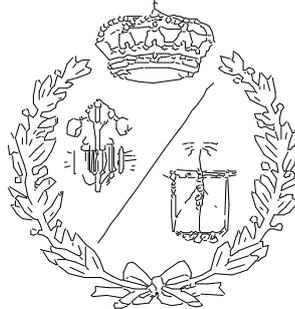


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO, DIMENSIONADO Y SIMULACIÓN
DE UN GENERADOR LINEAL PARA EL
DESARROLLO DE UNA BOYA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ**

**(Design, sizing and simulation of a linear
generator for the development of an energy
wave-powered generation buoy)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Carlos García Saiz

Septiembre - 2015

TÍTULO	Diseño, dimensionado y simulación de un generador lineal para el desarrollo de una boya de generación de energía undimotriz		
AUTOR	Carlos García Saiz		
DIRECTOR / PONENTE	José Carlos Lavandero Conzález		
TITULACIÓN	Grado en tecnologías industriales	FECHA	

PLABRAS CLAVE

Generador, ola, onda, energía, dimensionamiento, traslador, estator, bobinado, potencia, tensión, corriente, simulación

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El trabajo se plantea como una solución energética renovable, la problemática que lleva al planteamiento de este proyecto es el cambio climático que sufre el planeta, amplificado por las emisiones de CO2 provocadas por los combustibles fósiles, por lo que centrarse en el desarrollo de un sistema de producción de energía limpia, cabe dentro de un planteamiento lógico. Del mismo modo España dentro del marco Europeo e internacional tiene acuerdos de aumentar el porcentaje de potencia de fuente renovable instalada con respecto al total, a su vez de disminuir las emisiones de CO2, por consiguiente ese proyecto aborda ambos temas y desarrolla una fuente de energía aun por desarrollar.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto plantea un generador lineal como elemento de generación de energía eléctrica, este se encuentra en sumergido en el mar, por lo que el generador obtiene el movimiento de las olas, de este modo, comenzamos planteando la

localización geográfica del generador en las costa de Suances, Cantabria; obteniendo datos del oleaje de un punto cercano al de nuestra localización. A partir de estos datos de carga y mediante las ecuaciones del generador síncrono adaptadas a nuestro generador, lineal y de imanes permanentes, realizamos el dimensionamiento de las magnitudes eléctricas del generador. Una vez obtenido el resultado del dimensionamiento del generador se realiza una simulación para comprobar el funcionamiento eléctrico del generador.

CONCLUSIONES / PRESUPUESTO

La energía undimotriz no es una energía barata, el sistema de extracción de energía es grande y costoso, que requiere una gran inversión. A su vez, es una energía joven por lo que no tiene gran desarrollo por el momento se requiere todavía de evolución.

También se debe tener en cuenta las difíciles condiciones a las que puede verse sometido en el mar, así como la disponibilidad del recurso energético.

Las ventajas observadas a lo largo del proyecto son varias, las ventajas que presenta los generadores lineales frente a los rotativos, adaptándose mejor a las situaciones de carga dadas, otra gran ventaja es que al ser un sistema anclado al lecho marino no interfiere en las rutas de navegación y evita impacto visual en las costas

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aaron H. V. Novel Control of a Permanent Magnet Linear Generator for Ocean Wave Energy Applications
- [2] Bravo Moya, A. N. Sistema de conversión mecánica eléctrica para un genrador undimotriz.
- [3] Andolz Bielsa, J. Calculo y diseño de un motor lineal tubular de imanes permanentes.



- [4] Bhag, S; et al. Electric Machiner and transformers.
- [5] Chapman, S. J. Máquinas eléctricas. Mc Graw Hill,2000.
- [6] Corrales Martín, J. Calculo industrial de maquinas eléctricas.
- [7] Eriksson, M. Modelling and experimental verification of direct wave energy conversion.
- [8] Fernández Chozas, Julia. Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para generación de electricidad. Proyecto Fin de Carrera. UPM. Septiembre, 2008
- [9] Fernandez Diez, P. Energia de las olas.
- [10] Fraile Mora, J. Máquinas eléctricas.
- [11] Fitzgerald, A.E; et al. Máquinas eléctricas.
- [12] Gómez León, D. Análisis de los generadores de accionamiento directo en tecnología undimotriz.
- [13] González Morales, L. G. Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable
- [14] Gonzalez Cubrero, J. Analisis de los requisitos eléctricos para el diseño de un parque offshore de energía undimutriz.
- [15] H. Polinder; et al. Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator.
- [16] Ibañez Martin, M. Generador de flujo axial estatorico de imanes permanentes.
- [17] IDAE ; Evaluación del Potencial de la energía de las olas. Estudio Técnico PER 2011-2020.

- [18] Joao M.B.P. Cruz; et al. Sea state characterisation of the test site of an offshore wave energy plant.
- [19] Méndez Sánchez, P. Fundamentos para el dimensionamiento eléctrico de un alternador de imanes permanentes.
- [20] R. Torres, Carlos. Mecánica de Olas. iio/aubc.2008.
- [21] Red eléctrica de España [En línea]. <http://www.ree.es/en>
- [22] Rodriguez Pozueta, M.A. Campos magnéticos de dispersión. 2011
- [23] Sá da Costa, José; et al. Modeling of an ocean waves power device AWS
- [24] Sara Hoya Arijá, Sara. Diseño eléctrico de una boya para energía olamotriz.
- [25] Suárez Arrabal, J.R. Concepción, dimensionamiento y simulación de generador undimotriz para boya marina.
- [26] Szabó, L; et al. Novel permanent magnet tubular linear generator for wave energy converters.
- [27] Valério, Duarte; et al. Optimisation os wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing
- [28] Vanfretti, L. Modelado y simulación de la máquina síncrona y su operación en sistemas de potencia.
- [29] Vates Aviles, A. Sistemas de conversión de la energía de las olas.
- [30] Wikipedia. [En línea] <http://www.wikipedia.org>



**Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de
Telecomunicación**



ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
Índice de figuras	6
Índice de tablas	9
Glosario	10
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Justificación del Trabajo	14
1.1.1 Agotamiento de los recursos fósiles	15
1.1.2 Los gases de efecto invernadero	18
1.1.3 La energía en España	19
1.2 Objetivo del Trabajo	21
1.3 Metodología	21
2. ENERGÍA DE LAS OLAS	23
2.1 Introducción	23
2.2 Potencial del recurso	25
2.3 Convertidores de energía de las olas	26
2.3.1 Dispositivos de generación fijos	27
2.3.2 Dispositivos de generación flotantes	30

