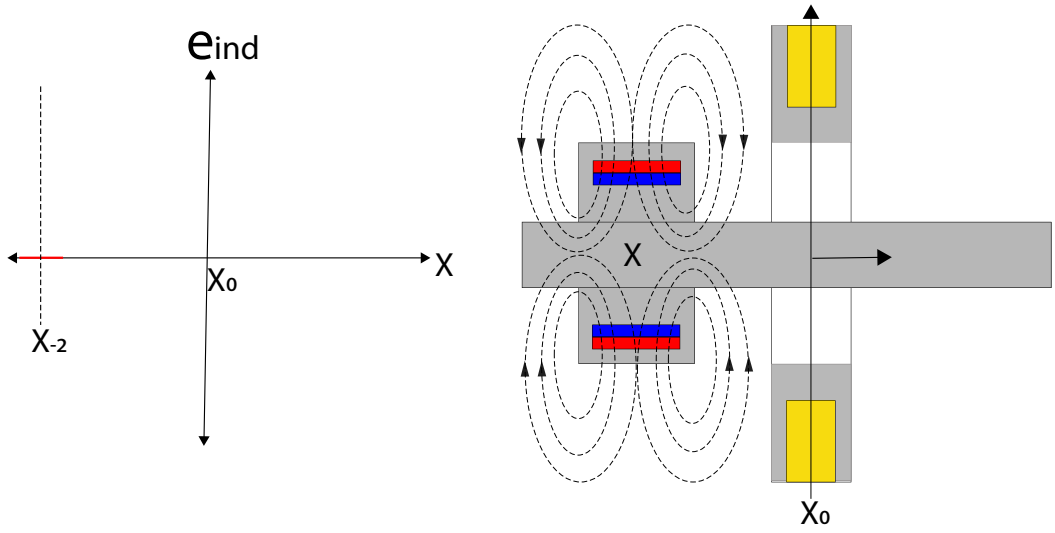


Figura 3.8: Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_{-2}

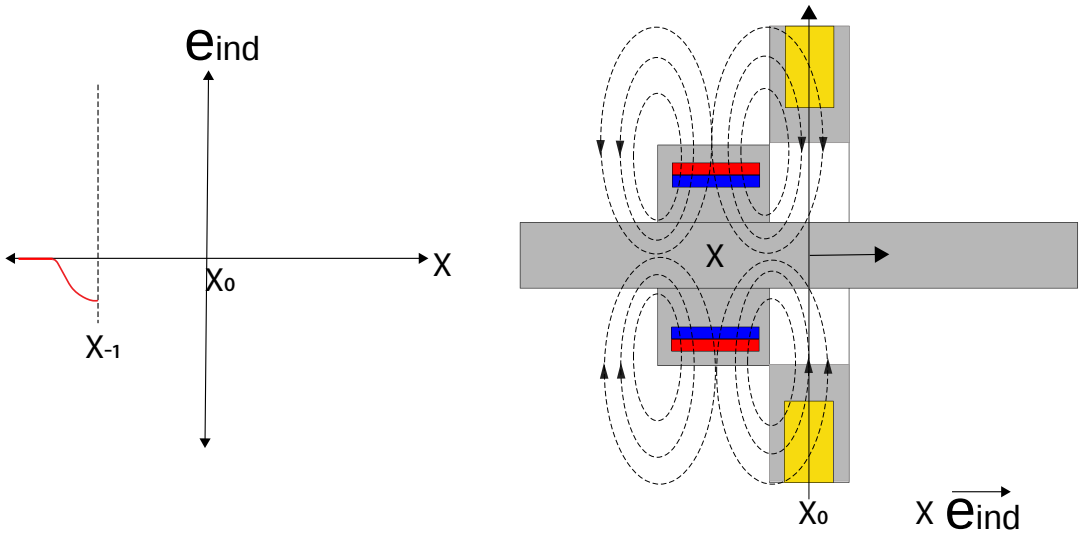


Figura 3.9: Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_{-1}

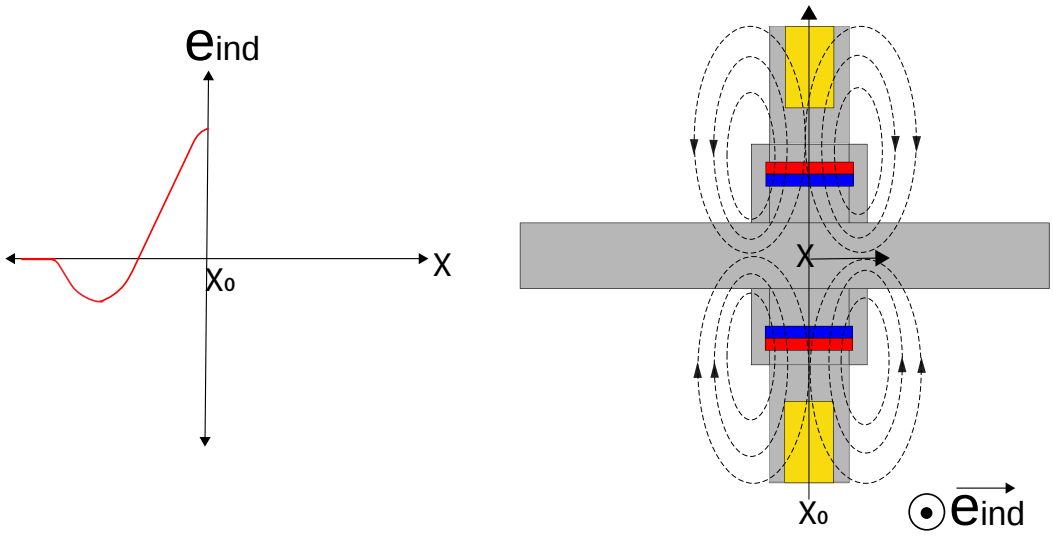


Figura 3.10: Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_0

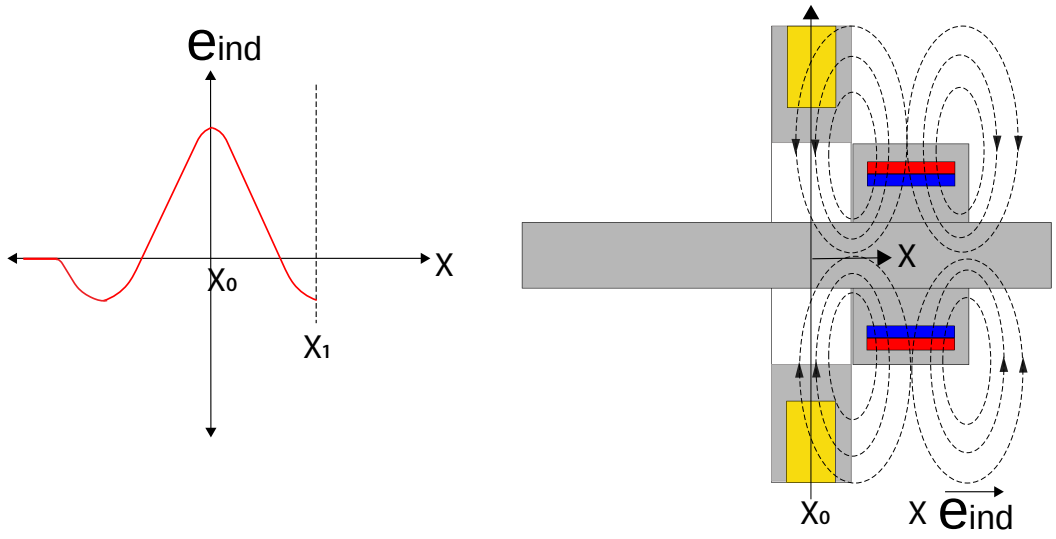


Figura 3.11: Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_1

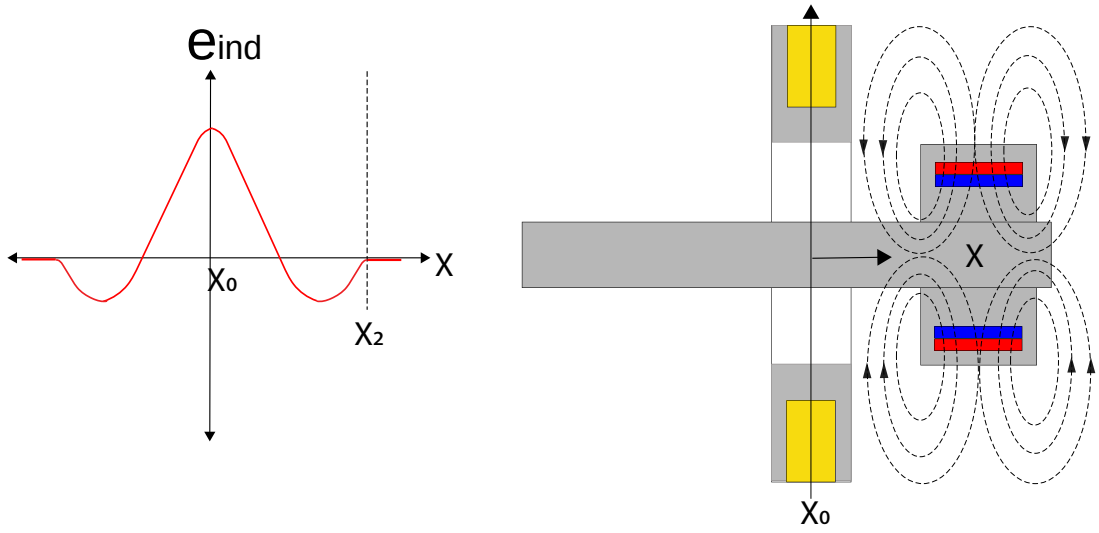


Figura 3.12: Voltaje Inducido en la Configuración 1x1 en la Posición x_2

El voltaje inducido en la bobina en las posiciones x_{-2} y x_2 es 0, debido a que las líneas del flujo del campo magnético no cortan en la superficie de la bobina, como se indica en las figuras 3.8 y 3.12 respectivamente.

Por otro lado, las líneas del flujo magnético del imán que están afuera de la superficie cambian de dirección, apuntando hacia el interior del traslador para retornar al polo sur del imán. De modo que en la posición x_{-1}, figura 3.9, cuando el imán está apunto de ingresar en el interior del estator, las líneas de flujo magnético que cortan a la superficie de la bobina están apuntando en dirección del polo sur del imán, y como este flujo magnético no se distribuye de forma uniforme y se acerca a una velocidad constante se induce un voltaje negativo con características referido al aumento del flujo magnético con dirección sur durante el transcurso del tiempo.

Cuando el imán empieza a ingresar al estator, la bobina empieza sentir un crecimiento de flujo magnético, con dirección al polo norte del imán, que atraviesa su superficie. El flujo que corta a la bobina sigue creciendo hasta llegar a su máximo cuando el imán está totalmente contenido en el estator, en la posición x_0 representado en la figura 3.10. De modo que durante este período se induce un voltaje positivo en la bobina que sale de la imagen donde el crecimiento de este voltaje está relacionado con el incremento del flujo magnético presente en la bobina durante esta etapa.

Durante el transcurso del instante cuando el traslador se ubica entre las posiciones x_0 y x_1, el traslador se desplaza por el estator y sale de este, de modo que la bobina presencia una disminución de las líneas de flujo magnético a medida que el traslador sale del estator, provocando una disminución paulatina de voltaje inducido. Luego las líneas de flujo del campo magnético que cruzan a la bobina apuntan hacia la dirección polo sur del imán generado nuevamente un voltaje negativo.

3.3.2. Configuración 2x1 Misma Polaridad

Esta configuración se utiliza dos módulos de traslador, de misma polaridad (polo norte apuntando hacia de forma radial y al exterior del estator), y de un único módulo de estator. De modo que la bobina tiene una dimensión más pequeña que los imanes. La imagen 3.13 muestra la evolución del voltaje inducido en la bobina durante el el trayecto del traslador.

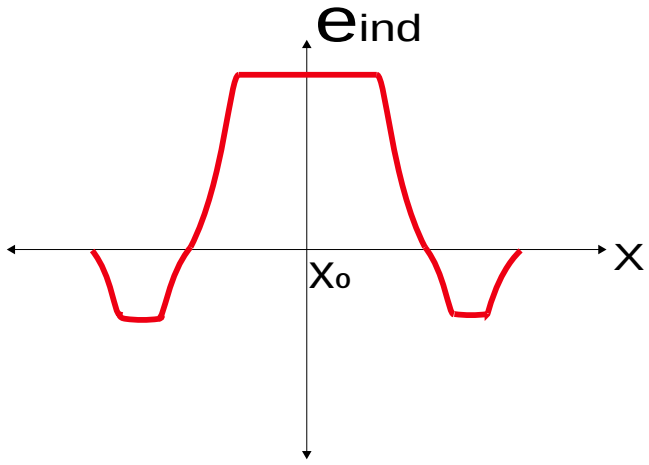


Figura 3.13: Voltaje inducido en la Configuración 2x1 NN

Haciendo un enfoque en el momento esencial de esta prueba, durante el desplazamiento del traslador en torno a la posición x_0, es el instante en que el traslador está contenido dentro del estator, es decir, los imanes estan dentro del estator durante el trayecto. De modo que la bobina presencia un flujo de campo magnético uniforme con dirección al polo norte del imán, de manera que al tener velocidad y el flujo magnético que corta la superficie de la bobina constante, se induce un voltaje positivo constante en la bobina durante este trayecto.

3.3.3. Configuracion 2x1 Polarización Contraria

En esta configuración se presenta dos módulos de traslador con polaridad contraria entre sí, un módulo de estator tendrá el norte apuntando hacia el exterior de manera radial, en cambio el otro posee el polo sur apuntando hacia el exterior del módulo estator de manera radial. Además, se utiliza un módulo de estator. La imagen 3.14 se ilustra el comportamiento del voltaje inducido durante el trayecto del traslador en el estator.
Como el traslador se compone por dos módulos con distinta polaridad, al acercarse al estator se inducirá un voltaje producido por el extremo del traslador que se aproxima, una vez ubicado en el centro el traslador el voltaje inducido es nulo debido a que ahora entra el segundo módulo con la polaridad diferente de manera que al seguir deplazandose se induce un voltaje contrario.

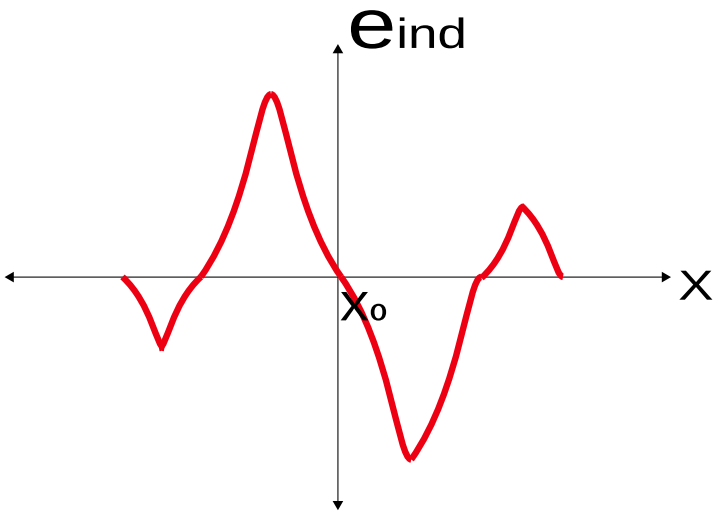


Figura 3.14: Voltaje Inducido en la Configuracipon 2x2 NS

3.3.4. Voltaje Inducido a Velocidad Constante

Por la ley de Faraday sabemos que el voltaje es proporcional a la variación del flujo magnético, en el caso aplicado a una máquina de movimiento lineal, el flujo que percibe la bobina varía con la velocidad el cual se desplaza el campo magnético.

$$|e_{ind}|| = |v| \cdot |B| \cdot l \cdot \sin(\pi/2) \tag{3.41}$$

Teniendo en consideración las dimensiones del radio de la bobina y la velocidad lineal del motor lineal Actuonix, las variables se definen como:

$$|v| = 0{,}02[m/s] \tag{3.42}$$
$$N = 200[vuelta] \tag{3.43}$$
$$r_{bobina} = 32{,}75 \cdot 10^{-3}[m] \tag{3.44}$$
$$l = 2 \cdot \pi \cdot r_{bobina} \cdot N = 41{,}15[m] \tag{3.45}$$

La maqueta del generador lineal está compuesta por plástico ABS, un material paramagnético, de modo que existe una gran dispersión de campo magnético lo que dificulta obtener la densidad del campo magnético en las bobinas mediante un análisis de circuito magnético. Debido a este problema se utilizó el software FEMM, figura 3.15, en el cual se diseñó una vista superior del generador lineal, teniendo en consideración los imanes de neodimio de grado N52, la orientación del campo magnético en los imanes y la permeabilidad magnética del plástico. Una vez realizado la prueba se obtiene la siguiente densidad del campo magnético en la bobina.

$$B_{coil} = 74{,}28[mT] \tag{3.46}$$

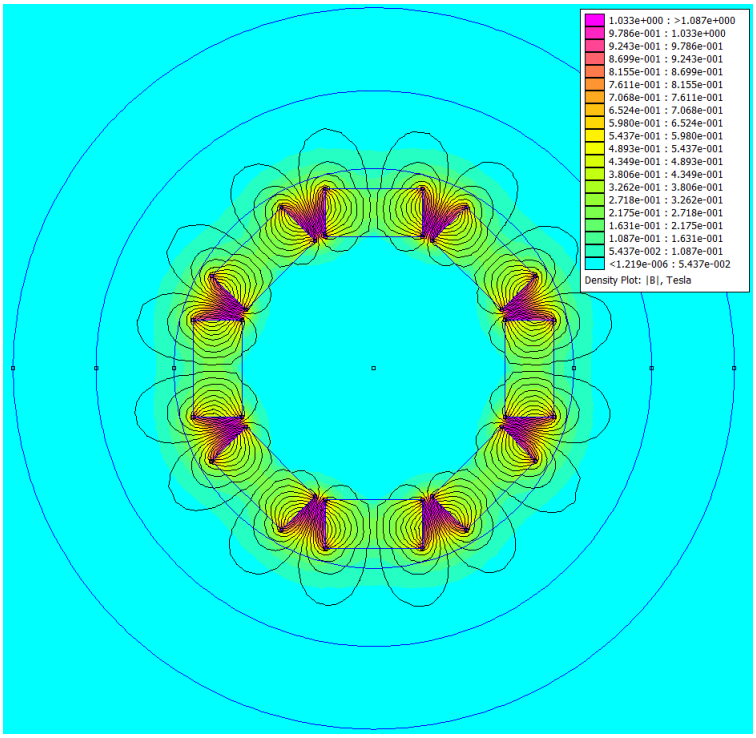


Figura 3.15: Vista Superior del Generador Lineal en FEMM

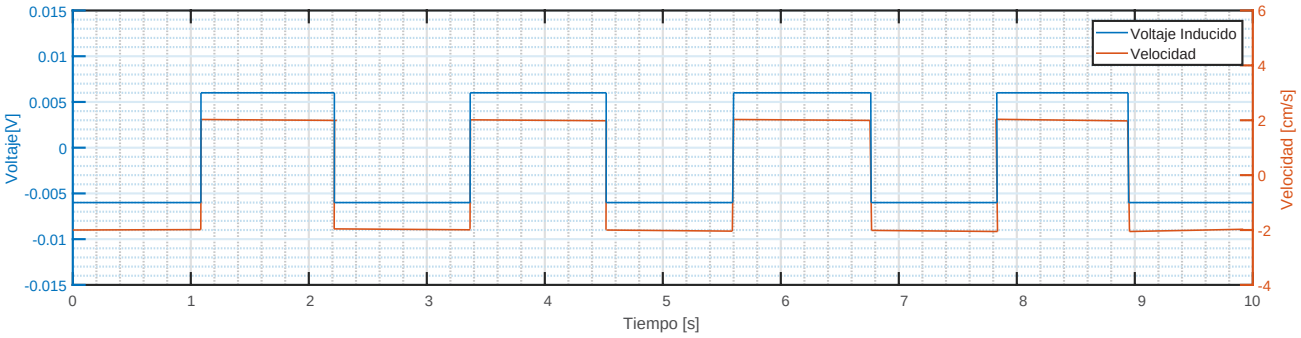


Figura 3.16: Voltaje Inducido Teórico

Considerando la ecuación 3.41 con las variables definidas se obtiene el siguiente voltaje inducido 3.16.

$$e_{ind} = 6{,}1[mV] \tag{3.47}$$

3.4. Simulaciones en Comsol

Esta sección trata de los resultados de los voltajes inducidos a las diferentes configuraciones propuestas, y también se observará las líneas del campo magnético entre los imanes. Cabe mencionar que los parámetros en los cuales se realiza estas simulaciones serán las mismas que en los resultados experimentales. La cual trata de que el traslador se desplaza a lo largo del estator y solamente se aleja 1[cm] de la estructura del estator para luego volver a entrar.

