

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES APLICADAS A LA GENERACIÓN MAREOMOTRIZ

Presentado ante:

**Comité de Trabajo de Grado de la Escuela de
Ingenierías Eléctrica, Electrónica y
Telecomunicaciones. – UIS**

Samuel Andrés Mendoza Mejía

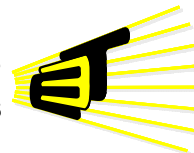
Estudiante Ing. Eléctrica

Jesús Eulides Arenas Mejía

Estudiante Ing. Eléctrica



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



Bucaramanga, febrero de 2009

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES APLICADAS A LA GENERACIÓN MAREOMOTRIZ

Proyecto de grado para optar el título de ingeniero electricista

Samuel Andrés Mendoza Mejía

Estudiante Ing. Eléctrica

Jesús Eulides Arenas Mejía

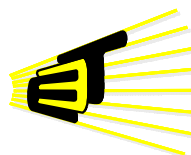
Estudiante Ing. Eléctrica

Ing. Julio César Chacón Velasco

Director del Trabajo de Investigación



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico a Dios por acompañarme con momentos, lugares y seres tan especiales como han sido mis padres, hermanas y amigos que con cada instante han ayudado a forjar en mí la persona que soy y seré.

Jesús Eulides Arenas Mejía

Este proyecto lo dedico a mis padres, que siempre me han apoyado y con mucho amor, dedicación y esfuerzo me han formado como persona y buscado lo mejor para mí y toda la familia.

Samuel Andrés Mendoza Mejía

AGRADECIMIENTOS

Agradezco ante todo a Dios por el existir, a mis padres por haber esperado por mí, a mis hermanas que junto a mis padres y amigos con cada instante que junto a ellos he pasado han formado lo que soy y me han permitido influir en sus propias vidas. “Dios gracias por los momentos y personas que he conocido”

Agradecemos a Dios, a nuestros profesores, nuestra familia y compañeros de estudio. Gracias, cada uno de ustedes aportó en el desarrollo de este sueño.

Agradecemos al profesor Julio César Chacón Velasco, por su apoyo, dedicación, su valiosa amistad y consejo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTACIÓN HISTÓRICA Y TEÓRICA DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES	2
1.1 MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES	3
1.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	8
1.2.1 LEY DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE FARADAY-HENRY:	8
1.2.2 LEY DE GAUSS PARA EL CAMPO ELÉCTRICO	15
1.2.3 LEY DE GAUSS PARA CAMPO MAGNÉTICO.....	16
1.2.4 LEY DE AMPÈRE.....	16
1.2.5 EN MEDIOS MATERIALES	17
1.2.6 MAGNETISMO Y MATERIALES FERROMAGNÉTICOS	21
2. CLASES DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES	28
2.1 MÁQUINA CON BOBINA EN EL TRASLADOR CENTRAL	28
2.2 MÁQUINAS TRASLACIONALES CON IMANES PERMANENTES EN EL TRASLADOR....	31
2.3 MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES CON TRASLADOR DE HIERRO.....	37
3. APLICACIONES DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES.	39
3.1 MOTORES TRASLACIONALES.	39
3.1.1 MOTOR TRASLACIONAL DE PASOS.	39
3.1.2 MOTOR DE TRACCIÓN MAGLEV (<i>Magnetic levitation</i>).....	40
3.2 GENERADORES TRASLACIONALES.	42
4. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE UN GENERADOR ELÉCTRICO TRASLACIONAL A PARTIR DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ.	46
4.1 ENERGÍA MAREOMOTRIZ	46
4.2 LEYES DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ	50
4.2.1 LEYES FUNDAMENTALES DE LA HIDROSTÁTICA.....	50
4.2.2 POTENCIA DE LAS OLAS.....	53
4.3 ENERGÍA DE LAS OLAS EN COLOMBIA	54
4.4 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO TRASLACIONAL	56
4.4.1 OPERACIÓN DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA TRASLACIONAL.....	56
4.4.2 PARÁMETROS DE LA MÁQUINA.....	61

5.	MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR TRASLACIONAL DE 20 KW DE SALIDA	70
5.1	DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ EN MATLAB.....	73
5.2	PROGRAMAS EN MATLAB PARA MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES TUBULARES.	76
5.2.1	<i>PROGRAMA DE LA MÁQUINA CON IMANES EN EL TRASLADOR.....</i>	<i>78</i>
5.2.2	<i>PROGRAMA PARA MÁQUINA CON BOBINA EN EL TRASLADOR.....</i>	<i>79</i>
5.3	PARÁMETROS RESULTANTES PARA EL GENERADOR TRASLACIONAL TUBULAR CON IMANES EN EL TRASLADOR SIMPLIFICADO.....	79
6.	CONCLUSIONES	82
7.	REFERENCIAS	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EXPERIMENTOS DE MICHAEL FARADAY	3
FIGURA 2. MÁQUINA ELÉCTRICA ESTÁTICA	5
FIGURA 3. MÁQUINA ELÉCTRICA DE ROTACIÓN	5
FIGURA 4. DIAGRAMA DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA TRASLACIONAL.....	6
FIGURA 5. DESCRIPCIÓN DE MOVIMIENTO EN SÓLIDOS	6
FIGURA 6. VECTORES DE MOVIMIENTO EN SÓLIDOS.....	7
FIGURA 7. ESQUEMA DEL EXPERIMENTO DE FARADAY CON QUE DESCUBRIÓ LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	10
FIGURA 8. ESQUEMA DEL EXPERIMENTO DE FARADAY CON QUE DESCUBRIÓ LAS CORRIENTES INDUCIDAS A PARTIR DEL MAGNETISMO	10
FIGURA 9. FLUJO ELÉCTRICO DE UNA CARGA PUNTUAL EN UNA SUPERFICIE CERRADA.	15
FIGURA 10. LÍNEAS DE FLUJO ENTRE POLOS MAGNÉTICOS	21
FIGURA 11. ORDENAMIENTO DE DIPOLOS SEGÚN EL ESTADO DEL MATERIAL.....	22
FIGURA 12. CURVA DE MAGNETIZACIÓN Y PERMEABILIDAD RELATIVA DEL HIERRO COMERCIAL (RECOCIDO)...	24
FIGURA 13. CURVA DE HISTÉRESIS PARA UN MATERIAL FERROMAGNÉTICO.	25
FIGURA 14. CURVAS DE HISTÉRESIS DE UN MATERIAL, PARA VARIOS VALORES DE HMAX. LA LÍNEA PUNTEADA MUESTRA LA SATURACIÓN DE LA CURVA B-H.....	26
FIGURA 15. CURVAS DE HISTÉRESIS PARA HIERRO COMERCIAL Y ACERO AL TUNGSTENO.	27
FIGURA 16. MÁQUINA CON BOBINA CENTRAL EN MOVIMIENTO.....	28
FIGURA 17. MÁQUINA CON BOBINA CENTRAL EN MOVIMIENTO MULTIPOLAR.	30
FIGURA 18. MÁQUINA TRASLACIONAL CON ENTRE HIERRO RADIAL E IMANES PERMANENTES TUBULARES EN EL TRASLADOR	32
FIGURA 19. MÁQUINA DE ENTREHIERRO AXIAL E IMANES PERMANENTES TUBULARES EN EL TRASLADOR.	33
FIGURA 20. MÁQUINA ELÉCTRICA TRASLACIONAL MULTIPOLAR DE IMANES PERMANENTES TUBULARES EN EL TRASLADOR.	34
FIGURA 21. MÁQUINA ELÉCTRICA TRASLACIONAL DE FLUJO REVERSIBLE CON IMANES PERMANENTES PLANOS Y DE ALTA DENSIDAD DE FLUJO.	35
FIGURA 22. MÁQUINA ELÉCTRICA TRASLACIONAL DE FLUJO REVERSIBLE CON IMANES PERMANENTES PLANOS Y DE ALTA DENSIDAD DE FLUJO. (DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO). A) TRASLADOR EN EL EXTREMO DERECHO, B) TRASLADOR EN LA POSICIÓN CENTRAL.....	35
FIGURA 23. MÁQUINAS TRASLACIONALES DE IMANES PERMANENTES PLANOS DE FLUJO TRANSVERSAL AL MOVIMIENTO. A) CON FLUJO CONCENTRADO, B) SIN FLUJO CONCENTRADO.	36
FIGURA 24. MÁQUINAS TRASLACIONALES CON TRASLADOR DE HIERRO.	37
FIGURA 25. MOTOR TRASLACIONAL TUBULAR.	39
FIGURA 26. APLICACIÓN DE UN MOTOR TRASLACIONAL.	40
FIGURA 27. TREN DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA.....	41
FIGURA 28. MOVIMIENTO LINEAL Y LEVITACIÓN MAGNÉTICA.....	41

FIGURA 29.SISTEMA AWS.....	42
FIGURA 30.PRINCIPIO DE UNA PLANTA DE ENERGÍA A PARTIR DE LAS OLAS.....	43
FIGURA 31.GENERADOR A PARTIR DE UN MOTOR STIRLING.....	45
FIGURA 32.CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ.....	47
FIGURA 33.FORMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS OLAS.....	47
FIGURA 34.PARÁMETROS DE LAS OLAS.....	48
FIGURA 35.REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS TIPOS DE OLAS.....	49
FIGURA 36.PRINCIPIO DE ARQUIMEDES.....	51
FIGURA 37.GENERADOR MAREOMOTRIZ CON GENERADOR TRASLACIONAL SUMERGIDO.....	53
FIGURA 38.VARIACIÓN DEL FLUJO EN LAS BOBINAS CON RESPECTO A LA POSICIÓN.....	57
FIGURA 39.POSICIÓN, VELOCIDAD, Y CORRIENTE EN UNA MÁQUINA ELÉCTRICA TRASLACIONAL IDEAL.....	59
FIGURA 40.CIRCUITO EQUIVALENTE.....	60
FIGURA 41.DIAGRAMA FASORIAL.....	60
FIGURA 42.GENERADOR TRASLACIONAL MULTIPOLAR CON BOBINAS EN EL TRASLADOR.....	62
FIGURA 43.MÁQUINA TUBULAR UNIPOLAR CON DOBLE BOBINA.....	65
FIGURA 44.DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO EN LA MÁQUINA.....	65
FIGURA 45.GENERADOR TRASLACIONAL TUBULAR COMÚN CON IMANES EN EL TRASLADOR.....	73
FIGURA 46.VENTANA DE PRESENTACIÓN A LA INTERFAZ DE MATLAB.....	74
FIGURA 47.VENTANA DE INGRESO DE DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	75
FIGURA 48.CORTES DE MÁQUINA ELÉCTRICA TRASLACIONAL TUBULAR SIMPLIFICADO.....	78

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.ECUACIONES DE MAXWELL.....	19
TABLA 2.C, ϵ_0 Y μ_0	20
TABLA 3.CARACTERÍSTICAS DE LAS OLAS. A) CARTAGENA Y SUS ALEDAÑOS B) ÁREA DE BARRANQUILLA C) ÁREA DE LAS ISLAS DE SAN BERNARDO	55
TABLA 4.PROPIEDADES DEL IMÁN DE FERRITA Y EL DE NEODYMIUM.....	72
TABLA 5.DATOS DE ENTRADA PROGRAMA MÁQUINA CON IMANES EN EL TRASLADOR.....	80
TABLA 6.PARÁMETROS DE SALIDA OBTENIDOS DEL PROGRAMA MÁQUINA CON IMANES EN EL TRASLADOR....	81

ANEXOS

Anexo A. Programa en Matlab® para máquinas con imanes en el trasladador.....87

Anexo B. Programa en Matlab® para máquinas con bobinas en el trasladador... 95

TITULO: ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES APLICADAS A LA GENERACIÓN MAREOMOTRIZ. *

Autores:

SAMUEL ANDRÉS MENDOZA MEJÍA

JESÚS EULIDES ARENAS MEJÍA **

Palabras Clave: Ley de Faraday; Energía Mareomotriz, Olas, Ley de Pascal, Generador traslacional.

Resumen:

Como alternativa en el aprovechamiento energético de energía de naturaleza periódica, se hace un estudio de generadores que aprovechen directamente los movimientos traslacionales, sin necesidad de hacer conversiones a energía rotacional. El funcionamiento de dicho generador se fundamenta en la ley de inducción de Faraday, de igual forma que lo hacen todas las máquinas eléctricas. Este documento está enfocado hacia el aprovechamiento de las olas como parte de la energía mareomotriz, por lo tanto, se hace necesario la aplicación de algunos conceptos de la hidrostática, y datos estadísticos de las olas para un supuesto lugar de montaje de la máquina. Con la anterior información se desarrolló un programa en Matlab® que proporciona los datos necesarios para el posterior diseño de la máquina.

En el proyecto, como parte de los objetivos se recopiló información acerca de los principios y leyes que aplican a estas máquinas, se describe brevemente sus aplicaciones del aprovechamiento energético, entre las cuales se puede destacar su uso como motor en procesos de automatización y en el sistema tracción maglev (Magnetic levitation), y se presenta un modelo matemático de un generador traslacional que satisface necesidades de 20 kW de salida.

Con respecto a estas máquinas como generadoras de energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz se recalcan las siguientes características:

- La energía que se puede obtener a partir del moviendo de las olas, en su cambio de altura tiene un amplio rango de variación de frecuencias, que generalmente son bajas, por lo tanto la implementación de sistemas de rectificación AC/DC y viceversa es necesaria para su distribución con características acordes a los sistemas eléctricos locales.
- Las condiciones del lugar de montaje son las que determinan la eficiencia que tendrá la máquina, ya que esta tiene un mejor comportamiento a mayor altura y menor periodo de las olas.

* Título de proyecto de grado en la modalidad de investigación.

** Autores del proyecto de grado, Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones, Director Ing. Julio César Chacón Velasco.

TITLE: STUDY OF CHARACTERISTICS OF LINEAR ELECTRIC MACHINES APPLIED TO WAVE ENERGY. *

Authors:

SAMUEL ANDRÉS MENDOZA MEJÍA

JESÚS EULIDES ARENAS MEJÍA **

Key words: Faraday's Law, Tidal and Waves energy, Law of Pascal, Linear generator.

Summary:

As an alternative in the energetic utilization of energy of nature regularly, it becomes a study of generators to use directly the movements translational, without the need to make conversions to rotational energy. The operation of the generator is based on the law of induction of Faraday, in the same way that makes all the electrical machines. This document is focused on the use of the waves as part of the tidal power, it is therefore requires the implementation of some concepts of the hydrostatic and statistical data of the waves for a supposed place of mounting the machine. With the previous information is developed a program in Matlab® to provide the necessary data for the subsequent design of the machine.

In the project, as part of the objectives will gather information about the principles and laws that apply to these machines, Briefly describes its applications, Among which can highlight its use as an engine in automation processes and in the system traction (Magnetic levitation), And presents a mathematical model of a generator translational of 20 kW.

With regard to these machines such as power from the tidal power will emphasize the following features:

- The energy that can be obtained from moving to the waves, In his change of heights has a wide range of variation of frequencies, Who are generally low, Therefore the implementation of systems of correction AC/DC is necessary for its distribution with characteristics consistent with the electrical systems.
- The conditions of the place of mount are those that determine the efficiency that will have the machine, this is a better performance at higher altitude and shorter period of the waves.

* Undergraduate Thesis

** Physical-Mechanical Engineering Faculty

Electric, Electronic and Telecommunications Engineering School

Director Ing. Julio César Chacón Velasco.

RESUMEN DEL TRABAJO

Título:

Estudio de las características de máquinas eléctricas traslacionales aplicadas a la generación mareomotriz

Director

Ing. Julio César Chacón Velasco

Equipo de Investigación:

- Samuel Andrés Mendoza Mejía
- Jesús Eulides Arenas Mejía

Tipo de Investigación:

Aplicada

Costo Total:

\$10 906 400 [M/C]

Plazo

12 meses

Programa Nacional de Ciencia y Tecnología:

Entidades Interesadas en los Resultados

- Universidad industrial de Santander - UIS
- Empresas generadoras de energía eléctrica
- Grupo de investigación en sistemas de energía eléctrica - GISEL

Breve Reseña del Proyecto:

En busca de nuevas fuentes de energía, se ha estudiado la posibilidad de aprovechar la energía mareomotriz, por medio de máquinas con movimiento de traslación. Se ha recopilado la información pertinente a este tipo de máquinas y las posibles fuentes de energía que faciliten su aplicación, de las cuales se ha prestado mayor importancia a la energía brindada por el movimiento de las olas.

Objetivos del Proyecto:	
Objetivo Propuesto	Resultado Obtenido
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recopilar información acerca de los principios y leyes que aplican a las máquinas eléctricas traslacionales (lineales). 	<p>Se ha encontrado la información que describe el funcionamiento de una máquina de movimiento de traslación, a partir de las leyes y principios básicos del electromagnetismo.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Describir brevemente las aplicaciones del aprovechamiento energético de este tipo de máquinas. 	<p>Se ha encontrado que este tipo de máquinas tienen múltiples aplicaciones como motor, y además existen muchas formas de energía periódicas y que proporcionan movimientos de traslación, por lo tanto es necesario darle un mayor esfuerzo al desarrollo de esta tecnología.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presentar un modelo matemático de un generador traslacional que satisfaga necesidades de 20 kW de salida. 	<p>Se desarrollo un modelo matemático de un tipo de máquina traslacional por medio de Matlab®.</p>

Actividades de Difusión Realizadas / Programadas:

Se ha publicado un artículo en la revista UIS Ingenierías, bajo el título del presente proyecto. En este se explica el funcionamiento de un generador traslacional aprovechando la energía de las olas y se dan los resultados obtenidos por medio del programa en Matlab® para una máquina con ciertas características como potencia, voltaje, número de imanes, etc.

Impactos del Proyecto:

En nuestro país no se ha dedicado el suficiente tiempo y esfuerzo al estudio de las máquinas eléctricas traslacionales, ya sean como motor o como generador. Por medio de este proyecto se ha dado a conocer los tipos de máquinas eléctricas traslacionales, sus aplicaciones y sus principios de funcionamiento, como una primera etapa en el desarrollo y montaje de esta tecnología en nuestro país.

INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se estudian las características de funcionamiento de máquinas eléctricas traslacionales (lineales) utilizadas como generadores de energía eléctrica a partir de energía mareomotriz. Se hace una recopilación de la bibliografía de las máquinas de este tipo ya existentes y sus aplicaciones, utilizando como medio las diferentes bases de datos a las que tiene acceso la Universidad y a través de Internet.

Con éste proyecto se pretende dar a conocer el uso y características de éste tipo de máquinas como generadoras de energía eléctrica, aprovechando los movimientos de vaivén (ondulatorios) característicos de algunos fenómenos naturales como las olas, o algunos movimientos mecánicos que se ven comúnmente en algunas máquinas.

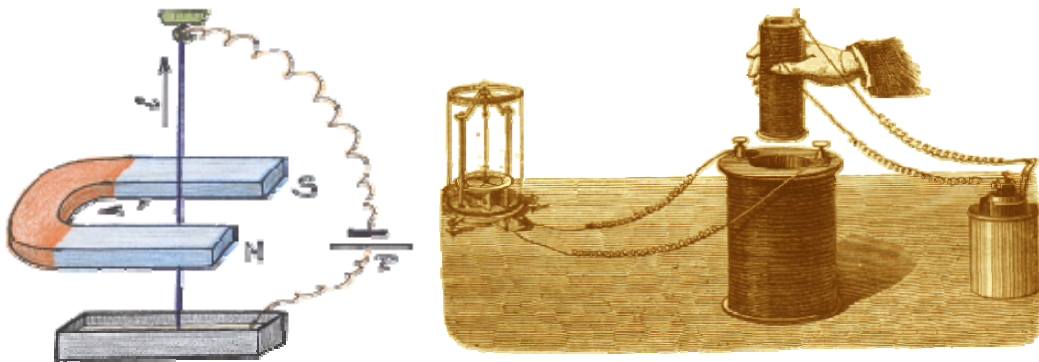
Este proyecto se constituye en una primera etapa que debe consolidarse con el desarrollo que permita la construcción e implementación de prototipos de generadores eléctricos traslacionales (lineales), en busca de mejorar y ampliar la tecnología existente en el aprovechamiento de fuentes alternativas de energía en el país.

1. FUNDAMENTACIÓN HISTÓRICA Y TEÓRICA DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES

El desarrollo del concepto de las máquinas traslacionales se ha dado desde los inicios del estudio de las máquinas eléctricas, incluso desde la realización de los experimentos de Michael Faraday (1831), cuando observó que un imán generaba una corriente eléctrica en las proximidades de una bobina, siempre que el imán o la bobina estuvieran en movimiento. La explicación teórica esta relacionada con los siguientes elementos:

- Es necesario un campo magnético variable (imán, bobina o cable en movimiento) para crear una corriente eléctrica en el cable o en la bobina.
- Esta corriente se conoce como corriente inducida, y al fenómeno, como inducción electromagnética. La corriente eléctrica inducida existe mientras el campo magnético varíe con el tiempo.
- La intensidad de la corriente eléctrica es tanto mayor cuanto más intenso sea el campo magnético y cuanto más rápido se muevan el imán o la bobina.

Figura 1. Experimentos de Michael Faraday



Fuente. http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema9/tema9.html

Aunque los principios de funcionamiento de las máquinas eléctricas traslacionales y los de las rotacionales son básicamente los mismos, pero debido al fuerte desarrollo de las rotacionales, estas, las traslacionales no se tomaron en cuenta sino a principios de los años 1970s, cuando se empezaron a buscar fuentes alternativas de energía (en este caso con la extracción de energía de las olas) debido a la crisis del petróleo. Esta tecnología no alcanzó logros importantes, fue menospreciada y sólo en los años 1990s se retomaron las investigaciones asociadas al avance tecnológico de máquinas para la extracción de energía del mar y el desarrollo de medios de transporte híbridos, entre otros.

1.1 MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES

Una máquina eléctrica es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en otro tipo de energía y viceversa, pasando esta energía por una

etapa de almacenamiento en un campo magnético. Las máquinas eléctricas se clasifican en tres grandes grupos:

- Generadores
- Motores
- Transformadores

Los generadores transforman energía mecánica en eléctrica, mientras que los motores transforman la energía eléctrica en mecánica. Los motores y generadores pueden clasificarse en de corriente continua y de corriente alterna, por su alimentación y salida, respectivamente. Los transformadores conservan la forma de la energía pero transforman sus características.

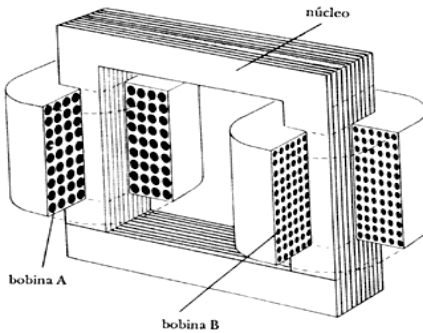
Una máquina eléctrica tiene un circuito magnético y dos circuitos eléctricos. Normalmente a uno de los circuitos eléctricos se llama de excitación, porque al ser recorrido por una corriente eléctrica produce los Amper-vueltas necesarios para crear el flujo establecido en el conjunto de la máquina.