3. MODELIZACIÓN DE LA OLA	35
3.1 Introducción	35
3.2 Teoría lineal del oleaje	36
3.3 Oleajes irregular	43
3.4 Emplazamiento del OWC. Régimen de oleaje	47
4. OSCILADOR DE OLA DE ARQUIMEDES (AWS)	55
4.1 Características	55
4.2 Justificación del sistema escogido	56
4.3 Funcionamiento	57
4.4 Modelado mecánico	59
4.5 Dispositivo de conversión energética	61
5. LA MÁQUINA SINCRONA	63
5.1 Descripción básica del generador síncrono rotativo	61
5.1.1 Introducción	63
5.1.2 Funcionamiento	64
5.2 Generador síncrono rotativo de imanes permanentes	67
5.2.1 Aspectos generales	67
5.2.2 Ventajas de la utilización de imanes permanentes	70
5.3 Generador síncrono lineal de imanes permanente	72
5.3.1 Principio de funcionamiento	72
5.3.2 Ventajas, inconvenientes y aplicaciones de las máquinas síncronas lineales	73

6. DIMENSIONADO DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES	76
6.1 Consideraciones previas del generador lineal con arrastre directo	76
6.1.1 Fuerza del accionamiento: esfuerzo cortante	76
6.1.2 Fuerza Maxwell	77
6.1.3 Dimensionamiento del OWS	78
6.2 Esquema y cotas del generador lineal	79
6.3 Variables y parámetros de diseño	80
6.4 Expresiones para el dimensionado	82
6.4.1 Formulaciones generales	82
6.4.2 Formulaciones del circuito magnético	84
6.4.3 Formulaciones del devanado	87
6.4.4 Grado de aislamiento del devanado	90
6.4.5 Resistencia e inductancia del devanado	90
6.5 Volúmenes y pesos de los materiales activos	92
6.6 Perdidas del generador	94
6.6.1 Perdidas del cobre	94
6.6.2 Perdidas en el hierro	94
7. Resultado del dimensionamiento	98
7.1 Datos numéricos del dimensionamiento	98
8. ECUACIONES PARA LA SIMULACION DEL PMSG	104
8.1 Bases consideradas en la modelización	104
8.2 Desplazamiento mecánico y eléctrico	105
8.3 Ecuaciones del generador en coordenadas primitivas	105

8.4	Transformada de Park	106
8.5	Ecuaciones U-I del PMSLG en la referencia ortogonal d-q	108
8.6	Inductancias del generador síncrono en ejes d-q	108
8.7	Carga del generador	110
8.8	Transformación de intensidades y a fase a-b-c del PMSLG	113
8.9	Potencias del generador síncrono de imanes permanentes	117
9.	SIMULACIÓN	120
9.1	Simulación de las tensiones trifásicas	120
9.2	Simulación de las corrientes trifásicas	122
9.3	Simulación de la potencia del generador	124
10.	CONCLUSIONES	125
	ANEXO I: MATERIALES	130
	ANEXO II: PLANOS	133
	ANEXO III: DATOS DE INTERES	140
	ANEXO IV: CONEXIÓN A LA RED	142
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1.1 Evolución de la extracción de petróleo mundial	16
1.2 Reservas mundiales de petróleo	16
1.3 Precio del barril de petróleo	17
1.4 Relación entre el aumento de CO ₂ y la temp. media global	18
1.5 Evolución de la potencia instalada y la demanda de energía en España	20
1.6 Desglose de la energía producida en España, en 2010	20
2.1 Movimiento de las moléculas de agua en las olas	23
2.2 Potencia en kW/m de las olas	25
2.3 Sistema de captación OWC	28
2.4 Sistema de captación Tapchan	29
2.5 Sistema de captación Wall-Roller	30
2.6 Sistema de captación Pelamis	31
2.7 Sistema de captación Salter Duck	32
2.8 Sistema de captación Wave Dragon	33
2.9 Sistema de captación AWS	33

2.10 Sistema de captación Power Buoy	34
3.1 Onda sinusoidal progresiva y parámetros de definición	39
3.2 Perfiles de la velocidad de las partículas y su relación con la elevación	40
3.3 Perfil de un estado de mar irregular	43
3.4 Emplazamiento del generador	48
3.5 Evolución de los valores medios anuales de la altura significativa de ola	49
3.6 Evolución de los valores medios mensuales de la altura significativa de ola	50
3.7 Evolución de los valores medios anuales del periodo de pico de ola	51
3.8 Evolución de los valores medios mensual del periodo de pico de ola1	52
3.9 Histograma de frecuencias de la altura significativa de ola	53
3.10 Histograma de frecuencias del periodo de pico de ola	54
4.1 Esquema de funcionamiento del AWS	58
5.1 Máquina síncrona rotativa de polos salientes	64
5.2 Esquema simplificado de una máquina síncrona trifásica bipolar	65
5.3 Generador síncrono de imanes permanentes	68
5.4 Ciclos de histéresis	69
5.5 Evolución de la máquina rotativa a la máquina lineal	71
5.6 Partes constituyentes del generador síncrono lineal de imanes permanentes	72
6.1 Cotas principales del generador	80

8.1	Diagrama de bloques para la simulación del generador	113
8.2	Diagrama de bloques para transformar las tensiones a coordenadas trifásicas	115
8.3	Diagrama de bloques para transformar las intensidades a coordenadas trifásicas	117
8.4	Diagrama de bloques para el calcula de la potencia del generador	119
	Diagrama de bloques para transformar las tensiones a coordenadas trifásicas	
9.1	Simulación de las tensiones trifásicas del generador	121
9.2	Ampliación de la simulación de las tensiones trifásicas	121
9.3	Simulación de las intensidades trifásicas del generador.....	122
9.4	Ampliación de la simulación de las intensidades trifásicas	123
9.5	Potencia del generador	124
I.1	Curva de inducción del hierro	131
IV.1	Configuración básica de la conexión a la red de undispositivo de energía undimotriz con generación directa	142
IV.2	Circuito equivalente de PMLSM y diagrama de fasores, con CSI	143
IV.3	Circuito equivalente de PMLSM y diagrama de fasores, con VSI	144

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
3.1 Clasificación de las aguas según la profundidad del mar.	38
3.2 Series temporales de altura significativa de ola H_s (m). Valores medios mensuales.	49
3.3 Series temporales del periodo de pico de ola T_p (s). Valores medios mensuales.	51
6.1 Valores del esfuerzo cortante máximo en máquinas eléctricas.	77
7.1 Valores de las características .del generador.	98
7.2 Valores calculados de las características .del generador.	100
I.1 Características del hierro	130
I.2 Características del cobre	132
III.1 Coste de los materiales	140
III.2 Costes de los elementos del generador	140
III.3 Estimación del peso del OWS	141

GLOSARIO

L_s	Longitud del generador.
A_s	Ancho del generador.
p	Número de polos del generador.
h_s	Altura de la ranura.
$B_{\delta 0}$	Campo magnético del aire en-el entrehierro.
B_{d0}	Campo magnético en la ranura.
J_{rms}	Densidad de corriente eficaz
m	Número de fases.
q	Número de ranuras por polo y fase.
K_{fs}	Factor de apilado de chapas magnéticas.
h_i	Espesor del aislamiento en ranuras.
K_{cu}	Factor de llenado de ranura.
ρ_{cu}	Densidad cobre
B_{yr}	Campo magnético en el yugo del rotor.
B_{ys}	Campo magnético en el yugo del estator.
H_c	Fuerza coercitiva del imán.
μ_m	Permeabilidad relativa del imán.
μ_0	Permeabilidad del aire, o en el vacío.
b_{s1}	Abertura de la ranura.