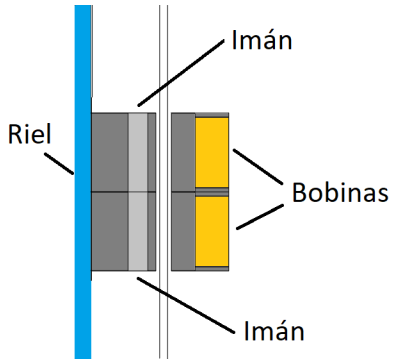


Figura 3.17: Representación en 2D del Generador Lineal 2x2 en Comsol

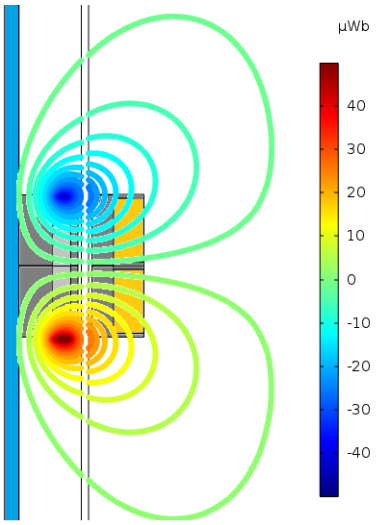


Figura 3.18: Líneas del Flujo Magnético en Configuración 2x2 NN

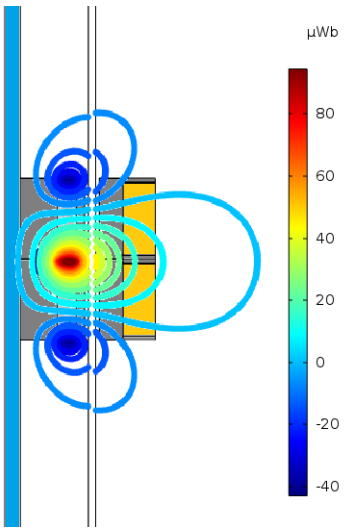


Figura 3.19: Líneas del Flujo Magnético en Configuración 2x2 NS

Como se observa en las figuras de las líneas del campo magnético 3.18 y 3.19, el flujo se cierra en los extremos de los imanes, en un trayecto desde la cara norte hacia la cara sur, pero en el caso de la figura 3.19 al tener dos imanes con diferentes sentido de polaridad magnética el flujo magnético se cierra entre las caras salientes del traslador, y solo una pequeña proporción del campo magnético se comporta como un flujo magnético de dispersión que regresa hacia el interior del traslador, en comparación con el traslador de la figura 3.18 en donde se presenta un campo de dispersión es mayor.

Las figuras 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23, muestran el voltaje inducido en distintos parámetros de configuración de imanes (NN o NS) y a diferentes forma de desplazamiento del traslador, en las cuales se simulan las configuraciones 2x2 con trasladores de misma y distinta polaridad a diferentes velocidades. Además, cabe mencionar que el traslador se mueve el doble de rápido en las señales de referencia de periocidad de 7.14[s] que en las de 14.28[s]. De modo que el voltaje inducido también posee una magnitud dos veces mayor que en los casos de las señales de período 14.28[s]. Para corroborar esto se compara las señales y se ajusta el tiempo de las señales de periocidad 7.14[s] para visualizar de forma más simple lo afirmado como se muestran en las figuras 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27.

Dado la ley de Faraday $e_{ind} = -N\frac{d\phi}{dt}$, el voltaje inducido es proporcional al cambio del flujo magnético en un determinado período de tiempo, de modo que si mantenemos un flujo constante a lo largo del estator y movemos un imán que se ubica en el centro del estator, el cambio del flujo magnético visto por las bobinas, debido por los cortes del flujo magnético en la superficie de la bobina, sería proporcional a la velocidad con la que se desplaza el imán. De modo que si la posición del imán con respecto al centro de la bobina varía de forma constante, se debe inducir un voltaje de pulsos cuadrados, como se ilustra en la imagen 3.28, donde la configuración corresponde a la imagen 3.29.

En los casos de las configuraciones 2x2 (o 1x1) sucede algo diferente, es debido a que el

estator presencia una distribución del campo magnético variante a lo largo de la bobina, a medida que el traslador se desplaza dentro de la estructura, de modo que el flujo de las líneas del campo magnético que cortan las superficies de las bobinas no es uniforme en todas las zonas del estator, induciendo de esta forma un voltaje proporcional al cambio de la posición del traslador con respecto a la bobina y a la distribución del campo magnético dentro del estator. Las imágenes se puede observar que el máximo del voltaje inducido sucede cuando la posición es **cero**, ya que en esta posición el centro de traslador se alinea junto con el centro del estator, de modo que todos los imanes están presentes en el interior del estator y las bobinas presencian un mayor flujo magnético que atraviesa sus superficies. Caso contrario en la configuración **2x2 NS** en el cual en la posición **cero** no se induce voltaje debido a que en esa posición se encuentra la transición de los imanes en el cual la polaridad cambia y el circuito magnético se cierra.

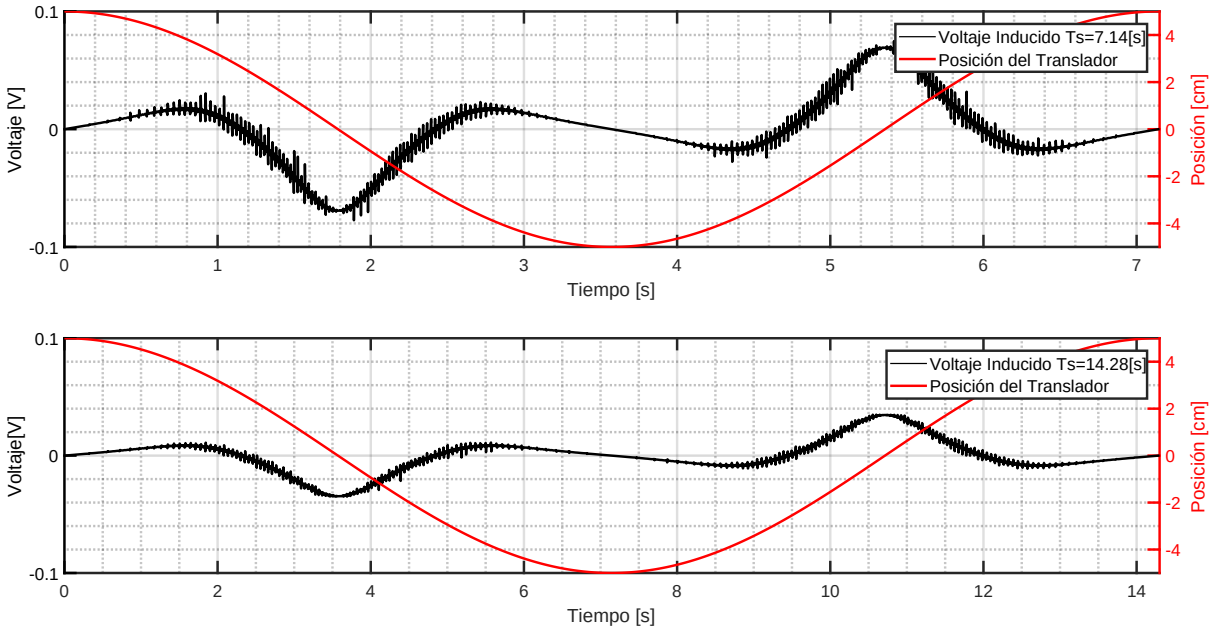


Figura 3.20: **2x2 NN:** Voltaje Inducido por Referencias de Posición Sinusoidales

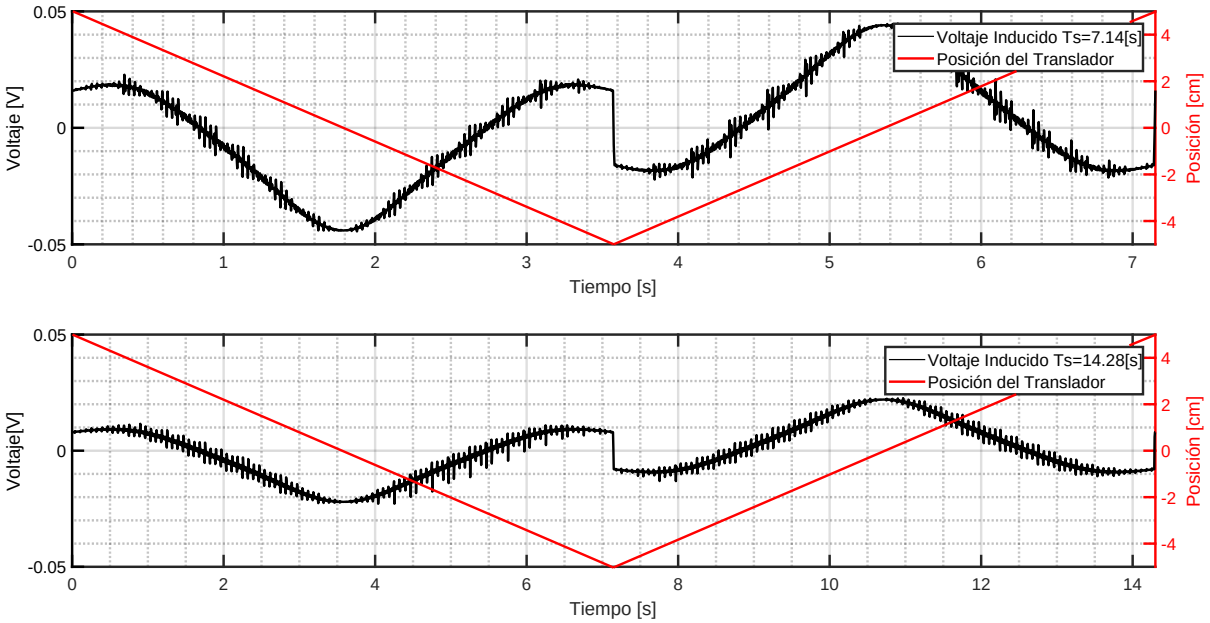


Figura 3.21: **2x2 NN:** Voltaje Inducido por Referencias de Posición Triangulares

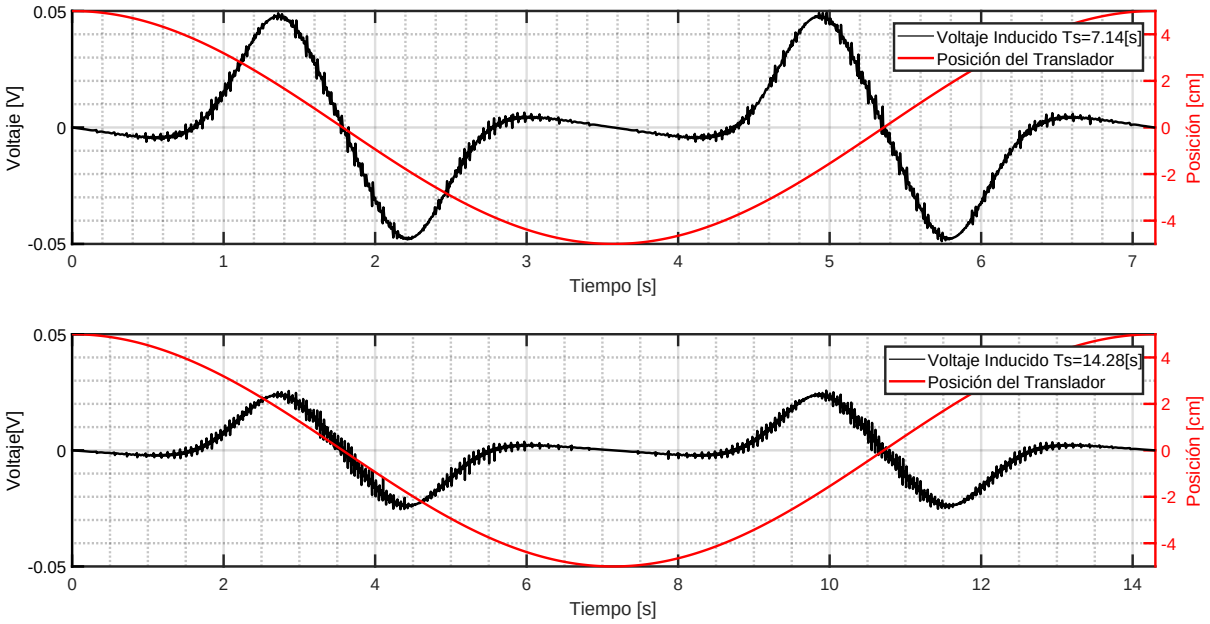


Figura 3.22: **2x2 NS:** Voltaje Inducido por Referencias de Posición Sinusoidales

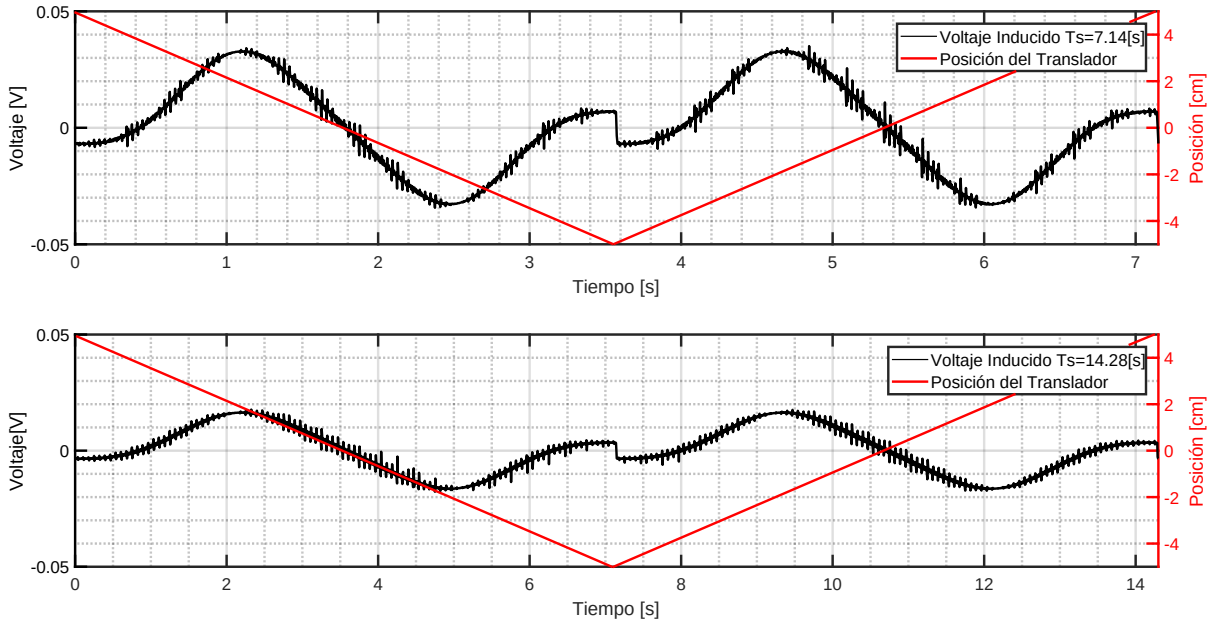


Figura 3.23: **2x2 NS:** Voltaje Inducido por Referencias de Posición Triangulares

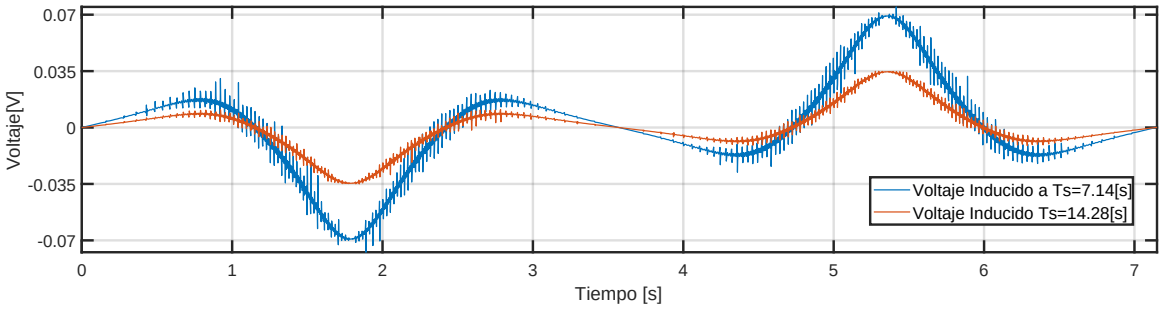


Figura 3.24: **2x2 NN:** Comparación de los Voltajes Inducidos por Referencias de Posición Sinusoidales

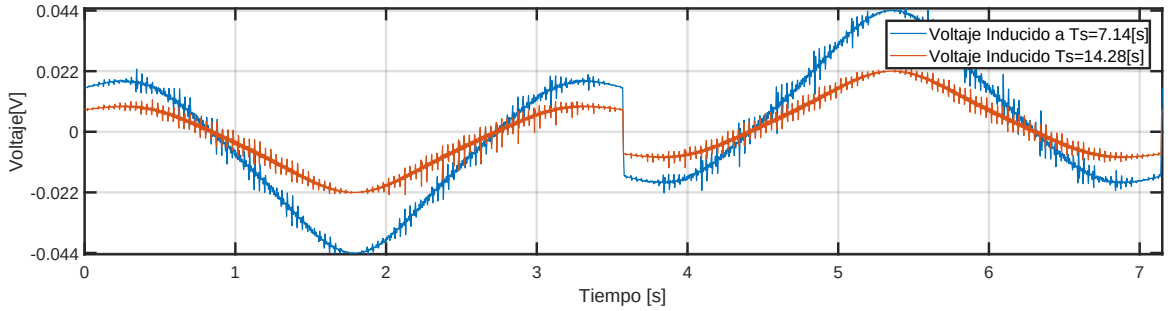


Figura 3.25: **2x2 NN:** Comparación de los Voltajes Inducidos por Referencias de Posición Triangulares

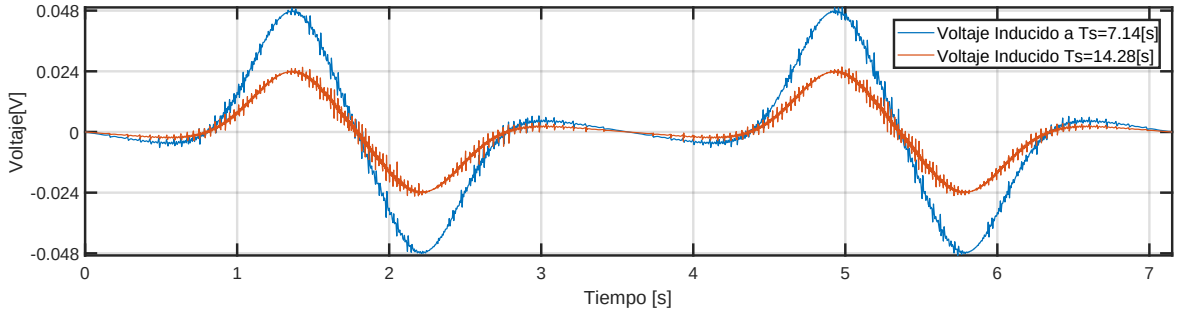


Figura 3.26: **2x2 NS:** Comparación de los Voltaje Inducido por Referencias de Posición Sinusoidales

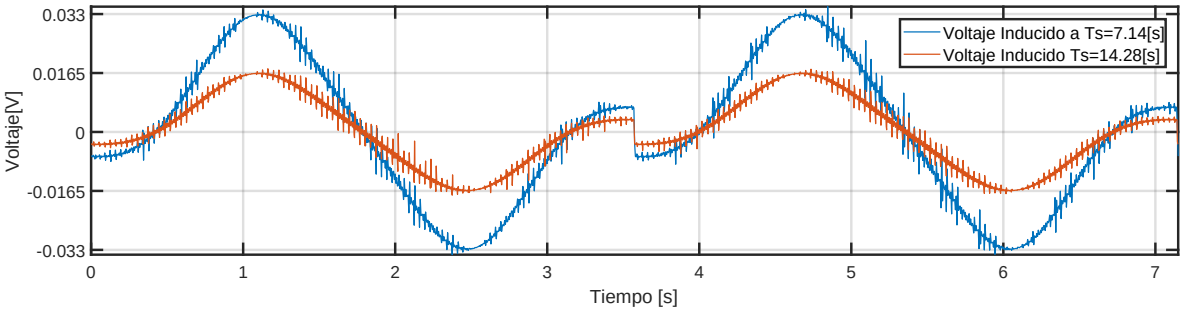


Figura 3.27: **2x2 NS:** Comparación de Voltajes Inducidos por Referencias de Posición Triangulares

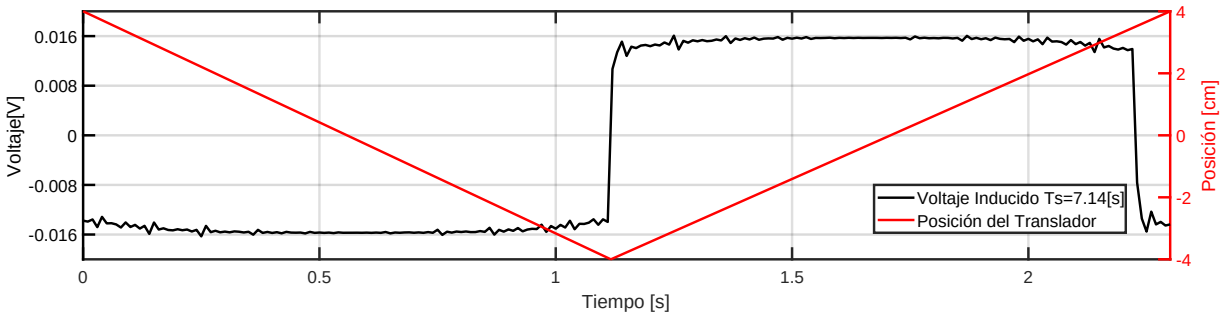


Figura 3.28: **2x1 NN:** Voltaje Inducido por Referencia de Posición Triangular

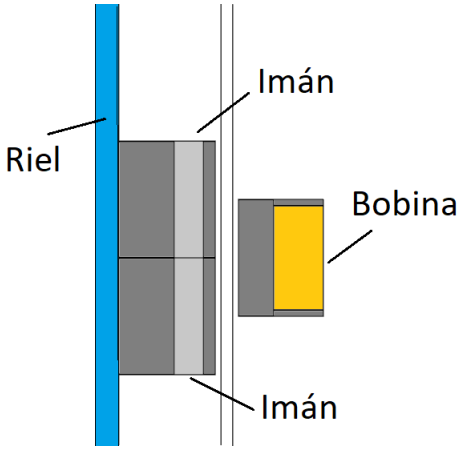


Figura 3.29: Representación en 2D del Generador Lineal 2x1 en Comsol

Capítulo 4

DISEÑO DE LA MAQUETA DEL GENERADOR LINEAL

Este capítulo se centra en el desarrollo del generador lineal, las piezas del estator, traslador y extras, las alternativas de diseño de piezas. Como también el diseño del control el cual se efectuó por sobre el motor lineal Actuonix con el Arduino UNO.