Mecánicamente las máquinas eléctricas se pueden clasificar en de rotación y estáticas. Pero al observar que también existen máquinas de movimiento traslacional ¹, la división más conveniente para las máquinas eléctricas desde el punto de visto mecánico, más específicamente desde la cinemática del inducido o del inductor sería:

- **Estáticas:** Son las que no disponen de partes móviles, es decir, ni su inducido ni su inductor presentan movimiento entre sí. Ejemplos de este tipo de máquina son los transformadores.

¹ En la literatura internacional son llamadas lineales, lo que produce ambigüedad en su interpretación con respecto a las características de algunas en las que su salida es proporcional a alguna variable de entrada.

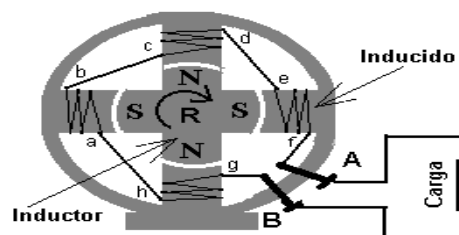
Figura 2. Máquina eléctrica estática



Fuente: http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema9/tema9.html

- **De rotación:** En ellas se encuentra un rotor y un estator; en estas máquinas, dependiendo de su funcionamiento, como motor o generador, hay un elemento que gira en su centro; estas son las máquinas eléctricas comunes, tales como el motor DC, el universal, el síncrono y el asíncrono o de inducción.

Figura 3. Máquina eléctrica de rotación

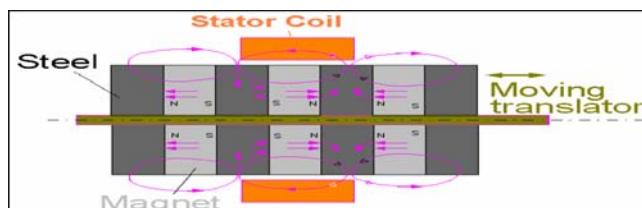


Fuente: http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema9/tema9.html

- **Traslacionales:** Como su nombre lo indica, existe un estator y un elemento que se traslada en su centro, tal como el rotor de las máquinas de rotación. En la literatura se pueden encontrar algunas máquinas de este tipo tales como la máquina lineal síncrona de imán permanente, la

máquina lineal híbrida de Vernie y la máquina tubular de imán permanente con núcleo de aire.

Figura 4. Diagrama de una máquina eléctrica traslacional

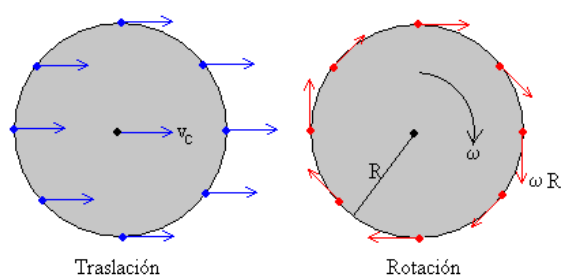


Fuente: Loránd SZABÓ, Claudiu OPREA, "Linear Generators for Wave Power Plants to Be Set up Near the Romanian Coasts of the Black Sea"

La explicación física del principio de funcionamiento de las máquinas traslacionales y rotacionales.² Se resume de la siguiente manera:

El movimiento general de un sólido rígido, es la composición de un movimiento de traslación del centro de masa y de un movimiento de rotación alrededor de un eje que pasa por ese centro. En el movimiento de rodar sin deslizar, la rueda se traslada a la vez que gira.

Figura 5. Descripción de movimiento en sólidos



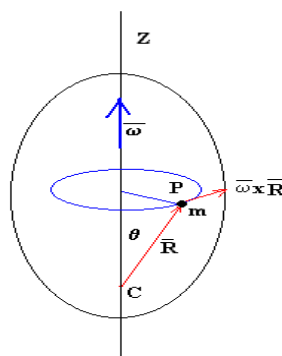
Fuente: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/rodar/mov_rodar.htm

² Mecánica Vectorial para Ingenieros. Dinámica Beer F.P. y Johnston E.R. Editorial McGraw-Hill, 1998, 6ª edición. CAPÍTULO 5

En el movimiento de **traslación**, todos los puntos del sólido se mueven en trayectorias paralelas. La velocidad de un punto del sólido es la misma que la velocidad del centro de masas, es decir, “en un sólido rígido con movimiento de traslación, todos sus puntos tienen la misma velocidad y la misma aceleración instantánea”. En el caso de una traslación curvilínea, dicha aceleración y velocidad varían, tanto en dirección como en módulo. En el movimiento de traslación rectilíneo, todas las partículas del sólido se mueven según rectas paralelas, y su velocidad y aceleración conservan la misma orientación durante todo el movimiento.

En el movimiento de **rotación** alrededor de un eje que pasa por el centro de masas, la velocidad de un punto del sólido es proporcional al radio de la circunferencia que describe, y su dirección es tangente a dicha circunferencia; en este movimiento, las partículas del sólido rígido se mueven en planos paralelos entre sí y perpendiculares al eje, describiendo circunferencias cuyo centro se encuentra situado en el eje fijo; si este eje, denominado eje de rotación, corta el sólido, las partículas situadas en él carecen de velocidad y aceleración.

Figura 6. Vectores de movimiento en sólidos



Fuente: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/rodar/mov_rodar.htm

1.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Las leyes básicas del electromagnetismo están resumidas en el conjunto de ecuaciones de Maxwell, que describen por completo tanto los fenómenos eléctricos como los magnéticos. La gran contribución de James Clerk Maxwell fue reunir en estas ecuaciones largos años de resultados experimentales, debidos a Coulomb, Gauss, Ampere, Faraday y otros, introduciendo los conceptos de campo y corriente de desplazamiento, y unificando los campos eléctrico y magnético en un solo concepto: el campo electromagnético.

Los principios electromagnéticos de funcionamiento de una máquina eléctrica traslacional son básicamente los mismos que para las máquinas eléctricas rotacionales.

1.2.1 LEY DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE FARADAY-HENRY:

El descubrimiento, debido a Hans Christian Oersted, de que una corriente eléctrica produce un campo magnético estimuló la imaginación de los físicos de la época y multiplicó el número de experimentos en busca de relaciones nuevas entre la electricidad y el magnetismo. En ese ambiente científico pronto surgiría la idea inversa de producir corrientes eléctricas mediante campos magnéticos. Algunos físicos famosos y otros menos conocidos estuvieron cerca de demostrar experimentalmente que también la naturaleza apostaba por tan atractiva idea. Pero fue Faraday el primero en precisar en qué condiciones podía ser observado semejante fenómeno.

A las corrientes eléctricas producidas mediante campos magnéticos Michael Faraday las llamó *corrientes inducidas*. Desde entonces al fenómeno consistente en generar campos eléctricos a partir de campos magnéticos variables se denomina *inducción electromagnética*.

La inducción electromagnética es la producción de corrientes eléctricas por campos magnéticos variables con el tiempo. El descubrimiento de

Faraday y Henry ³ de este fenómeno introdujo una cierta simetría en el mundo del electromagnetismo. James Clerk Maxwell consiguió reunir en una sola teoría los conocimientos básicos sobre la electricidad y el magnetismo. Su teoría electromagnética predijo, antes de ser observadas experimentalmente, la existencia de ondas electromagnéticas. Heinrich Rudolf Hertz comprobó su existencia e inició para la humanidad la era de las telecomunicaciones.

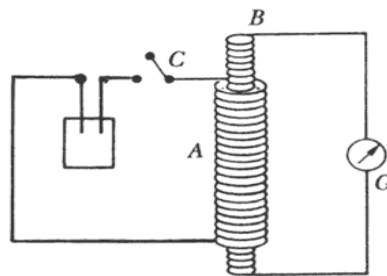
Las experiencias de Faraday

Las experiencias que llevaron a Faraday al descubrimiento de la inducción electromagnética pueden ser agrupadas en dos categorías: experiencias con corrientes y experiencias con imanes.

En primer lugar preparó dos solenoides, uno arrollado sobre el otro, pero aislados eléctricamente entre sí. Uno de ellos lo conectó a una pila y el otro a un galvanómetro y observó cómo cuando accionaba el interruptor del primer circuito la aguja del galvanómetro del segundo circuito se desplazaba, volviendo a cero tras unos instantes. Sólo al abrir y al cerrar el interruptor el galvanómetro detectaba el paso de una corriente que desaparecía con el tiempo. Además, la aguja se desplazaba en sentidos opuestos en uno y otro caso.

³ Independiente de Faraday, Joseph Henry realizó experimentos que lo llevaron a las mismas conclusiones de Faraday.

Figura 7. Esquema del experimento de Faraday con que descubrió la inducción electromagnética

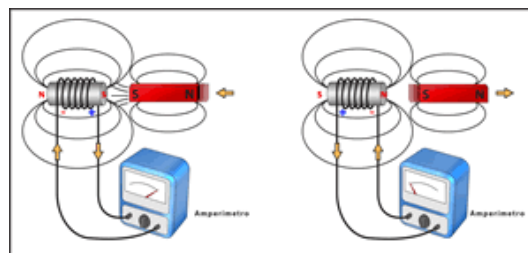


Fuente.

http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_7.htm

En el segundo grupo de experiencias Faraday utilizó un imán recto y una bobina conectada a un galvanómetro. Al introducir bruscamente el imán en la bobina observó una desviación en la aguja, desviación que desaparecía si el imán permanecía inmóvil en el interior de la bobina. Cuando el imán era retirado la aguja del galvanómetro se desplazaba de nuevo, pero esta vez en sentido contrario. Cuando repetía todo el proceso completo la aguja oscilaba de uno a otro lado y su desplazamiento era tanto mayor cuanto más rápido era el movimiento del imán entrando y saliendo en el interior de la bobina. Lo mismo sucedía cuando mantenía quieto el imán y movía la bobina sobre él.

Figura 8. Esquema del experimento de Faraday con que descubrió las corrientes inducidas a partir del magnetismo



Fuente.

http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_7.htm

La representación del campo magnético en forma de líneas de fuerza permitió a Faraday encontrar una explicación intuitiva para este tipo de fenómenos. Para que se produjera una corriente inducida en la bobina era necesario que las líneas de fuerza producidas por el imán fueran cortadas por el hilo conductor de la bobina como consecuencia del movimiento de uno u otro cuerpo. En el primer grupo de experiencias, las líneas de fuerza, al aparecer y desaparecer junto con la corriente debida a la pila, producían el mismo tipo de efectos. Las experiencias anteriores a las de Faraday, al no tener en cuenta los aspectos dinámicos, o de cambio con el tiempo, de esta clase de fenómenos, no pudieron detectar este tipo de corrientes que aparecen en un circuito eléctrico sin que exista dentro del propio circuito ninguna pila que las genere.

La ley de Faraday–Henry

Independientemente de Faraday, Joseph Henry, en los Estados Unidos, había observado que un campo magnético variable produce en un circuito próximo una corriente eléctrica. Los resultados concordantes de las experiencias de ambos físicos pueden resumirse en un enunciado que se conoce como ley de Faraday–Henry:

La fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en un circuito es proporcional a la rapidez con la que varía el flujo magnético que lo atraviesa. O en forma matemática:

$$e = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Siendo:

- e: la fuerza electromotriz inducida
- $\Delta\phi_B$: la variación de flujo magnético que se produce en el intervalo de tiempo Δt .

De acuerdo con la ecuación 1.1, la magnitud de la f.e.m. inducida coincide con la variación del flujo magnético por unidad de tiempo. La presencia de la fuerza electromotriz e en la ley de Faraday–Henry en lugar de la intensidad de corriente (ambas son proporcionales entre sí), resalta la característica de la inducción, es decir, su capacidad para sustituir a un generador, ó para producir los mismos efectos que éste en un circuito eléctrico. Por su parte, el signo negativo recoge el hecho, observado experimentalmente por Lenz ⁴, de que aumentos ($\Delta\phi_B > 0$) y disminuciones ($\Delta\phi_B < 0$) de flujo magnético producen corrientes inducidas de sentidos opuestos.

Si no hay variación con el tiempo del flujo magnético que atraviesa un circuito, el fenómeno de la inducción electromagnética no se presenta. Tal circunstancia explica los fracasos de aquellos físicos contemporáneos de Faraday que pretendieron conseguir *corrientes inducidas* en situaciones estáticas, o de reposo, del circuito respecto del imán o viceversa.

Cuando la ley de Faraday–Henry se aplica a una bobina formada por N espiras iguales toma la forma:

$$e = -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \quad (1.2)$$

siendo $\Delta\phi_B/\Delta t$ la variación del flujo magnético por unidad de tiempo para una sola espira en la bobina.

El sentido de las corrientes inducidas

Lenz quien investigó el electromagnetismo en Rusia al mismo tiempo que Faraday y Henry, propuso la siguiente explicación del sentido de

⁴ Lenz (1804–1865): Físico Alemán

circulación de las corrientes inducidas que se conoce como *ley de Lenz*, ya que, aunque la ley de Faraday–Henry, a través de su signo negativo, establece una diferencia entre las corrientes inducidas por un aumento del flujo magnético y las que resultan de una disminución de dicha magnitud, no explica este fenómeno:

Las corrientes que se inducen en un circuito se producen en un sentido tal que con sus efectos magnéticos tienden a oponerse a la causa que las originó.

Así, cuando el polo norte de un imán se aproxima a una espira, la corriente inducida circulará en un sentido tal que la cara enfrentada al polo norte del imán sea también Norte, con lo que ejercerá una acción magnética repulsiva sobre el imán, la cual es preciso vencer para que se siga manteniendo el fenómeno de la inducción. Inversamente, si el polo norte del imán se aleja de la espira, la corriente inducida a de ser tal que genere un polo Sur que se oponga a la separación de ambos. Sólo manteniendo el movimiento relativo entre espiras e imán persistirán las corrientes inducidas, de modo que si se detiene el proceso de acercamiento o de separación cesarían aquéllas y, por tanto, la fuerza magnética entre el imán y la espira desaparecería.

La ley de Lenz, que explica el sentido de las corrientes inducidas, puede ser a su vez explicada por un principio más general, el *principio de la conservación de la energía*. La producción de una corriente eléctrica requiere un consumo de energía y la acción de una fuerza desplazando su punto de aplicación supone la realización de un trabajo. En los fenómenos de inducción electromagnética es el trabajo realizado, en contra de las fuerzas magnéticas que aparecen entre espira e imán, el que suministra la energía necesaria para mantener la corriente inducida. Si no hay desplazamiento, el trabajo es nulo, no se transfiere energía al sistema y las corrientes inducidas no pueden aparecer. Análogamente, si éstas no se opusieran a la acción magnética del imán, no habría trabajo exterior, ni por tanto cesión de energía al sistema.

Finalmente en forma general, la Ley de Faraday (-Lenz o Henry) puede expresarse de la siguiente manera:

“Si se tiene un campo magnético variable con el tiempo, una fuerza electromotriz es inducida en cualquier circuito eléctrico; y esta fuerza es igual a menos la derivada temporal del flujo magnético”, así:

$$e = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (1.3)$$

Como el campo magnético es dependiente de la posición se tiene que el flujo magnético es igual a:

$$\phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1.4)$$

Además, el que exista fuerza electromotriz indica que existe un campo eléctrico relacionado con la *f.e.m.* así:

$$e = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.5)$$

Con lo que finalmente se obtiene la expresión de la ley de Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1.6)$$

Lo que indica que un campo magnético que depende del tiempo implica la existencia de un campo eléctrico, del que su circulación por un camino arbitrario cerrado es igual al menos a la derivada temporal del flujo magnético en cualquier superficie limitada por el camino cerrado.

La forma diferencial de la ecuación 1.6 es la ecuación 1.7:

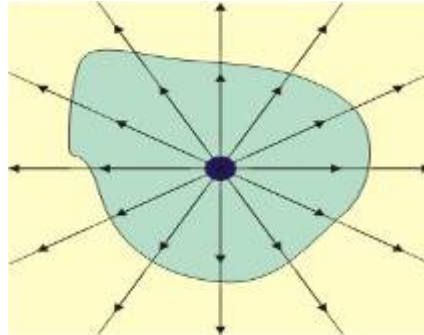
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.7)$$

La ecuación 1.7 relaciona los campos eléctrico y magnético, pero tiene también muchas otras aplicaciones prácticas. Esta ecuación describe cómo los motores eléctricos y los generadores eléctricos funcionan. Más

precisamente, demuestra que un voltaje puede ser generado variando el flujo magnético que atraviesa una superficie dada.

1.2.2 LEY DE GAUSS PARA EL CAMPO ELÉCTRICO

Figura 9. Flujo eléctrico de una carga puntual en una superficie cerrada.



Fuente. Los autores

La ley de Gauss explica la relación entre el flujo del campo eléctrico y una superficie cerrada. Se define como flujo eléctrico (ψ) a la cantidad de *fluido eléctrico* que atraviesa una superficie dada. Análogo al flujo de la mecánica de fluidos, el fluido eléctrico no transporta materia, pero ayuda a analizar la cantidad de campo eléctrico (\vec{E}) que pasa por una superficie. Matemáticamente se expresa como:

$$\psi = \oint_s \vec{E}_{(r)} \cdot d\vec{s} \quad (1.8)$$

La ley establece que el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es igual al cociente entre la carga (q) o la suma de las cargas que hay en el interior de la superficie y la permitividad eléctrica en el vacío (ϵ_0), así:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.9)$$

La forma diferencial de la ley de Gauss es

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon_0} \quad (1.10)$$

Donde ρ_v es la densidad de carga. Esta expresión es para una carga en el vacío, para casos generales se debe introducir una cantidad llamada densidad de flujo eléctrico (\vec{D}) y la expresión obtiene la forma:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (1.11)$$

1.2.3 LEY DE GAUSS PARA CAMPO MAGNÉTICO

Al igual que para el campo eléctrico, existe una **ley de Gauss para el campo magnético**, que se expresa en sus formas integral y diferencial como:

$$\oint_s \vec{B}(\vec{r}) \cdot d\vec{S} = 0 \quad (1.12)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.13)$$

Esta ley expresa la inexistencia de cargas magnéticas o, como se conocen habitualmente, monopolos magnéticos. Las distribuciones de fuentes magnéticas son siempre neutras en el sentido de que posee un polo norte y un polo sur, por lo que su flujo a través de cualquier superficie cerrada es nulo.

1.2.4 LEY DE AMPÈRE

Ampère formuló una relación para un campo magnético inmóvil y una corriente eléctrica que no varía en el tiempo. La ley de Ampère dice que la circulación en un campo magnético (\vec{B}) a lo largo de una curva C es igual

a la densidad de corriente (\vec{J}) sobre la superficie encerrada en la curva C, matemáticamente así:

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (1.14)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío.

Cuando esta relación se la considera a campos que varían a través del tiempo se llega a cálculos erróneos, como el de violar el principio de conservación de la carga. Maxwell corrigió esta ecuación para lograr adaptarla a campos no estacionarios y posteriormente pudo ser comprobada experimentalmente. Maxwell reformuló esta ley con la ecuación 1.15:

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_s \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (1.15)$$

En el caso específico estacionario esta relación corresponde a la ley de Ampère, además confirma que un campo eléctrico que varía con el tiempo produce un campo magnético y además es consecuente con el principio de conservación de la carga.

En forma diferencial, la ecuación 1.15 toma la forma de:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.16)$$

1.2.5 EN MEDIOS MATERIALES

Para el caso de cargas en medios materiales, y asumiendo que éstos son lineales, homogéneos, isotrópicos y no dispersivos, se tiene una relación entre los vectores intensidad e inducción a través de dos parámetros conocidos como permitividad eléctrica ε y la permeabilidad magnética μ :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (1.17)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (1.18)$$

Estos valores también dependen del medio material, por lo que se dice que un medio es lineal cuando la relación entre E/D y B/H es lineal. Si esta relación es lineal, matemáticamente se puede decir que ϵ y μ están representadas por una matriz 3x3. Si un medio es isótropo es porque esta matriz ha podido ser diagonalizada y consecuentemente es equivalente a una función $\epsilon(x, y, z)$; si en esta diagonal uno de los elementos es diferente al otro se dice que es un medio anisótropo. ϵ y μ son las constantes dieléctrica y magnética. Cuando estas constantes no dependen de su posición, el medio es homogéneo.

El valor de ϵ y μ en medios lineales no depende de las intensidades del campo. Por otro lado, la permitividad y la permeabilidad son escalares cuando las cargas están en medios homogéneos e isotrópicos. Los medios heterogéneos y anisótropos dependen de las coordenadas de cada punto por lo que los valores, escalares, van a depender de la posición. Los medios anisotrópicos son tratados como tensores.

Finalmente, en el vacío tanto ρ_v como \vec{J} son cero porque se supone que no hay fuentes.

En la tabla 1 se encuentran a las ecuaciones de Maxwell como se escriben en la forma más general.

Tabla 1. Ecuaciones de Maxwell

Nombre	Forma diferencial	Forma integral
NOMBRE	FORMA DIFERENCIAL	FORMA INTEGRAL
Ley de Gauss:	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v$	$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q = \int_v \rho_v dv$
Ley de Gauss para el campo magnético:	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$
Ley de Faraday:	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$
Ley de Ampère generalizada:	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} + \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$

Estas cuatro ecuaciones junto con la fuerza de Lorentz son las que explican cualquier tipo de fenómeno electromagnético. Una fortaleza de las ecuaciones de Maxwell es que permanecen invariantes en cualquier sistema de unidades, salvo pequeñas excepciones, y que son compatibles con la relatividad especial y general. Además Maxwell descubrió que la cantidad $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ era simplemente la velocidad de la luz en el vacío, por lo que la luz es una forma de radiación electromagnética. Los valores

aceptados actualmente para la velocidad de la luz, la permitividad y la permeabilidad magnética se resumen en la tabla 2:

Tabla 2.c, ε_0 y μ_0

Símbolo	Nombre	Valor numérico	Unidad de medida SI	Tipo
c	Velocidad de la luz	$2,998 \times 10^8$	m/s	definido
ε_0	Permitividad eléctrica	$8,854 \times 10^{-12}$	F/m	derivado
μ_0	Permeabilidad magnética	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m	definido

En las ecuaciones de Maxwell, los campos vectoriales no son solo funciones de la posición, en general son funciones de la posición y del tiempo, como por ejemplo $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$. Para la resolución de estas ecuaciones en derivadas parciales, las variables posiccionales se encuentran con la variable temporal. En la práctica, la resolución de dichas ecuaciones pueden contener una solución armónica (sinusoidal).

Con ayuda de la notación compleja se puede evitar la dependencia temporal de los resultados armónicos, eliminando así el factor complejo de la expresión $e^{j\omega t}$. Gran parte de las resoluciones de las ecuaciones de Maxwell toman amplitudes complejas, además de no ser solo función de la posición. En lugar de la derivación parcial en el tiempo se tiene la multiplicación del factor imaginario $j\omega$, donde ω es la frecuencia angular.

En la forma compleja, las ecuaciones de Maxwell se escriben de manera:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (1.19)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.20)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (1.21)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \quad (1.22)$$

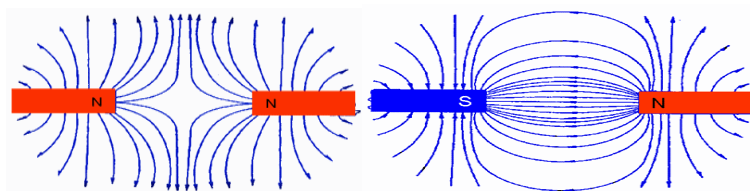
1.2.6 MAGNETISMO Y MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

La fuerza magnética y el **campo magnético** son consecuencia de la existencia de los polos magnéticos (polos Norte y Sur).