h_{s1}	Altura de diente.
h_{s2}	Altura de la cuña de ranura.
a	Número de circuitos en derivación.
E_{pn}	Tensión de fase en bornes del generador en vacío.
Q	Número ranuras del generador
Q_f	Número ranuras del generador por fase
τ_s	Paso de ranura.
δ	Entrehierro geométrico
A_e	Ancho media equivalente del generador.
A_u	Anchura útil del generador.
b_d	Ancho del diente.
b_s	Ancho de ranura.
h_{ys}	Altura yugo estator.
h_{yr}	Altura yugo rotor.
b_m	Longitud del imán.
\hat{V}_{ys}	Caída de tensión en el yugo del estator.
\hat{V}_{ys}	Caída de tensión en el yugo del traslador.
\hat{V}_d	Caída de tensión en los dientes.
\hat{V}_m	Caída de tensión en el imán.
\hat{V}_δ	Caída de tensión en el entrehierro.
b_{cu}	Ancho de cobre en ranura.
h_{cu}	Altura del cobre en ranura.
h_{s3}	Altura útil del cobre en ranura.
R_s	Resistencia devanado del estator por fase
Z_Q	Número de conductores por ranura.

$B_{\delta(1)}$	Componente fundamental de la inducción del entrehierro.
δ_t	Entrehierro total.
λ_r	Permeancia de dispersión en ranura.
λ_t	Permeancia de dispersión en diente.
λ_b	Permeancia de dispersión en bobina.
λ_m	Permeancia de los imanes.
L_s	Inductancia de dispersión en ranura.
L_d	Inductancia de dispersión en diente.
L_{cd}	Inductancia de dispersión en bobina.
L_m	Inductancia magnetización.
L_f	Inductancia total devanado del estator por fase.
K_{ca}	Coefficiente de Carter.
δ_{ef}	Entrehierro efectivo.
P	Potencia activa.
f	Frecuencia.
v_x	Velocidad de traslación.
i_d, i_q	Corrientes instantáneas en los ejes directo y en cuadratura.
u_d, u_q	Tensiones instantáneas en los ejes directo y en cuadratura
U_a, U_b, U_c	Tensiones eficaces de fase del alternador
I_a, I_b, I_c	Intensidades eficaces de fase del alternador
ψ_a, ψ_b, ψ_c	Flujos concatenados por fase.
n	Velocidad de sincronismo.
Z	Número total de conductores.
Z_f	Número total de conductores por fase.
N_f	Número total de espiras por fase.

$\xi_{w(1)}$	Coeficiente distribución del devanado para la componente fundamental.
ϕ_m	Flujo por polo.
X	Posición mecánica del rotor.
x_e	Posición eléctrica del rotor.
v_e	Velocidad eléctrica del rotor.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del Trabajo

Las motivaciones para abordar este Trabajo son múltiples; las consideradas más relevantes, como son: el agotamiento de los recursos fósiles, el efecto invernadero producido por la emisión de gases y el estado energético de España, se detallan con mayor extensión en los apartados siguientes.

Otro aspecto a tener en cuenta, es el crecimiento de las necesidades energéticas del país; la población ha sufrido un crecimiento en cuanto al número de habitantes se refiere, y lo que es más importante, cada vez las necesidades energéticas por habitante son mayores; cabe recordar que uno de los índices que pone de manifiesto el desarrollo de una sociedad viene marcado por el consumo energético por habitante.

Lo anterior, sugiere la necesidad de buscar nuevas formas de energía, que den apoyo a las existentes en la actualidad, tanto para hacer frente a la demanda energética actual, como que las fuentes renovables vayan sustituyendo, progresivamente, a las tradicionales, conforme su grado de evolución sea el suficiente para afrontar, con garantía, las necesidades de las futuras demandas.

Por otra parte, la situación geográfica de Cantabria -emplazamiento en el que se sitúa el Trabajo-, con el mar Cantábrico bañando la costa, hace que se tenga en cuenta la energía procedente de las olas como una alternativa en la

producción energética, ya que, por la holografía de la costa y por el oleaje que posee, es uno de los mares más propicios para el aprovechamiento de dicho potencial.

Por lo expuesto, se justifica la necesidad de realizar el presente Trabajo, que está orientado a la obtención de energía eléctrica a partir de una fuente renovable por el aprovechamiento de la energía de las olas.

1.1.1 Agotamiento de los recursos fósiles

La disponibilidad del petróleo en el futuro no se debate. Lo que gira en torno a dicha discusión no es la posibilidad del agotamiento del mismo; después de todo, se está ante un recurso no renovable, que tarde o temprano llegará a su fin; además, el crecimiento de las necesidades energéticas del planeta tiene como consecuencia el aumento de consumo sobre este recurso energético. Existen varias teorías sobre cuando se acabara el petróleo, algunas de ellas, apuntan a finales del siglo XXI; otro indicativo, de gran interés, es el pico de extracción de petróleo, que indica el momento de extracción máxima del recurso y como a partir de dicho punto, la producción descenderá a la misma velocidad que previamente creció, como indica la Teoría del Pico de Hubbert.

El año exacto del pico todavía no ha sido establecido con precisión, si bien, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) hizo público en noviembre de 2010, que la producción de petróleo crudo llegó a su pico máximo en 2006. Aunque no se pueda asegurar si este dato es cierto, lo que si se cree es que este punto de inflexión esta próximo, y aunque podría verse retrasado por la aparición de nuevas formas de explotación, como el fracking, no es una circunstancia evitable y, una vez alcanzado, empezaran a verse mermadas las reservas energéticas tradicionales. La figura 1.1, muestra la extracción realizada y prevista de petróleo y gas en las diferentes zonas mundiales, que corrobora lo expuesto.

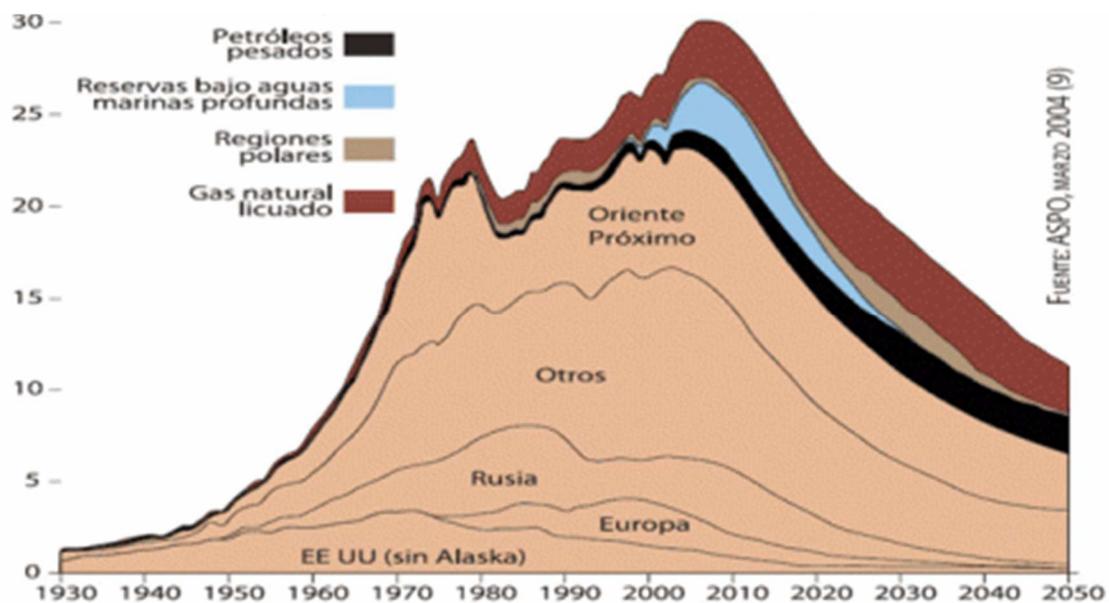


Figura 1.1. Evolución prevista de la extracción del petróleo y gas mundial.