4.1. Diseño de Piezas

El diseño del generador se pensó en crearlo de forma modular, por piezas, de modo que se pueden realizar distintas pruebas para diferentes configuraciones de imanes en el traslador ó números de vueltas en el estator. Para el diseño del traslador se tomó primero en consideración los imanes de geometría rectangular de neodimio que se tuvo a disposición junto con la forma escogida de crear un estator y traslador cilíndrico. Esta geometría tiene la propiedad que el flujo del campo magnético proveniente del traslador corta de manera perpendicular a la superficie de las bobinas del estator, debido a que la circunferencia posee curvas suaves. Ya que en el caso de un generador con una estructura triangular o cuadricular se obtiene una menor eficiencia en cuanto al interacción del campo magnético con la superficie de las bobinas, por el hecho de que en las esquinas el flujo magnético no corta de manera perpendicular a la bobina. Tomando esto en consideración se optó la forma de crear un octágono con los imanes, un imán en cada cara, de manera de imitar la circunferencia.

4.1.1. Traslador A

Este traslador consiste en un octágono con los imanes expuestos a la superficie de manera de no incrementar la separación entre los imanes y el estator. Se realizó un octágono de lado

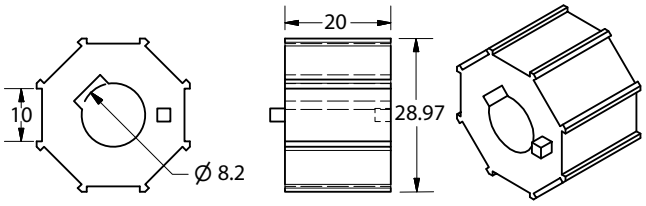


Figura 4.1: Esquema del Traslador A

Figura 4.2: Traslador A Impreso y con Imanes

12[mm] y con altura de 20[mm], para luego hacer un sacado centrado en cada cara de 10[mm] para poder depositar el imán y facilitar la unión con el módulo traslador. Una vez impresa un módulo del traslador se procedió a pegar los imanes a la pieza, se tuvo en consideración que todos los imanes tuviesen la misma polaridad en las caras externa del polígono. Esta etapa de fabricación resultó ser un poco engorrosa debido al tener problemas de adhesividad del pegamento con el imán y la pieza de plástico. Además, los imanes se repelían o se atraían entre ellos dependiendo de como se manipulaba los imanes resultando que algunos imanes ya unidos a la pieza se despegasen de sus lugares y salieran despedidos o se unían imán que se estaba tratando de pegar. Se decidió utilizar cinta adhesiva una vez que el imán se uniera al material.

4.1.2. Traslador B

Este diseño se basa en el modelo anterior, pero en vez de que los imanes estén encajados en la superficie de las caras del octágono, los imanes estarán contenido dentro de un cilindro. Lo que facilita la unión del imán con el traslador sin la necesidad de usar pegamento, pero al costo de aumentar la separación entre los imanes y las bobinas, lo que se transmite en una menor densidad magnética que cruzará por las bobinas. Tambíen se realizaron dos sacados cuadrados en una de las caras superficiales del traslador y se elevaron dos cuadrados en la otra cara, de modo de poder montar los módulos uno sobre otro.

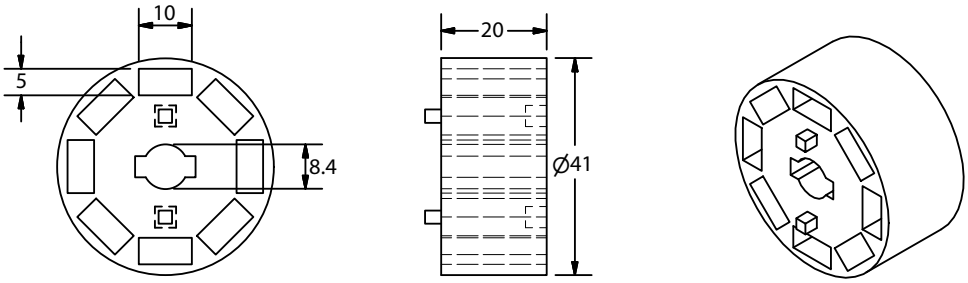


Figura 4.3: Esquema de Traslador B

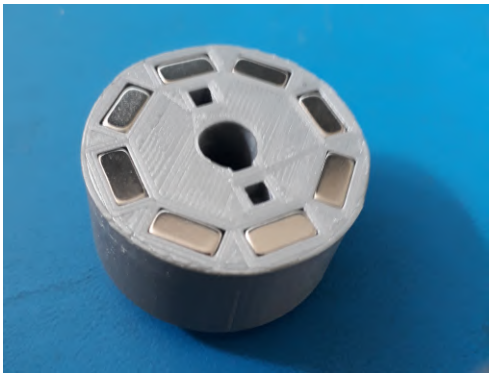


Figura 4.4: Traslador B Impreso y con Imanes Incrustados

Una vez impresa la pieza se armó el módulo traslador con los imanes. Este modelo tiene la ventaja de que la inserción de los imanes a la pieza sea sencilla, solo hay que tener cuidado al instalar un imán cerca del otro debido a que otros imanes pueden ser despedidos por la fuerza de repulsión entre mismos polos. Por esta razón fue que se dio uso a la cinta adhesiva para sellar el imán una vez que hubiese encajado en su lugar.

4.1.3. Tapa del Traslador

Para solucionar el problema se creo dos piezas adicionales que forman unas tapas que sellan las caras externas del traslador. Se diseñaron dos tapas, estas tapas son similares entre sí con la única diferencia de que sirven para diferentes encajes, es decir una tapa hembra, una de sus caras tiene 2 sacados en forma de cuadrados, y una tapa macho, en una de sus superficies sobresalen 2 pequeños cubos, con la intención de coincidir con los módulos externos del traslador.

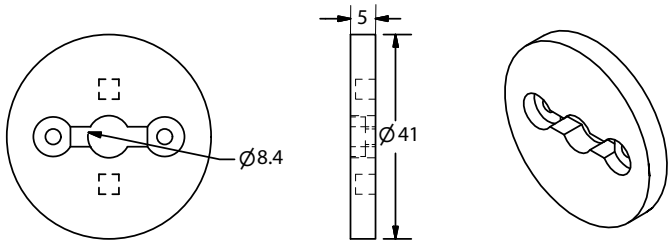


Figura 4.5: Esquema de las Tapas del Estator

4.1.4. Estator

El módulo de estator consiste en dos piezas iguales, esto es debido a que se creó la pieza del estator como un cilindro con dos tapas de geometría cuadrada relativamente grande en comparación con el cilindro. Esto genera un problema en el momento de imprimir la pieza, debido a que una de estas tapas estaría en el aire sin que la estructura misma del estator lo soporte. De forma que para imprimir la tapa superior requeriría de impresiones de columnas de plástico para tener una base en donde se formaría la tapa superior. Lo que conlleva a tener riesgo de romper la pieza una vez que se trata de extraer el plástico innecesario de las columnas, además aumentar el consumo del filamento de plástico. La imagen 4.6 representa el esquema de dos piezas de estator unidos para formar un módulo.

Las piezas se unen y se bobinan con 200 vueltas, con alambre esmaltado para bobinas con dimensión AWG 22, el cual la bobina consiste en cuatro capas de 50 vueltas cada una. En la siguiente imagen se presenta un módulo de estator.

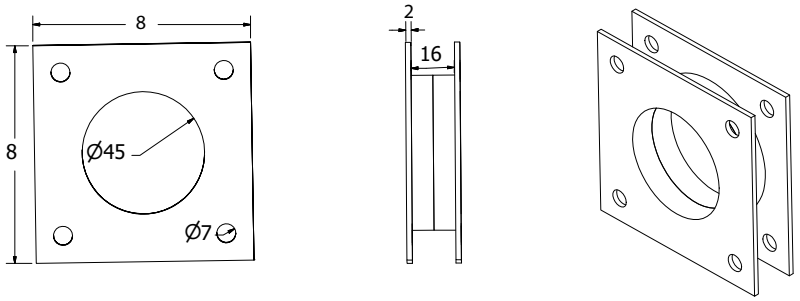


Figura 4.6: Esquema del Estator

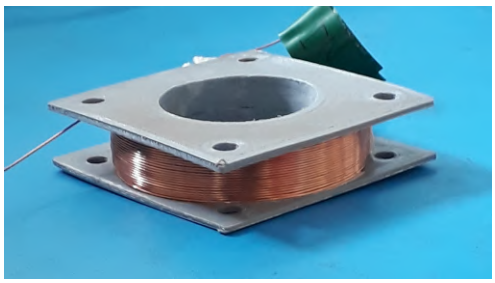


Figura 4.7: Estator Bobinado

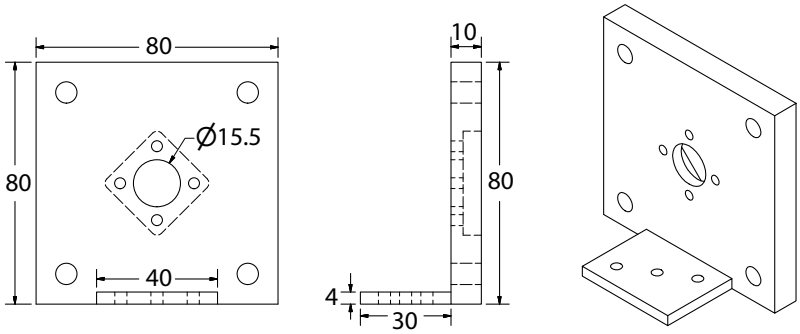


Figura 4.8: Esquema de la Tapa Sostenedora del Riel Metálico

4.1.5. Tapa Sostenedora del Riel Metálico

El desplazamiento del traslador transcurre a lo largo de un riel metálico cilíndrico de diámetro 8[mm] y de 20[cm] de largo. Para sostener el riel se crearon tapas que sostiene el riel metálico y limita el desplazamiento del traslador. Además las tapas tienen un sacado en el cual se ubica un rodamiento, con el fin no interferir con roces el desplazamiento del traslador que se mueve junto con el riel metálico. El esquemático de la tapa sostenedora se puede observar en al figura 4.8

4.1.6. Adaptador del Eje del Motor Actuonix y Riel

Para unir el eje del motor Actuonix al riel metálico se diseñó una pieza que pudiese adaptar estos dos elementos y unirlos. Esta pieza consiste en un cilindro semi-hueco que contiene 2 diferente diámetro interior para cada extremo del cilindro, un extremo con un diámetro ligeramente mayor que el diámetro del eje del motor Actuonix y el otro extremo con un diámetro similar al riel metálico, y un separador en la mitad del cilindro. Además de tener un lado plano con perforaciones para incrustar tornillos y así mantener fijo la unión entre las componentes y el adaptador.

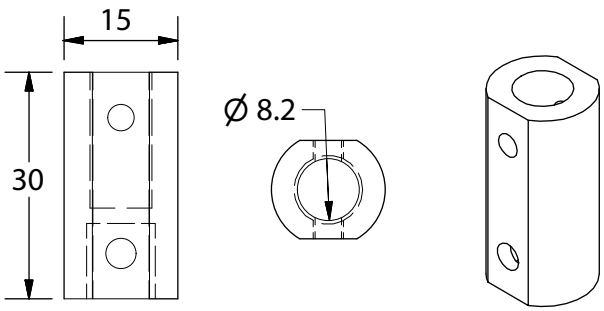


Figura 4.9: Esquema del Adaptador Motor-Riel

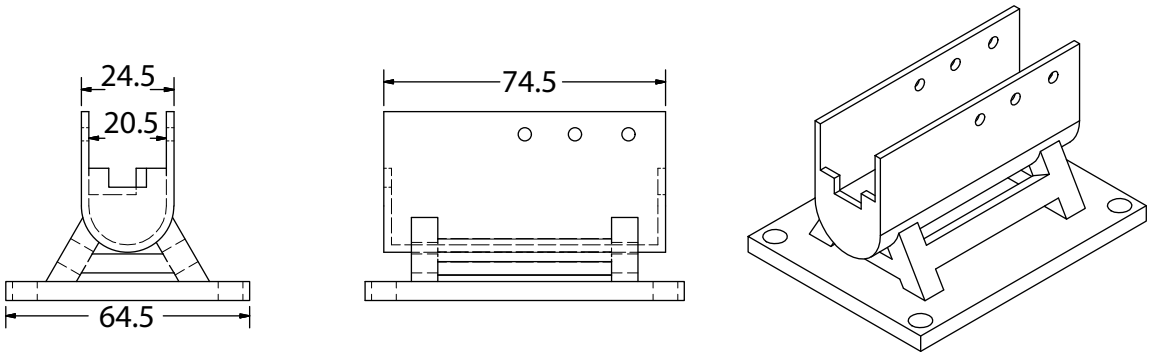


Figura 4.10: Esquema del Soporte del Motor Actuonix

4.1.7. Soporte de Motor Actuonix

Se necesitó la creación de una pieza que mantuviera inmóvil y firme al motor Actuonix, de modo que se creó un soporte para este, se conforma de un rectangulo en el cual se puede anclar en cualquier superficie con tuercas y de un recipiente que contenga al motor Actuonix. La imagen 4.10 ilustra el esquema del diseño del soporte.

Capítulo 5

DESARROLLO Y CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

5.1. Instrumentos y Recursos Utilizados

Este capítulo trata sobre los recursos que se utilizaron para la creación de la maqueta del generador y para realizar a cabo las pruebas. Como los programas y equipos utilizados para la elaboración del control sobre el desplazamiento del generador lineal, y los materiales para la creación de la estructura de pruebas y del generador lineal.

5.1.1. Hardware

Para mover el traslador se utilizó un motor linear Actuonix P16-P [8], que es un modelo con una velocidad máxima (sin carga) de 4[mm/s] y un estiramiento máximo de eje de 150[mm]. Además, posee una señal de retroalimentación. El Actuonix P16-P posee cinco cables, los cuales dos de estos son de alimentación para el estiramiento o retracción del eje dependiendo de la polaridad del voltaje que se aplican en las entradas 3 y 4, que corresponden a los cables de color rojo y negro respectivamente. Además posee una entrada para una referencia negativa (1), cable de color naranjo, y una entrada de referencia máxima (5), cable color amarillo y por último una salida que entrega el voltaje del potenciómetro (2) que es proporcional a la posición del fin del eje, siendo el valor mínimo (voltaje de referencia negativa) cuando el eje este totalmente retraído y un voltaje igual al valor máximo (voltaje de referencia positiva) cuando el eje este totalmente estirado.

Figura 5.1: Motor Lineal Actuonix Modelo P16-P

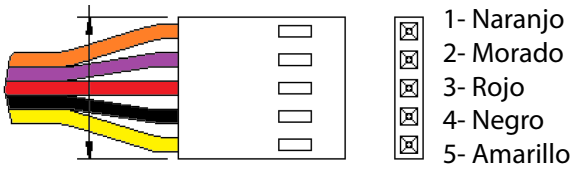


Figura 5.2: Señales del Motor Actuonix

Para controlar el motor lineal Actuonix se utilizó el driver MD1.3 2A Dual Motor Controller SKU DRI0002, que consiste en dos puentes H. Este driver además de tener entradas de alimentación posee cuatro entradas de señales de control y cuatro terminales de salida a los motores, dos por cada puente. Lo cual sólo se utilizó dos señales de control y dos terminales. Las señales son el Enable (Ex) que tiene la función de habilitar con un '1' lógico o deshabilitar con un '0' lógico el puente H, y el Motor Control (Mx) que es el encargado de la polaridad del voltaje de salida en los terminales que alimenta al motor Actuonix, con un '1' lógico se cambia la polaridad del voltaje a negativo y con un '0' lógico se obtiene un voltaje positivo en los terminales de salida.

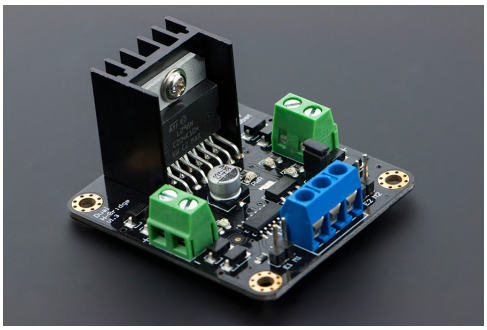


Figura 5.3: MD1.3 2A Dual Motor Controller SKU DRI0002

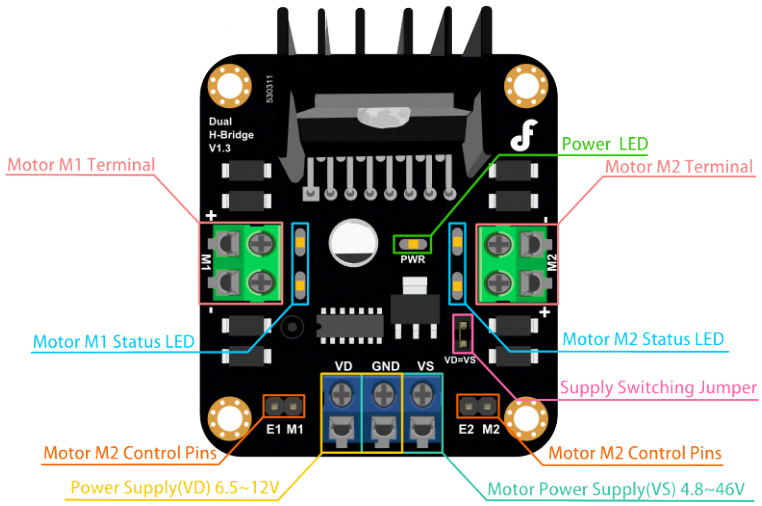


Figura 5.4: Conexiones del Driver

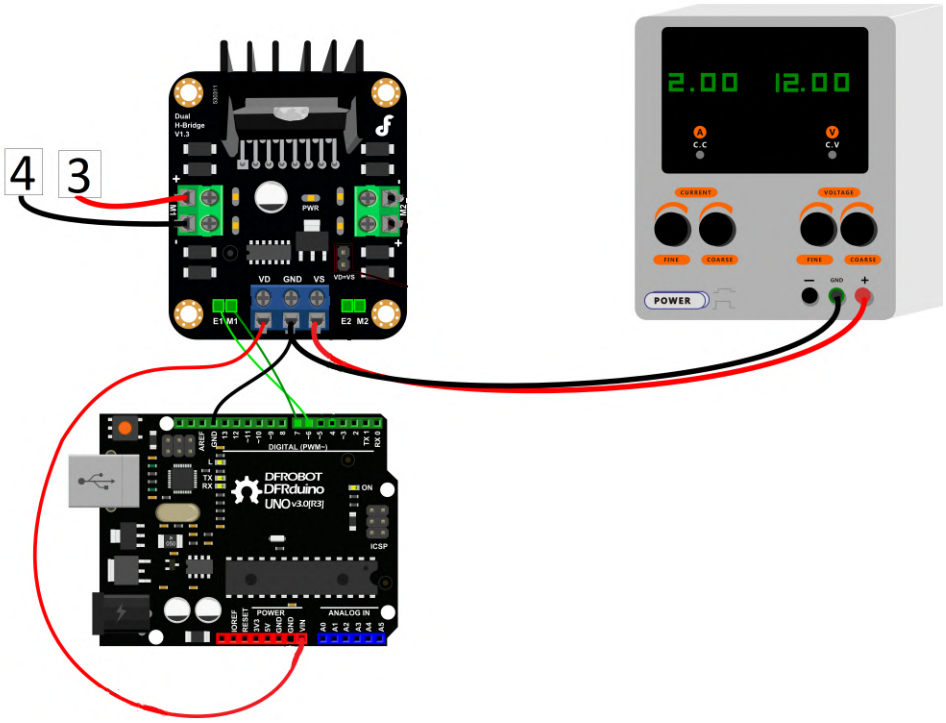


Figura 5.5: Conexiones entre el Driver y el Motor Actuonix

Ex	Mx	Terminal +	Terminal -	Acción
0	X	GND	GND	Inmóvil
1	0	GND	VS	Retraer
1	1	VS	GND	Estirar

Tabla 5.1: Lógica del Motor

Para la alimentación del puente H, se utilizó una fuente de 12[V] marca Weho modelo MS-15-12, de modo que los valores de voltaje aplicados a los terminales de entrada del motor Actuonix son de +12[V] y -12[V].