Las líneas de campo magnético permiten estimar en forma aproximada el campo magnético existente en un punto dado, tomando en cuenta las siguientes características:

- Las líneas de campo magnéticos son siempre lazos cerrados que van de norte a sur por fuera del imán y de sur a norte por dentro del imán.
- Los lazos magnéticos nunca se entrecruzan.
- Las líneas magnéticas de imanes diferentes se atraen y se repelen entre sí: Las líneas del mismo sentido se atraen y las de sentido opuesto se repelen.

Figura 10. Líneas de flujo entre polos magnéticos



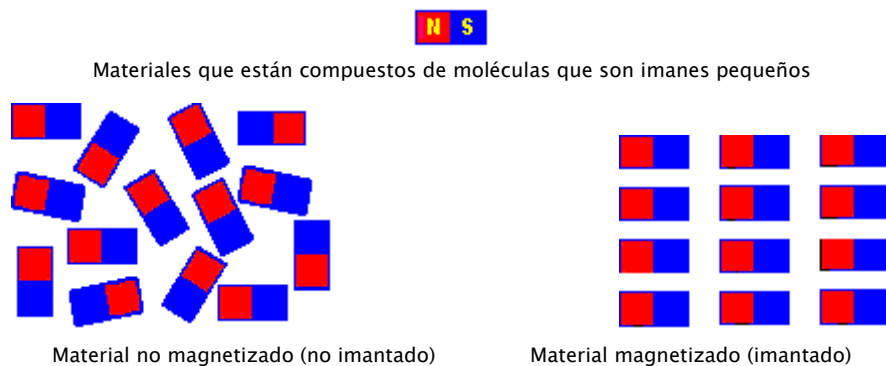
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos30/particulas-magneticas/particulas-magneticas.html>

La mayoría de los materiales no responden a un campo magnético, sin embargo, hay algunos materiales, llamados ferromagnéticos, que son sensibles y responden a excitaciones magnéticas.

Estos materiales constan de moléculas que son como imanes pequeños, dipolos magnéticos los cuales tienen polos norte y sur e inducen un campo magnético. Originalmente estas moléculas tienen una orientación aleatoria. Esto causa que sus campos se cancelen entre sí y parecen no tener propiedades magnéticas.

Cuando se aplica una fuerza magnética exterior las moléculas se alinean en el sentido de la fuerza exterior. Así los campos magnéticos se unen (suman) y estos materiales se comportan como imanes (están imantados).

Figura 11. Ordenamiento de dipolos según el estado del material



Fuente: http://www.unicrom.com/tut_campomagnetico.asp

Algunos de estos materiales se mantienen imantados por poco, mucho tiempo o permanentemente. Esta capacidad de mantenerse imantado, se llama retentividad. Un imán permanente está hecho de un material con alta retentividad.

Otra característica de un imán permanente es su capacidad de mantener su imantación en presencia de un campo magnético exterior.

Lo opuesto a la imantación se llama resistencia magnética. Lo opuesto a la resistencia magnética es la permeabilidad (facilidad con que un material es imantado).

La dependencia del campo magnético (B) de la estructura molecular del material en que reside, lleva a definir la intensidad de campo magnético (H) producida por un campo exterior, como si fuera aplicada en el vacío.

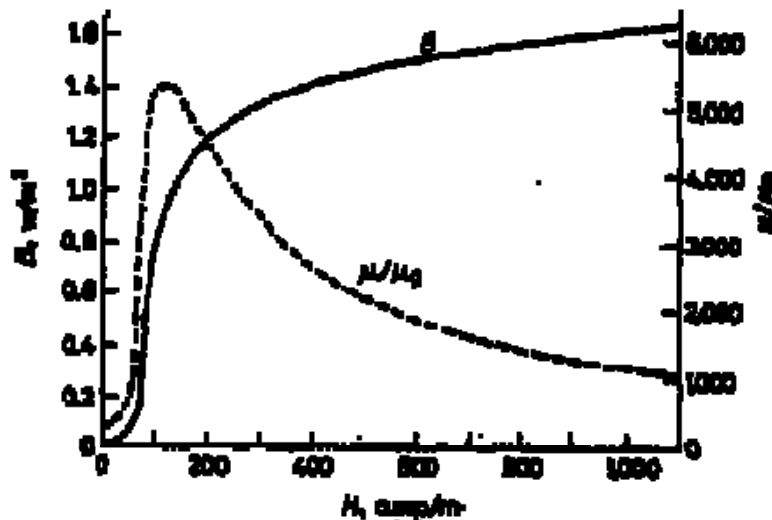
La relación entre B y H está dada por la permeabilidad del material al cual se aplica el campo magnético, se da en la ecuación 1.18.

Los materiales ferromagnéticos afectan drásticamente las características de los sistemas en los que se los usa. Los materiales ferromagnéticos no son lineales. Esto significa que las relaciones entre \vec{B} y \vec{H} (o entre \vec{H} y \vec{M} , la magnetización) no corresponden a líneas rectas. En realidad, lo que ocurre es más complicado; la relación entre \vec{B} y \vec{H} presenta el fenómeno de *histéresis*. Esto significa que, cuando se somete al material a un ciclo de operación, la magnetización (relación B-H) sigue una curva complicada. En general, se considera que el campo excitante es H (pues está directamente relacionado a la corriente). Puede entonces ocurrir que $H=0$, y tanto B como M sean distintos de cero: esto es lo que se conoce corrientemente como un imán. Los materiales ferromagnéticos a temperatura ambiente son el Hierro, el Níquel, el Cobalto, y unas tierras raras como el gadolinio, el terbio, el disprosio; Los materiales magnéticos mas utilizados, son aleaciones que en su mayoría contienen hierro en su composición. Desde el punto de vista tecnológico son muy importantes para aplicaciones en generación de energía, en motores eléctricos, en almacenamiento de información (cintas y discos magnéticos), etc.

Para entender el fenómeno, se parte de una muestra de material ferromagnético, inicialmente desmagnetizada. Se considera que el parámetro de control experimental es el campo \vec{H} , pues éste está

directamente relacionado a la corriente eléctrica (por la ley de Ampère). Si el campo \vec{H} se incrementa, desde cero, la magnetización del material crecerá monótonamente, describiendo una curva como la de la figura 12. Si se definiera $\mu = B/H$, el valor de μ sería una función de H con un rango de variación de varios órdenes de magnitud. Se observa, en primer lugar la existencia de una *saturación*; esto es, que si el campo H alcanza un valor suficientemente elevado, la magnetización M alcanza un valor máximo, que depende del material. Este resultado experimental puede entenderse simplemente, pues significa que en una muestra saturada todos los dipolos magnéticos elementales se han alineado con el campo H.

Figura 12. Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro comercial (recocido)

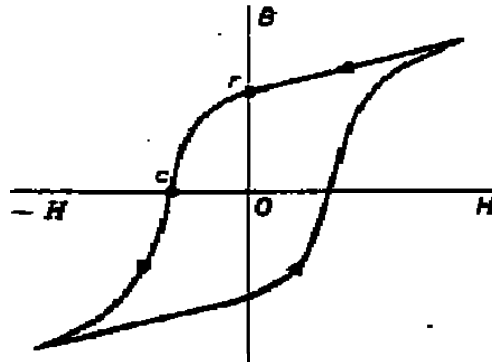


Fuente: <http://cabierta.uchile.cl/libros/c-utreran/node104.html>

En una segunda etapa la muestra ya está magnetizada, y en presencia de un campo \vec{H} ($\vec{H} \neq 0$). Si ahora se disminuye \vec{H} , la relación $B-H$ no describe la curva inicial de la Figura 12, sino que regresa por una nueva curva, como la de la figura 13, llegando hasta el punto r , en donde $H=0$, pero $\vec{B} \neq 0$. Si ahora se continúa aumentando H en sentido inverso al original, la muestra adquiere una magnetización invertida, pasando por el

punto **c**, en donde $B=0$, pero $\vec{H} \neq 0$. Si ahora se hace aumentar H , entonces B regresa por la parte inferior de la curva $B-H$. Se observa que la curva para H creciente es distinta a aquella para H decreciente. Este fenómeno se denomina histéresis, y la figura 13 es la llamada *curva de histéresis del material*.

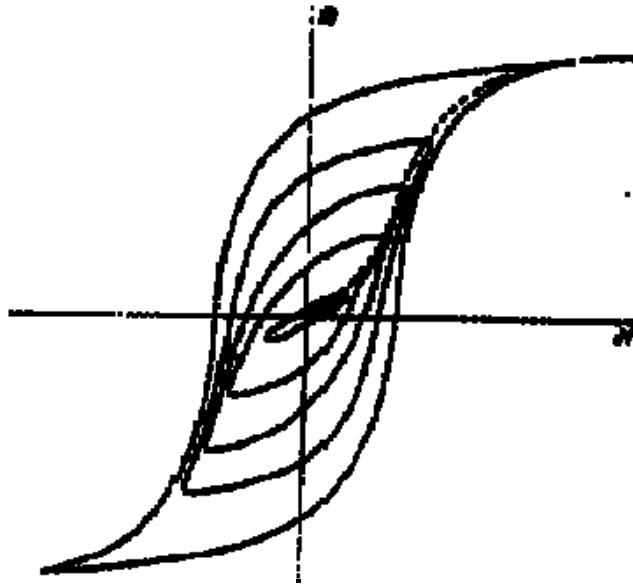
Figura 13. Curva de histéresis para un material ferromagnético.



Fuente: <http://cabierta.uchile.cl/libros/c-utrerar/node104.html>

Se observa que la curva de histéresis depende del material, pero además del valor máximo de H al cual se encuentra sometido el material. Si el valor de H_{max} es suficientemente intenso, la forma de la curva no cambia al aumentar H_{max} , como se observa en la figura 14.

Figura 14. Curvas de histéresis de un material, para varios valores de H_{max} . La línea punteada muestra la saturación de la curva B-H.



Fuente: <http://cabierta.uchile.cl/libros/c-utreran/node104.html>

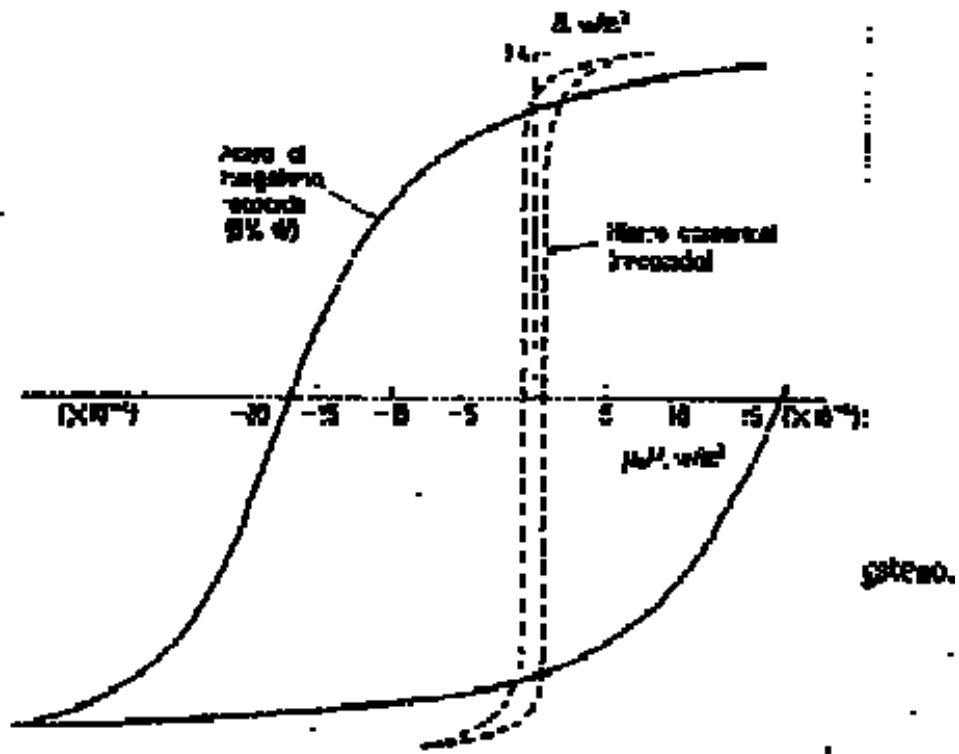
Las aplicaciones más frecuentes de los materiales ferromagnéticos son:

1. Para aumentar el flujo en circuitos de corriente (motores, generadores).
2. Como fuentes de campo magnético (imanes)
3. En almacenamiento magnético de información.

Cuando una muestra de material ferromagnético se utiliza como imán, primero se le magnetiza hasta su saturación, y luego se elimina el campo H . El campo magnético remanente B en r se llama retentividad.

Para ilustrar la gran variedad de comportamiento magnético entre los materiales ferromagnéticos, se muestran las curvas de histéresis para dos materiales distintos, el hierro comercial y un acero al tungsteno, en la Figura 15.

Figura 15. Curvas de histéresis para hierro comercial y acero al tungsteno.



Fuente: <http://cabierta.uchile.cl/libros/c-utrerar/node104.html>

Las PM-LMA ⁶ con bobina central en movimiento siguen el principio del micrófono en donde un imán permanente en forma de anillo se ubica en el espacio cilíndrico formado por el entrehierro, el cual se llena parcialmente con la bobina en movimiento construida con anillos colocados en un aislador eléctrico de gran resistencia mecánica.

Con el movimiento axial de vaivén, el campo del imán permanente induce una fuerza electromotriz $e(t)$ en la bobina que es proporcional a la velocidad lineal $\frac{dx}{dt}$, la densidad de flujo $B_{g\ PM}$, la longitud promedio de las vueltas $n_c = n'_c \frac{(l_{recorrido} + l_{PM})}{l_{PM}}$ y el número de vueltas activas n'_c por longitud del imán permanente l_{PM} ; lo que resulta expresado en la ecuación 2.1:

$$e(t) = -\frac{dx}{dt} n'_c l_{av} B_{PM_{av}} \quad (2.1)$$

Como se observa en la figura 16 :

$l_{recorrido}$ corresponde la longitud total del movimiento en medio periodo.

l_{av} la distancia promedio abarcada por el bobinado.

n_c corresponde al número total de vueltas en la bobina.

$B_{g\ PM}$ es la densidad de flujo producida por los imanes permanentes en el entrehierro.

La longitud de la bobina en esta máquina es mayor que la longitud del imán permanente, l_{PM} , como se ilustra en la Figura 16.

$$l_{recorrido} = 2x_{\max} \quad (2.2)$$

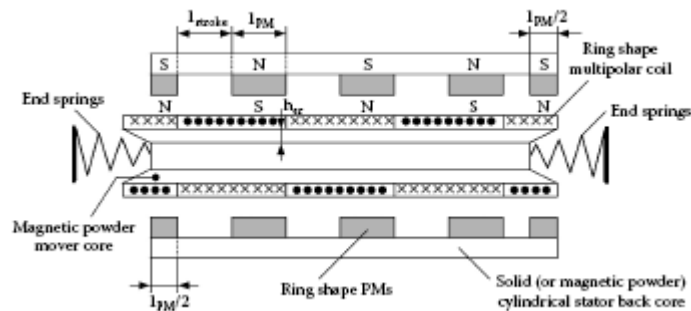
⁶ PM-LMA: Siglas en ingles de Alternador de Movimiento Lineal con Imán Permanente (Permanent Magnet- Linear Motion Alternador)

$$n_c = n'_c \frac{(l_{re corrido} + l_{PM})}{l_{PM}} \quad (2.3)$$

La ecuación 2.3 indica que solo parte de la bobina en movimiento que envuelve el imán es activa en términos de *fem*; mientras que la totalidad de la bobina se tiene en cuenta para considerar su resistencia e inductancia. Para que toda la bobina fuese activa en el proceso de generación eléctrica, los imanes permanentes deberían ser más largos que la bobina.

Una ventaja de este tipo de generadores traslacionales es su bajo peso, pero sus grandes pérdidas en cobre son una característica significativa a tener en cuenta en el momento del diseño.

Figura 17. Máquina con bobina central en movimiento multipolar.



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

Para la utilización de este tipo de máquinas, es conveniente pensar en generadores multipolares que tienen la misma estructura que las monopolares, con la diferencia que las bobinas deben ser montadas en paralelo o en contra serie para lograr salidas de corriente y tensión con diferentes ángulos. Sin embargo, este tipo de máquina presenta los

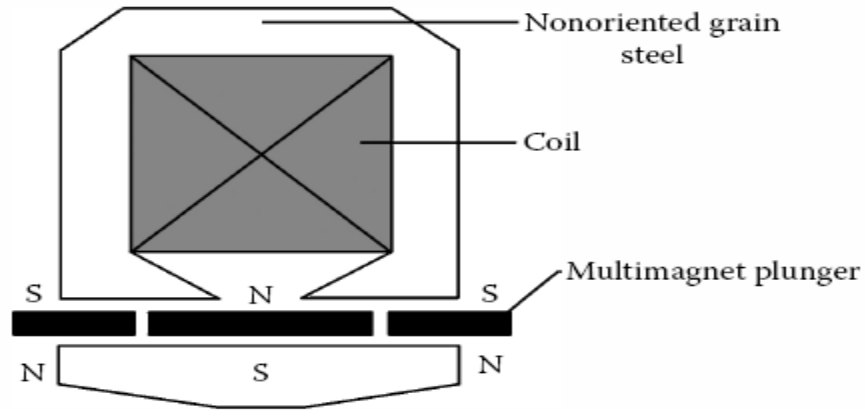
mismos problemas que la monofásica, ya que se debe aumentar la rigidez del trasladador, y aún así no se puede evitar que la totalidad de las bobinas aporten pérdidas al sistema.

2.2 MÁQUINAS TRASLACIONALES CON IMANES PERMANENTES EN EL TRASLADOR

Este tipo de máquinas se caracteriza por tener los imanes permanentes en el trasladador. Se dividen en varias clases, dependiendo de su modo de construcción, lo cual hace que varíen ciertas características tales como la concentración de flujo, la inductancia de las bobinas y el peso del núcleo del estator. Por lo tanto la adecuada selección de una configuración, es un factor determinante en las características deseadas de la máquina cuando se trata de evaluar los costos para su construcción.

En la figura 18 se observa un esquema de la máquina eléctrica traslacional con entrehierro radial e imanes permanentes tubulares en el trasladador. Básicamente esta conformada por una bobina en el estator rodeada por un núcleo en forma de U, que puede ser fabricado a partir de láminas compactadas o de núcleo compacto construido de polvo magnético. El trasladador es de dos polos y en la superficie de este están adheridos los imanes permanentes, de tal modo que queden aislados del eje del trasladador.

Figura 18. Máquina traslacional con entre hierro radial e imanes permanentes tubulares en el trasladador



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Tailor & Francis, 2006

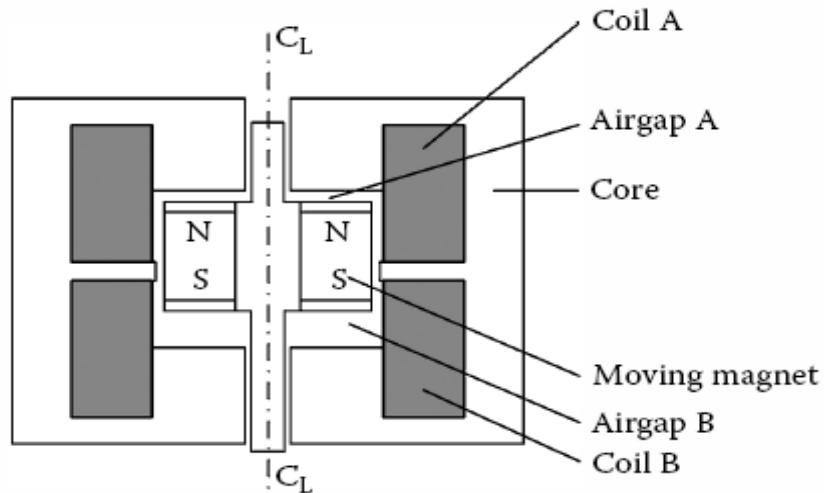
Fabricar el estator de una máquina de núcleo compacto de polvo magnético es más sencillo, pero por la geometría y peso de los imanes permanentes hacen que la fuerza electromagnética de la máquina sea aproximadamente un 30% menor a la de una máquina con núcleo de láminas compactas ⁷. En esta máquina y como se puede apreciar en la figura 18, cada medio periodo del movimiento, el flujo cambia de dirección, por lo que es considerada como una máquina de flujo reversible, y dado su diseño presenta altas cantidades de fugas de flujo.

La fragilidad del trasladador y las fugas de flujo de los imanes permanentes cada medio polo son, junto con las dificultades de construcción de la máquina, los factores determinantes para mejorar la concentración del flujo magnético y la eficiencia de la máquina. Por lo anterior se planteó un nuevo tipo de máquina de entrehierro axial e imanes permanentes

⁷ Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Tailor & Francis, 2006, capítulo 12.

tubulares en el traslador, la cual es conocida como máquina lineal síncrona de imanes permanentes. figura 19.

Figura 19.Máquina de entrehierro axial e imanes permanentes tubulares en el traslador.



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Tailor & Francis, 2006

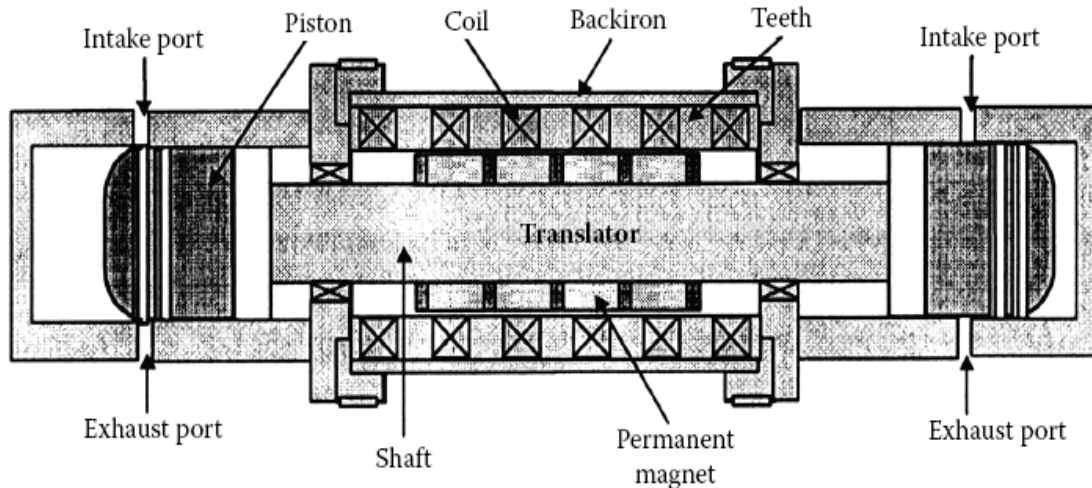
Esta máquina se comporta mejor para pequeñas longitudes de movimiento (máximo 10 mm) manteniendo la misma facilidad de construcción que la máquina anterior.