Otro de los grandes problemas de las reservas de petróleo y gas, es su distribución global. Así, mientras Europa y Estados Unidos son los mayores consumidores, sus reservas son escasas, tal como ilustra la figura 1.2 que muestra la distribución de reservas de petróleo por regiones mundiales a fecha de 2001, destaca el Oriente Medio, con el 64% de las reservas totales. Esto origina

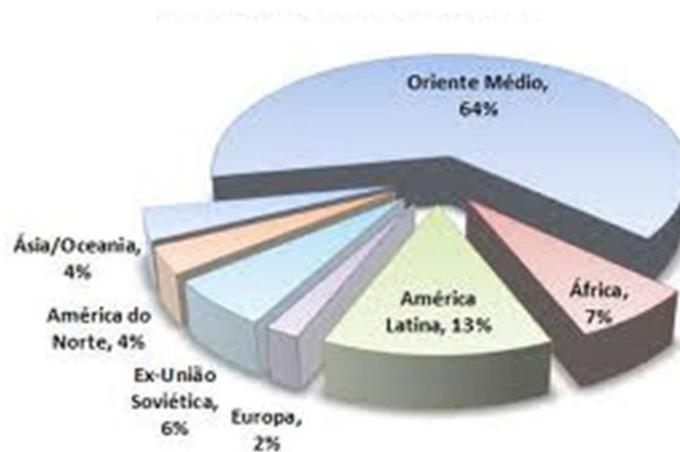


Figura 1.2. Reservas mundiales de petróleo por regiones mundiales.

una gran dependencia de estos países. Países, además, de gran inestabilidad lo que provoca que en un futuro puedan producirse nuevas crisis del petróleo, como las que ya acontecieron en 1973 y 1979, o las guerras del golfo e Iraq, lo que implicó una gran subida en el precio de los hidrocarburos. En la figura 1.3, se muestra la evolución temporal del precio del barril de petróleo tipo Brent.

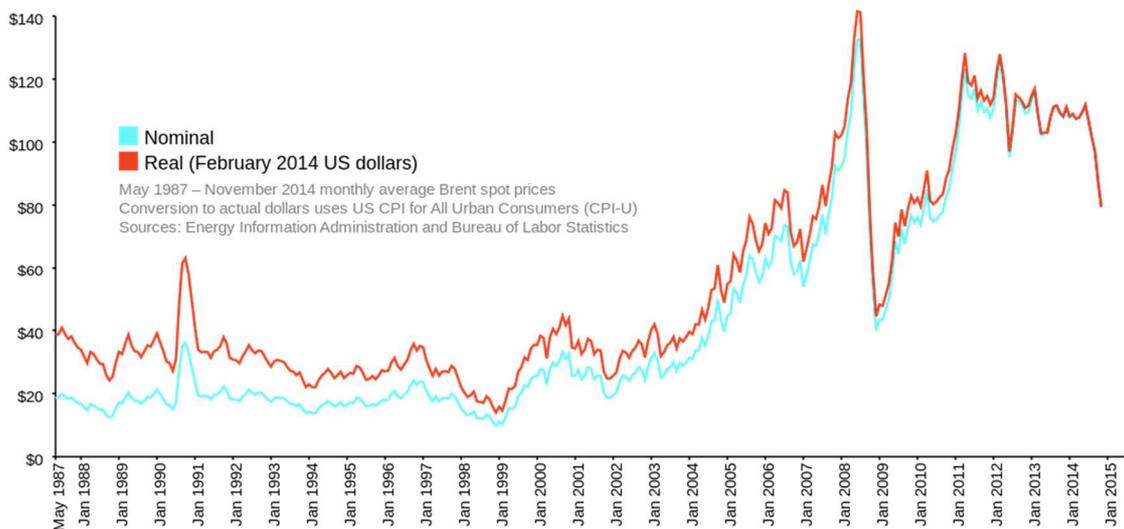


Figura 1.3. Evolución del precio del barril de petróleo Brent.

1.1.2 Los gases de efecto invernadero

Hoy ya es un hecho comprobado, que el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, es una de las principales causas del cambio climático global del planeta Tierra.

El cambio climático va asociado con el aumento de la temperatura del globo debido al aumento del efecto invernadero en la atmosfera; si bien es cierto, que un porcentaje de efecto invernadero es necesario para la vida, la actividad humana lo está potenciando de tal modo, que se ha convertido en una amenaza potencial. En los últimos 100 años, la temperatura media global del planeta ha aumentado 0,7 °C, siendo, desde 1975, el incremento de temperatura de unos

0,15 °C por década. En lo que resta de siglo, según el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), la temperatura media mundial aumentará en 2-3 °C. Este aumento de temperatura supondrá el mayor cambio climático en los últimos 10 000 años y será difícil para las personas y los ecosistemas adaptarse a este cambio tan brusco. Los efectos más inminentes de este cambio climático ya se están dejando ver, con el deshielo de los casquetes polares, el cual está produciéndose a un mayor ritmo de lo pronosticado y, también, con el aumento en frecuencia e intensidad de grandes tormentas.

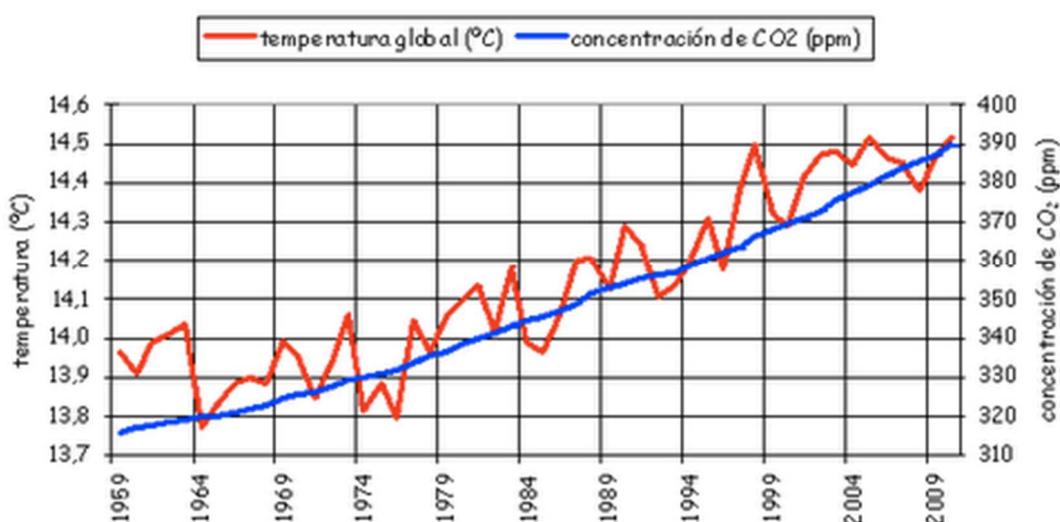


Figura 1.4. Relación aumento de CO₂ - temperatura global media.