Para controlar el movimiento del motor Actuonix, se utilizó un Arduino UNO R3, usando dos entradas analógicas para la lectura de la posición del eje del motor Actuonix y de la referencia de voltaje que entrega un generador de señales. Además se utilizaron dos salidas digitales que van hacia las señales de control (Ex y Mx) de uno de los puentes H del MD1.3 2A Dual Motor Controller SKU DRI0002. Cabe mencionar que también se le dio uso de un pin digital extra para ver el tiempo en que el Arduino demoraba en realizar la tarea del control.

Figura 5.6: Fuente de voltaje 12[V] Weho MS-15-12]

Figura 5.7: Arduino UNO R3

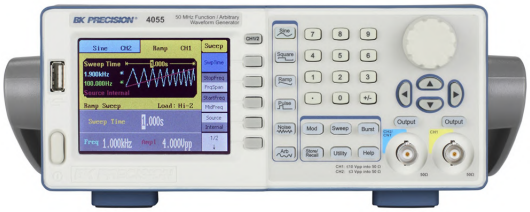


Figura 5.8: Generador de señales BK Precision 4055

Para generar las señales de referencia de posición del eje del motor Actuonix, se utilizó el generador de señales BK Precision 4055.

5.1.2. Software

Para la creación de las piezas que componen el generador, el estator y el traslador, se utilizó el programa de diseño 3D, Autodesk Inventor. Este programa incluye videos tutoriales para usuarios sin experiencias en dibujo y diseño de figuras 3D, que resultan ser intuitivos y suficiente para realizar diseños 3D de poca complejidad. Por otro lado, para la programación del Arduino UNO R3, se utilizó su propio programa compilador "Arduino" y el software "Cube Pro"que sirve para la configuración y crear el tipo de archivo en cual opera la impresora 3D Cube Pro.

5.1.3. Materiales

El material del cual está formado el generador es de filamentos de plástico ABS, se escogió este tipo de plástico debido a que es más resistente a golpes y a deformaciones, además de ser más fácil de pegar en otras superficies que el material PLA, que resulta una característica útil para unir las partes que forman los módulos del estator del generador lineal. Por otro lado, para el montaje se utilizó acrílico, fijadores, rodamientos y un riel de metal de diámetro de 8[mm], tornillos y tuercas para la construcción de la estructura en la cual el generador lineal estará fijo junto con el Arduino UNO R3 y el MD1.3 2A Dual Motor Controller SKU DRI0002.

Por último, se utilizaron imanes de neodimio N55 de dimensiones 2x1x0.5$[cm^3]$, de polaridad superficial en las caras con más áreas ($2x1cm^2$). Los imanes de neodimio N55 son los más potentes que se venden comercialmente en la actualidad, tiene un producto energético máximo de 414 446[kJ/m^3] o 52 56[MGOe].

5.2. Control sobre el Motor Lineal

Para imitar el movimiento lineal producido en las olas se utilizó un motor lineal Actuonix modelo P16-P junto con el Arduino UNO R3, donde este último recibirá la señal de

voltaje proveniente del potenciómetro del motor Actuonix y además emitirá las señales de control a uno de los puentes H del producto MD1.3 2A Dual Motor Controller, en el cual el controlador de motores transmitirá los niveles de voltajes de la alimentación del motor lineal Actuonix indicando la detención, estiramiento o retracción del eje del motor.

El movimiento de las olas tiene una característica periódica que depende de diversos factores, y para crear una señal analógica que simule la posición de la superficie marítima por el movimiento de las olas, además de poder modificar la señal, como frecuencia o amplitud en tiempo real una vez que el Arduino este programado, es algo engorroso. Por lo que se decidió por una alternativa más sencilla de crear un controlador que sea capaz de seguir un voltaje de referencia, de la posición, y ejercer una actuación en el motor Actuonix para poder ubicar la posición del fin del eje a la referencia dada.

Para este controlador se utilizaron dos alternativas. Se tiene en consideración la lógica con el cual el controlador de motor MD1.3 2 funciona (tabla 3.1), se toma dos pines I/O del Arduino para tener control sobre la señal Ex y Mx, además de dos entradas analógicas (A0 y A1) para la lectura del voltaje de referencia y del voltaje del potenciómetro del motor Actuonix que es un voltaje proporcional a la posición del fin del eje. Se diseña dos controladores.

5.2.1. Control por Histéresis

Es un control sencillo de programar, en donde se comparan las señales de referencia y de la posición del eje del motor, dando origen al error (e). Luego de la comparación se verifica si este error está dentro de un intervalo dado por δ, dependiendo de la situación se obtienen las actuaciones.

- $e < -\delta/2$**:** La posición es menor que el valor de referencia, por lo que se habilita las señales Ex y Mx, de modo que el motor se acciona para estirar el eje.

- $\delta/2 < e < -\delta/2$**:** La posición posee un valor cercano a la referencia, debido a esto se deshabilita la señal Ex para detener el motor.

- $e > \delta/2$**:** La posición es mayor que la referencia, lo que genera que se habilita la señal Ex y deshabilita la señal Mx para encender el motor y retraer el eje.

En presencia de velocidades lentas, es decir cuando la posción del traslador no varía mucho durante un transcurso determinado de tiempo, el controlador no genera una respuesta deseada que se traduce por lo general en la detención del motor. También cabe mencionar que todo depende de cuan grande sea el tamaño de la variable δ, que representa el intervalo que puede variar la señal una vez que se acerca del valor deseado de la referencia, de modo de que si la señal es muy ruidosa el motor empezará a vibrar al retraer y estirar el eje en breves periodos de tiempo.

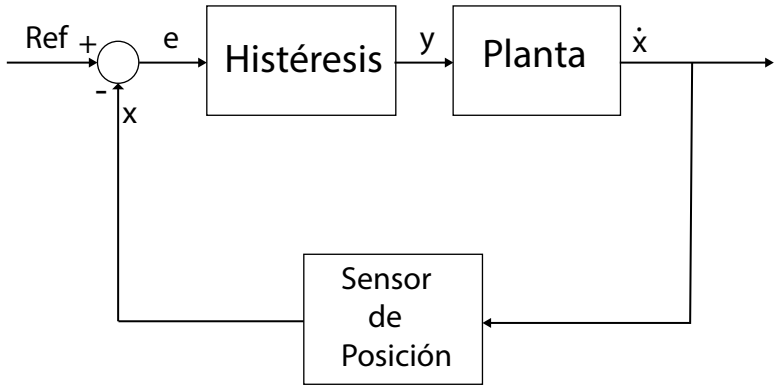


Figura 5.9: Diagrama de Control de Histéresis

5.2.2. Control PI en Tiempo Discreto

La velocidad en la que se desplaza el eje del motor no es lineal, debido a que solo posee tres velocidades la cuales dependen del voltaje de alimentación del motor Actuonix, una velocidad máxima de estiramiento en vacío de 46[mm/s] cuando se alimenta con +12[V], una velocidad en vacío en el sentido contrario (de retracción) de 46[mm/s] cuando es alimentado por -12[V] y a una velocidad 0[mm/s] en el momento en que no se aplica voltaje al motor Actuonix. De manera que no es posible implementar solamente un controlador PI, debido a esto es que se utiliza algunas herramientas como la discretización del problema y el uso de la modulación PWM, de modo de obtener una velocidad proporcional a los ciclos de trabajo de la PWM.

Primero se definió un sistema SISO en variables de estado, donde x(t) es la variable de estado que representa la posición del fin del eje del motor, y(t) la variable de salida, la actuación aplicar al motor Actuonix, y sea e(t) la variable de entrada que en este caso representa el error entre la referencia que entrega el generador de señales y la posición del eje del motor.

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot e(t) \tag{5.1}$$
$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot e(t) \tag{5.2}$$

Luego aplicamos la transformada de Laplace a ambas ecuaciones e ignoramos las condiciones iniciales.

$$s \cdot X(s) = A \cdot X(s) + B \cdot E(s) \tag{5.3}$$
$$Y(s) = C \cdot X(s) + D \cdot E(s) \tag{5.4}$$

Se despeja X(s) en la ecuación 5.3 y se reemplaza en 5.4.

$$Y(s) = C \cdot \Big(\frac{B \cdot E(s)}{s - A}\Big) + D \cdot E(s) \tag{5.5}$$

$$Y(s) = E(s) \cdot \Big(\frac{C \cdot B}{s - A} + D\Big) \tag{5.6}$$

Para representar el modelo de la actuación Y(s), se considera igualar la ecuación 5.6 con una salida Y(s) de un controlador PI(ecuación 5.7).

$$Y(s) = \Big(P + \frac{I}{s}\Big)E(s) \tag{5.7}$$

$$E(s) \cdot \Big(\frac{C \cdot B}{s - A} + D\Big) = \Big(\frac{P \cdot s + I}{s}\Big)E(s) \tag{5.8}$$

Donde el primer término del lado izquierdo de la ecuación 5.7 representa al control PI, E(s) el error y Y(s) es la actuación.

Para que se cumpla la igualdad en 5.8 se debe cumplir lo siguiente.

$$A = 0 \tag{5.9}$$

$$C \cdot B = I \tag{5.10}$$

$$D = P \tag{5.11}$$

Al tener libertad de elección en las variables C y B, se escoge B=1 y C=I.
Luego reemplazando estos coeficientes en las ecuaciones de Variables de Estado (ecuaciones 5.1 y 5.2) en tiempo continuo se obtiene lo siguiente.

$$\dot{x}(t) = e(t) \tag{5.12}$$

$$y(t) = I \cdot x(t) + P \cdot e(t) \tag{5.13}$$

Se realiza la transformada Z a estas ecuaciones para poder implementar el control en el Arduino.

$$x[k] = T_s \cdot e[k] + x[k-1] \tag{5.14}$$

$$y[k] = I \cdot x[k] + P \cdot e[k] \tag{5.15}$$

Donde T_s es el período de muestreo del controlador PI.

La actuación y[k] no es lineal y está referido a la tabla de estado 3.1, de forma que las acciones se definen de la siguiente manera.

La planta al recibir una señal de actuación mayor a cero, la planta lo considera como un **1** y se estira a máxima velocidad. De manera análoga si recibe una señal de actuación menor a cero la planta realiza la acción de retraerse a máxima velocidad. Por lo que se integra una modulación PWM entre la actuación y la planta. Para esto es necesario tener un período

Ex	Mx	Acción	Valor
0	X	Inmóvil	0
1	0	Retraer	-1
1	1	Estirar	1

Tabla 5.2: Valores de Acción

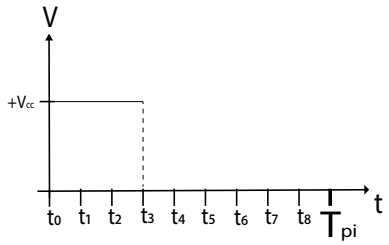


Figura 5.10: Ejemplo del PWM de una actuación de y[k]=0.3

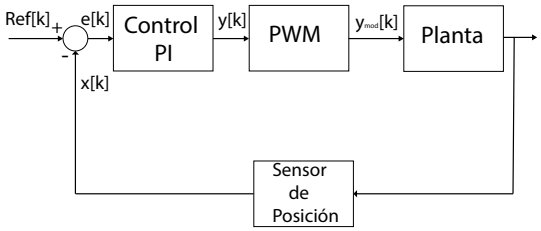


Figura 5.11: Diagrama de Control

fijo en el cual se efectúa el control PI, y dividir la actuación en varios tramos de tiempo para que la planta entregue una velocidad proporcional al ciclo de trabajos, de esta manera el siguiente período de tiempo en el cual se integra nuevamente el control PI ya se efectúo una acción de manera proporcional a lo que se deseaba.

Para este caso en particular el tiempo de muestreo es de $0.5[\mu s]$ que equivale el tiempo en la cual se demora el Arduino en ejecutar el programa. En consecuencia el tiempo de muestreo que corresponde al control PI es de $5[\mu s]$, ya que se decidió usar la modulación PWM en diez tramos de períodos de tiempo, como se muestra en la figura 5.10, de esta forma se obtiene diez velocidades diferentes en ambos sentidos.

El parámetro de proporcionalidad ($K_p = P$) se obtuvo realizando pruebas con una referencia

de señales cuadradas y variando el parámetro P hasta dar con el valor de P=0.2 el cual fue el momento en que el motor dejaba de oscilar una vez que la posición igualaba a la referencia. En cambio el parámetro I se eligió el valor de I=0.002, una magnitud 100 veces menor que el parámetro P de dar menos peso a los valores anteriores.

5.2.3. Pruebas de los Controladores

A continuación se presenta la comparación de la señal de referencia de la posición (señal segmentada de color rojo) y el voltaje entregado por el potenciometro del motor Actuonix (señal azul) el cual representa la posición del fin del eje. Cabe mencionar que tambíen se muestra el desempeño del controlador 'Lineal Actuator Control Board' que entrega el fabricante del motor Actuonix.

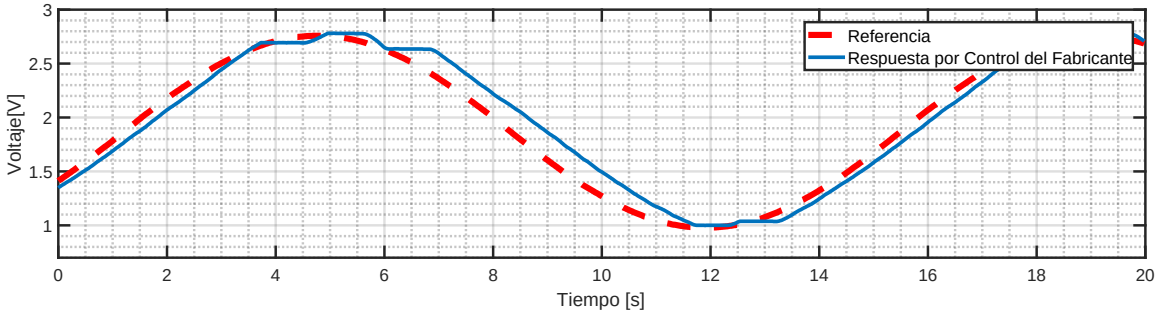


Figura 5.12: Seguimiento de la Referencia del Controlador del Fabricante

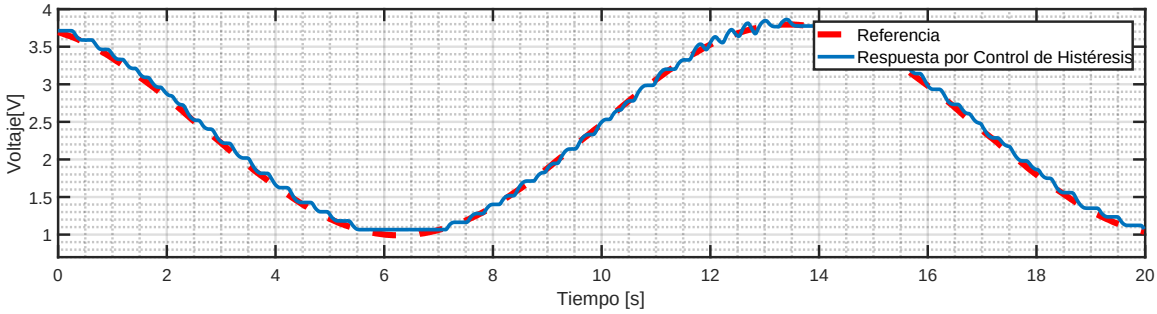


Figura 5.13: Seguimiento de la Referencia del Controlador por Histéresis

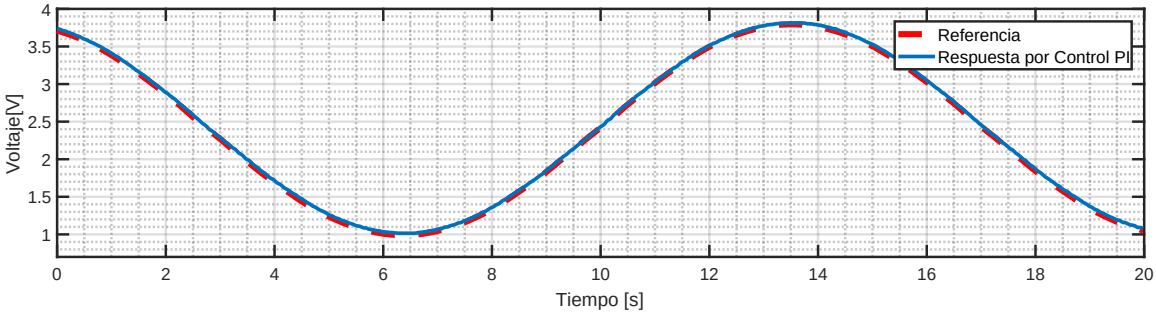


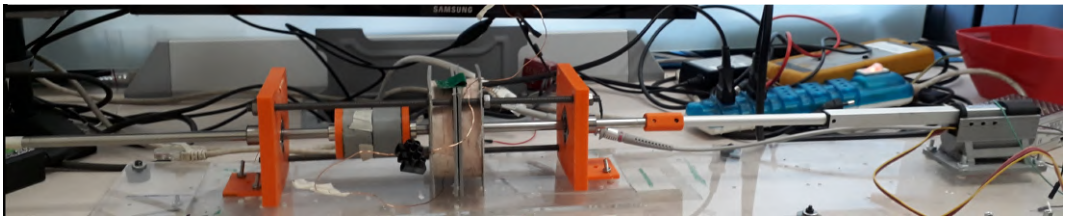
Figura 5.14: Seguimiento de la Referencia del Controlador PI en Tiempo Discreto

Se puede apreciar que el controlador por Histéresis posee ripples que es asociado al tamaño del δ y por la característica de la acción del motor de funcionar siempre en velocidad máxima y en detención, por lo que en las curvas suaves se presenta mayor oscilaciones o como también puede estar detenido debido a que el error es menor al δ, en cambio el control PI logra seguir la referencia al funcionar a una frecuencia relativamente grande para poder recrear diferentes niveles de velocidades y así ajustarse a la señal de referencia, por lo que logra seguir a la referencia. Cabe mencionar que el control está limitado por la velocidad máxima en la cual el eje del motor Actuonix se desplaza, de modo a que si la referencia es una frecuencia alta el Controlador no podrá seguirla.