La ventaja de esta versión de la máquina radica en que se aprovechan mejor las líneas de flujo en cada bobina, y además el flujo no cambia de dirección, solo varía de un valor mínimo a otro valor máximo.

El principal problema de los dos tipos de máquinas anteriormente mencionados esta asociado con la baja concentración de flujo magnético, aunque se caractericen por tener una baja inductancia.

En la figura 20 se ve una máquina traslacional similar a la anterior, pero multipolar, la cual esta en estudio para ser usada en vehículos híbridos. En este tipo de máquinas multipolares el número de bobinas debe ser superior al número de imanes permanentes.

Figura 20. Máquina eléctrica traslacional multipolar de imanes permanentes tubulares en el traslador.

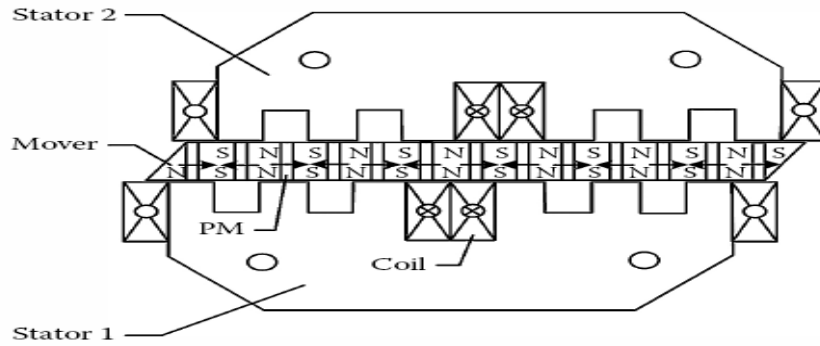


Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

Buscando incrementar la densidad de flujo se diseñaron otros tipos de máquinas, sin embargo, el incremento de la inductancia se mantiene como un problema propio de su funcionamiento. Estas máquinas físicamente constan de un traslador plano con imanes permanentes y un estator con múltiples dientes. Figura 21.

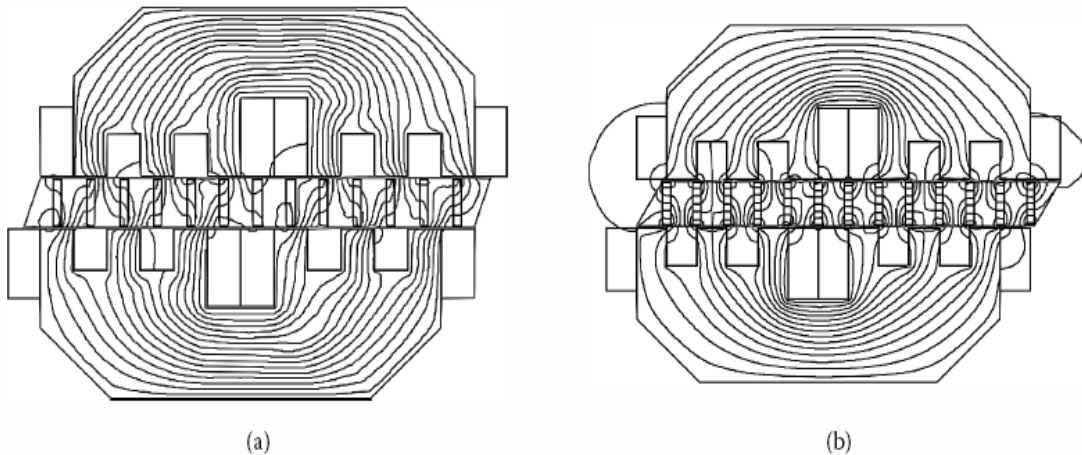
En la figura 21 se observa que los imanes permanentes, los cuales corresponden a los pequeños segmentos rectangulares, polarizan la parte metálica del traslador o eje, tal como lo indican las flechas, obteniendo unas líneas de flujo de acuerdo a la figura 22, las cuales cambian de dirección dependiendo de la posición del traslador.

Figura 21. Máquina eléctrica traslacional de flujo reversible con imanes permanentes planos y de alta densidad de flujo.



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

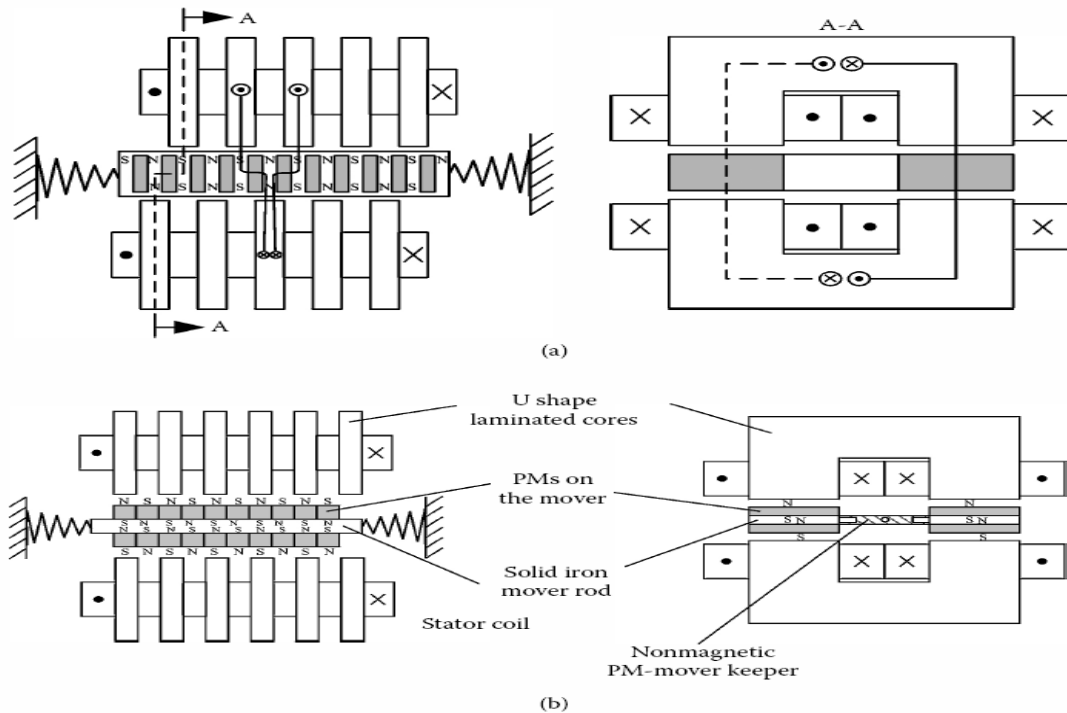
Figura 22. Máquina eléctrica traslacional de flujo reversible con imanes permanentes planos y de alta densidad de flujo. (Distribución del flujo magnético). a) Traslador en el extremo derecho, b) Traslador en la posición central.



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

Además de esta máquina también existe las máquinas de imanes permanentes planos pero de flujo transversal al movimiento del traslador figura 23.

Figura 23. Máquinas traslacionales de imanes permanentes planos de flujo transversal al movimiento. a) Con flujo concentrado, b) sin flujo concentrado.



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

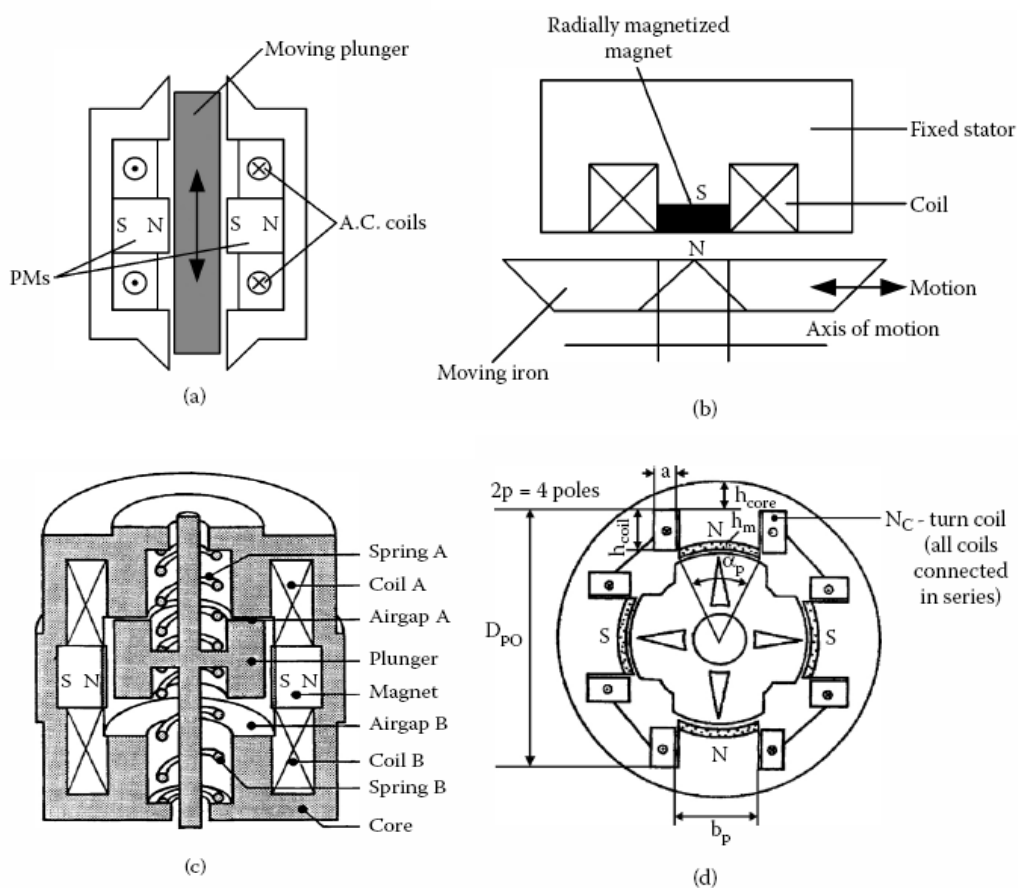
En las máquinas de imanes permanentes planos el flujo va en dirección transversal al movimiento del trasladador, lo cual es parecido al concepto de flujo transversal de las máquinas de rotación de imán permanente. Las máquinas de flujo transversal trabajan como lo hacen las de flujo reversible pero requieren una estructura especial para sostener al estator y a sus bobinas debido a que este no es uno solo como en las máquinas anteriores, sino que consta de varios núcleos independientes, haciéndolo más sencillo de construir aunque más pesado.

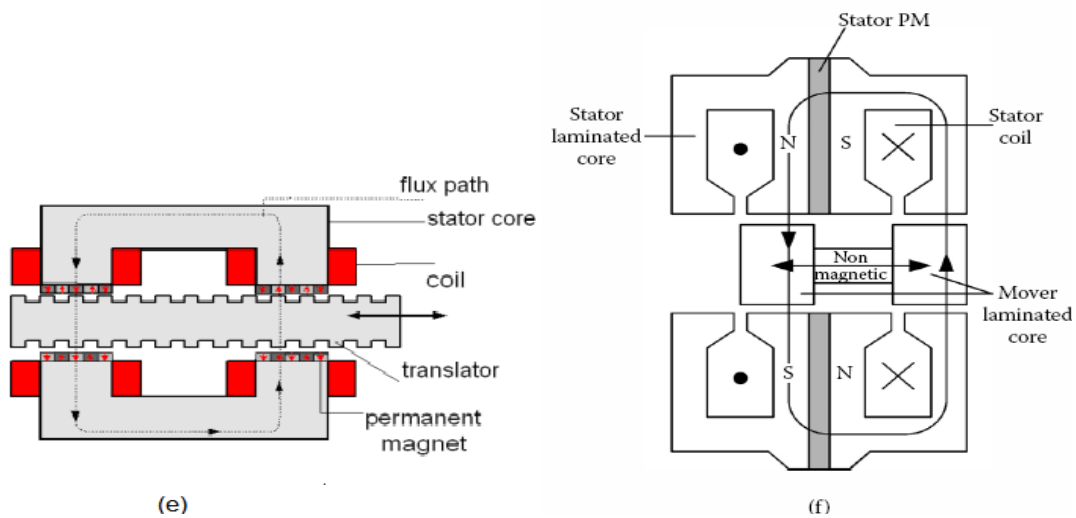
Es importante anotar que dentro de las máquinas de flujo transversal, aquellas que tienen el flujo concentrado poseen una inductancia menor.

2.3 MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES CON TRASLADOR DE HIERRO.

Las máquinas de la figura 24 corresponden a máquinas eléctricas traslacionales con trasladador de hierro. Las máquinas a), b), y c) son de flujo alterno, mientras la d), e), y f) son de flujo reversible. Las máquinas a), b), c) y d) son máquinas tubulares mientras que la e) y f) son máquinas planas.

Figura 24. Máquinas traslacionales con trasladador de hierro.





Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania;
 Tailor & Francis, 2006

La máquina de la figura 24 e) es llamada máquina de Vernier. Posee un eje de traslación dentado y un estator en cuyos polos se fijan varios imanes permanentes de modo que estén dispuestos con polaridad alternada. El estator es un núcleo magnético aislado e independiente con forma de C. La oposición magnetizadora de los imanes permanentes montados en los polos del estator produce un flujo magnético que cruza a través de las bobinas, y dependiendo de la posición del traslador este flujo cambia de dirección.

3. APLICACIONES DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES.

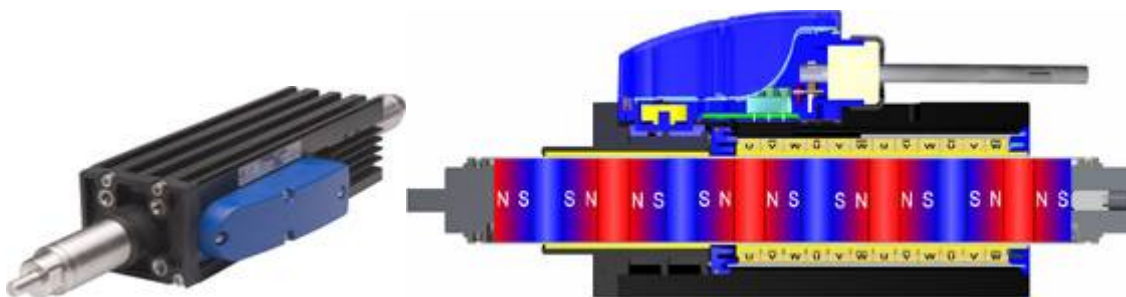
La mayoría de máquinas eléctricas traslacionales que fueron mencionadas en el capítulo anterior pueden ser usadas como generadores y como motores, de la misma forma que se hace con las máquinas eléctricas rotacionales. De modo que la selección de cualquiera de estas máquinas depende del aprovechamiento energético que se le vaya a dar, sea como generador ó como motor.

3.1 *MOTORES TRASLACIONALES.*

3.1.1 MOTOR TRASLACIONAL DE PASOS.

La aplicación mas común de los motores eléctricos traslacionales es el motor traslacional de pasos, cuyo diseño básico es el de la máquina de dos polos de la figura 25 y que corresponde a una máquina tubular. En este motor la bobina es alimentada pon un generador de pulsos DC.

Figura 25.Motor traslacional tubular.

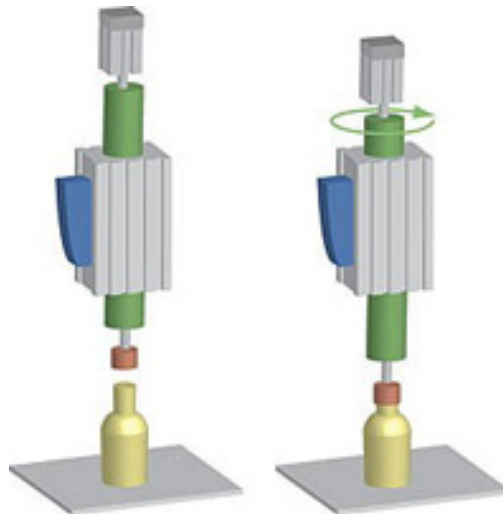


Fuente: http://www.infopl.net/Documentacion/Docu_MotionControl/Docu_Motores_Lineales.html

De los movimientos que se encuentran en las máquinas de cualquier industria, un alto porcentaje está relacionado con desplazamientos rectilíneos, de modo que los motores lineales, más precisos y que no requieren lubricación ni mantenimiento están sustituyendo los cilindros neumáticos y los sistemas clásicos de accionamiento electromecánico

También pueden ser útiles en aplicaciones de atornillado, roscado o en robótica de manipulación, puesto que solo se requiere añadir un pequeño motor de rotación en un extremo del traslador. Figura 26.

Figura 26. Aplicación de un motor traslacional.



Fuente: http://www.infoplcn.net/Documentacion/Docu_MotionControl/Docu_Motores_Lineales.html

3.1.2 MOTOR DE TRACCIÓN MAGLEV (Magnetic levitation)

El principio del motor de inducción traslacional es usado para propulsar los trenes de alta velocidad con sistemas Maglev (en figura 27), los cuales flotan en un campo magnético creado por electromagnetos.

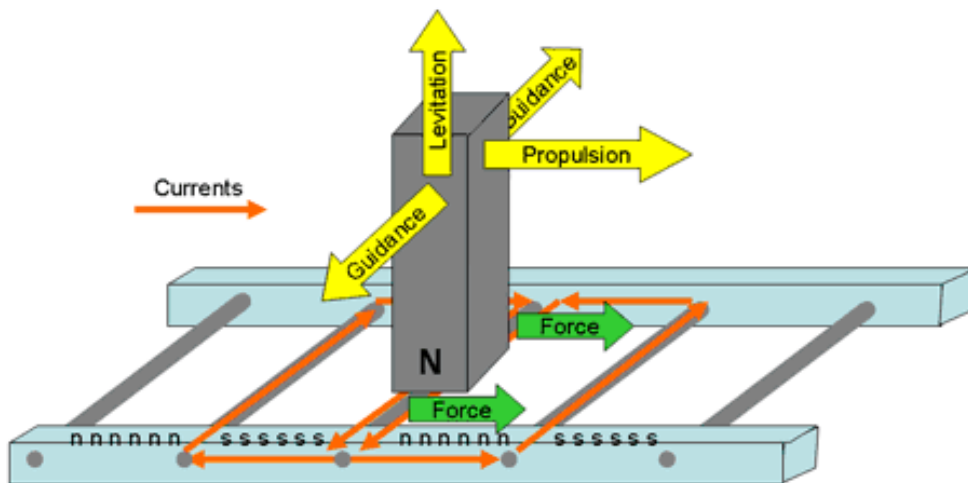
Figura 27. Tren de levitación magnética



Fuente: Enciclopedia encarta

El tren Maglev usa las fuerzas electromagnéticas producidas por la corriente y los imanes permanentes en ellos para tres diferentes tareas: de suspensión (en inglés levitation), de guía (en inglés guidance) y de propulsión (propulsion) como se muestra en la figura 28, dichas corrientes son controladas por un sistema de control de acuerdo al avance y posición del tren.

Figura 28. Movimiento lineal y levitación magnética.

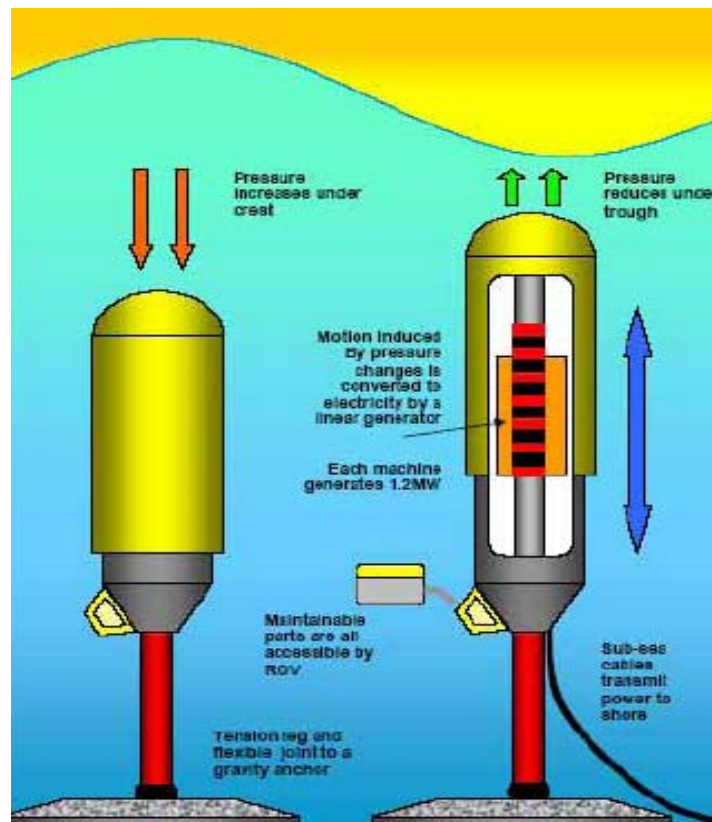


Fuente: <http://www.4shared.com/u/skzgtg/df381651/azadiedugmailcom.html>

3.2 GENERADORES TRASLACIONALES.

Todas las máquinas descritas en el capítulo dos pueden ser usadas como generadores. Hoy en día la aplicación más común de una máquina traslacional como generador es para aprovechar la energía de las olas. Se destacan diferentes sistemas basados en el principio de Arquímedes, entre ellos el AWS⁸, y el de boyas flotantes mostrado en la figura 30, para los cuales la potencia mínima en el frente de la ola debe ser de 20 kW/m.

Figura 29. Sistema AWS.



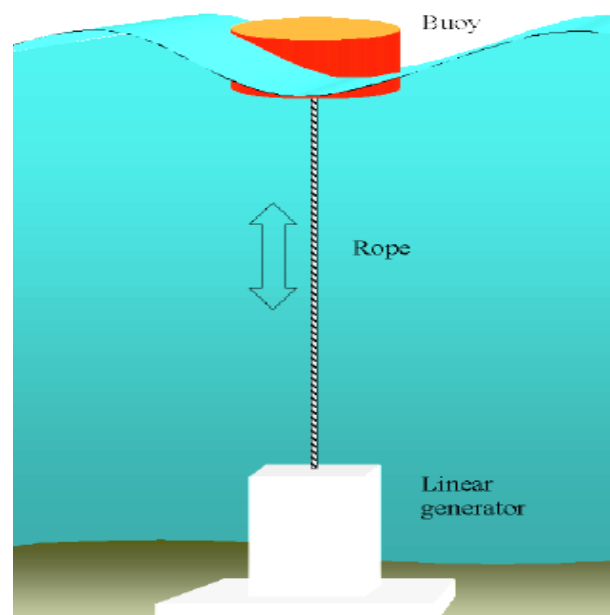
Fuente: AWS Ocean energy Ltd, Luc Hamilton, 25 October 2006.

⁸ Archimedes Wave Swing.

El sistema AWS consta de un pistón sumergido en su interior, lleno de aire o cualquier otro fluido, que se contrae y expande moviendo un generador traslacional de acuerdo a la presión de la ola. Figura 29.

Este sistema se caracteriza por ser muy eficiente y simple por requerir poco mantenimiento, por tener un mínimo impacto ambiental ⁹, además, ya que el sistema es sumergido, ni las condiciones meteorológicas extremas (tormentas, huracanes), ni la presencia de olas muy altas le representan riesgo. Para el montaje de este sistema es necesaria una profundidad mínima de 80 a 90 metros ¹⁰. Utilizando este sistema se han construido unidades comerciales de 1,25 MW, suficiente para las necesidades energéticas de 625 casas ¹¹.