En la figura 1.4, se observa la relación directa que mantienen en el tiempo, el aumento de CO₂ con el aumento de la temperatura media global.

Se estima que el CO₂ es el principal gas de efecto invernadero (60%-85% del impacto total), siendo los combustibles fósiles los principales causantes de su emisión. La concentración actual de CO₂ en la atmósfera ronda las 380 partes por millón (ppm), sugiriendo los estudios realizados que no se debería superar el rango de 450-550 ppm, si se quieren evitar efectos de gran repercusión.

Si no se adoptan políticas de control de las emisiones y se mantiene la tendencia actual, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera podrían aumentar hasta los 1260 ppm, en el año 2100.

La estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero a niveles admisibles exigirá, no sólo la simple reducción en el crecimiento de las emisiones, sino una importante reducción en términos absolutos de las mismas. La tendencia actual de crecimiento en las emisiones mundiales de CO₂ y su efecto sobre la concentración atmosférica de este gas, dependerá del cumplimiento de los programas establecidos a nivel mundial.

1.1.3 La energía en España

La situación energética de España es complicada; el gran crecimiento de la economía a principios del siglo XXI, supuso que la energía demandada superase la potencia que el sistema era capaz de suministrar; esto, supuso la obligación de comprar energía a países vecinos, con un gran coste económico para el país.

La figura 1.5, ilustra la evolución en el tiempo de la demanda de energía frente a la potencia instalada en España. Se observa, como la actual crisis está frenando ambos parámetros.

Otro extremo a tener en cuenta en la gestión de la energía Española, es el *mix* de energías que forman la base, con una gran dependencia de energías derivadas del uso de combustibles fósiles (véase la figura 1.6), con las emisiones que esto conlleva. España tiene tratados de reducir las emisiones de gases efecto invernadero, por lo que se debe reducir la dependencia de estas energías.

Por otro lado, una de las grandes bases de la producción energética española es la energía nuclear, aunque no presenta emisiones tiene otros factores a tener en cuenta ya conocidos, como la gestión de residuos;

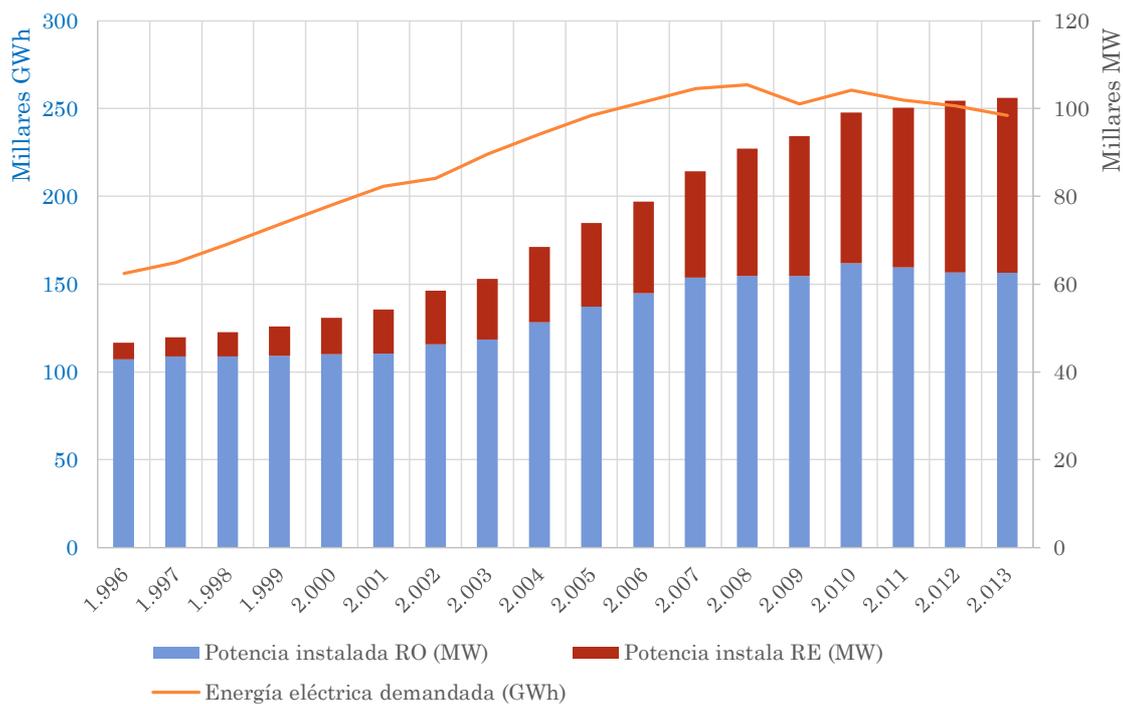


Figura 1.5. Evolución de la potencia instalada y la energía demandada en España.

también ha de tenerse en cuenta, que las centrales nucleares españolas tienen una cierta antigüedad y la legislación española no permite la construcción de nuevas plantas, por lo que pronto estas llegaran al fin de su vida útil y cerraran.

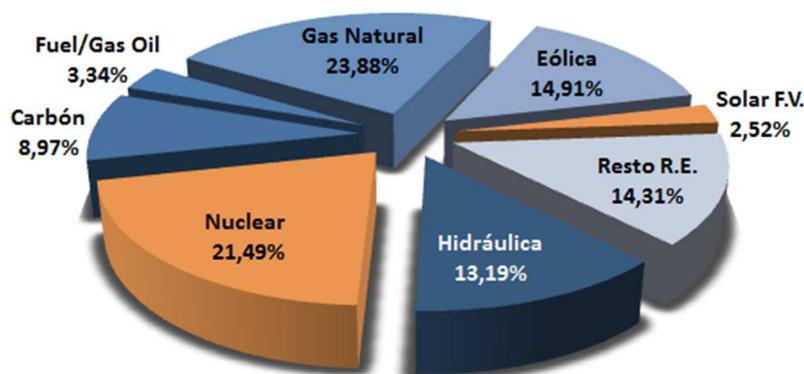


Figura 1.6. Desglose de la energía producida en España en 2010.

Todo ello en su conjunto obliga a aumentar la presencia de las energías renovables dentro del *mix* energético español.