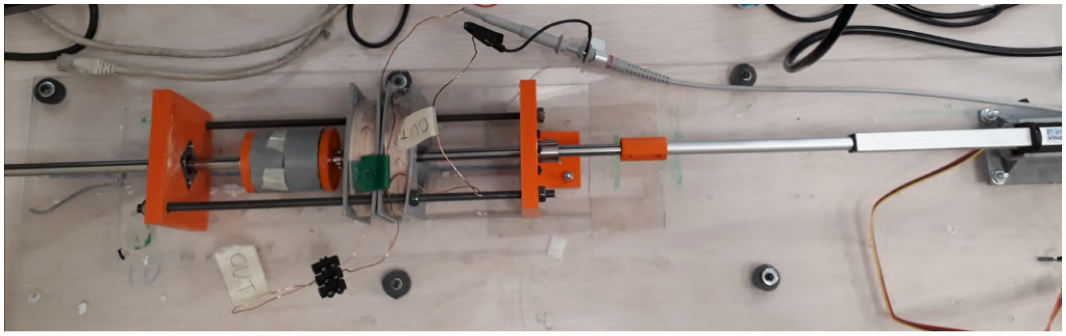
5.3. Pruebas Experimentales

Para realizar las pruebas se montó el generador en una base de acrílico, junto con el motor Actuonix. Se utilizó el generador de señales para crear la señal de referencia a la cual la posición del traslador seguiría y el osciloscopio para medir la señal de posición del generador lineal, el voltaje inducido en el estator y la señal de referencia del generador de señales.

Se midió el voltaje inducido en el estator en las distintas configuraciones que se realizó variando el número de los módulos de estator y de traslador, como también cambiando la polaridad magnética de los módulos de traslador. Cada prueba consiste en el ingreso y salida total del traslador en la estructura del estator, de manera que los imanes del traslador sólo se alejan 1[cm] del estator una vez estando afuera, momento en que la abrazadera egresa del estator, y luego vuelve a entrar al estator. También se varía la periocidad entre 14.28[s] y 7.14[s] de la señal de referencia y la forma (triangular y sinusoidal) de esta para ver el efecto en el comportamiento del voltaje inducido. En cuanto al largo del recorrido del traslador se toma en consideraciones las dimensiones de las componentes que ocupan lugar en el trayecto, en la cual para toda configuración el número de tapas de traslador y de abrazaderas son 2 unidades de cada uno, que cumplen con la tarea de sellar y mantener los imanes dentro del traslador, además de mantener fijo el traslador en el riel metálico respectivamente.



(a) Vista Lateral



(b) Vista Superior

Figura 5.15: Generador Lineal

Componentes	Espacio[cm]
Módulo Estator	2
Módulo traslador	2
Abrazadera	0.5
Tapa de traslador	0.5

Tabla 5.3: Espacio que ocupan las componentes en el trayecto de las pruebas

Configuración	Módulo de Estator [unidad]	Módulo de traslador [unidad]	**Recorrido[cm]**
1x1	1	1	**6**
2x1	2	1	**8**
1x2	1	2	**8**
2x2	2	2	**10**

Tabla 5.4: Recorrido del traslador que realiza en cada sentido de desplazamiento

5.3.1. Voltaje Inducido en Distintas Configuraciones

En los siguientes gráficos se observará el voltaje inducido en las bobinas en relación a la distancia en la que se encuentra el traslador con el estator la posición **cero** se refiere posición del traslador cuando está en el centro de la bobina. Las configuraciones se definen de la siguiente manera **(Número de Módulos de traslador)x(Número de Módulos de Estator)(Tipo de Polarización)**, donde el tipo de polarización se define **NN** para configuraciones con dos módulos de misma polaridad magnética y **NS** para configuraciones en cuales los módulos de traslador poseen distintos sentidos de polarización magnético entre sí.

El ruido presente en el voltaje inducido en las figuras es dado por la vibración del eje del motor Actuonix que es generado por la característica de la modulación PWM. Además de que se genera un pequeño ángulo de ataque del eje del motor con respecto al riel metálico del generador lineal, unido por la pieza adaptadora, lo que al estirar el eje se ejerce un mayor torque sobre este provocando una torsión en el eje lineal. Por otro lado se genera una vibración en todo el eje del motor Actuonix cuando el potenciómetro (encargado de entregar un voltaje proporcional a la posición del fin del eje) se desplaza en el interior del eje torcido a lo largo de un tornillo sin fin. Debido a estas vibraciones se produce cambios en el sentido de la velocidad del traslador, formando los cambios de pendientes cuando el voltaje inducido está creciendo y decreciendo. No se utilizó un filtro analógico en la medición del voltaje inducido, ya que de ser así no se podría analizar el efecto que induce la velocidad del traslador al voltaje inducido.

Las imágenes de los resultados obtenidos por una señal de referencia para la posición de forma triangular estan adjunto en el Apéndice B.

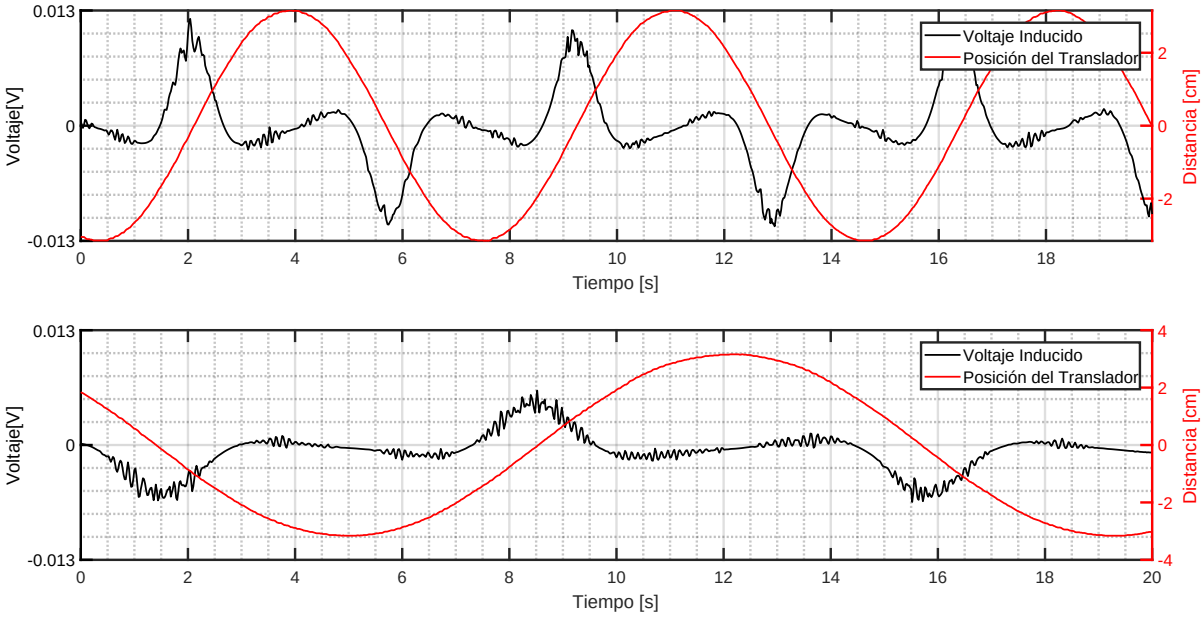


Figura 5.16: **1x1:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s]

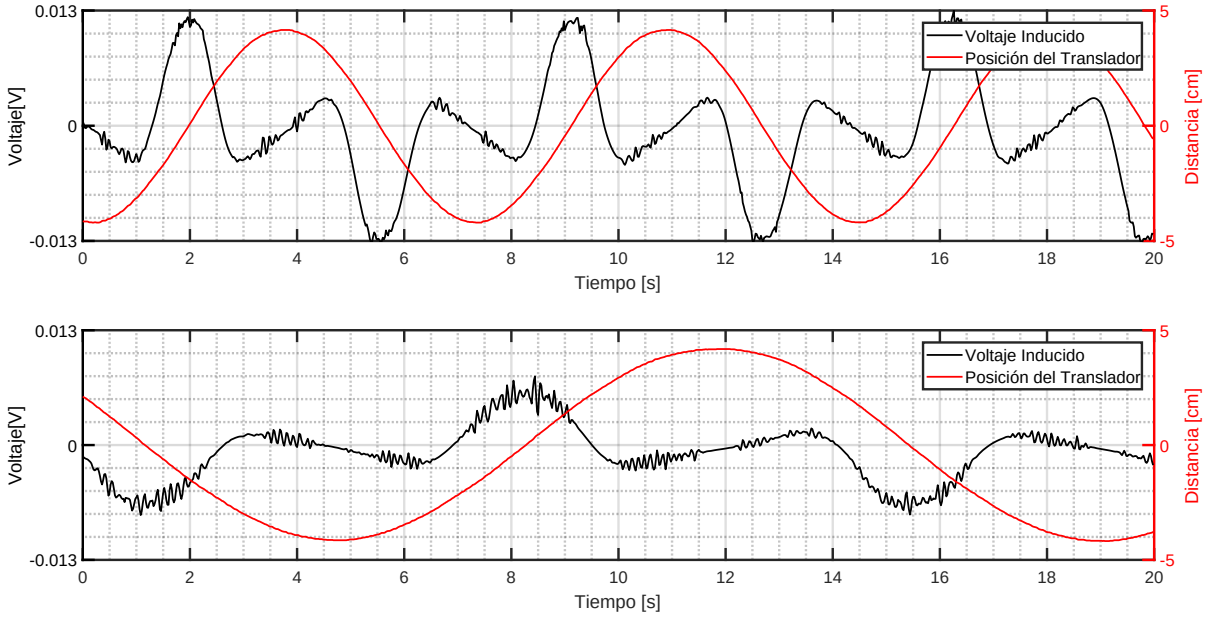


Figura 5.17: **1x2:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s]

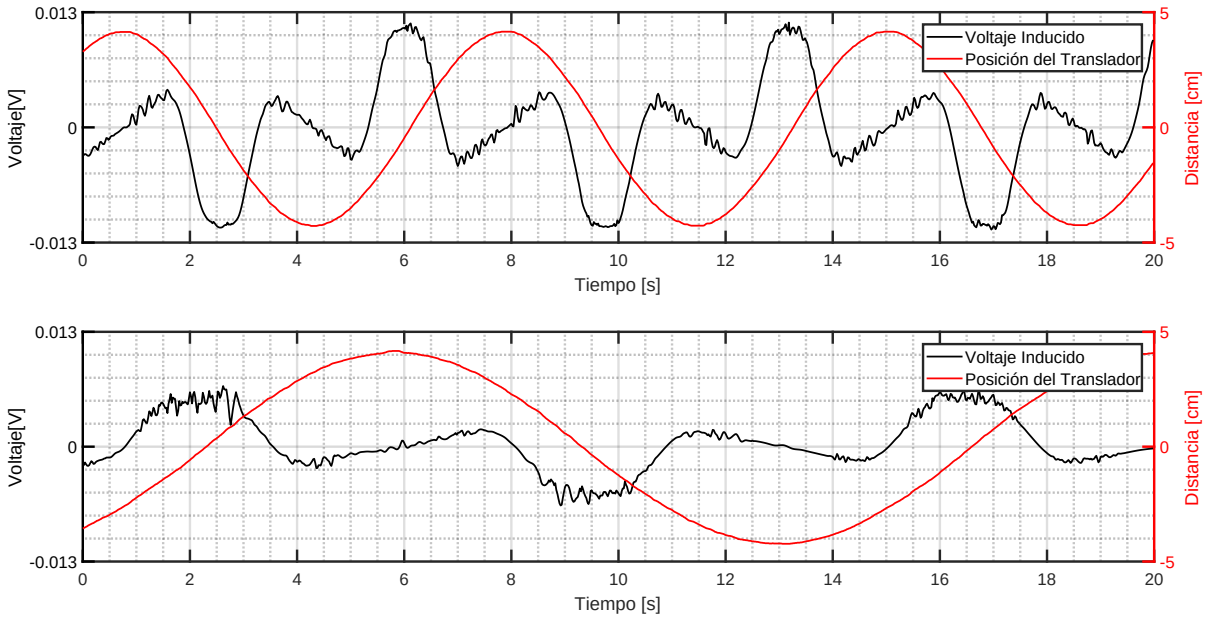


Figura 5.18: **2x1 NN:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s]

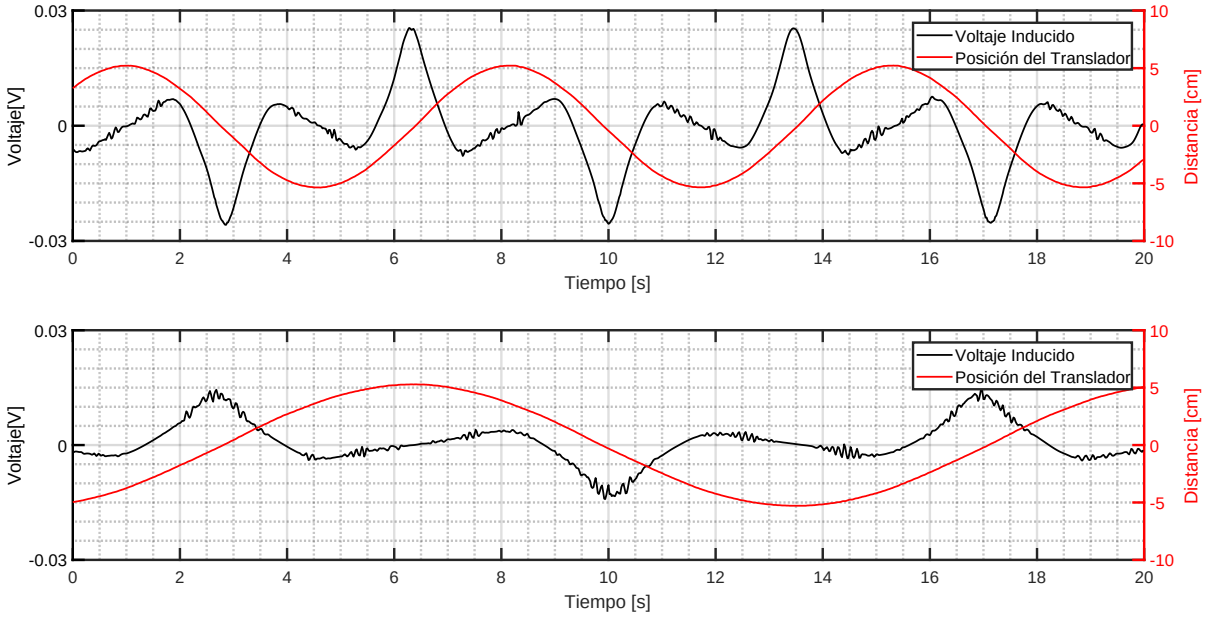


Figura 5.19: **2x2 NN:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s]

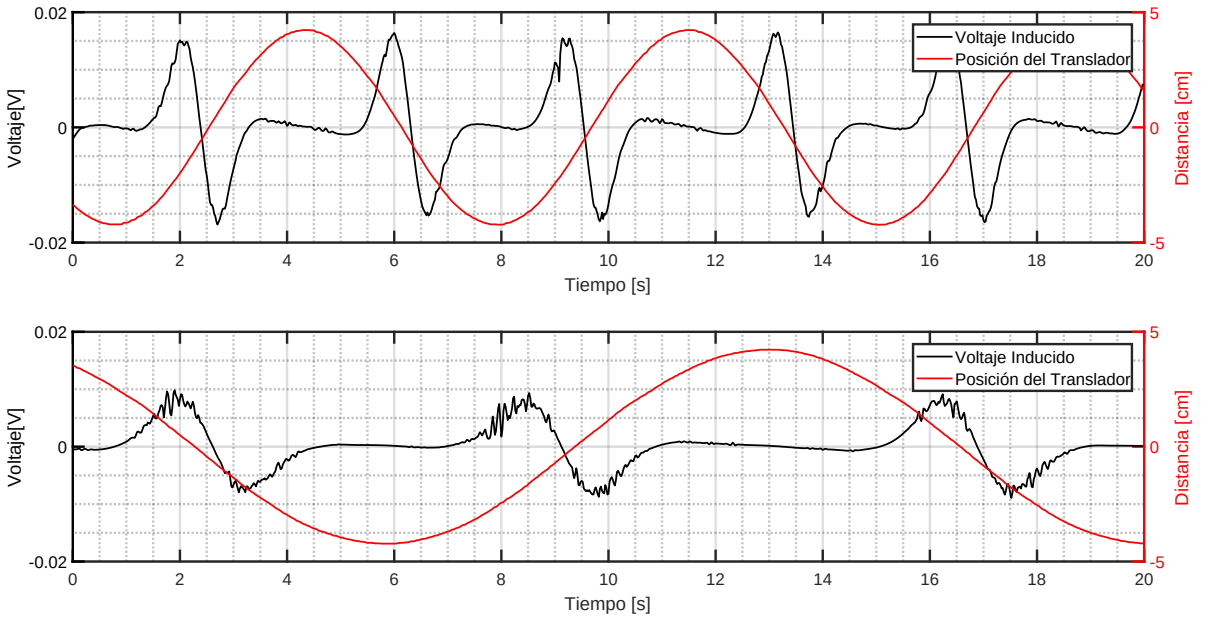


Figura 5.20: **2x1 NS:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s]

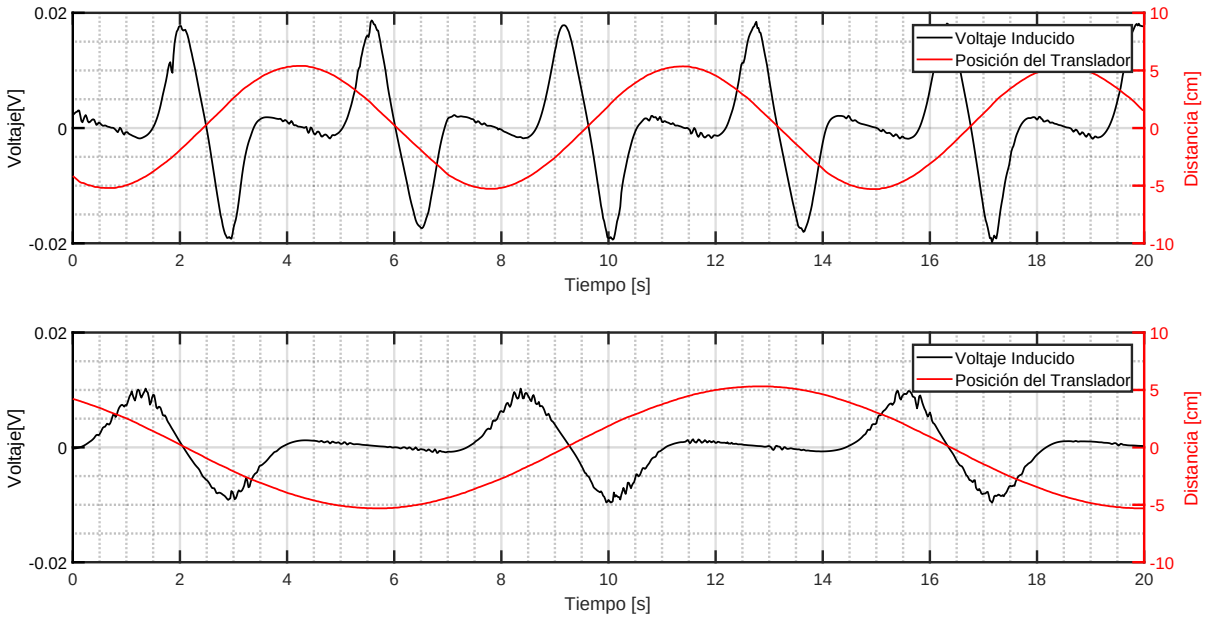


Figura 5.21: **2x2 NS:** Voltaje Inducido y Posición con Período 14.28[s] y 7.14[s]

Capítulo 6

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En las siguientes figuras se realizaron las mediciones de las señales de período 7.14[s] en un cuadro de tiempo de 10[s], y para las señales de 14.28[s] se tomaron las mediciones en un cuadro de tiempo de 20[s], de manera de comparar más fácil las amplitudes de los voltajes inducidos al igualar el periodo de muestreo de las señales de 7.14[s] a las de 14.28[s].

En cada una de las imágenes se puede notar que la amplitud de la señales de voltaje de período 7.14[s] poseen una magnitud de amplitud doble que las señales de período 14.2u8[s], es debido a que la velocidad en el traslador en las pruebas de periocidad de 7.14[s] es el doble ($v_{7,14}$) que en las pruebas de período 14.28[s] ($v_{14,28}$), dado a que el traslador recorre el mismo trayecto en ambas frecuencias y a que en ambos casos el estator está sometido al mismo comportamiento del campo magnético. De modo que al aplicar la magnitud a la ley de Faraday para un conductor en movimiento la relación siguiente se cumple.

$$v_{7,14} = 2 \cdot v_{14,28} \tag{6.1}$$
$$|e_{ind_{14,28}}| = |v_{14,28}| \cdot |B| \cdot l \cdot \sin(\pi/2) \tag{6.2}$$
$$|e_{ind_{7,14}}| = |2 \cdot v_{14,28}| \cdot |B| \cdot l \cdot \sin(\pi/2) \tag{6.3}$$
$$|e_{ind_{7,14}}| = 2 \cdot |e_{ind_{14,28}}| \tag{6.4}$$

El largo de **l** se define de la siguiente forma.

$$l = 2\pi \cdot r_{bobina} \cdot N_{vueltas} \tag{6.5}$$

Donde r_{bobina} es el radio de la bobina (37[mm]) y $N_{vueltas}$ es el número de vueltas que posee la bobina (200[-]).