Figura 30. Principio de una planta de energía a partir de las olas.



Fuente: OSCAR DANIELSSON. Desing of a linear generator for wave energy plant. Uppsala universitet, Master's degree project. January 2003.

⁹ AWS Ocean ener.gy Ltd, Luc Hamilton, 25 october 2006.

¹⁰ André Martinez. Definición de los parámetros básicos naturales para el aprovechamiento de la energía de las olas. EIGSI, LA ROCHELLE, FRANCE. 2007.

¹¹ Luc Hamilton .AWS Ocean ener.gy Ltd, 25 october 2006.

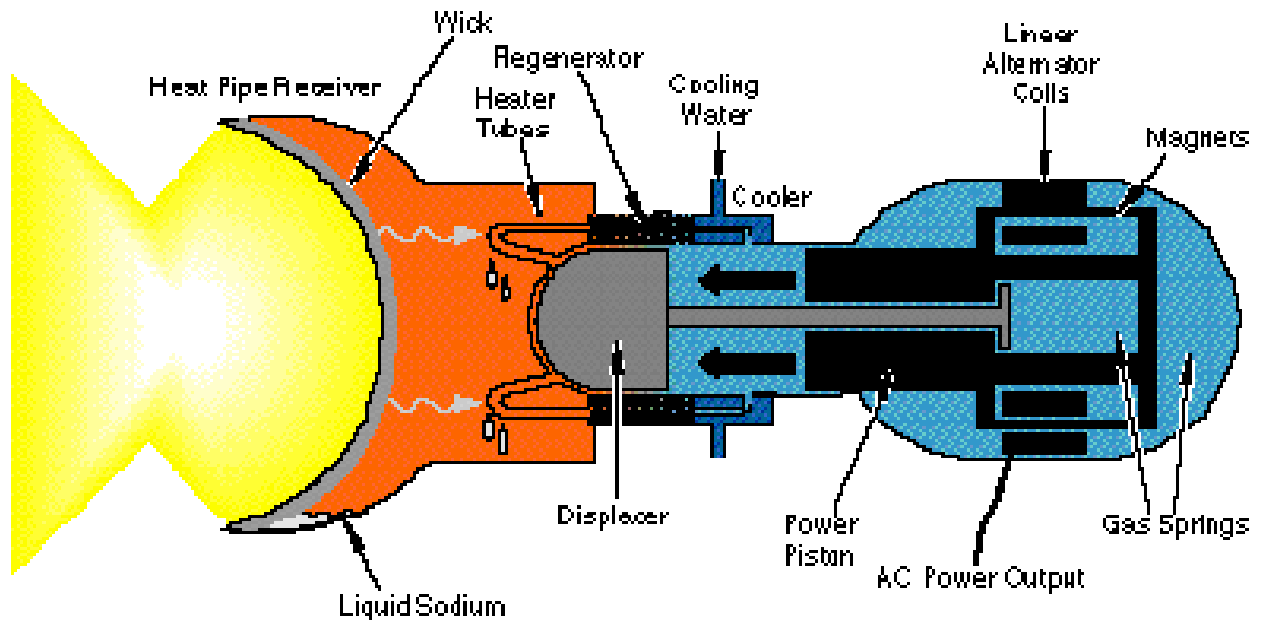
Las olas no son la única fuente de energía que brindan movimientos traslacionales, por ejemplo se están realizando prototipos de motores de combustión interna para vehículos híbridos, figura 20 y motores Stirling, figura 31.

En el prototipo de motor de combustión interna la gran ventaja es la poca cantidad de partes en contacto, así se disminuye la fricción, lo cual aumenta considerablemente la eficiencia de este generador. El problema a tratar en este tipo de generadores es el sistema de control de la ignición para así reducir las vibraciones, las cuales serían notorias en el vehículo.

El principio de funcionamiento del motor Stirling es el trabajo hecho por la expansión y contracción de un gas (normalmente helio, hidrógeno, nitrógeno o simplemente aire) al ser obligado a seguir un ciclo de enfriamiento, con lo cual se contrae, y de calentamiento, con lo cual se expande. Es decir, es necesaria la presencia de una diferencia de temperatura entre dos ciclos.

Este motor, de gran antigüedad, continúa en investigación gracias a la versatilidad de fuentes de energía utilizables para su funcionamiento, ya que al necesitar solamente una fuente de calor externa al cilindro, es posible usar una gran variedad de fuentes energéticas (energía solar térmica como en figura 31, todo tipo de combustibles, uso de la biomasa, energía geotérmica, etcétera).

Figura 31. Generador a partir de un motor Stirling.



Fuente: http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/STRLNG2.HTM

En la figura 31 se muestra el funcionamiento de un motor Stirling como generador a partir de energía solar térmica. En este caso el fluido de trabajo es calentado por radiación solar. La radiación calienta un caloducto (heat pipe receiver) que transfiere el calor a los tubos de un intercambiador de calor (zona naranja). La zona derecha del motor incorpora tanto el pistón de trabajo (power piston) como el desplazador (displacer). Al moverse el desplazador, transfiere el gas de trabajo desde la zona fría (como está en la figura) a la zona caliente. Esto lo hace atravesando el regenerador. El enfriamiento en la zona fría es por agua de refrigeración.

El movimiento de los pistones (el desplazador y el pistón de trabajo) se logra por medio de resortes con gas comprimido (el mismo gas de trabajo). La conversión del movimiento alternativo del pistón de trabajo a energía útil se logra por medio de una bobina (fija) e imanes permanentes acoplados al pistón de trabajo, es decir un generador traslacional.

4. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE UN GENERADOR ELÉCTRICO TRASLACIONAL A PARTIR DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ.

Como parte de la energía mareomotriz, la energía de las olas es oscilatoria armónica, siendo esta la fuente de energía necesaria para una máquina eléctrica traslacional. A continuación se describen las características de este tipo de energía y las de los generadores síncronos traslacionales de imán permanente.

4.1 *ENERGÍA MAREOMOTRIZ*

Los océanos, con una superficie de 361 millones de km² y un volumen de 1370 km³, cubren más del 70% de la superficie terrestre, convirtiéndose de esta forma en el más grande sistema colector y de almacenamiento de la energía solar; la cual incide anualmente sobre la tierra en un orden de $6 \cdot 10^{14}$ MW/h.

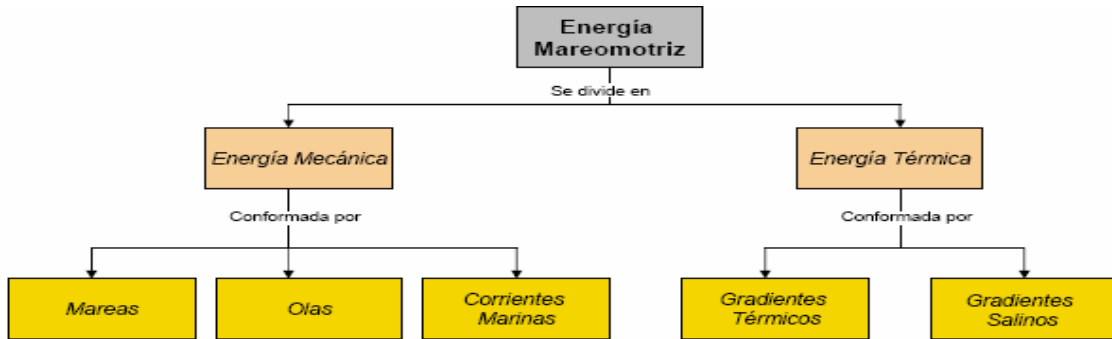
En la figura 32 se muestra esquemáticamente la clasificación de la energía mareomotriz. La energía almacenada por los océanos se manifiesta de diversas formas, y se puede dividir en dos grupos:

- 1) térmica: gradientes salinos y gradientes térmicos.
- 2) mecánica: mareas, las olas y corrientes marinas.

De las anteriores manifestaciones de energía mareomotriz, las más estudiadas y por tanto desarrolladas son: las mareas, las olas y los gradientes térmicos¹².

¹² Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Perez, Jassir Enrique; "Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana", UIS , Bucaramanga, 2006

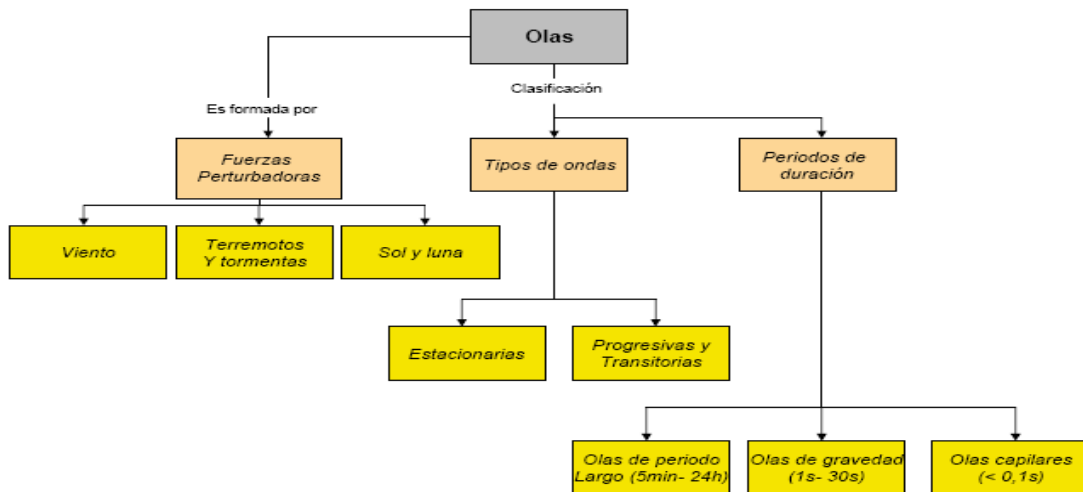
Figura 32. Clasificación de la energía mareomotriz



Fuente: Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Perez, Jassir Enrique; “Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana”, UIS , Bucaramanga, 2006.

Para obtener movimientos de vaivén periódicos se usa la energía mecánica de las olas. La figura 33 esquematiza la manera como se forman las olas, también muestra una clasificación de ellas.

Figura 33. Formación y clasificación de las olas.

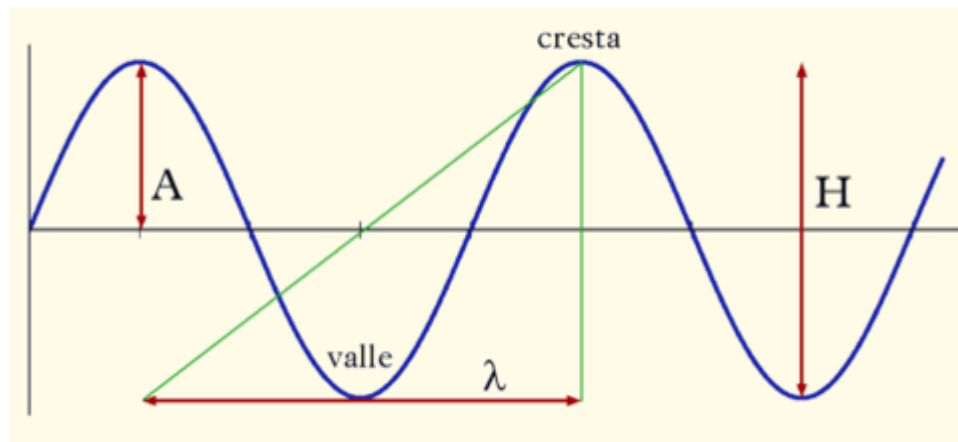


Fuente: Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Perez, Jassir Enrique; “Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana”, UIS , Bucaramanga, 2006.

A continuación se presenta brevemente una explicación de los movimientos de las olas.

Las olas del mar son ondas mecánicas (es decir, perturbaciones de un medio material) de las llamadas superficiales, que son aquellas que se propagan por la interfase (la frontera) entre dos medios materiales. En este caso se trata del límite entre la atmósfera y el océano.

Figura 34. Parámetros de las olas.



Fuente: WWW.WIKIPEDIA.ORG

En la figura 34 se muestra el esquema ideal de una onda típica en donde: A es amplitud, λ la longitud de onda y H la altura.

Las olas que se producen en la superficie del mar son provocadas por los vientos, de los cuales recogen y almacenan energía. Al no ser constantes los vientos, ni en velocidad ni en dirección, las olas producidas no son regulares y, por tanto, es bastante complicado determinar la energía que transportan.

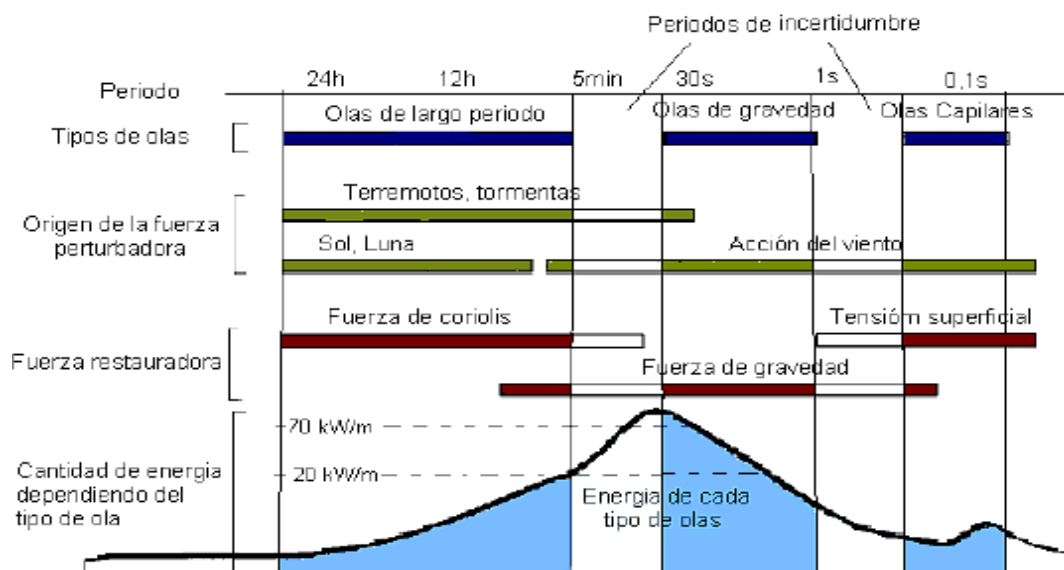
Aunque se han realizado muchas evaluaciones de la potencia media o de la energía total disipada por las olas, los valores obtenidos en cada caso son muy diferentes, aunque se considera que, en zonas favorables, la disipación de potencia es de unos 45 kW/m¹³.

¹³ <http://www.imasdtecnologia.com/imasd/ene01/0101ma4.htm>

Las olas también se pueden clasificar atendiendo parámetros tales como la fuerza perturbadora que las genera y su periodo de duración.

En la figura 35 se hace una representación esquemática de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de una curva de energía dependiendo de cada tipo de ola.

Figura 35. Representación esquemática de los tipos de olas



Fuente: Fernández Díez Pedro. Energía de las Olas. Universidad de Cantabria. España. 2002.

Las olas debidas al viento son las que contienen más energía y son las que se aprovechan para obtener electricidad; la energía de las olas debidas al viento, procede en última instancia, de la energía solar.

4.2 LEYES DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ

A continuación se describen brevemente los principios de la hidrostática que explican el potencial energético de los fluidos, para el caso del presente texto, corresponden a grandes masas de agua, tal como el mar.

4.2.1 LEYES FUNDAMENTALES DE LA HIDROSTÁTICA

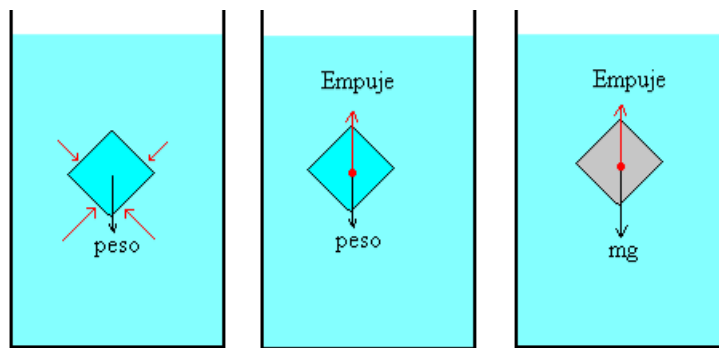
La hidrostática esta regida básicamente por dos leyes fundamentales, formuladas por Arquímedes y Blas Pascal, de la siguiente manera:

El principio de Arquímedes afirma que “Cuando un cuerpo está parcialmente o totalmente sumergido en el fluido que le rodea, una fuerza de empuje actúa sobre el cuerpo. Dicha fuerza tiene dirección hacia arriba y su magnitud es igual al peso del fluido que ha sido desalojado por el cuerpo”.

La explicación del principio de Arquímedes consta de dos partes como se indica en la figura 36.

1. El estudio de las fuerzas sobre una porción de fluido en equilibrio con el resto del fluido.
2. La sustitución de dicha porción de fluido por un cuerpo sólido de la misma forma y dimensiones.

Figura 36. Principio de Arquímedes



Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/estatica/arquimedes/arquimedes.htm>

Por otra parte, Blas Pascal formula en su principio que “Si en un punto de un fluido se ejerce una presión, ésta se transmite de forma instantánea y con igual intensidad en todas direcciones”.

De las observaciones de Pascal, junto con las realizadas por Arquímedes se puede llegar a la formulación del principio fundamental de la hidrostática que establece que:

“La presión ejercida por un fluido de densidad ρ_f en un punto situado a una profundidad x_t de la superficie es numéricamente igual a la presión ejercida por una columna de fluido de altura x_t ”, es decir:

$$P_f = \rho_f g x_t \quad (4.1)$$

De estos principios hidrostáticos se puede definir para el generador traslacional en el fondo del mar, como el mostrado en la figura 37, que la presión de empuje ejercida por la boya (contenedor de la máquina cuya densidad total es menor a la densidad del agua que rodea la máquina) en el punto medio de su recorrido:

$$P_{aws} = \rho_{aws} g h \quad (4.2)$$

En donde ρ_{aws} es la densidad del conjunto de la máquina y h es su altura.

Al igualar dichas ecuaciones se tiene que:

$\rho_{aws} g h = \rho_f g x_{pmi}$, de donde se obtiene:

$$x_{pmi} = \frac{\rho_{aws} h}{\rho_f} \quad (4.3)$$

Donde x_{pmi} es la profundidad de instalación con la máquina en la mitad de su recorrido y con la superficie del mar en calma.

Ahora teniendo en cuenta la perturbación del mar (olas) se define x_t la altura total de la columna de agua sobre la máquina.

$$\begin{aligned} x_t &= x_{pmi} + \Delta x_{ao} = x_{pmi} + A_o \text{sen}(\omega t) \\ \Delta x_{ao} &= A_o \text{sen}(\omega t) \end{aligned} \quad (4.4)$$

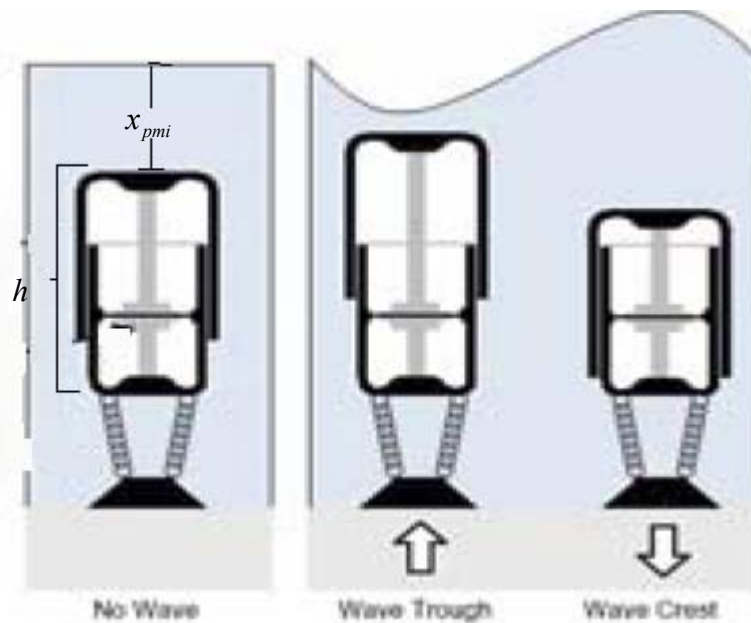
En donde Δx_{ao} es el incremento de la columna de agua dada la variación de la ola y con A_o como la amplitud máxima de la ola.

De la ecuación 4.4, se puede encontrar la profundidad de instalación para que la máquina se mantenga en equilibrio, teniendo en cuenta que el doble de la amplitud de la ola sea menor a la profundidad mínima de instalación ($2A_o < x_{pmi}$) y la densidad del sólido (densidad del traslador de la máquina ρ_{aws}) debe ser menor o igual a la densidad del fluido (densidad del agua de mar ρ_f) ($\rho_{aws} \leq \rho_f$).

Aún así, es conveniente tener en cuenta que existe variación en la profundidad media del mar por fenómenos tales como maremotos, mareas y constante aumento de su nivel, lo que obliga la instalación de sistemas de control que corrijan la densidad de la máquina por medio de compresores o dispositivos similares.

En la figura 37, se aprecia el movimiento del generador traslacional provocado por la variación en la altura de las olas y las diferencias de presión que estas provoquen sobre la superficie de la máquina, explicado anteriormente por las leyes de la hidrostática. (Principio de Arquímedes y Pascal).

Figura 37. Generador mareomotriz con generador traslacional sumergido



Fuente: <http://vnatura.wordpress.com/2007/02/10/energia-das-ondas-sua-importancia-e-metodos-de-extracao>

4.2.2 POTENCIA DE LAS OLAS

Para poder ubicar las máquinas en un lugar con las condiciones energéticas óptimas, es necesario conocer la potencia de las olas en dicha área.

La potencia real del oleaje depende de factores tales como su frecuencia, su dirección y la profundidad del mar. Esta potencia se puede calcular por medio de la ecuación 4.5. La cual representa la potencia del frente de ola

de anchura igual a la unidad para olas no regulares. Y esta definida para aguas profundas tales que $h > \lambda/2$.¹⁴

En donde:

h es la profundidad del mar

λ es la longitud de onda de la ola.

$$P_{ola} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{64\pi} \quad [kW/m] \quad (4.5)$$

En donde:

ρ es la densidad del agua.

g es la gravedad.

H es la altura de la ola.

T es el periodo de la ola.

4.3 ENERGÍA DE LAS OLAS EN COLOMBIA

Con base en la información de CIOH (Centro de Investigación Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional) las siguientes zonas se destacan como las mejores para aprovechar la energía de las olas ¹⁴.teniendo en cuenta que la potencia de las olas debe estar en el rango de 20 a 70kW/m para el frente de la ola ¹⁵. En la tabla 3 se ilustra el comportamiento de estas en los mares de Barranquilla, Cartagena y las Islas de San Bernardo

¹⁴ Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Perez, Jassir Enrique; "Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana", UIS , Bucarmanga, 2006.

¹⁵ International Energy Agency. Wave and Marine Current Energy. United Kingdom Department of Trade and Industry's New and Renewable Energy Programme. Reino Unido. 2002. Sitio Web: <<http://www.ieaoceans.org/publ/2002WEstat.pdf>>.