1.2 Objetivos del Trabajo

En el presente Trabajo se realiza el diseño eléctrico de un generador para una boya de energía undimotriz, aislado del sistema eléctrico. La solución adoptada para el generador eléctrico es de tipo síncrono, lineal, con imanes permanentes.

El Trabajo no incluye otros elementos, como la electrónica de potencia a utilizar, la construcción del generador, la extracción de la energía a la costa, el estudio de costes o la viabilidad económica del proyecto.

1.3 Metodología

El presente Trabajo está organizado en diferentes capítulos en los que se desarrollaran los diferentes conceptos a tener en cuenta:

- Primero, se describe una explicación del recurso, el potencial de dicho recurso, así como las tecnologías existentes para el aprovechamiento del mismo.
- Análisis del oleaje, como se comporta y la modelización matemática del mismo, seguido de los parámetros que indican su potencial energético.
- Descripción de la máquina síncrona convencional, como una primera aproximación a la máquina proyectada; a continuación, se remarcaran

las características particulares de la máquina de imanes permanentes y de la máquina lineal.

- Las características generales del dimensionado mecánico y eléctrico de la máquina, que conlleva el establecimiento de la potencia nominal del generador.
- El desarrollo de las ecuaciones eléctricas, en base a los parámetros característicos de la máquina síncrona lineal.
- Un conjunto de simulaciones en computador del generador proyectado ante la excitación provocada por una ola promedio, con el objeto de observar y certificar la validez del desarrollo propuesto.
- Resumen y conclusiones obtenidas una vez finalizado el Trabajo.

2. ENERGIA DE LAS OLAS

2.1 Introducción

El oleaje o movimiento de la superficie del mar, es un fenómeno omnipresente en la superficie de cualquier recinto con agua, ya sean estanques, lagos, embalses, mares u océanos. Su estudio, sin embargo, es muy complejo; únicamente, cuando los avances en instrumentación de medida y capacidad de proceso de datos que ha permitido el muestreo del mar, su desarrollo ha sido vertiginoso. Los modelos analíticos capaces de ofrecer una descripción completa del oleaje, no surgieron hasta la segunda mitad del siglo XX.

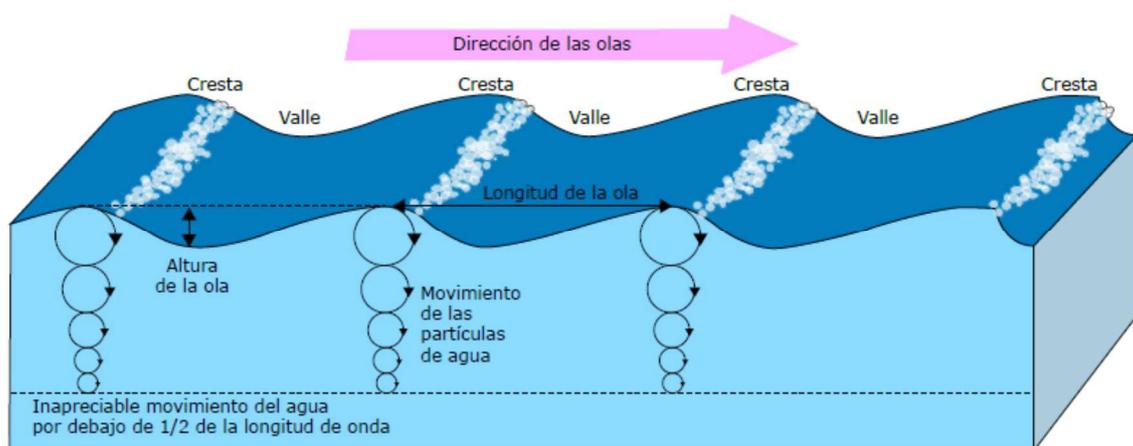


Figura 2.1. Movimiento de las moléculas de agua en las olas.

Las olas son ondas que se desplazan a lo largo de la superficie marina (véase la figura 2.1), donde se produce un ascenso del nivel del mar, cresta, proseguido de una depresión, valle, debido al movimiento de las partículas de agua que adquieren un movimiento de vaivén, con una componente vertical y otra longitudinal, en la dirección de propagación de la onda; esto origina que ambas avanzan a lo largo de la superficie marina, donde se suceden de forma alternativa. El tiempo entre crestas, así como la altura de las mismas, se produce de una forma errática con una gran variedad.

El análisis del oleaje se analiza como un proceso estocástico. Se simplifica el análisis considerando el oleaje como un proceso estacionario o cuasi-estacionario, lo que implica que los estadísticos del proceso se mantienen invariables a lo largo del tiempo (media, varianza, etc.). Dichos intervalos de tiempo cuasi-estacionarios (entre 30 y 60 min), se llaman *estados de mar*. Sin embargo, el oleaje es la respuesta de la superficie del mar a condiciones atmosféricas no estacionarias; por tanto, el oleaje está caracterizado por un conjunto de estados de mar.

Se llama *análisis a corto plazo*, al análisis estadístico y espectral en estados de mar, que puede ser descrito con unos pocos parámetros: altura de ola del momento de orden cero espectral, H_{m0} , periodo de pico espectral, T_p , altura de ola significativa, H_s , periodo medio, T_z , etc.

Constituye una *serie temporal de estados de mar*, el conjunto de estados de mar en el tiempo. Las características estadísticas de esta serie describen el *clima marítimo a largo plazo* en una determinada zona.

2.2 Potencial del recurso energético

La energía de las olas oceánicas es enorme; incluso, la fracción de la energía que es potencialmente explotable es muy grande comparada con el consumo actual de electricidad en el mundo.

Con el propósito de estimar el potencial mundial, se han realizado diversos estudios. Se estima, que la energía mundial explotable es de 2 TWh al año y que las aguas europeas son capaces de cubrir más del 50% del consumo total de energía propia.

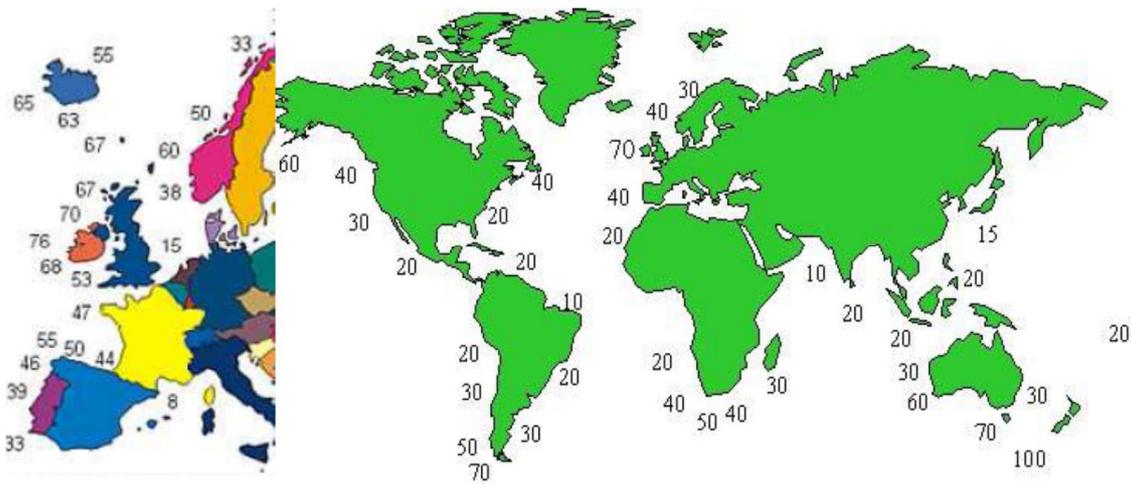


Figura 2.2. Potencia en kW por metro de ancho de ola.