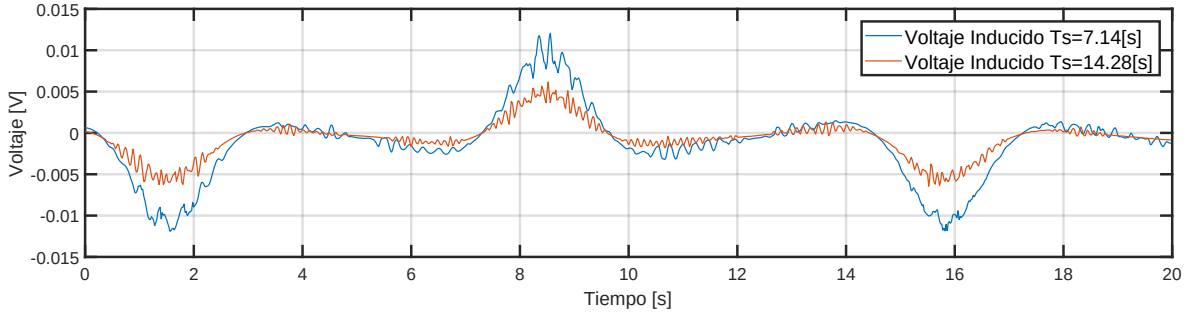


Figura 6.1: **1x1:**Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos

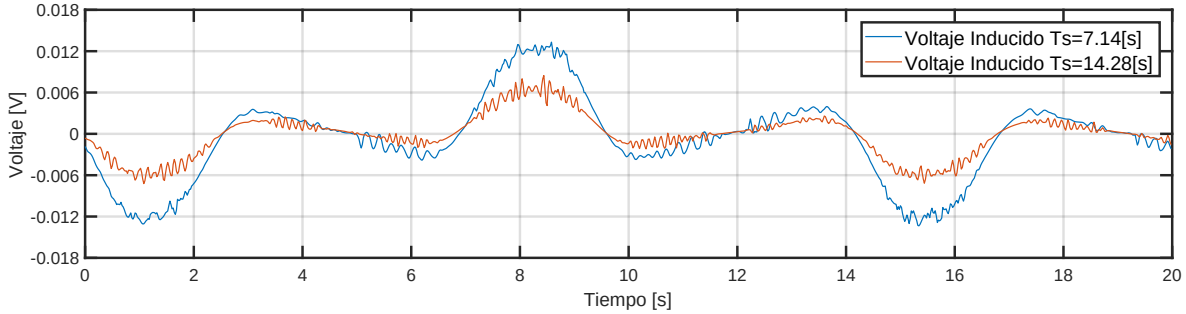


Figura 6.2: **1x2:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos

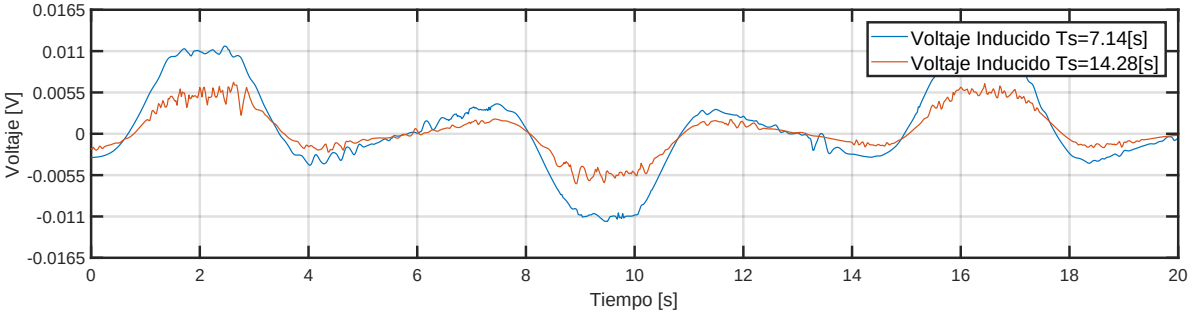


Figura 6.3: **2x1 NN:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos

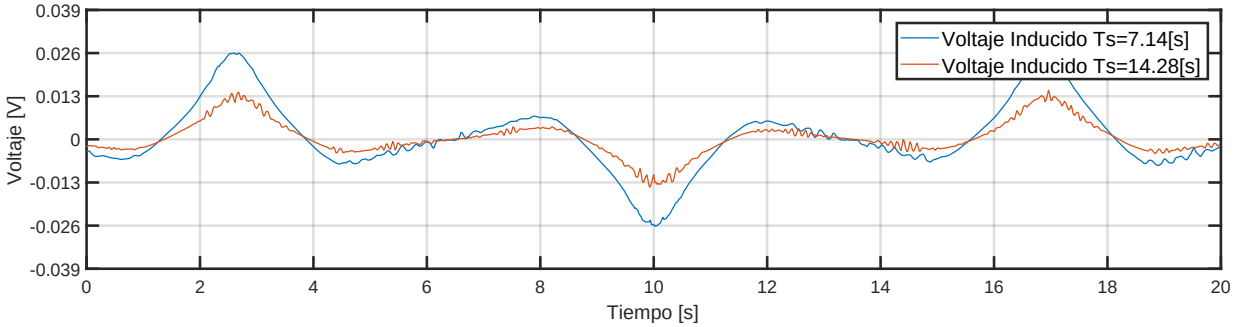


Figura 6.4: **2x2 NN:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos

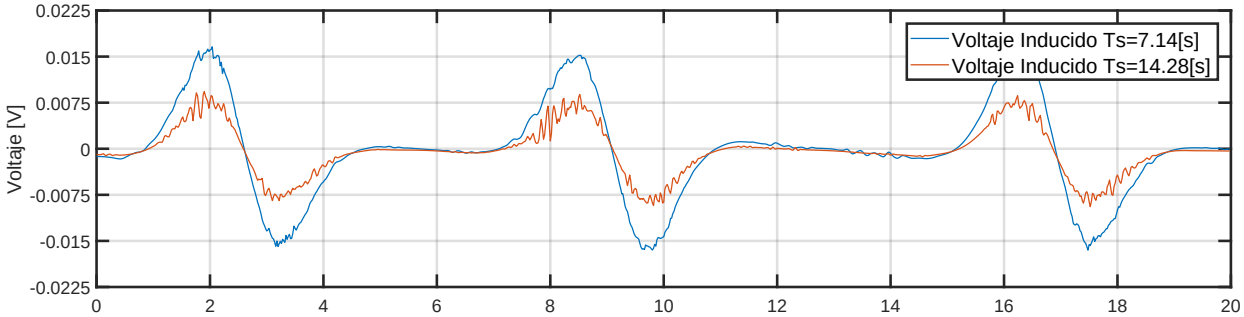


Figura 6.5: **2x1 NS:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos

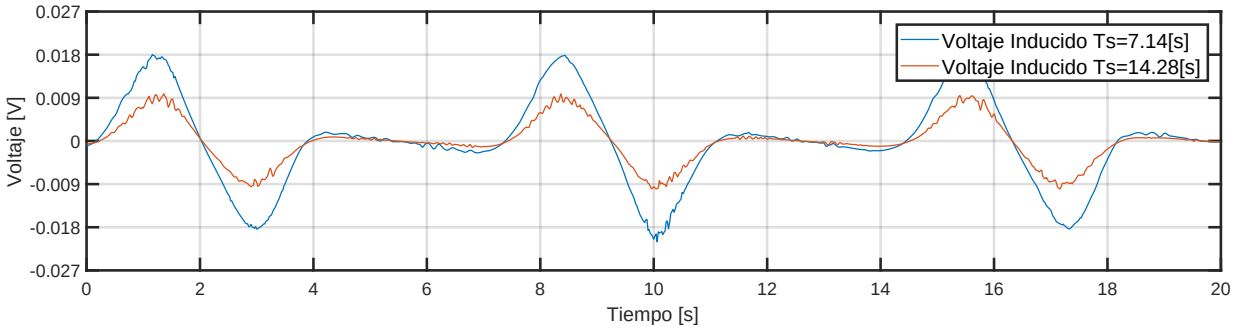


Figura 6.6: **2x2 NS:** Voltajes Inducidos por Referencias Sinusoidales y de Diferentes Períodos

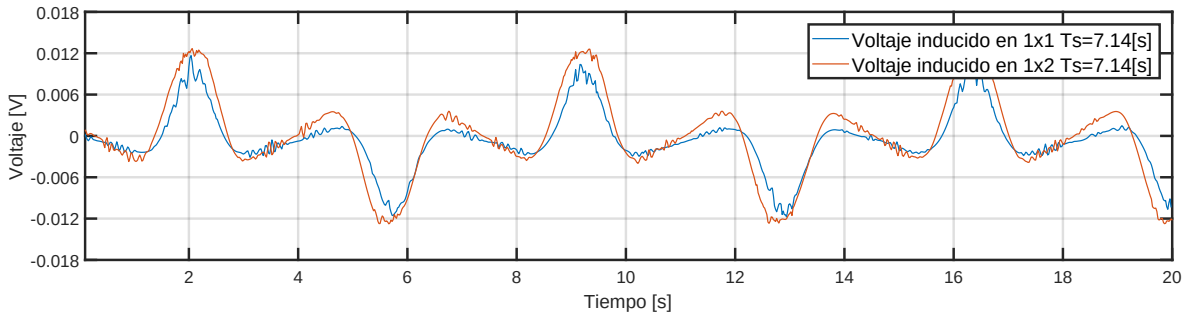


Figura 6.7: Comparación del Voltaje Inducido con Referencia Sinusoidal de las Configuraciones **1x2** y **1x1**

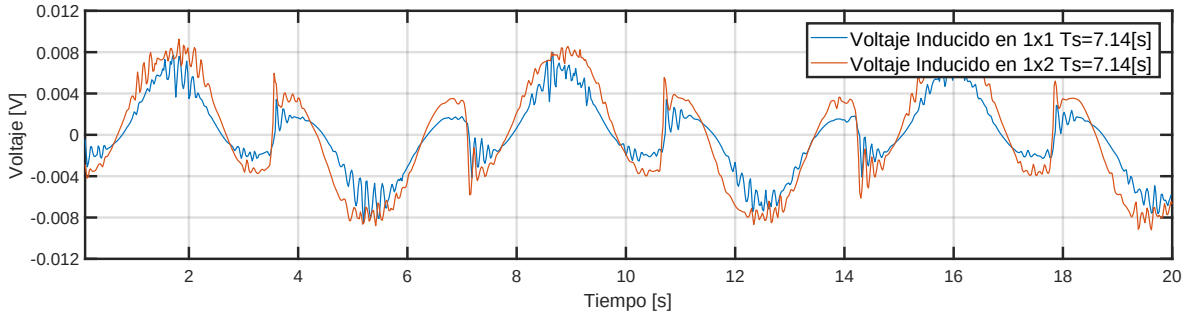


Figura 6.8: Comparación del Voltaje Inducido con Referencia Triangular de las Configuraciones **1x2** y **1x1**

Por otro lado, por la definición de la ecuación de la Ley de Faraday para sistemas lineales, el largo del material conductor, en este caso la bobina, también influye en el voltaje inducido, de modo que si comparamos los resultados de la configuración **1x1** y **1x2**, la configuración **1x2** debería tener un voltaje inducido dos veces mayor que el de la configuración **1x1** debido a que posee el doble de número de vueltas, pero no es así. Esto es debido a que el tamaño del traslador, lugar donde se alojan los imanes, posee una dimensión más pequeña que el estator, estructura donde se ubican las bobinas. Consideremos que la bobina esta conformada por N-espiras que se destribuye a lo largo del estator y el traslador se ubica en el centro del estator, si el traslador se desplaza hacia el final de la bobina donde se ubica las espiras N-ésimas, la espira N-ésima presenciará un aumento del flujo mágnetico que atraviesa su superficie, de modo que inducirá un voltaje creciente, pero a la vez las primeras espiras ubicadas en el otro extremo sienten que el imán se esta alejándose de ellas, de modo el flujo mágnetico que cortan su superficie disminuye, lo que provoca que induscan un voltaje decreciente cancelando de cierta forma el voltaje que inducen las espiras N-ésimas. De modo que sólo se induce voltaje efectivo solo en las zonas del estator en la cual se aloja por completo el traslador. Tal como se muestran en las siguientes imágenes 6.7 y 6.8. Cabe recordar que la configuración 1x2 el recorre un trayecto más largo que en la configuración

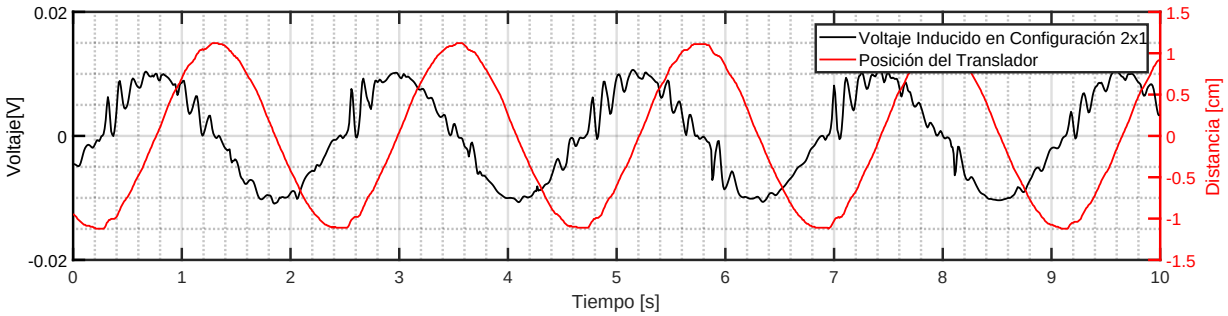


Figura 6.9: Voltaje Inducido por una Referencia Sinusoidal de Frecuencia 450[mHz]

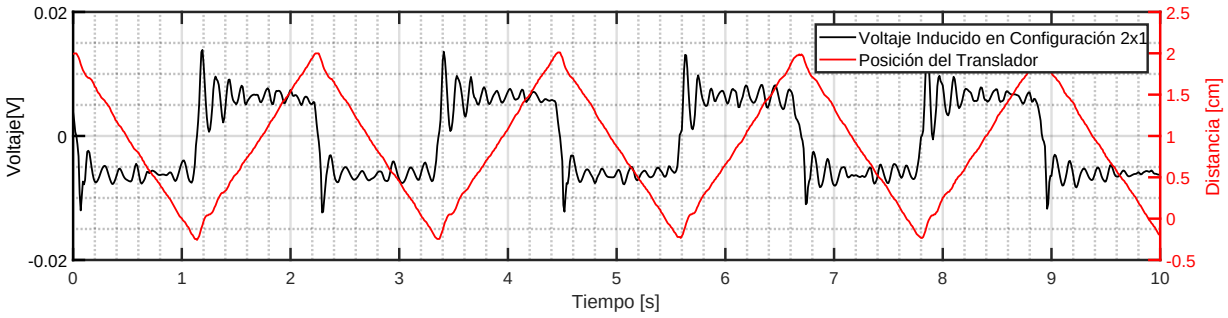


Figura 6.10: Voltaje Inducido por una Referencia Triangular de Frecuencia 450[mHz]

1x1, de modo que al mantener la misma frecuencia la velocidad es mayor por ende se induce un voltaje levemente mayor.

La ley de Faraday con un inductor de N vueltas se define como $e_{ind} = -N\frac{d\phi}{dt}$. De modo de que si consideramos una densidad de campo constante, producido por imanes permanentes, a lo largo de una bobina, la única forma de variar el flujo del campo mágnetico que cruzan por la superficie de la bobina sería moviendo el imán, de modo que el voltaje inducido sería proporcional a la variación del espacio entre el imán y la bobina en un tiempo determinado, es decir con la velocidad en el cual el imán se acerca o se aleja de la bobina. Para corroborar esto se desarrolla un experimento con una configuración **2x1**, en donde los dos imanes se desplaza de manera centrada al estator, de tal forma que los imanes no salgan del estator para mantener un campo lo más uniforme posible a lo largo del estator. Tal como se muestra en las siguientes imágenes 6.9 y 6.10.

Para apreciar de manera más explicita se deriva la posición, de esta forma se compara el voltaje inducido con la velocidad. Las figuras 6.11 y 6.12 lo ilustran.

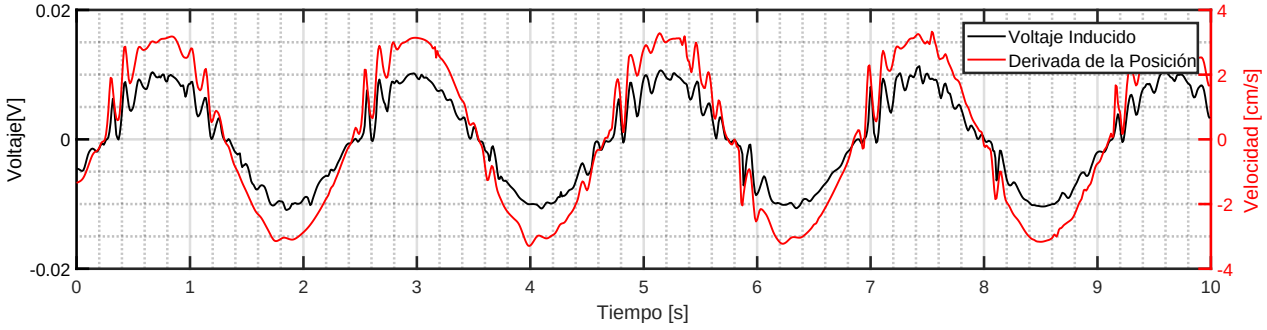


Figura 6.11: Comparación del Voltaje Inducido con la Velocidad del Traslador con Desplazamiento Sinusoidal

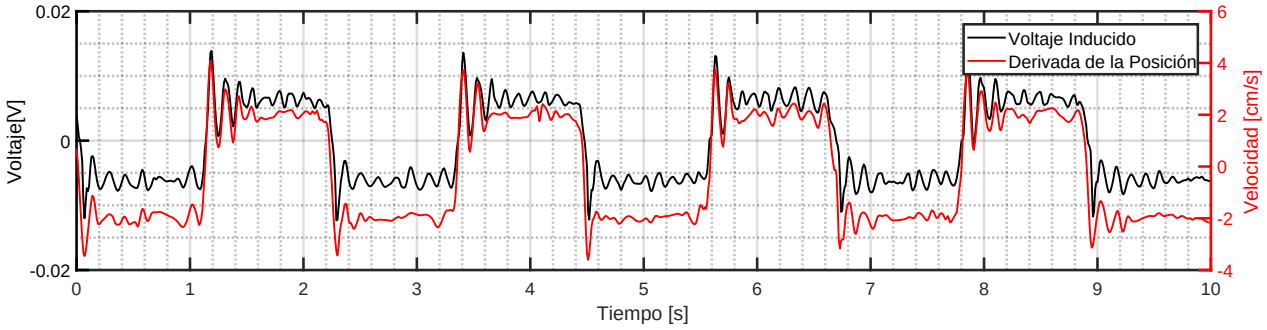


Figura 6.12: Comparación del Voltaje Inducido con la Velocidad del Traslador con Desplazamiento Triangular

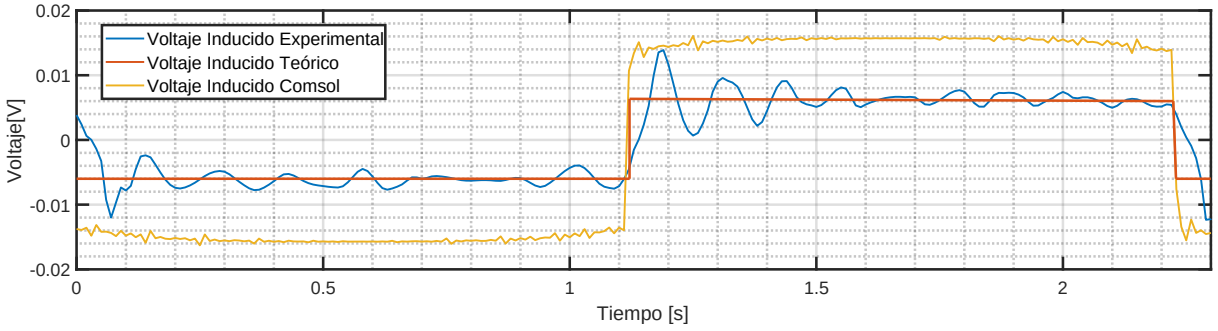


Figura 6.13: Comparación del Voltaje Inducido

La figura 6.13 compara las pruebas experimental, simulada por Comsol y teórico, del caso de una configuracion **2x1 NN** con una referencia de posición triangular. Se puede apreciar

que el resultado experimental es muy similar a lo previsto en lo teórico, con la diferencia que en el resultado experimental se obtiene oscilaciones producto a las vibraciones que se produjo en el motor durante las pruebas. Por otro lado el resultado simulado con COMSOL presenta un voltaje inducido mayor, casi el doble que el experimental, uno de los factores que induce a este error es que el traslador creado en la simulación está compuesto por un único imán con forma de anillo, de manera que provoca un mayor flujo de campo magnético que corta de manera perpendicular a la bobina por la geometría del imán y por el aumento del área del imán con respecto a los imanes usados en el experimento.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

7.1. Conclusiones

En base a los resultados experimentales se pudo apreciar la aplicación de la ley de Faraday en generadores lineales, se registró la evolución del voltaje inducido en relación al desplazamiento del traslador con respecto al estator, además de la orientación del flujo magnético de los imanes del traslador. Las simulaciones de Comsol Multiphysics resultaron ser certeras con respecto a la forma del voltaje inducido pero en términos de magnitud no se tiene certeza, debido principalmente a que no se puede determinar con exactitud el campo remanente de los imanes, además que el traslador emulado en Comsol posee imanes con forma de anillo lo que puede diferir con los resultados experimentales en las cuales se forma un octágono con imanes rectangulares.