Con datos como estos se puede estimar el lugar adecuado para el montaje de un sistema de generación a partir de la energía de las olas, que para el caso estudiado utiliza generadores traslacionales.

En la tabla 3 se destaca la información sobre la altura máxima de la ola, su periodo y potencia de frente de ola.

Tabla 3. Características de las olas. a) Cartagena y sus alrededores b) Área de Barranquilla c) Área de las islas de San Bernardo

CARTAGENA						
DIRECCION	ALTURA DE OLA [m]	ALTURA MAXIMA [m]	PERIODO DE PASO [s]	PERIODO PICO [s]	POTENCIA [kW/m]	
NORTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NORTE NORESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NORESTE	2,27	6,80	10,00	18,00	25,41	
NORESTE ESTE	2,00	6,00	10,00	18,00	19,78	
ESTE	1,90	5,70	10,00	18,00	17,85	
ESTE SURESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SURESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SURESTE SUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUR SUROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUROESTE OESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OESTE NORESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NOROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NOROESTE NORTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

(a)

BARRANQUILLA						
DIRECCION	ALTURA DE OLA [m]	ALTURA MAXIMA [m]	PERIODO DE PASO [s]	PERIODO PICO [s]	POTENCIA [kW/m]	
NORTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NORTE NORESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NORESTE	2,00	6,00	10,00	18,00	21,96	
NORESTE ESTE	2,17	6,50	9,50	18,00	24,48	
ESTE	1,67	5,00	9,00	18,00	13,73	
ESTE SURESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SURESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SURESTE SUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUR SUROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUROESTE OESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OESTE NORESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NOROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NOROESTE NORTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

(b)

SAN BERNARDO						
DIRECCION	ALTURA DE OLA [m]	ALTURA MAXIMA [m]	PERIODO DE PASO [s]	PERIODO PICO [s]	POTENCIA [kW/m]	
NORTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NORTE NORESTE	1,40	4,20	9,00	17,00	8,72	
NORESTE	2,10	6,30	9,50	18,00	20,71	
NORESTE ESTE	1,73	5,20	10,00	18,00	14,85	
ESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ESTE SURESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SURESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SURESTE SUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUR SUROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SUROESTE OESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OESTE NOROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NOROESTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NOROESTE NORTE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

(c)

Fuente: Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Perez, Jassir Enrique; “Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana”, UIS , Bucaramanga, 2006.

4.4 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO TRASLACIONAL

4.4.1 OPERACIÓN DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA TRASLACIONAL.

Por lo general las máquinas eléctricas traslacionales describen un movimiento oscilatorio armónico ⁷, en este caso provocado por la energía de las olas, el cual puede representarse por la ecuación 4.6.

$$x = x_m \text{sen}(\omega_r t) \quad (4.6)$$

En donde x_m es la amplitud de la ola y ω_r su velocidad angular.

La fuerza electromotriz puede expresarse de la siguiente manera multiplicando y dividiendo por dx .

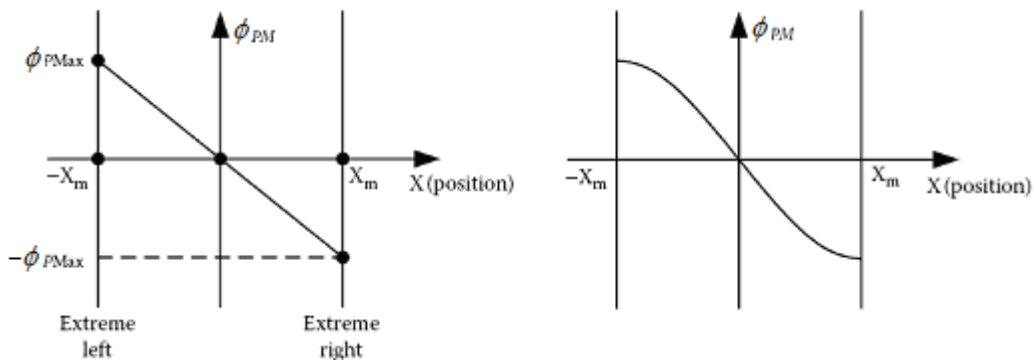
$$e(t) = - \frac{\partial \phi_{pm}}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.7)$$

En donde ϕ_{pm} es el flujo magnético provocado por los imanes permanentes. Teniendo en cuenta las anteriores ecuaciones la fuerza electromotriz adquiere la siguiente forma.

$$e(t) = -\frac{\partial \phi_{pm}}{\partial x} x_m \omega_r \cos(\omega_r t) \quad (4.8)$$

El flujo varía de forma aproximadamente lineal con respecto a la posición, como se muestra en la figura 38,

Figura 38. Variación del flujo en las bobinas con respecto a la posición.



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

Teniendo en cuenta la ecuación 4.8, la variación del flujo con respecto a la posición se expresa como una constante ⁷.

$$\frac{\partial \phi_{pm}}{\partial x} \approx C_e \quad (4.9)$$

La ecuación 4.9 expresa de manera ideal que las líneas de flujo en las fases de las bobinas varían linealmente con la posición, pero realmente el flujo tiende a aplanarse en los extremos del movimiento.

El efecto en los extremos provoca la presencia del tercer, quinto y séptimo armónicos en la fem $e(t)$. También, debido principalmente a la saturación

magnética, a las corrientes instantáneas y a la posición del trasladador se pueden presentar el segundo y cuarto armónicos en la $e(t)$.

De las ecuaciones 4.8 y 4.9 se obtiene la siguiente expresión.

$$e(t) = -C_e x_m \omega_r \cos(\omega_r t) \quad (4.10)$$

La fuerza electromagnética de la máquina se expresa utilizando los conceptos de energía, $W = F x$, y de potencia, $P = W / t$, que para este caso es potencia eléctrica.

$$F_e = \frac{e(t)i(t)}{\frac{dx}{dt}} = -\frac{\partial \phi_{pm}}{\partial x} i(t) \quad (4.11)$$

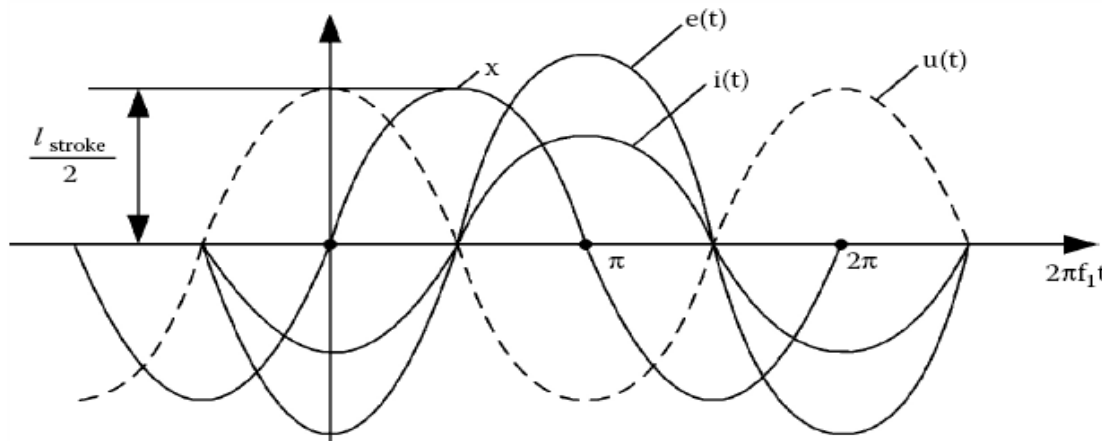
Dado que la variación del flujo en las bobinas con respecto a la posición se aproxima a una constante, la fuerza electromagnética esta en contra fase con la corriente.

A partir de la ecuación 4.11 de fuerza electromagnética se pueden deducir factores esenciales en el diseño de la máquina.

La fem y la velocidad de la máquina deben estar en fase para que la variación del flujo con respecto a la posición se aproxime a una constante. Analizando la ecuación 4.11 se observa que para que ese cociente sea negativo la velocidad debe estar desfasada 180° con respecto a la fem, es decir están en contra fase.

En la Figura 39.se aprecian las formas de onda para un caso ideal.

Figura 39. Posición, velocidad, y corriente en una máquina eléctrica traslacional ideal.



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

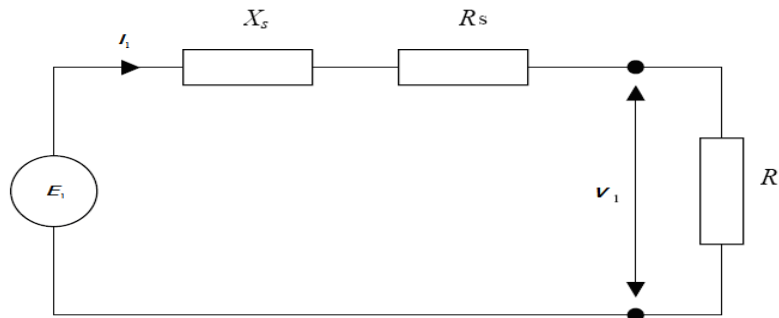
También se observa que para poder obtener una mayor fuerza electromagnética la fem y la corriente deben estar en fase cuando la inductancia de fase no varía con la posición del traslador, lo cual ocurre cuando la reluctancia que produce la fuerza de reluctancia es igual a cero ⁷.

La fuerza debida a la interacción entre los imanes permanentes del traslador con las ranuras del estator aparece cuando la corriente es cero ⁷, y se define como la fuerza cogging F_{cog} .

Esta fuerza debe ser cero en la mitad del movimiento y máxima en los puntos finales, comportándose de forma similar a la variación del flujo magnético con respecto a la posición y de esta manera ser útil en la conversión de energía, $F_{cog} \approx -Kx$.

De acuerdo al análisis anterior en una máquina eléctrica traslacional ideal la inductancia de fase es constante, $L_s = Cte$, y la fuerza electromotriz tiene la forma $e(t) = E_m \cos(\omega_r t)$, en donde $E_m = -C_e x_m \omega_r$, lo que proporciona el movimiento armónico ideal dado por su forma sinusoidal. Se debe anotar que la F_{cog} debe ser completamente lineal.

Figura 40. Circuito equivalente.



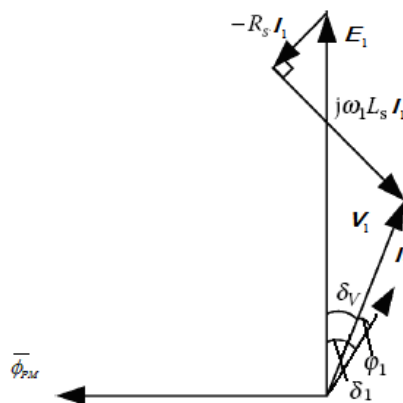
Fuente: autores

De acuerdo al circuito equivalente mostrado en la figura 40 que representa el modelo eléctrico de un generador traslacional síncrono de imanes permanentes, la ecuación de voltaje en estado estable está dada por la ecuación 4.12:

$$V_1 = -(R_s + j \omega_r L_s) I_1 + E_1 \quad (4.12)$$

En donde la fuerza electromotriz está dada por $E_1 = E_m e^{j\omega_r t}$ y $V_1 = V_1 \sqrt{2} e^{j(\omega_r t - \delta_v)}$

Figura 41. Diagrama fasorial



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Tailor & Francis, 2006.

De las ecuaciones anteriores, y del circuito y diagrama fasorial del modelo de generador mostrado en la figura 41 se observa que el circuito equivalente es semejante al de un generador síncrono de rotación.

La potencia entregada por la máquina esta dada por:

$$S = V_1 I_1 = P_1 + J Q_1$$

$$S = E_m I_1 \cos(\delta_1) - R_s I_1^2 + j(\omega_r L_s I_1^2 + E_1 I_1 \text{sen}(\delta_1)) \quad (4.13)$$

$$S = V_1 I_1 = P_1 + J Q_1$$

En donde la potencia activa promedio es:

$$P_1 = \frac{E_m}{\sqrt{2}} I_1 \cos(\delta_1) - R_s I_1^2$$

Para poder entregar una considerable potencia el valor RMS de la fuerza electromotriz debe ser mucho mayor al voltaje en los bornes de la máquina, es decir $\frac{E_m}{\sqrt{2}} > V_1$.

El proceso de sincronización es igual al de las máquinas síncronas de rotación, pero se deben regular tanto la amplitud como la frecuencia, para así cumplir la condición de igual frecuencia y voltaje, $E_1 = V_1$. Además, teniendo en cuenta la carga del generador, se observa que aumentando la amplitud del movimiento se aumenta la potencia entregada.

4.4.2 PARÁMETROS DE LA MÁQUINA.

A continuación se indican los parámetros de diseño de una máquina eléctrica traslacional, tales como la densidad de flujo, la fem, la fuerza electromagnética, la resistencia y la inductancia.

Aplicando la ley de Ampère y la ley de Gauss para campos magnéticos se halla un modelo analítico aproximado de la densidad de flujo en el entrehierro.

En la figura 42 se muestran los detalles geométricos de un generador traslacional multipolar con bobinas en el traslador. Constructivamente se destacan de esta máquina los siguientes elementos:

l_{stroke} es la longitud del recorrido.

l_{pm} es la longitud de los imanes permanentes.

h_{pm} es la altura de los imanes permanentes.

g es la separación del entrehierro.

h_{coil} es la altura de la bobina.

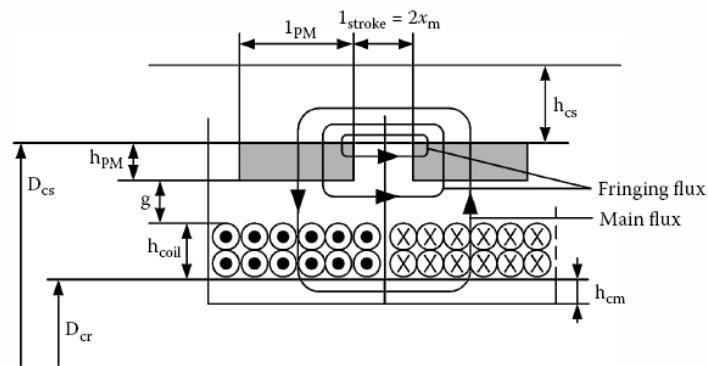
D_{cr} es diámetro de los traslador.

D_{cs} es el diámetro del imanes.

h_{cs} es el espesor del núcleo del estator

h_{cm} es el espesor del núcleo del traslador

Figura 42. Generador traslacional multipolar con bobinas en el traslador



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Tailor & Francis, 2006

Para el generador traslacional multipolar con bobinas en el traslador la densidad de flujo en el entrehierro B_{gpm} se encuentra de acuerdo con la ecuación 4.14 7:

$$B_{gpm} = \frac{B_r h_{pm}}{h_{pm} + (g + h_{coil}) \mu_r} \frac{1}{(1 + K_{fringe})(1 + K_s)} \quad (4.14)$$

En donde,

h_{pm} es la altura de los imanes permanentes.

μ_r es la permeabilidad relativa del imán.

B_r es la densidad de flujo remanente de los imanes.

g es la separación del entrehierro.

h_{coil} es la altura de la bobina.

La constante K_{fringe} (efecto borde), representa las líneas de flujo de dispersión que se pierden entre el entrehierro y los imanes cercanos. Este factor depende de $(1 + (g + h_{coil})/h_{pm})$, de la relación l_{stroke}/h_{pm} , en donde $l_{stroke} = l_{recorrido}$, y de la saturación magnética del traslador y el estator. Por lo general para un buen diseño esta constante esta entre 0,3 y 0,5.

El factor K_s hace referencia a la saturación magnética y generalmente su valor esta entre 0,05 y 0,15 ⁷.

Teniendo en cuenta las expresiones para la fem y el número efectivo de vueltas de esta máquina (ver capítulo 2), se continúan las consideraciones de diseño.

$$e(t) = -\frac{dx}{dt} n'_c l_{av} B_{PM_{av}} \quad \gamma \quad n_c = n'_c \frac{(l_{recorrido} + l_{pm})}{l_{pm}}$$

La fuerza electromotriz en una máquina con $2p$ bobinas, en donde P es el número de polos frente a una bobina en un recorrido es:

$$E(t) = B_{gPM} U(t) \pi D_{avc} 2p n_c \left(\frac{l_{PM}}{l_{PM} + l_{recorrido}} \right) \quad (4.15)$$

En donde,

$U(t)$ es la velocidad de la máquina.

D_{avc} es el diámetro promedio de las bobinas.

p es el número de polos

n_c es el número total de bobinas.

La fuerza electromagnética se encuentra utilizando la ecuación 4.16:

$$F(t) = B_{gPM} \pi D_{avc} 2pn_c \left(\frac{l_{PM}}{l_{PM} + l_{recorrido}} \right) i(t) \quad (4.16)$$

La inductancia y resistencia de la máquina se determina con la ayuda de las expresiones 4.17 y 4.18:

$$L_s = \frac{1}{4} p \mu_0 n_c^2 \pi D_{avc} \frac{l_{PM} + l_{recorrido}}{(h_{PM} + g + h_{coil})} \quad (4.17)$$

$$R_s = \rho_{co} \pi D_{avc} \frac{n_c^2 2p}{\frac{I_n n_c}{j_{con}}} \quad (4.18)$$

En donde, I_n es el valor RMS de la variación de corriente.

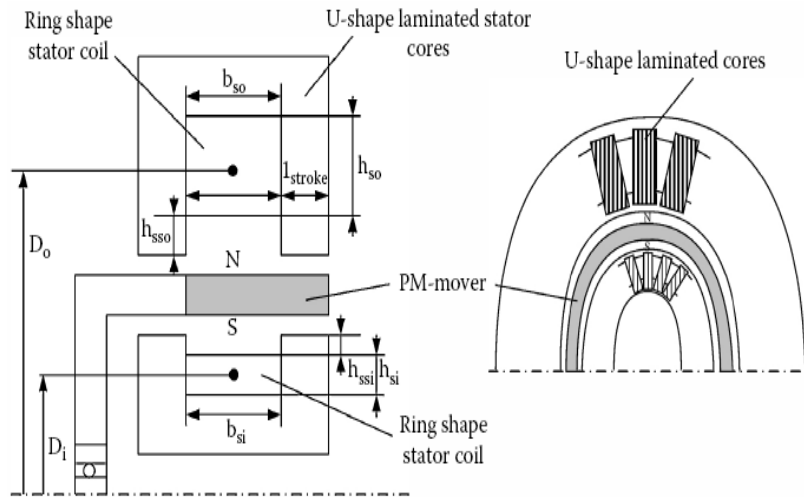
j_{con} es la densidad de corriente del diseño.

ρ_{co} es la resistividad del conductor utilizado en la bobina.

D_{avc} es el diámetro promedio de las bobinas.

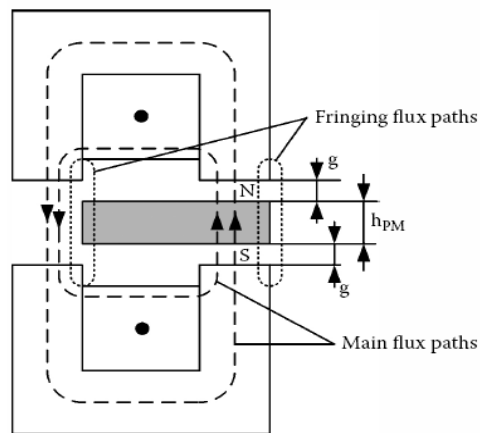
Existe otro tipo de máquina cuyas pérdidas por corrientes de Eddy son menores, que corresponde a la máquina tubular de imanes en el trasladador y con bobinas interna y externa, figura 43 y 44.

Figura 43. Máquina tubular unipolar con doble bobina



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

Figura 44. Distribución del flujo en la máquina.



Fuente: Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Taylor & Francis, 2006

Constructivamente se destacan de esta máquina los siguientes elementos:

l_{stroke} es la longitud del recorrido.

h_{pm} es la altura de los imanes permanentes.

g es la separación del entrehierro.

h_{so} y h_{si} es la altura de la bobina externa e interna respectivamente.

D_o y D_i es diámetro de las bobinas externas e internas respectivamente.

b_{so} Longitud de la bobina externa.

b_{si} Longitud de la bobina interna.

h_{sso} y h_{ssi} Altura del diente externo e interno de los estatores respectivamente.

La densidad de flujo en el entrehierro de la máquina mostrado en la figura 44, se puede describir por la ecuación 4.19 ⁷:

$$B_{gPM} \approx \left(\frac{B_r h_{PM}}{h_{PM} + (4g + h_{PM})\mu_r} \right) \left(\frac{1}{(1 + K_{fringe})(1 + K_s)} \right) \quad (4.19)$$

En esta máquina se requiere que $h_{PM} \gg 4g$ para que exista una razonable densidad de flujo en el entrehierro.

Donde:

h_{pm} es la altura de los imanes permanentes.

μ_r es la permeabilidad relativa del imán.

B_r es la densidad de flujo remanente de los imanes.

g es la separación del entrehierro.

h_{coil} es la altura de la bobina.

El factor K_s hace referencia a la saturación magnética y generalmente su valor esta entre 0,05 y 0,15 ⁷.

La constante K_{fringe} (efecto borde), representa las líneas de flujo que se pierden entre el entrehierro y los imanes cercanos.

Bajo un movimiento armónico y una variación lineal de flujo magnético la fuerza electromotriz se calcula de acuerdo con la ecuación 4.20:

$$E(t) = -2\pi f B_{gPM} l_{recorrido} \pi D_{mave} 2p(N_0 + N_1) \cos(2\pi f t) \quad (4.20)$$

En donde D_{mave} es el diámetro promedio del trasladador,

N_0 y N_i son la cantidad de vueltas de las bobinas externas e internas respectivamente.

La inductancia de la máquina tiene dos componentes: la inductancia de flujo disperso L_l y la inductancia principal L_m .

La inductancia de flujo disperso L_l se calcula de acuerdo con la ecuación 4.21:

$$L_l = \mu_0 N_i^2 \left(\frac{h_{si}}{3b_{si}} + \frac{h_{si}}{b_{si}} \right) \pi D_i + \mu_0 N_0^2 \left(\frac{h_{s0}}{3b_{s0}} + \frac{h_{s0}}{b_{s0}} \right) \pi D_0 \quad (4.21)$$

Donde:

b_{s0} Longitud de la bobina externa.

b_{si} Longitud de la bobina interna.

h_{sso} y h_{ssi} son la altura del diente externo e interno de los estatores respectivamente.

N_i es el número de vueltas de la bobina interna.

N_0 es el número de vueltas de la bobina externa.

La inductancia principal L_m se encuentra con ayuda de la ecuación 4.22:

$$L_m \approx \frac{\mu_0 \pi D_{mav} (N_0 + N_i)^2 l_{recorrido}}{(1 + K_s)(4g + h_{PM}(1 + \mu_r))} \quad (4.22)$$

Donde:

D_{mave} es el diámetro promedio del traslador.

El movimiento de la máquina idealmente es un movimiento sinusoidal (al igual que el movimiento de las olas) y la longitud del recorrido es $l_{recorrido} = 2x_m$. Por lo tanto el movimiento armónico de la máquina esta dado por la ecuación 4.23.

$$x = \frac{l_{\text{recorrido}} \text{Sen}(\omega_r t)}{2} \quad (4.23)$$

La velocidad instantánea de la máquina es $u(t) = \frac{dx}{dt} = l_{\text{recorrido}} \pi f \text{Cos}(\omega_r t)$.