Como la mayoría de las fuentes renovables, la energía de las olas se encuentra distribuida en el globo terráqueo de forma desigual. Las zonas del mundo sujetas a vientos regulares son las que disponen de mayores potenciales energéticos que pueden extraerse de las olas. Así, la actividad de las olas se ve incrementada entre las latitudes de 30° y 60°, en ambos hemisferios, inducidas por los vientos alisios predominantes que soplan en estas regiones. Los vientos procedentes del Golfo de Méjico, que soplan con una dirección predominante del noreste, cruzan el Atlántico y tienen varios miles de kilómetros para transferir

energía al Océano Atlántico. Estos vientos crean grandes olas que llegan a las líneas de costa de Europa.

En la figura 2.2, se muestra la distribución global de la energía de las olas en kW por metro de ancho de ola, en varios lugares del mundo. Para capturar la máxima energía de una ola, los aparatos deben diseñarse para interceptar completamente los movimientos de las partículas de agua, es decir, deberían capturar la energía de todos los movimientos circulares de la ola, desde la superficie hasta las profundidades. Sin embargo, ya que las órbitas más profundas y pequeñas contienen poca energía no resulta viable, desde el punto de vista técnico y económico, tratar de capturarlas todas.

Existen pocos lugares en el mundo donde la línea de costa esté constituida por acantilados con aguas profundas. Estos lugares, son los más apropiados para instalar dispositivos de captación de la energía del oleaje, ya que las olas incidentes contienen gran cantidad de energía; sin embargo, en la mayoría de las zonas costeras del mundo las aguas son poco profundas. La ola, cuando se acercan a aguas poco profundas va perdiendo, gradualmente, su potencia.

2.3 Convertidores de energía de las olas

El movimiento de las olas puede convertirse en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica, usando los mecanismos o sistemas apropiados.

En estos últimos 20 años se han diseñado una gran diversidad de mecanismos para explotar la energía de las olas. Con la finalidad de obtener un panorama del abanico de dispositivos captadores, se describen algunos convertidores de energía de las olas.

Diferentes clasificaciones, ordenan los dispositivos que extraen energía de las olas. Algunas, están basadas en la posición del dispositivo respecto a la costa, en la generación a la cual pertenece el dispositivo en la historia de los desarrollos, en el modo de movimiento, en el flujo de potencia, en el principio de funcionamiento, etc.

A continuación, se clasifican en dos grandes grupos, diferenciados por el lugar de instalación: sistemas fijos y sistemas flotantes.

2.3.1 Dispositivos de generación fijos

Estos dispositivos son los que están construidos en la línea costera o fijados al lecho marino en aguas poco profundas. Los sistemas fijos tienen algunas ventajas importantes sobre los sistemas flotantes, sobre todo con respecto al mantenimiento. Sin embargo, la cantidad de lugares apropiados para este tipo de dispositivos es limitada.

- **Columna de agua oscilante (OWC)**

La columna de agua oscilante (Oscillating Water Column ó OWC) genera electricidad en un proceso de dos pasos (véase la figura 2.3).

Cuando la ola entra en la columna, fuerza al aire de la misma a pasar por la turbina e incrementa la presión dentro de la columna. Cuando la ola sale, el aire vuelve a pasar por la turbina –en sentido contrario–, debido a la disminución de la presión de aire en el lado del océano de la turbina. Sin importar la dirección de la corriente de aire, la turbina (conocida como turbina Wells) gira en la misma dirección y hace que el generador acoplado a la turbina produzca electricidad.

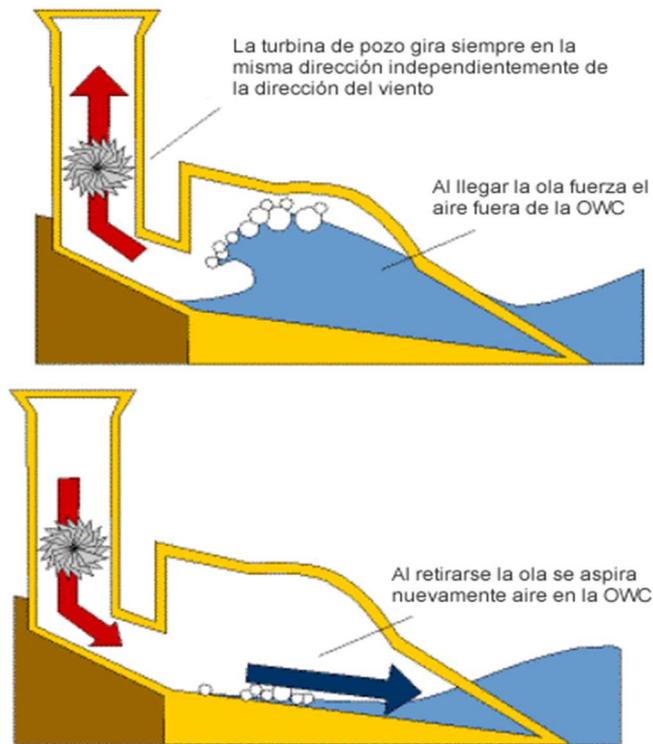


Figura 2.3. Sistema de captación OWC.

- **Estrechamiento de canal (TAPCHAN)**

El sistema de estrechamiento de canal, consiste en un canal que a lo largo de su longitud se va estrechando. El canal alimenta a un embalse construido sobre un acantilado, como ilustra en la figura 2.4. El estrechamiento del canal hace que las olas aumenten su amplitud cuando se acercan a la pared del acantilado. Eventualmente, las olas se desbordan sobre las paredes del canal dentro del embalse, que está ubicado varios metros por encima del nivel del mar. La energía cinética de la ola en movimiento se convierte en energía potencial cuando el agua se conserva en el embalse. La generación de electricidad es similar a la de una planta hidroeléctrica; por ejemplo, el agua en depósito se hace pasar por una turbina Kaplan, acoplada a un generador.