Por otro lado, el material del que está formado el generador lineal cumple un rol importante en el desempeño del voltaje inducido, de manera que al poseer material paramagnético genera una reluctancia de gran magnitud, que limita y disminuye la magnitud de flujo mágnetico que corta las superficie de las bobinas.

La configuración de los imanes en el traslador también influyen en los resultados, ya que dependiendo de como se relaciona la polaridad de los imanes entre los módulos de los trasladores se puede disminuir el campo magnético de dispersión y se puede aumentar el flujo magnético en dirección a las bobinas. Por ejemplo en las configuraciones de 2x2 NS (distinta polaridad), el circuito mágnetico se cierra entre las caras de los imanes que están expuesto hacia las bobinas obteniendo un incremento de flujo magnético que circula y corta las superficie del estator. Como también la relación de la cantidad de módulos de estatores y de trasladores, y la velocidad con la que se desplaza el traslador. Ya que si las bobinas en el estator tienen un largo más pequeño que el largo de los imanes en el traslador, es posible establecer un campo magnético constante, en la configuración NN, en las bobinas. Por lo que el voltaje inducido es proporcional a la velocidad con la que se mueven los imanes.

7.2. Trabajo a Futuro

Se propone mejorar el diseño del generador lineal al cambiar el modelo del rotor y la geometría de los imanes. Para aprovechar de mejor manera el ángulo entre la densidad del campo magnético y la superficie de la bobina se debe utilizar imanes curvos, de manera que puedan formar un anillo

Por otro lado el traslador consistiría en un cilindro en el cual los imanes curvos se alojarían, y cubrir los imanes con un manto de un cilindro y tapas en los extremos para evitar que se escapen , como se ilustra en la figuras presente en el Anexo C.

También se propone utilizar la configuración Halbach en los trasladores, de modo de concentrar las lineas del flujo magnético en un solo sentido, hacia las bobinas, y disminuir el flujo en el interior del traslador. De modo que se disminuyen las reluctancias y el flujo de dispersión

Por último a la pieza del estator se propone disminuir el ancho del cilindro en donde las bobinas se enrollan, de modo que las bobinas estén más próximos a los imanes para obtener una mayor densidad de campo magnético que corta a las bobinas para inducir un voltaje mayor. En el presente diseño se hizo un cilindro grueso sólo con la intención de facilitar la unión de las dos piezas que conforman un módulo de estator para aumentar el área en donde se unen las piezas para crear ranuras y encajes, además de tener más area en donde usar pegamento.

Apéndice A

CÓDIGOS DE CONTROL

A.1. Control por Histéresis

```
int LED=8;
int POS;
int REF;
int n;
int enable;
int dir;
int REFcte=521;
int E=33;
int M=35;
int delta=10;
int e;

void setup() {
// put your setup code here, to run once:
pinMode(LED,OUTPUT);
pinMode(A0,INPUT);
pinMode(A1,INPUT);
pinMode(E,OUTPUT);
pinMode(M,OUTPUT);
Serial.begin(9600);
}
```

```
22
23 void loop() {
24 // put your main code here, to run repeatedly:
25 ////////////////////// Control Histéresis
26 POS=analogRead(A1);
27 REF=analogRead(A0);
28 e=POS-REF;
29 if (e>delta)
30 {
31 n=1;
32 }
33 else if(e<-delta)
34 {
35 n=-1;
36 }
37 else
38 {
39 n=0;
40 }
41 if(n>0)
42 {
43 dir=1;
44 }
45 else
46 {
47 dir=0;
48 }
49 enable=abs(n);
50 }
```

A.2. Control PI

```
1 int REF;
2 int ini_0=1;
3 int SET_1;
4 int POS;
5 float Error;
```

```
6  int n;
7  int E=33;
8  int M=35;
9  float X=0.5;
10 float Z=0;
11 float P=0.2;
12 float I=0.0002;
13 float T=0.005;
14 boolean flag=true;
15 int Flag=8;
16 int cont=0;
17 int UU[10];
18 int neg[10]={-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};
19 int pos[10]={1,1,1,1,1,1,1,1,1,1};
20 int zer[10]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
21 void setup() {
22 // put your setup code here, to run once:
23 Serial.begin(9600);
24 pinMode(E,OUTPUT);
25 pinMode(M,OUTPUT);
26 pinMode(A0,INPUT);
27 pinMode(A1,INPUT);
28 pinMode(Flag,OUTPUT);
29 pinMode(12,OUTPUT);
30 pinMode(13,OUTPUT);
31 }
32
33
34 void loop() {
35 // put your main code here, to run repeatedly:
36 POS=analogRead(A1);
37 REF=analogRead(A0);
38 SET_1=analogRead(A2);
39
40 if ( (POS>=1010) || (POS<=20) )
41 {
42 digitalWrite(E,LOW);
43 return;
44 }
45
```

```
46 Error=REF-POS;
47 if (cont==9)
48 {
49 cont=-1;
50 }
51 else
52 {
53 X=X+T*Error;
54 Z=I*X+P*Error;
55 if (Z>1)
56 {
57 Z=1;
58 }
59 else if (Z<-1)
60 {
61 Z=-1;
62 }
63 else;
64 }
65 cont=cont+1;
66 Mod(Z,UU);
67 n=UU[cont];
68 if (n==1)
69 {
70 digitalWrite(E,HIGH);
71 digitalWrite(M,LOW);
72 digitalWrite(12,HIGH);  //se esta estirando
73 digitalWrite(13,LOW);
74 }
75 else if (n==-1)
76 {
77 digitalWrite(E,HIGH);
78 digitalWrite(M,HIGH);
79 digitalWrite(12,LOW);
80 digitalWrite(13,HIGH);   //se retrae
81 }
82 else
83 {
84 digitalWrite(E,LOW);
85 digitalWrite(12,LOW);
```

```
86 digitalWrite(13,LOW);
87 }
88
89 }
90 void estirar()
91 {
92 if (POS<950)
93 {
94 digitalWrite(M,LOW);
95 digitalWrite(E,HIGH);
96 }
97 else
98 {
99 digitalWrite(E,LOW);
100 }
101 }
102 void iniciar()
103 {
104 digitalWrite(M,HIGH);
105 digitalWrite(E,HIGH);
106 //delay(100);
107 }
108 void subarray(int srcArray[], int subArray[], int ini, int finish)
109 {
110 for (int i = ini; i <= finish; i++)
111 {
112 subArray[i] = srcArray[i];
113 }
114 }
115 void Mod(float Z, int U[])
116 {
117 if (Z<-0.9)
118 {
119 subarray(neg,U,0,9);
120 }
121 else if (-0.9<=Z && Z<-0.8)
122 {
123 subarray(zer,U,0,9);
124 subarray(neg,U,1,9);
125 }
```

```
126 else if (-0.8<=Z && Z<-0.7)
127 {
128 subarray(zer,U,0,9);
129 subarray(neg,U,2,9);
130 }
131 else if (-0.7<=Z && Z<-0.6)
132 {
133 subarray(zer,U,0,9);
134 subarray(neg,U,3,9);
135 }
136 else if (-0.6<=Z && Z<-0.5)
137 {
138 subarray(zer,U,0,9);
139 subarray(neg,U,4,9);
140 }
141 else if (-0.5<=Z && Z<-0.4)
142 {
143 subarray(zer,U,0,9);
144 subarray(neg,U,5,9);
145 }
146 else if (-0.4<=Z && Z<-0.3)
147 {
148 subarray(zer,U,0,9);
149 subarray(neg,U,6,9);
150 }
151 else if (-0.3<=Z && Z<-0.2)
152 {
153 subarray(zer,U,0,9);
154 subarray(neg,U,7,9);
155 }
156 else if (-0.2<=Z && Z<-0.1)
157 {
158 subarray(zer,U,0,9);
159 subarray(neg,U,8,9);
160 }
161 else if (-0.1<=Z && Z<0)
162 {
163 subarray(zer,U,0,9);
164 subarray(neg,U,9,9);
165 }
```

```
166 else if (0<=Z && Z<0.1)
167 {
168 subarray(zer,U,0,9);
169 subarray(pos,U,9,9);
170 }
171 else if (0.1<=Z && Z<0.2)
172 {
173 subarray(zer,U,0,9);
174 subarray(pos,U,8,9);
175 }
176 else if (0.2<=Z && Z<0.3)
177 {
178 subarray(zer,U,0,9);
179 subarray(pos,U,7,9);
180 }
181 else if (0.3<=Z && Z<0.4)
182 {
183 subarray(zer,U,0,9);
184 subarray(pos,U,6,9);
185 }
186 else if (0.4<=Z && Z<0.5)
187 {
188 subarray(zer,U,0,9);
189 subarray(pos,U,5,9);
190 }
191 else if (0.5<=Z && Z<0.6)
192 {
193 subarray(zer,U,0,9);
194 subarray(pos,U,4,9);
195 }
196 else if (0.6<=Z && Z<0.7)
197 {
198 subarray(zer,U,0,9);
199 subarray(pos,U,3,9);
200 }
201 else if (0.7<=Z && Z<0.8)
202 {
203 subarray(zer,U,0,9);
204 subarray(pos,U,2,9);
205 }
```

```
206 else if (0.8<=Z && Z<0.9)
207 {
208 subarray(zer,U,0,9);
209 subarray(pos,U,1,9);
210 }
211 else
212 {
213 subarray(pos,U,0,9);
214 }
215 }
```

Apéndice B

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Resultados con Referencia de Posición Triangular

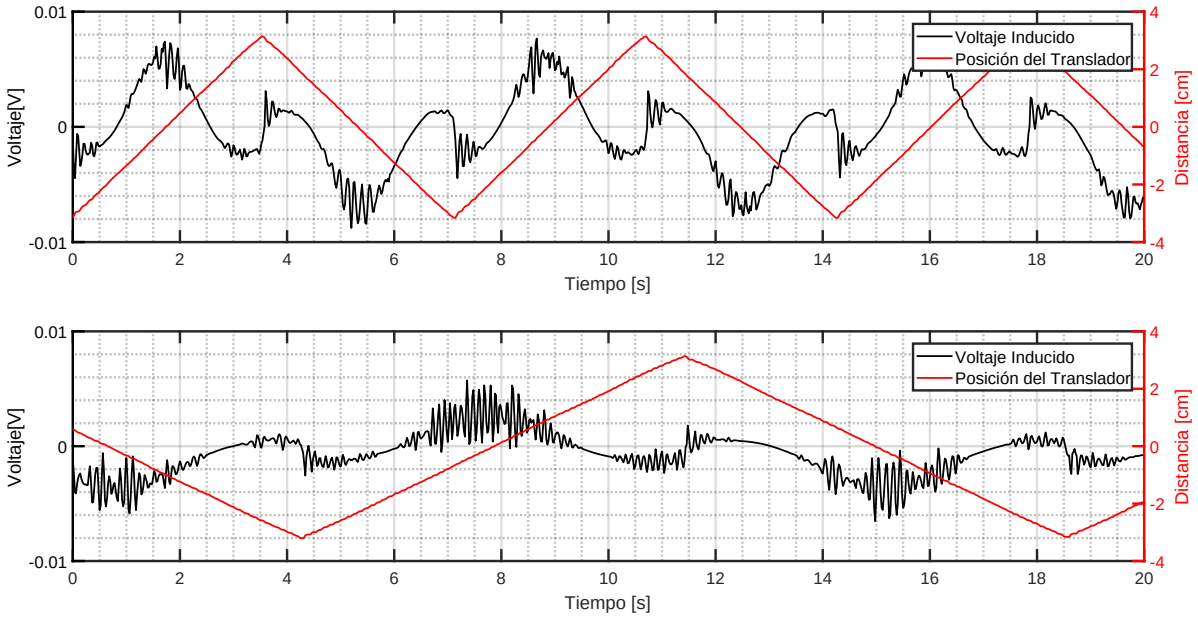


Figura B.1: **1x1:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s]

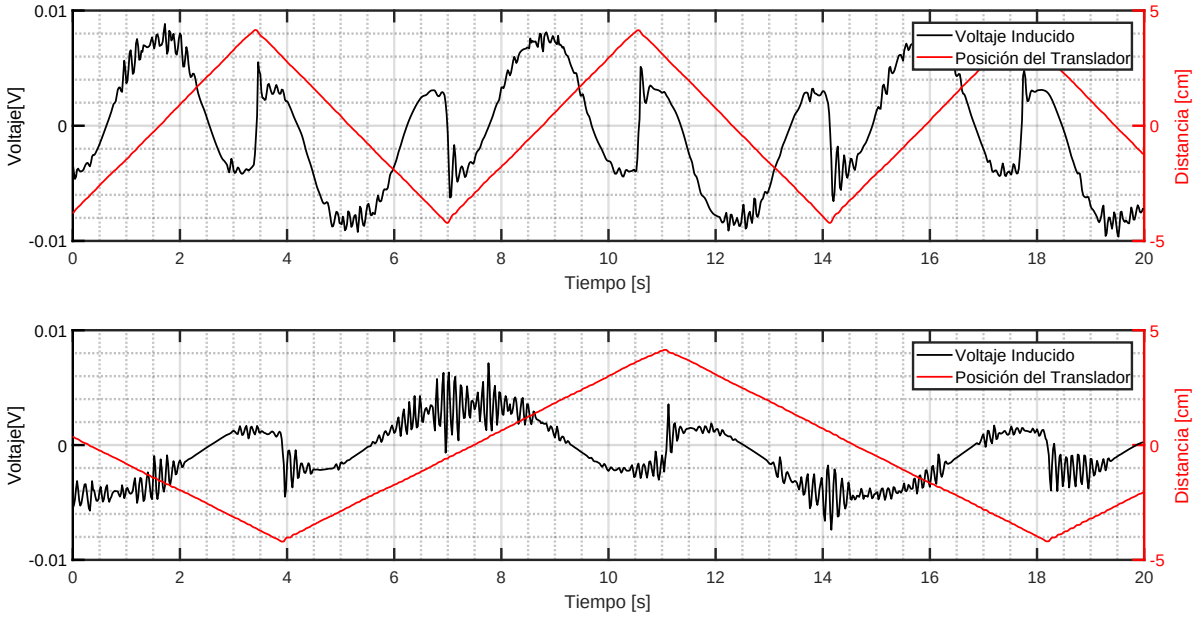


Figura B.2: **1x2:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s]

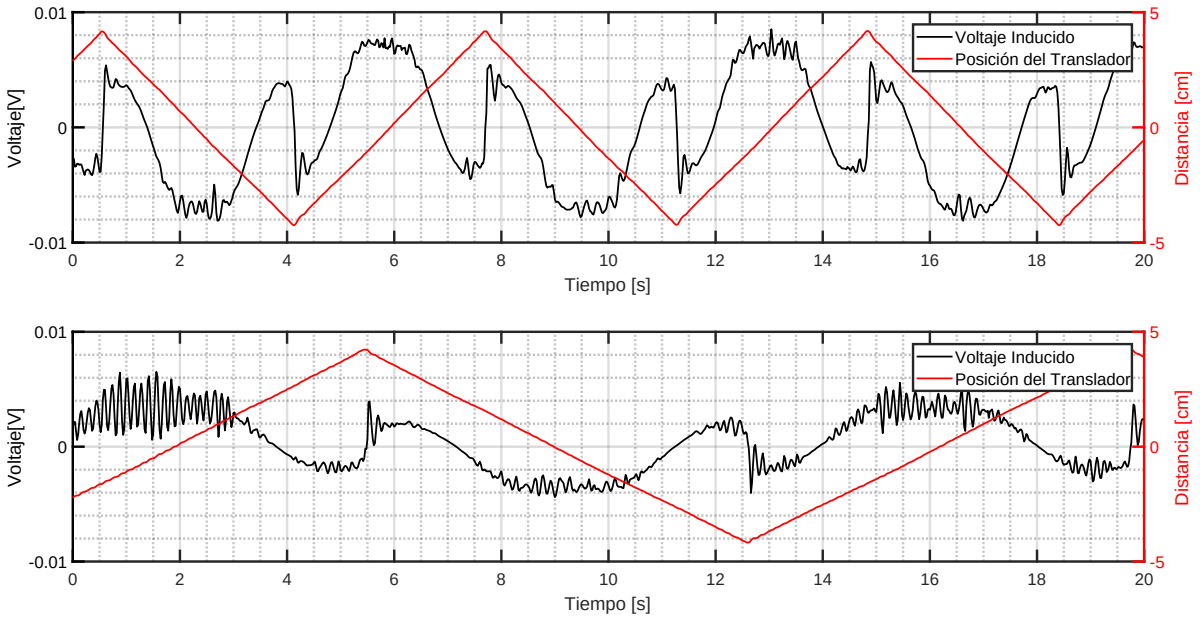


Figura B.3: **2x1 NN:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s]

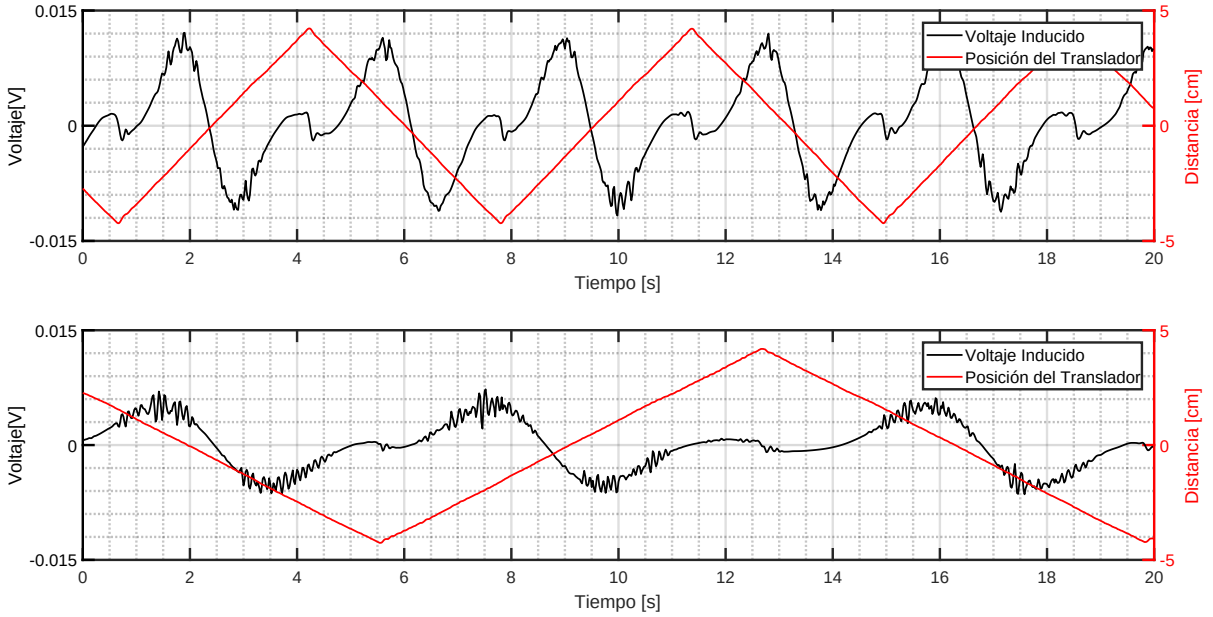


Figura B.4: **2x1 NS:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s]