Para una corriente sinusoidal la fuerza electromagnética se encuentra con la ayuda de la ecuación 4.24:

$$F_e(t) = \frac{E(t) i(t)}{u(t)} = \frac{B_{gPM} l_{\text{recorrido}} \pi D_{\text{mav}} (N_0 + N_i)}{\frac{l_{\text{recorrido}}}{2}} I \sqrt{2} \text{Cos}(\omega_r t) \quad (4.24)$$

Con estas ecuaciones es posible plantear un modelo matemático que puede representar el funcionamiento de una máquina traslacional simplificada, utilizada como generador traslacional mareomotriz. Además de estas ecuaciones se utilizan otras que son comunes para cualquier tipo de máquina eléctrica, como las necesarias para calcular la densidad de corriente y la fuerza magnetomotriz utilizada para la estimación de circuitos magnéticos en general.

Para hallar el diámetro del traslador se hace uso de la ecuación 4.25.

$$D_{\text{tra}} = \frac{F_e}{F_t 2 p l_{pm} \pi} \quad (4.25)$$

Donde:

F_e es la fuerza electromagnética de la máquina.

F_t es la presión aplicada por la columna de agua de la ola sobre la máquina.

p es el número de polos de la máquina.

l_{pm} es la longitud de cada uno de los imanes permanentes.

Para hallar la altura de cada una de las bobinas se usa la ecuación 4.26, en la cual se hace uso de la fuerza magnetomotriz del circuito magnético de la máquina.

$$h_{coil} = \frac{n_c I_n}{J_{con} k_{fill} l_{coil}} \quad (4.26)$$

Donde:

n_c es el número espiras en cada bobina.

I_n es la corriente nominal o valor eficaz de corriente.

J_{con} es la densidad de corriente en el circuito magnético.

k_{fill} es el factor de llenado de la bobina, para el cual es seleccionado un valor de 0,6.

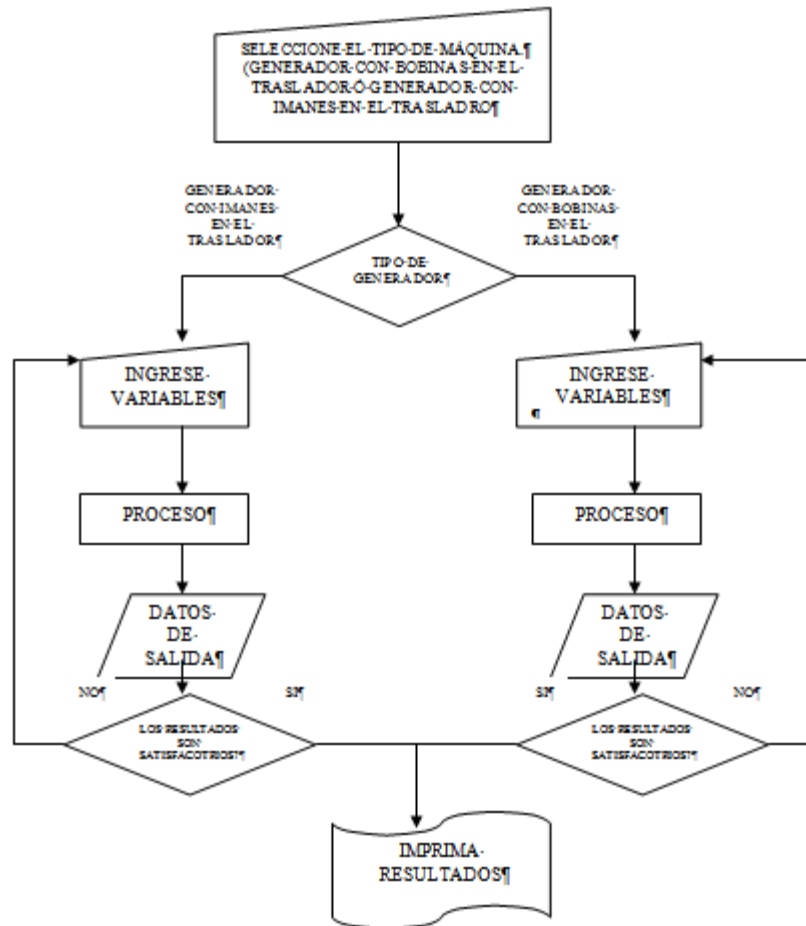
l_{coil} es la longitud de cada bobina.

5. MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR TRASLACIONAL DE 20 kW DE SALIDA

Por medio del software matemático Matlab® se desarrolló el programa para el diseño de dos tipos de generadores traslacionales a partir de los parámetros analizados en el capítulo anterior: Generador traslacional con bobinas en el traslador y generador traslacional con imanes en el traslador.

A continuación se muestra el algoritmo utilizado para el desarrollo de los programas planteados.

ALGORITMO



En el programa se piden los siguientes datos:

- T , Periodo del oleaje, el cual proporciona la frecuencia con la cual la máquina trabaja y por lo tanto la frecuencia de los fasores voltaje, corriente, Fem y fuerza electromagnética.
- l_{reco} , corresponde a la longitud del recorrido de la máquina, el cual equivale a la altura o el doble de la amplitud del oleaje.
- P , corresponde a la potencia deseada de salida.

- V , corresponde al voltaje deseado en los bornes de la máquina.
- E_f , corresponde a la eficiencia que se desea de la máquina.
- F_t , Es la presión aplicada por la columna de agua equivalente a la altura de la ola sobre el trasladador de la máquina. Esta presión depende de la densidad del agua, de la gravedad y de dicha altura, $P_a = \rho_f g H$, en donde la densidad de agua es aproximadamente igual a $1024 \text{ Kg}/\text{m}^3$ y la gravedad es $9,8 \text{ m}/\text{s}^2$. de modo que la presión sería una constante multiplicada por la altura de la columna de agua equivalente a la ola, $p_a = 10035,2 H \text{ [N}/\text{m}^2]$.
- n_b , son el número de bobinas que se necesiten para la máquina.
- B_r , corresponde a la densidad de flujo remanente de los imanes de la máquina, para el caso se usan imanes de Neodymium-iron-boro [NeFeB], ya que se caracterizan por tener elevados valores de inducción remanente.
- μ_r , corresponde a la permeabilidad magnética relativa del imán.

Para seleccionar el imán se debe tener en cuenta su calidad, y su precio. A continuación, en la tabla 4, se muestran las propiedades de dos tipos de imanes comúnmente usados en estas máquinas.

Tabla 4. Propiedades del imán de ferrita y el de Neodymium.

Material	Ferrite Magnet (Oe Magnet Y30 BH)	Neodymium-iron-boron (Vacodym 633 TP)
Remanece (T)	0,3663	1,32
Relative permeability	1,06	1,03
Density (kg/m ³)	4700	7700
Price (SEK/kg)	50	500

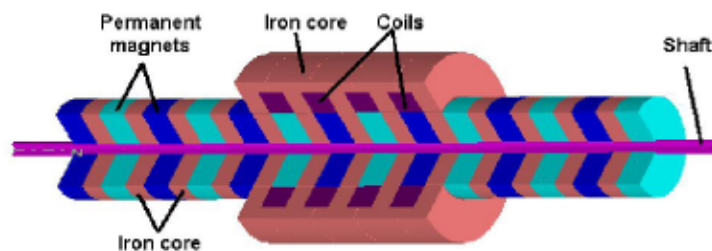
Fuente: Oscar Danielsson, DESIGN OF A LINEAR GENERATOR FOR WAVE ENERGY PLANT, master's degree project, university of Uppsala, Sweden. 2003

La moneda de Suecia es la Krona, $1 SEK = 0,13 USD$. De modo que el imán de ferrita tiene un costo aproximado de $6,31 USD/kg$ y el de Neodymium $63,15 USD/kg$.

- J_{con} , corresponde a la densidad de corriente, la cual es un factor de diseño que depende del tipo de refrigeración de la máquina y varía de $6 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 A/m^2$ para máquinas refrigeradas forzadamente y de $4 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6 A/m^2$ para máquinas con refrigeración normal ⁷.
- ves , Es el factor de proporción entre la longitud del imán y el recorrido, $L_{pm} / L_{reco} = ves$

Ya que la máquina con imanes en el trasladador se caracteriza por tener menos problemas debidos a corrientes parasitas y dado que en su diseño los conductores no están sometidos a movimientos permanentes, lo cual los debilitaría, esta máquina es la que se facilita a presentar como modelo. Es una máquina tubular con solo bobina externa como la que se aprecia en la figura 45.

Figura 45. Generador traslacional tubular común con imanes en el trasladador.



Fuente: Loránd Szabó, Claudiu Oprea, Ioan-Adrian viorel, Károly Ágoston Biro, NOVEL PERMANENT MAGNET TUBULAR LINEAR GENERATOR FOR WAVE ENERGY CONVERTERS, Departament of electrical machines, technical university of Cluj, Romania.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ EN MATLAB

Para facilitar el ingreso de datos se ha creado una interfaz gráfica. Para acceder a ella se ingresa a cualquiera de las carpetas en el archivo adjunto

a este documento teniendo en cuenta la máquina a evaluar. Dependiendo de la selección se ejecuta el archivo de interfaz llamado presentación.

Figura 46. Ventana de presentación a la interfaz de Matlab.



Fuente: Autores

En la figura 47 se muestra la ventana en donde se ingresan las variables que anteriormente se describieron y se obtienen los respectivos resultados para el modelo de la máquina. En cada casilla se especifican las unidades de los datos de ingreso y de los resultados, además los datos que corresponden a siglas y que no son reconocidos fácilmente tienen un botón de ayuda para indicar a que corresponde.

Figura 47. Ventana de ingreso de datos y obtención de resultados.

The screenshot shows a software window titled 'PLMA' with a logo in the top right corner. The interface is divided into two main sections: 'DATOS DE ENTRADA' (Input Data) on the left and 'RESULTADOS' (Results) on the right. A 'CALCULAR' button is located at the bottom of the input section.

DATOS DE ENTRADA:

- Periodo de la ola [s]: 17
- Numero de bobinas: 4
- Longitud del recorrido [m]: 3
- Br [T]: 1.32
- Potencia [KW]: 20
- μ_r : 1.03
- Voltaje [V]: 220
- Jcon [A/mm²]: 4E6
- Eficiencia [pu]: .95
- Lpm/Lreco: .2
- Presion [Nm²]: 30E3
- lpm/rec?:
- Presion?:

RESULTADOS:

- Diámetro del trasladador [m]: 0.263707
- n vueltas: 171.212
- B_{gpm} [T]: 0.52381
- Longitud del imán [m]: 0.6
- Inductancia [H]: 2.35803
- Pérdidas del cobre [W]: 4555.29
- Corriente nominal [A]: 111.466
- Frecuencia [Hz]: 0.0588235
- Sección conductor [m²]: 2.78664e-005
- Velocidad promedio [m/s]: 0.352941
- Resistencia del alambre [Ohms]: 0.0916589
- Fuerza electromagnética [N]: 294.561
- hcoil [m]: 0.0132529
- hpm [m]: 0.0167405
- Te [s]: 25.7261
- Factor de potencia: 0.907429
- Eficiencia obtenida: 0.843341

Fuente: Autores

Para el modelo de esta máquina se obtienen los siguientes resultados como partida para su posterior diseño:

- El diámetro del trasladador o pieza en movimiento. $D [m]$
- B_{gpm} que corresponde a la densidad de flujo magnético en el entrehierro. $[T]$
- La inductancia $L [H]$
- La corriente nominal $I [A]$
- La sección del conductor usado en las bobinas. $S [m^2]$

- La resistencia del conductor. R [Ω]
- h_{coil} que corresponde a la altura de la bobina, o su grosor dado la cantidad de vueltas que esta tenga. [m]
- T_e corresponde a la constante de tiempo eléctrica de la máquina. [s]
- n corresponde al número de vueltas de cada una de las bobinas.
- La longitud del imán a lo largo del trasladador y corresponde solamente a la longitud de un imán. l_{pm} [m]
- Perdidas del cobre $I_n^2 R$. [W]
- La frecuencia de la máquina, la cual depende del periodo del oleaje. f [Hz]
- Velocidad promedio de la máquina, que corresponde a la longitud de su recorrido sobre el periodo de la máquina. v_{ave} [m/s]
- Fuerza electromagnética F_e [N]
- h_{pm} que corresponde a la altura del imán permanente. [m]
- Factor de potencia, que siempre va a ser en atraso ya que es una máquina completamente inductiva. Fp
- La eficiencia obtenida por la máquina.

5.2 PROGRAMAS EN MATLAB PARA MÁQUINAS ELÉCTRICAS TRASLACIONALES TUBULARES.

Los programas presentados a continuación fueron desarrollados con el software matemático Matlab® y permiten encontrar los parámetros generales de diseño de un generador traslacional tubular; como se explicó en el apartado anterior. Se deben insertar datos tales como potencia y eficiencia deseada, número de bobinas de la máquina, características de los imanes, frecuencia y altura de la ola, entre otros, y con ellos, el programa, a través de ecuaciones previamente implementadas, así como

datos y relaciones entre dimensiones propias de la máquina obtenidas de estudios por parte de autores de diversas nacionalidades.

Entre las expresiones empíricas aplicadas en el programa para el diseño de estas máquinas esta la aproximación a una constante de una parte de la expresión de la densidad de flujo magnético en el entrehierro descritas en el capítulo 4 por las ecuaciones 4.14 y 4.19, tanto para máquinas con bobinas en el trasladador, como para máquinas con imanes en el trasladador respectivamente.

Las aproximaciones consisten en reemplazar $\frac{h_{pm}}{h_{pm} + (g + h_{coil})\mu_r}$ por 1/2 para las máquinas con bobinas en el trasladador en la ecuación 4.14.

Y $\frac{h_{pm}}{h_{pm} + (4g + h_{coil})\mu_r}$ por 1/2 para máquinas con imanes en el trasladador en la ecuación 4.19.

Además se debe tener en cuenta para el diseño general de la máquina con imanes en el trasladador que el número de imanes de esta, es menor en una unidad a la cantidad de bobinas que posea.

El valor del espacio en el entrehierro g , de acuerdo a la figura 44 explicada en el capítulo 4. Se toma un valor de 1,5 mm de espacio entre el trasladador y el estator, de modo que para los dos tipos de máquinas, g tiene un valor 3 mm.

La longitud de cada una de las bobinas se toma como igual a la longitud de cada uno de los imanes.

El factor de efecto borde k_{fringe} , se le asigna un valor de 0,2.

La constante de saturación magnética k_s se le asigna un valor de 0,05.

La altura h_{ss0} o altura del diente, la cual se puede apreciar en la figura 48. Se le asigna un valor igual al espacio en el entrehierro.

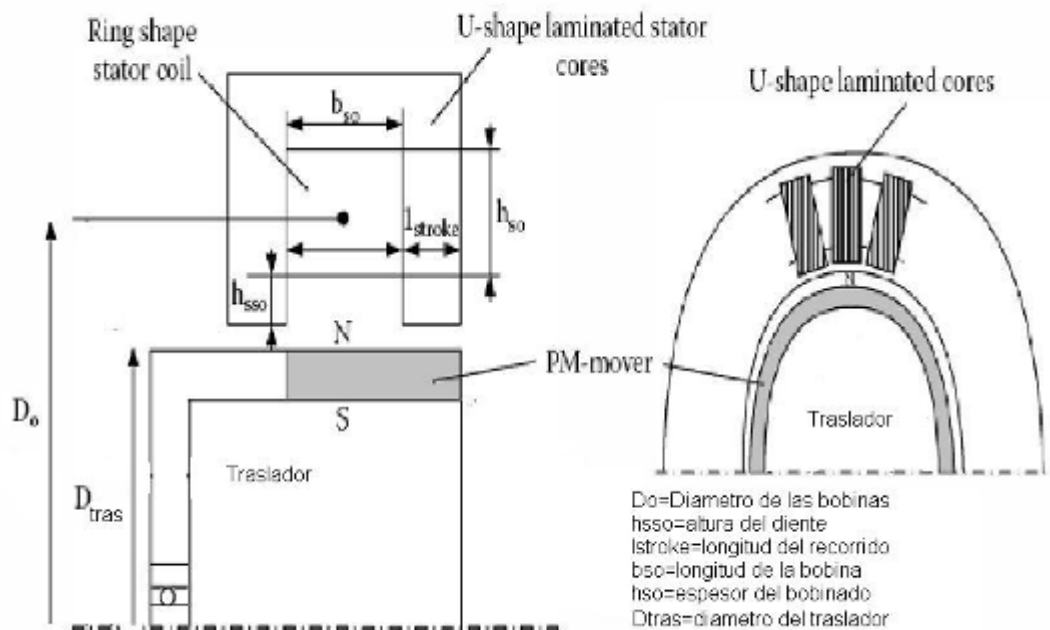
La longitud de la bobina se toma igual a la longitud del imán $l_{pm} = l_{coil}$.

5.2.1 PROGRAMA DE LA MÁQUINA CON IMANES EN EL TRASLADOR

El programa corresponde a una máquina eléctrica traslacional tubular con imanes en el traslador como la que se ilustra en la figura 48.

Esta máquina a diferencia a la explicada en el capítulo 4 tiene bobinas únicamente en la parte externa. Este tipo de máquina se ha seleccionado para el programa ya que el grado de complejidad de su diseño y construcción no son tan exigentes, lo cual se traduce en costos menores.

Figura 48. Cortes de máquina eléctrica traslacional tubular simplificado



Fuente: Autores

5.2.2 PROGRAMA PARA MÁQUINA CON BOBINA EN EL TRASLADOR

Este programa sigue completamente las ecuaciones y metodología mostrada en el capítulo 4 para máquinas con bobinas en el trasladador, como la mostrada en la Figura 42.

5.3 *PARÁMETROS RESULTANTES PARA EL GENERADOR TRASLACIONAL TUBULAR CON IMANES EN EL TRASLADOR SIMPLIFICADO.*

Como ejemplo de aplicación para una máquina traslacional tubular con imanes en el trasladador con una potencia eléctrica de 20 kW de salida con una altura de olas de 3 metros, 17 segundos de periodo y los demás datos mostrados en la tabla 5. Los resultados básicos de diseño se obtienen por medio del programa de máquinas con imanes en el trasladador (literal 5.2.1). Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 5. Datos de entrada programa máquina con imanes en el trasladador.

DATOS DE ENTRADA	VALOR
Periodo de la ola: T	10 s
Longitud del recorrido (altura de ola): l_{reco}	2,27 m
Potencia de salida P	20 kW
Eficiencia: E_f	0,9
Voltaje : V	220 V
Delta de presión: F_t	30 000 N/m ²
Número de bobinas n_b	5
Densidad de flujo magnético remanente del imán permanente (Neodimyun) B_r	1,32 T
Permeabilidad relativa del imán μ_r	1,03
Densidad de corriente J_{con}	4M A/m ²
Relación total entre longitud del imán y el recorrido ves	0,05

Tabla 6. Parámetros de salida obtenidos del programa máquina con imanes en el trasladador.

PARAMETROS DE SALIDA	VALOR
Diámetro del trasladador: D	0,9 m
Densidad de flujo magnético en el entrehierro: B_{gpm}	0,52 T
Inductancia: L	0,23 H
Corriente nominal: I	109 A
Sección del conductor: S	27 μ m ²
Resistencia del conductor: R	60 m Ω
Altura o grosor de la bobina: h_{coil}	13,25 mm
Constante de tiempo eléctrica: τ_e	4 s
Número de vueltas por bobina: n	33
Longitud de cada imán: l_{pm}	0,1 m
Pérdidas del cobre: P_{cc}	3,5 kW
Frecuencia: f	0,1 Hz
Velocidad promedio de la máquina: v_{ave}	0,45 m/s
Fuerza electromagnética: F_e	48,947 kN
Altura o grosor del imán: h_{pm}	17 mm
Factor de potencia: Fp	1
Rendimiento de la máquina	0,8

6. CONCLUSIONES

- ◆ El estudio de nuevas tecnologías o el retomar de algunas que fueron desechadas por la poca productividad que se les encontró en su momento, son formas de motivar a los investigadores y a las nuevas generaciones para su desarrollo; en el caso del presente proyecto se estudia la implementación de principios básicos del electromagnetismo para el desarrollo de máquinas que están mostrando ser de gran importancia y utilidad en la transformación y aprovechamiento de la energía mareomotriz, en la implementación en motores híbridos, entre otras aplicaciones en muchos países alrededor del mundo, tales como Suecia, Portugal, Reino Unido , Rumania, entre otras.
- ◆ Las máquinas eléctricas traslacionales en el contexto internacional son llamadas lineales, pero este nombre describe en muchos casos la relación entre las variables de entrada y salida cuando las mismas describen funciones lineales, por lo tanto, se crea ambigüedad en la clasificación e incluso en la descripción de las características de las mismas llevando a confusiones e incluso dificultando la búsqueda de información sobre máquinas de este tipo, tanto con recursos electrónicos como material impreso.
- ◆ El uso de este tipo de máquinas es mas común de lo que se pensaba, la dificultad en nuestro país, es que no se esta dando la importancia y apoyo a la investigación necesaria para desarrollar y aprovechar esta tecnología cohibiéndonos de las ventajas y beneficios que tiene implicaría el uso de esta tecnología en el aprovechamiento de nuestros recursos energéticos e intelectuales al innovar y darle valor agregado a tecnologías en desarrollo.
- ◆ Al igual que en máquinas eléctricas rotacionales, las máquinas eléctricas traslacionales permiten según su configuración utilizarlas

como motor o como generador eléctrico, permitiéndose así un amplio rango de aplicaciones industriales, tal como procesos de ensamble, transporte, generación eléctrica, entre otras.

- ◆ La energía que se puede obtener a partir del moviendo de las olas, en su cambio de alturas tiene un amplio rango de variación de frecuencias, que generalmente son bajas, por lo tanto la implementación de sistemas de rectificación AC/DC y viceversa es necesaria para su distribución con características acordes a los sistemas eléctricos locales.
- ◆ Debido a la semejanza entre las características eléctricas y magnéticas de las máquinas eléctricas sincronas rotacionales y traslacionales, es común ver que la formulación de programas para su respectivo estudio y diseño es similar.
- ◆ Debido a que las ecuaciones del programa se basan en aproximaciones empíricas, los datos de entrada son parámetros iniciales para el cálculo y no necesariamente son los parámetros finales obtenidos para la máquina.
- ◆ Las condiciones del lugar de montaje son las que determinan la eficiencia que tendrá la máquina, ya que esta tiene un mejor comportamiento a mayor altura y menor periodo de las olas.
- ◆ Para seleccionar el número adecuado de bobinas hay que ir comparando el factor de potencia, la eficiencia y las dimensiones. Ya que este parámetro de entrada tiene solo un punto en que estos valores son óptimos, y para los demás valores tanto superiores como inferiores la eficiencia disminuye, y a medida que aumenta el número de bobinas disminuye el diámetro del trasladador.
- ◆ La relación entre la longitud del imán y la del recorrido l_{pm} / l_{reco} es fundamental tanto en la selección de las dimensiones y la eficiencia de la máquina. A medida que l_{pm} / l_{reco} es menor la eficiencia de la máquina y el diámetro del trasladador aumentan.