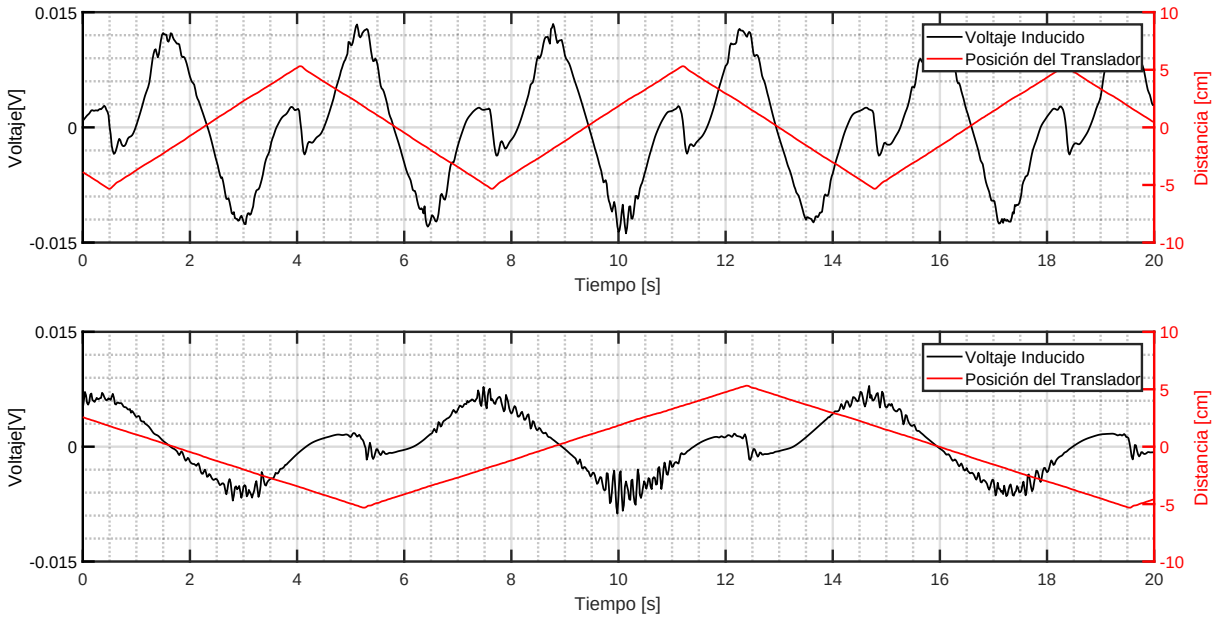


Figura B.5: **2x2 NS:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s]

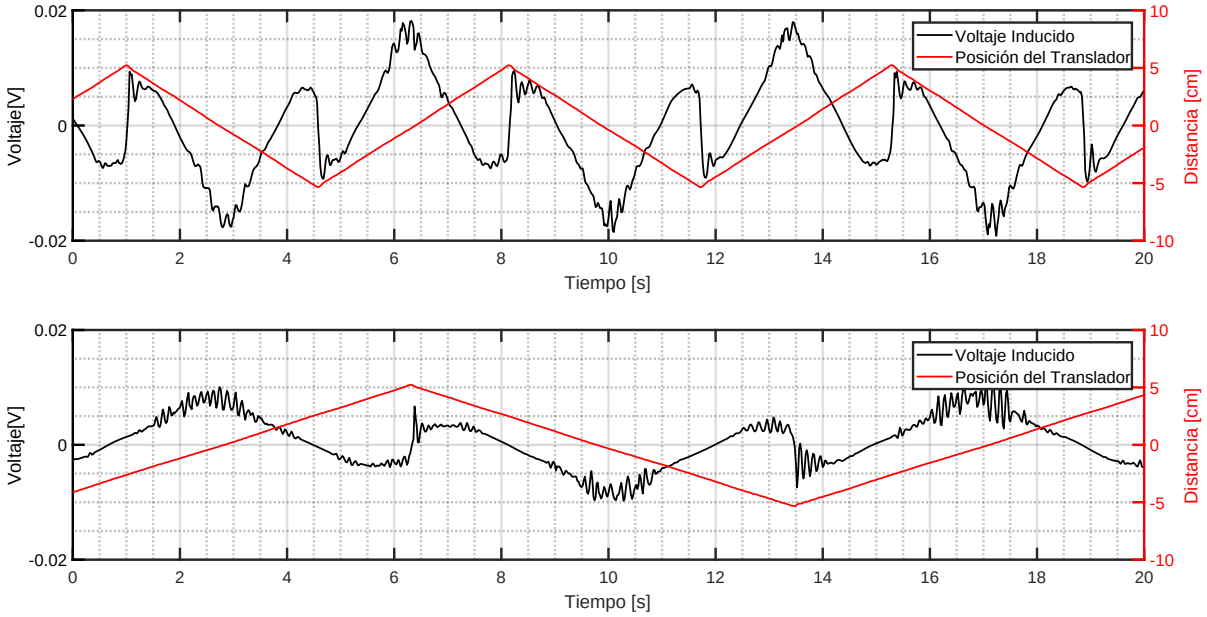


Figura B.6: **2x2 NN:** Voltaje Inducido y Posición con Ts=7.28[s] y Ts=14.28[s]

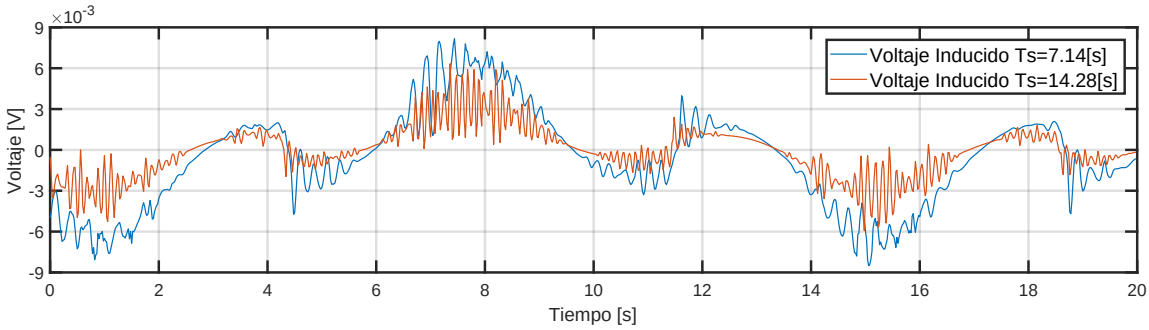


Figura B.7: **1x1:**Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos

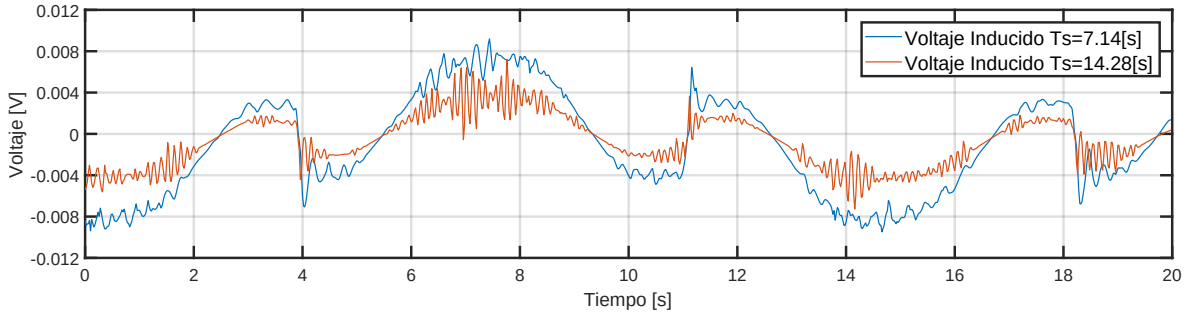


Figura B.8: **1x2:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos

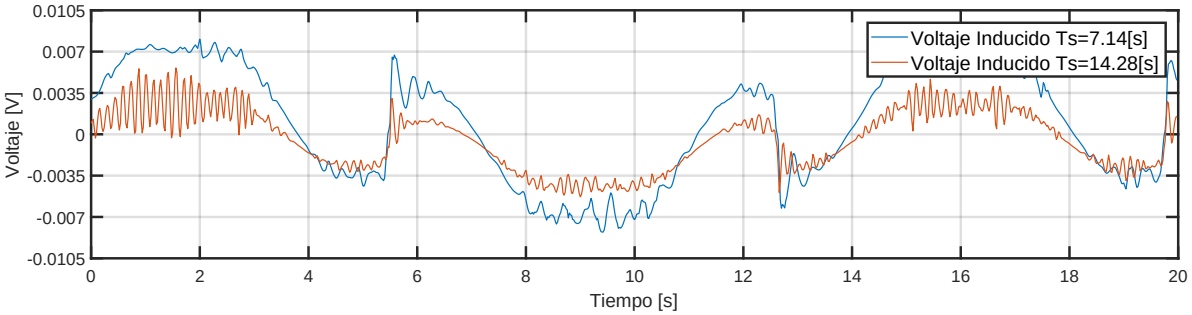


Figura B.9: **2x1 NN:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos

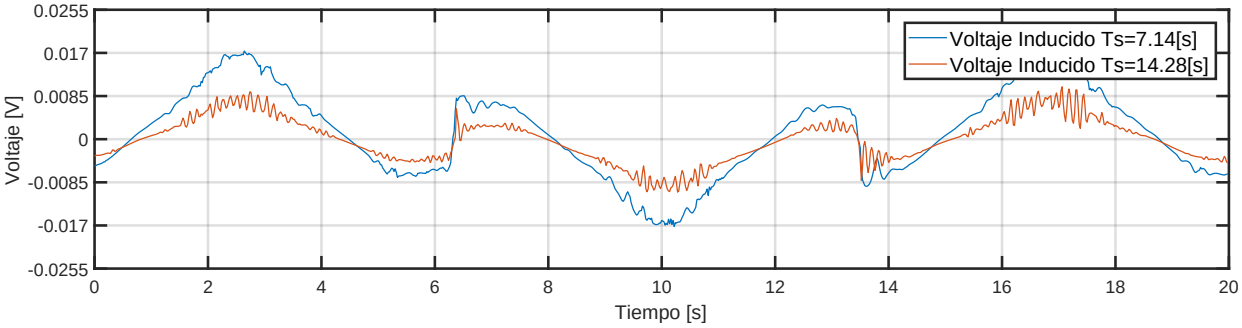


Figura B.10: **2x2 NN:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos

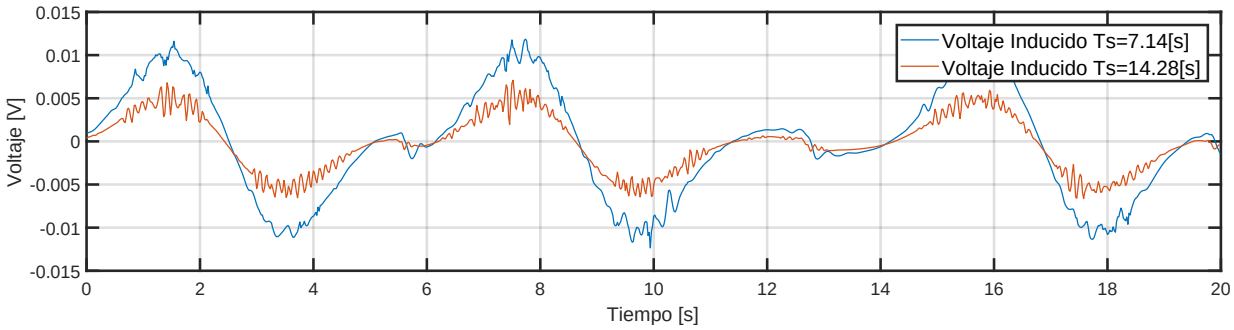


Figura B.11: **2x1 NS:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos

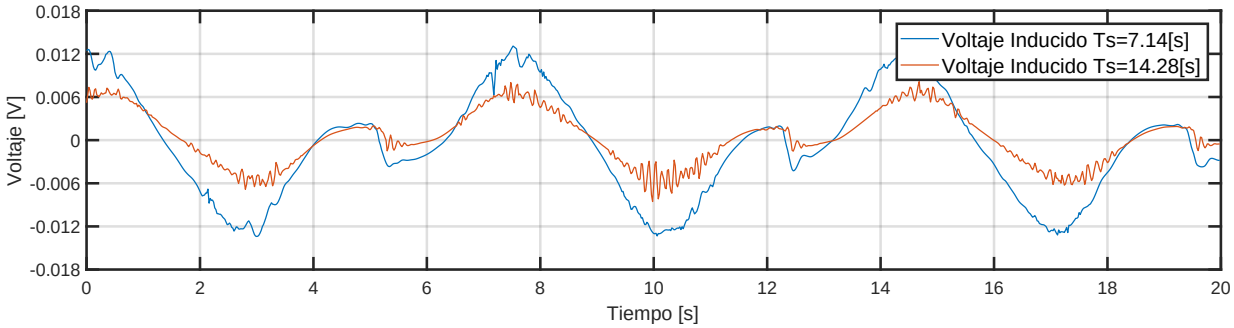


Figura B.12: **2x2 NS:** Voltajes Inducidos por Referencias Triangulares y de Diferentes Períodos

Apéndice C

TRABAJO A FUTURO

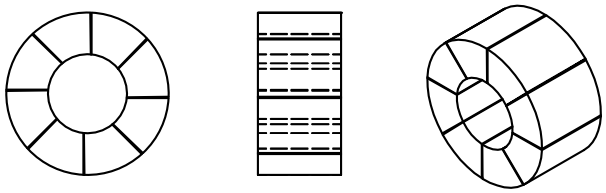


Figura C.1: Anillo de Imanes

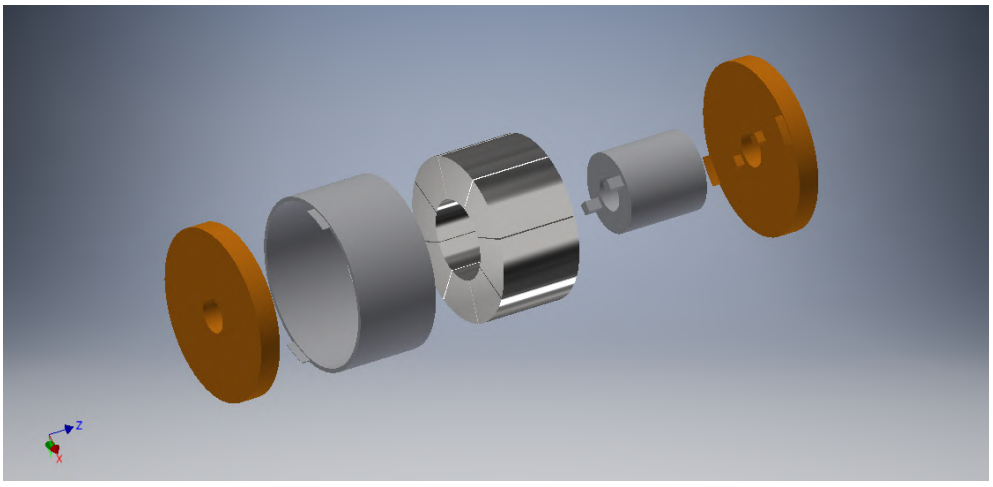


Figura C.2: Piezas del Traslador

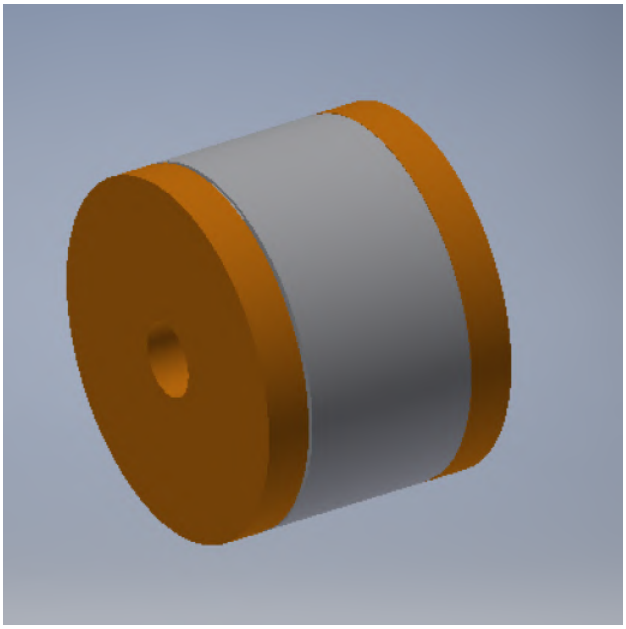


Figura C.3: Traslador Armado

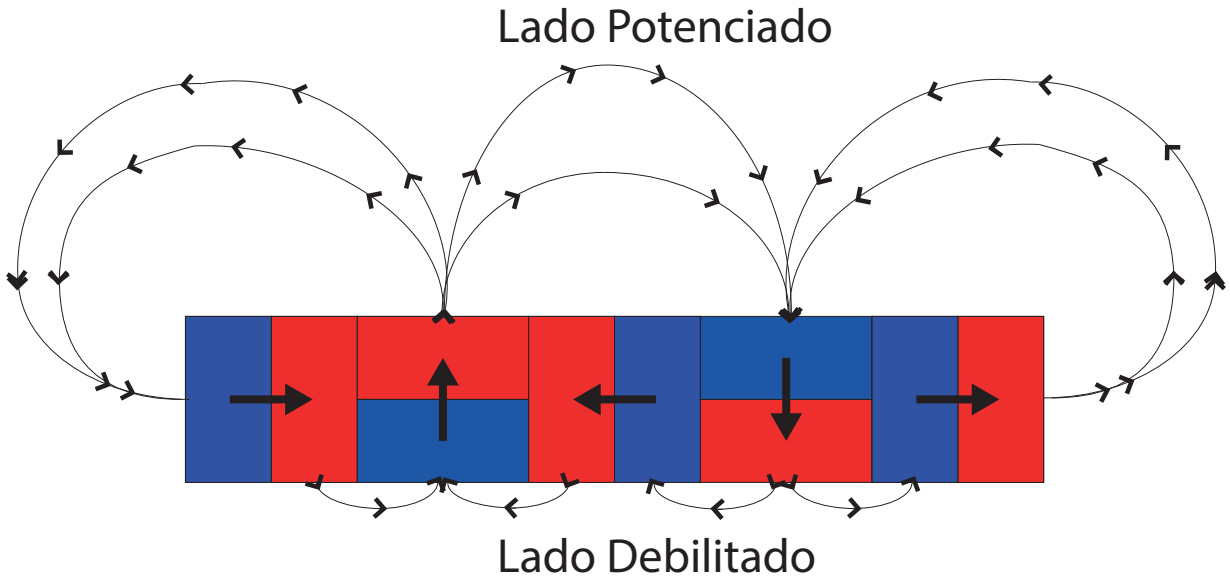


Figura C.4: Configuración Halbach

BIBLIOGRAFÍA

[1] "Ocean Energy," http://www.oceanenergy.ie, [Online; accedido 19-08-2018].

[2] Y. N. F. F. H. F. Y. Washio, H. Osawa and T. Fujita, "The offshore floating type wave power device"mighty Whale.ºpen sea tests," *Processdings of 10th International Offhore Po;ar Energineering Conference*, vol. 1, pp. 373–380, 2000.

[3] D. B. J. Lye and F. Johnso, "An investigation into the nonlinear effects resulting from air cushions in the orecon oscillating water column device," *Proceedings of 28th International Conference on Ocean Offshore Artic Engineering*, 2009.

[4] F. Antonio, "Wave Energy Utilization," *A review of the technologies*, 2009.

[5] J. P. S. Y. E. A. T. B. D. Elwood, A. Schacher and A. V. Jouanne, "Numerical Modeling and Ocean Testing of a Direct-Drive Wave Energy Device Utilizing a Permanent Magnet Linear Generator for Power Take-Off," *ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, vol. 4, pp. 817–824, 2009.

[6] N. P. Aamir Hussain Memon, Taib bin Ibrahim, "Portable and Pico-Scale Linear Generator for Wave Energy Conversion," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 2014.

[7] J. Falnesl, "Wave-energy conversion through relative motion between,," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,*, vol. 121, no. 1, pp. 32–38, 1999.

[8] Actuonix Motion Devices, "P16-P Linear Actuator with Feedback," https://s3.amazonaws.com/actuonix/Actuonix+P16+Datasheet.pdf.