- ◆ La frecuencia con que se mueve la máquina, corresponde a la frecuencia de los parámetros de salida (los fasores de tensión, y corriente).
- ◆ Los mejores resultados en una máquina traslacional, de acuerdo a los mejores valores de potencia de las olas colombianas, se obtienen de las olas de Cartagena con dirección noreste (tabla 3).

7. REFERENCIAS

[1]Boldea, VARIABLE SPEED GENERATORS, Polytechnical Institute Timisora, Romania; Tailor & Francis, 2006.

[2]André Martinez. Definición de los parámetros básicos naturales para el aprovechamiento de la energía de las olas. EIGSI, LA ROCHELLE, FRANCE. 2007.

[3]Hurtado Parra, Holmer Samir y Mejía Perez, Jassir Enrique; “Localización Técnica de una Pequeña Central Mareomotriz en la Costa Colombiana”, UIS , Bucaramanga, 2006.

[4]Loránd SZABÓ, Claudiu OPREA,“Linear Generators for Wave Power Plants to Be Set up Near the Romanian Coasts of the Black Sea”.

[5]Mecánica Vectorial para Ingenieros. Dinámica Beer F.P. y Johnston E.R. Editorial McGraw–Hill, 1998, 6ª edición. CAPÍTULO 5.

[6]AWS Ocean energy Ltd, Luc Hamilton, 25 october 2006.

[7]Oscar Danielsson, DESIGN OF A LINEAR GENERATOR FOR WAVE ENERGY PLANT, master’s degree project, university of Uppsala, Sweden. 2003

[8]Loránd Szabó, Claudiu Oprea, Ioan–Adrian viorel, Károly Ágoston Biro, NOVEL PERMANENT MAGNET TUBULAR LINEAR GENERATOR FOR WAVE ENERGY CONVERTERS, Departament of electrical machines, technical university of Cluj, Romania.

[9]Fernández Díez Pedro. Energía de las Olas. Universidad de Cantabria.España. 2002.

[10]<http://vnatura.wordpress.com/2007/02/10/energia-das-ondas-sua-importancia-e-metodos-de-extraccas>

[11]International Energy Agency. Wave and Marine Current Energy. United Kingdom Department of Trade and Industry’s New and Renewable Energy Programme. Reino Unido 2002.

web:<<http://www.ieaoceans.org/publ/2002WEstat.pdf>>.

[12]Principio de Arquimedes.

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/estatica/arquimedes/arquimedes.htm>

[13]http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema9/tema9.html.

[14]Composición de movimientos: traslación y rotación.

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/rodar/mov_rodar.htm.

[15]http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_7.htm

[16]<http://www.monografias.com/trabajos30/particulas-magneticas/particulas-magneticas.html>

[17]El campo magnético y las líneas de campo magnético.

http://www.unicrom.com/tut_campomagnetico.asp

[18]Ferromagnetismo e histéresis. <http://cabierta.uchile.cl/libros/c-utreras/node104.html>

[19]Motores lineales tubulares, una nueva tecnología de accionamiento lineal.

http://www.infopl.net/Documentacion/Docu_MotionControl/Docu_Motores_Lineales.html

[20]Aplicaciones del motor Stirling

http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/STRLNG2.HTM

[21]WWW.WIKIPEDIA.ORG

[22]<http://www.imasdtecnologia.com/imasd/ene01/0101ma4.htm>

ANEXOS

ANEXO A

Programa en Matlab® para máquinas con imanes en el trasladador

```
1 function varargout = PLMA(varargin)
2   gui_Singleton = 1;
3   gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
4 'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
5 'gui_OpeningFcn', @PLMA_OpeningFcn, ...
6 'gui_OutputFcn', @PLMA_OutputFcn, ...
7 'gui_LayoutFcn', [] , ...
8 'gui_Callback', []);
9   if nargin && ischar(varargin{1})
10      gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
11   end
12   if nargin
13      [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
14   else
15      gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
16   end
17   % End initialization code - DO NOT EDIT
18   % --- Executes just before PLMA is made visible.
19   function PLMA_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
20      wpo=imread('wpo.jpg'); %Leer imagen
21      axes(handles.wpo); %Carga la imagen en background
22      axis off;imshow(wpo);
23      % Choose default command line output for PLMA
24      handles.output = hObject;
25      % Update handles structure
26      guidata(hObject, handles);
27      % UIWAIT makes PLMA wait for user response (see UIRESUME)
28      % uiwait(handles.figure1);
29      % --- Outputs from this function are returned to the command line.
30      function varargout = PLMA_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
31         varargout{1} = handles.output;
32      function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
33         val= get(hObject, 'String')
34         Newval=str2double(val)
35         handles.edit1=Newval;
```

```

36 guidata(hObject,handles);
37 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
38 function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
39 if ispc
40 set(hObject,'BackgroundColor','white');
41 else
42
43 set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
44 end
45 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
46 % --- Executes on button press in pushbutton1.
47 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
48 T=handles.edit1;
49 lreco=handles.edit3;
50 P=handles.edit4;
51 v=handles.edit5;
52 ef=handles.edit6;
53 ft=handles.edit8;
54 nb=handles.edit9;
55 Br=handles.edit10;
56 u=handles.edit11;
57 Jcon=handles.edit12;
58 ves=handles.edit13;
59 f=T^-1;
60 set(handles.text3,'String',f);
61 %VELOCIDAD PROMEDIO
62 Uave=2*lreco*f;%velocida promedio de la máquina
63 set(handles.text10,'String',Uave);
64 %FUERZA ELECTROMAGNÉTICA
65 Fe=P*10^3/(ef*Uave);
66 set(handles.text12,'String',Fe);
67 %CONCIDERACIÓN DE DISEÑO
68 %ves: constante de selección
69 Lpm=lreco*ves;% longitud de los imanes permanentes
70 set(handles.text14,'String',Lpm);
71 %fuerza aplicada
72 p=nb/2;%polos de la máquina
73 %diametro externo del traslador
74 Dtra=Fe/(ft*2*p*Lpm*pi);
75 set(handles.text16,'String',Dtra);
76 %características del imán
77 Kfri=0.2;%factor de flecos
78 Ks=0.05;%0.05~0.15....constante de saturación magnetica
79 Bgpm=0.5*Br/((1+Kfri)*(1+Ks));% densidad de flujo en el entrehierro
80 set(handles.text18,'String',Bgpm);
81 % amper vueltas
82 Lcoil=Lpm;

```

```

82 ncIn=Fe/(Bgpm*Dtra*4*nb*sqrt(2));% In= corriente eficaz
83 %Iave=In*2*sqrt(2)/pi
84 Kfill=0.6;% factor de llenado de la bobina
85 %altura de la bobina
86 hcoil=ncIn/(Jcon*Kfill*Lcoil);
87 set(handles.text25,'String',hcoil);
88 g=3*10^-3; %espacio total del entrehierro
89 hpm=(g+hcoil)*u;
90 set(handles.text27,'String',hpm);
91 dsep=lreco*0.5;%diametro de los separadores en el trasladador
92 % inductancia
93 uo=4*pi*10^-7;
94 hssog;% con altura del diente igual al entrehierro
95 Do=Dtra+g+2*hssog+hcoil/2;
96 LlSnc2=uo*pi*Do*(hcoil/(3*Lcoil)+hssog/Lcoil);%LlSnc^2 para
inductancia de flujodisperso
97 LmSnc2=uo*pi*Dtra*lreco/((1+Ks)*(g+hpm*(1+u)));%LmSnc^2 para
inductancia principal
98 LsSnc2=LlSnc2+LmSnc2;
99 %resistencia, alambre de cobre
100 rco=1.7*10^-8;%resistividad del cobre
101 RSnc2=rco*pi*Do/(ncIn/Jcon);%R/nc^2
102 % constante eléctrica de tiempo
103 Te=LsSnc2/RSnc2;
104 set(handles.text29,'String',Te);
105 %perdidas del cobre
106 Pco=RSnc2*ncIn^2*nb;
107 set(handles.text31,'String',Pco);
108 Ce=Fe*lreco*pi*f/(sqrt(2)*ncIn);% constante eléctrica
109 tanfi=ncIn*2*pi*f*LsSnc2/Ce;
110 fi=atan(tanfi);
111 fp=cos(fi);%factor de potencia
112 set(handles.text33,'String',fp);
113 %número de vueltas
114 nc=v/(-RSnc2*ncIn+Ce)
115 set(handles.text35,'String',nc);
116 %corriente nominal
117 In=ncIn/nc;
118 set(handles.text37,'String',In);
119 %sección del conductor
120 A=In/Jcon;
121 set(handles.text39,'String',A);
122 R=RSnc2*nc^2;
123 set(handles.text41,'String',R);
124 Ls=LsSnc2*nc^2;
125 set(handles.text43,'String',Ls);
126 Iave=In*sqrt(2)*2/pi;

```

```

127 E=Ce*nc;
128 %%Eficiencia obtenida
129 psa=E*In*fp/sqrt(2)-Pco;
130 eficie=(E*In*fp/sqrt(2)-Pco)/(E*In*fp/sqrt(2));
131 set(handles.edit17,'String',eficie);
132 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
133 function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
134 val= get(hObject,'String')
135 Newval=str2double(val)
136 handles.edit3=Newval;
137 guidata(hObject,handles);
138 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
139 function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
140 if ispc
141 set(hObject,'BackgroundColor','white');
142 else
143
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
144 end
145 function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
146 val= get(hObject,'String')
147 Newval=str2double(val)
148 handles.edit4=Newval;
149 guidata(hObject,handles);
150 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
151 function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
152 if ispc
153 set(hObject,'BackgroundColor','white');
154 else
155
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
156 end
157 function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
158 val= get(hObject,'String')
159 Newval=str2double(val)
160 handles.edit5=Newval;
161 guidata(hObject,handles);
162 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
163 function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
164 if ispc
165 set(hObject,'BackgroundColor','white');
166 else
167
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
168 end
169 function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

170 val= get(hObject, 'String')
171 Newval=str2double(val)
172 handles.edit6=Newval;
173 guidata(hObject,handles);
174 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
175 function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
176 if ispc
177 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
178 else
179
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
180 end
181 function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
182 val= get(hObject, 'String')
183 Newval=str2double(val)
184 handles.edit8=Newval;
185 guidata(hObject,handles);
186 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
187 function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
188 if ispc
189 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
190 else
191
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
192 end
193 function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
194 val= get(hObject, 'String')
195 Newval=str2double(val)
196 handles.edit9=Newval;
197 guidata(hObject,handles);
198 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
199 function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
200 if ispc
201 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
202 else
203
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
204 end
205 function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
206 val= get(hObject, 'String')
207 Newval=str2double(val)
208 handles.edit10=Newval;
209 guidata(hObject,handles);
210 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
211 function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
212 if ispc
213 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');

```

```

214 else
215
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
216 end
217 function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
218 val= get(hObject, 'String')
219 Newval=str2double(val)
220 handles.edit11=Newval;
221 guidata(hObject,handles);
222 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
223 function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

224 if ispc
225 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
226 else
227
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
228 end
229 function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
230 val= get(hObject, 'String')
231 Newval=str2double(val)
232 handles.edit12=Newval;
233 guidata(hObject,handles);
234 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
235 function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
236 if ispc
237 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
238 else
239
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
240 end
241 function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
242 val= get(hObject, 'String')
243 Newval=str2double(val)
244 handles.edit13=Newval;
245 guidata(hObject,handles);
246 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
247 function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
248 if ispc
249 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
250 else
251
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
252 end
253 % --- Executes on selection change in popupmenu1.
254 function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
255 % --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

256 function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
257 if ispc
258 set(hObject,'BackgroundColor','white');
259 else
260
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
261 end
262 % --- Executes on button press in Br.
263 function Br_Callback(hObject, eventdata, handles)
264 msgbox('densidad de flujo remanente del imán permanente',' Br ');
265 % --- Executes on button press in u.
266 function u_Callback(hObject, eventdata, handles)
267 msgbox('permeabilidad relativa del imán',' u');
268 % --- Executes on button press in Jcon.
269 function Jcon_Callback(hObject, eventdata, handles)
270 msgbox('densidad de corriente, ...6*10^6~10*10^6 A/m^2 para máquinas
refrigeradas
forzadamente, ...4*10^6~6*10^6 A/m^2 refrigeración normal',' Jcon ');
271 % --- Executes on button press in Bgpm.
272 function Bgpm_Callback(hObject, eventdata, handles)
273 msgbox('densida de flujo magnético en el entrehierro',' Bgpm ');
274 % --- Executes on button press in hcoil.
275 function hcoil_Callback(hObject, eventdata, handles)
276 msgbox('Altura de del bobinado',' hcoil ');
277 % --- Executes on button press in hpm.
278 function hpm_Callback(hObject, eventdata, handles)
279 msgbox('Altura de del imán',' hpm ');
280 % --- Executes on button press in esquema.
281 function esquema_Callback(hObject, eventdata, handles)
282 openfig('dibuj.FIG','new')
283 % --- Executes on button press in Graficas.
284 function Graficas_Callback(hObject, eventdata, handles)
285 % --- Executes on button press in rel.
286 function rel_Callback(hObject, eventdata, handles)
287 msgbox('relación entre la longitud del imán y la del recorrido','
Lpm/lrec ');
288 % --- Executes on button press in Presion.
289 function Presion_Callback(hObject, eventdata, handles)
290 msgbox('Presión que ejerce el agua sobre el traslador; P=Pf*g*h ');
291 function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)
292 % hObject handle to edit16 (see GCBO)
293 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
294 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
295 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit16 as text
296 % str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit16 as a
297 % double
298 % --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

299 function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
300 % hObject handle to edit16 (see GCBO)
301 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
302 % handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called
303 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
304 % See ISPC and COMPUTER.
305 if ispc
306 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
307 else
308
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
309 end
310 function edit17_Callback(hObject, eventdata, handles)
311 val= get(hObject, 'String')
312 Newval=str2double(val)
313 handles.edit17=Newval;
314 guidata(hObject,handles);
315 function edit17_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
316 if ispc
317 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
318 else
319
set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
320 end

```

ANEXO B

Programa en Matlab® para máquinas con bobinas en el traslador

```
1 function varargout = PLMA(varargin)
2   gui_Singleton = 1;
3   gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
4   'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
5   'gui_OpeningFcn', @PLMA_OpeningFcn, ...
6   'gui_OutputFcn', @PLMA_OutputFcn, ...
7   'gui_LayoutFcn', [] , ...
8   'gui_Callback', []);
9   if nargin && ischar(varargin{1})
10    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
11  end
12  if nargin
13    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
14  else
15    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
16  end
17  function PLMA_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
18    wpo=imread('wpo.jpg'); %Leer imagen
19    axes(handles.wpo); %Carga la imagen en background
20    axis off;imshow(wpo);
21    handles.output = hObject;
22    guidata(hObject, handles);
23  function varargout = PLMA_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
24    varargout{1} = handles.output;
25  function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
26    val= get(hObject, 'String')
27    Newval=str2double(val)
28    handles.edit1=Newval;
29    guidata(hObject,handles);
30  function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
31  if ispc
32    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
33  else
34
35    set(hObject, 'BackgroundColor',get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
36  end
37  function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
38    T=handles.edit1;
39    lreco=handles.edit3;
```

```

39 P=handles.edit4;
40 v=handles.edit5;
41 ef=handles.edit6;
42 ft=handles.edit8;
43 nb=handles.edit9;
44 Br=handles.edit10;
45 u=handles.edit11;
46 Jcon=handles.edit12;
47 ves=handles.edit13;
48 f=T^-1;
49 set(handles.text3, 'String', f);
50 Uave=2*lrco*f;%velocida promedio de la máquina
51 set(handles.text10, 'String', Uave);
52 %FUERZA ELECTROMAGNÉTICA
53 Fe=P*10^3/(ef*Uave);
54 set(handles.text12, 'String', Fe);
55 Lpm=lrco*ves;% longitud de los imanes permanentes
56 set(handles.text14, 'String', Lpm);
57 p=nb/2;%polos de la máquina
58 %diametro externo del traslador
59 Dtra=Fe/(ft*2*p*Lpm*pi);
60 set(handles.text16, 'String', Dtra);
61 Kfri=0.2;%factor de flecos
62 Ks=0.05;%0.05~0.15
63 Bgpm=0.5*Br/((1+Kfri)*(1+Ks));% densidad de flujo en el entrehierro
64 set(handles.text18, 'String', Bgpm);
65 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
66 Lcoil=Lpm;% longitud de la bobina
67 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
68 ncIn=Fe/(Bgpm*Dtra*2*nb*sqrt(2))% In= corriente eficaz
69 Kfill=0.6;% factor de llenado de la bobina
70 hcoil=ncIn/(Jcon*Kfill*Lpm);
71 set(handles.text25, 'String', hcoil);
72 g=3*10^-3;%espacio total del entrehierro
73 hpm=(g+hcoil)*u;
74 set(handles.text27, 'String', hpm);
75 uo=4*pi*10^-7;
76
LsSnc2=(1/8)*2*p*uo*pi*(Dtra+2*hcoil)*Lcoil/((hpm+g+hcoil)*(1+Ks));%LsSn
c^2
77 %resistencia, alambre de cobre
78 rco=1.7*10^-8;
79 RSnc2=rco*pi*(Dtra+2*hcoil)*2*p/(ncIn/Jcon);%R/nc^2
80 % constante eléctrica de tiempo
81 Te=LsSnc2/RSnc2;
82 set(handles.text29, 'String', Te);
83 %perdidas del cobre

```

```

84 Pco=RSnc2*ncIn^2;
85 set(handles.text31, 'String', Pco);
86 Ce=Fe*lrco*pi*f/(sqrt(2)*ncIn);
87 tanfi=ncIn*2*pi*f*LsSnc2/Ce;
88 fi=atan(tanfi);
89 fp=cos(fi);%factor de potencia
90 set(handles.text33, 'String', fp);
91 %número de vueltas
92 nc=v/(-RSnc2*ncIn+Ce);
93 set(handles.text35, 'String', nc);
94 %corriente nominal
95 In=ncIn/nc;
96 set(handles.text37, 'String', In);
97 %sección del conductor
98 A=In/Jcon;
99 set(handles.text39, 'String', A);
100 R=RSnc2*nc^2;
101 set(handles.text41, 'String', R);
102 Ls=LsSnc2*nc^2;
103 set(handles.text43, 'String', Ls);
104 Iave=In*sqrt(2)*2/pi;
105 E=Ce*nc;
106 %%Eficiencia obtenida
107 psa=E*In*fp/sqrt(2)-Pco
108 eficie=(E*In*fp/sqrt(2)-Pco)/(E*In*fp/sqrt(2));
109 set(handles.edit15, 'String', eficie);
110 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
111 function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
112 val= get(hObject, 'String')
113 Newval=str2double(val)
114 handles.edit3=Newval;
115 guidata(hObject,handles);
116 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
117 function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
118 if ispc
119 set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
120 else
121
122 set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
122 end
123 function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
124 val= get(hObject, 'String')
125 Newval=str2double(val)
126 handles.edit4=Newval;
127 guidata(hObject,handles);
128 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
129 function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

130 if ispc
131 set(hObject,'BackgroundColor','white');
132 else
133
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
134 end
135 function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
136 val= get(hObject,'String')
137 Newval=str2double(val)
138 handles.edit5=Newval;
139 guidata(hObject,handles);
140 function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
141 if ispc
142 set(hObject,'BackgroundColor','white');
143 else
144
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
145 end
146 function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
147
148 val= get(hObject,'String')
149 Newval=str2double(val)
150 handles.edit6=Newval;
151 guidata(hObject,handles);
152 function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
153 if ispc
154 set(hObject,'BackgroundColor','white');
155 else
156
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
157 end
158 function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
159 val= get(hObject,'String')
160 Newval=str2double(val)
161 handles.edit8=Newval;
162 guidata(hObject,handles);
163 function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
164 if ispc
165 set(hObject,'BackgroundColor','white');
166 else
167
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
168 end
169 function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
170 val= get(hObject,'String')
171 Newval=str2double(val)
172 handles.edit9=Newval;

```

```

173 guidata(hObject,handles);
174 function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
175 if ispc
176 set(hObject,'BackgroundColor','white');
177 else
178
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
179 end
180 function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
181 val= get(hObject,'String')
182 Newval=str2double(val)
183 handles.edit10=Newval;
184 guidata(hObject,handles);
185 function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
186 if ispc
187 set(hObject,'BackgroundColor','white');
188 else
189
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
190 end
191 function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
192 val= get(hObject,'String')
193 Newval=str2double(val)
194 handles.edit11=Newval;
195 guidata(hObject,handles);
196 function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
197 if ispc
198 set(hObject,'BackgroundColor','white');
199 else
200
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
201 end
202 function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
203 val= get(hObject,'String')
204 Newval=str2double(val)
205 handles.edit12=Newval;
206 guidata(hObject,handles);
207 function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
208 if ispc
209 set(hObject,'BackgroundColor','white');
210 else
211
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
212 end
213 function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
214 val= get(hObject,'String')
215 Newval=str2double(val)

```

```

216 handles.edit13=Newval;
217 guidata(hObject,handles);
218 function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
219 if ispc
220 set(hObject,'BackgroundColor','white');
221 else
222
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
223 end
224 function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)

225 function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
226 if ispc
227 set(hObject,'BackgroundColor','white');
228 else
229
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
230 end
231 function Br_Callback(hObject, eventdata, handles)
232 msgbox('densidad de flujo remanente del imán permanente',' Br ');
233 function u_Callback(hObject, eventdata, handles)
234 msgbox('permeabilidad relativa del imán',' u');
235 function Jcon_Callback(hObject, eventdata, handles)
236 msgbox('densidad de corriente, ...6*10^6~10*10^6 A/m^2 para máquinas
refrijeradas
forzadamente, ...4*10^6~6*10^6 A/m^2 refrijeración normal',' Jcon ');
237 function Bgpm_Callback(hObject, eventdata, handles)
238 msgbox('densidad de flujo magnético en el entrehierro',' Bgpm ');
239 function hcoil_Callback(hObject, eventdata, handles)
240 msgbox('Altura del bobinado',' hcoil ');
241 function hpm_Callback(hObject, eventdata, handles)
242 msgbox('Altura del imán',' hpm ');
243 function esquema_Callback(hObject, eventdata, handles)
244 openfig('dibuj.FIG','new')
245 function Graficas_Callback(hObject, eventdata, handles)
246 function ft_Callback(hObject, eventdata, handles)
247 msgbox('Presión ejercida por la columna de agua de la ola',' ft ');
248 function efici_Callback(hObject, eventdata, handles)
249 % hObject handle to efici (see GCBO)
250 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
251 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
252 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of efici as text
253 % str2double(get(hObject,'String')) returns contents of efici as a
254 % double
255 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
256 function efici_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
257 % hObject handle to efici (see GCBO)

```

```

258 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
259 % handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called
260 % Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
261 % See ISPC and COMPUTER.
262 if ispc
263 set(hObject,'BackgroundColor','white');
264 else
265
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
266 end
267 function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)
268 val= get(hObject,'String')
269 Newval=str2double(val)
270 handles.edit15=Newval;
271 guidata(hObject,handles);
272 function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
273 if ispc
274 set(hObject,'BackgroundColor','white');
275 else
276
set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
277 end

```