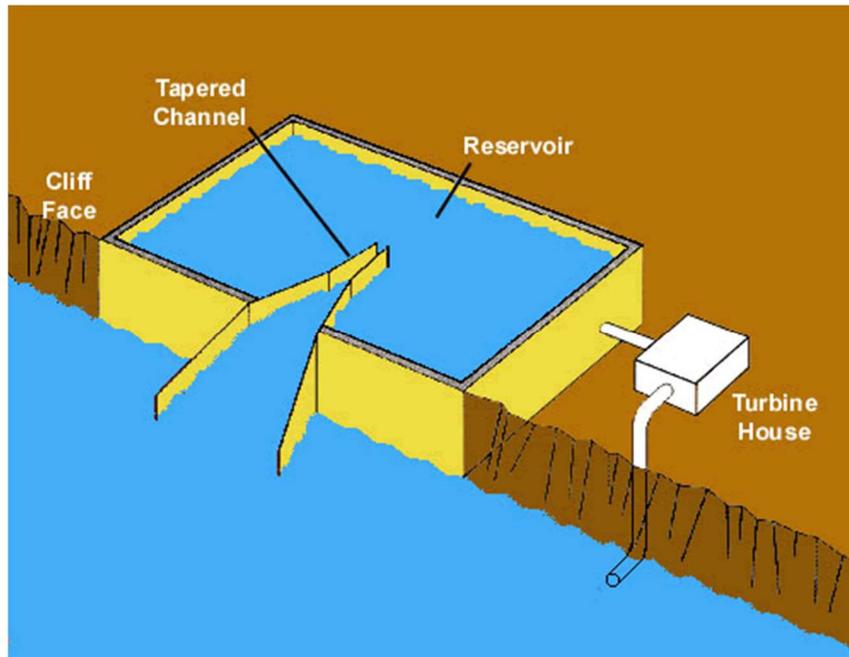


Figura 2.4. Sistema de captación Tapchan.

El concepto de Tapchan es una adaptación de la producción de energía hidroeléctrica tradicional, con muy pocas partes móviles, todo contenido en un edificio de generación, lo que origina bajos costes de mantenimiento y sean muy fiables. Este sistema no tiene problemas con la demanda puntual de energía, ya que el embalse puede conservarla hasta que ésta sea requerida.

Desafortunadamente, los sistemas Tapchan no son apropiados para todas las regiones costeras. Las mismas deben tener olas continuas, con un buen promedio de energía y con un rango de mareas de menos de 1 m, además de algunas propiedades de la costa, como aguas profundas cerca de la misma y una ubicación apropiada para el embalse.

- **Placa pivotante (Wave Roller)**

El dispositivo Wave Roller consiste en una placa fijada al fondo del océano por su parte inferior, que puede girar hacia adelante y atrás (véase la figura 2.5). El movimiento de las olas bajas mueve la placa y, la energía cinética producida, se recoge en una bomba de pistón. Esta energía puede ser convertida en electricidad ya sea por un generador unido a la unidad Wave Roller, o bien, mediante un sistema hidráulico cerrado en combinación con un sistema turbina-generador.

El Wave Roller implica un concepto modular, es decir, que la capacidad de la planta está formada por la conexión de una determinada cantidad de módulos de producción.

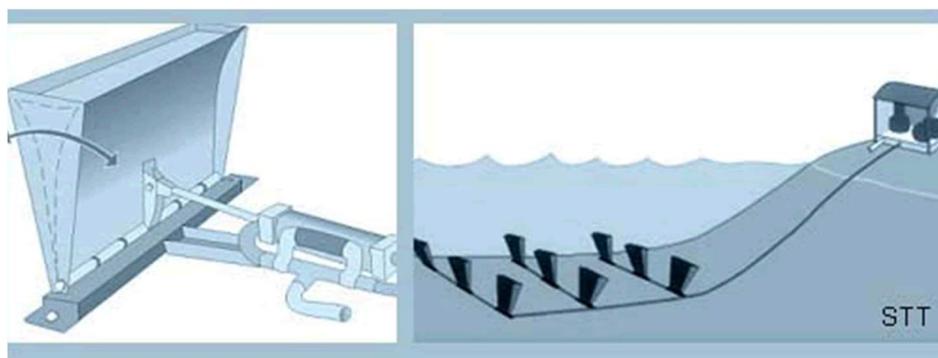


Figura 2.5. Sistema de captación Wave Roller.

2.3.2 Dispositivos de generación flotantes

Los dispositivos de generación de energía flotantes, son sistemas que se encuentran flotando en el océano, ya sea cerca de la costa u “offshore”. Son ejemplos de estos dispositivos de generación, los siguientes.

- **Cilindros articulados (Pelamis)**

El Pelamis consiste una estructura articulada semiflotante, compuesta por secciones cilíndricas unidas mediante bisagras, que siguen el movimiento de las olas. El movimiento de los cilindros es opuesto por arietes hidráulicos, que bombean aceite a alta presión accionando motores hidráulicos. Los motores acoplados a generadores producen electricidad.

La estructura se mantiene en posición mediante un sistema de anclaje compuesto por una combinación de cables, flotadores y pesas, que al mantiene el Pelamis en su posición y, además, permite el movimiento de vaivén de los cilindros con las olas entrantes. También, se pueden conectar varias unidades juntas y exportar la electricidad a la costa a través de un sólo cable, conducido por el fondo marino.



Figura 2.6. Sistema de captación Pelamis.

- **Pato Salter (Salter Duck)**

El Salter Duck es otro dispositivo semiflotante, como el Pelamis, que genera electricidad a través del movimiento armónico de la parte flotante (pato) del dispositivo (véase la figura 2.7). El pato rota con un movimiento de cabeceo a medida que la ola pasa. Este movimiento bombea fluido hidráulico que activa el motor, que a su vez, acciona un generador eléctrico asociado.

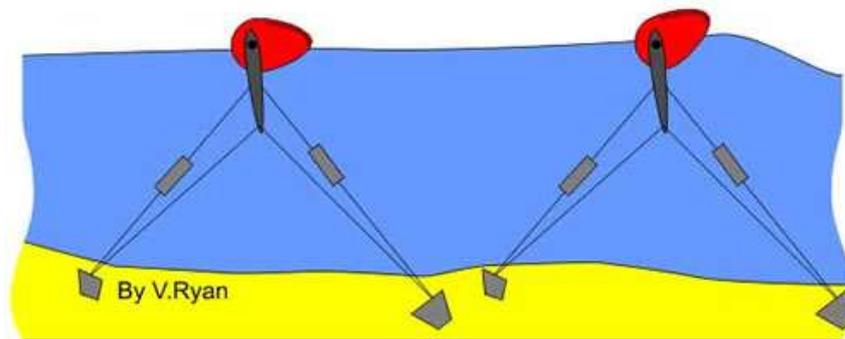


Figura 2.7. Sistema de captación Salter Duck.

- **Dragón de olas (Wave Dragon)**

El Wave Dragon es esencialmente un dispositivo que eleva las olas marinas a un embalse por encima del nivel del mar, donde se permite que el agua pase por una serie de turbinas y, por lo tanto, se genere electricidad (véase la figura 2.8). Su construcción es muy simple y sólo tiene como parte móvil las turbinas, lo que es útil para operar “offshore” bajo condiciones extremas. El Wave Dragon está anclado en aguas relativamente profundas para tomar ventaja de las olas marinas antes que pierdan energía cuando llegan a la costa. El dispositivo está diseñado para mantenerse lo más firme posible, utilizando simplemente la energía potencial del agua. El agua se conserva por un tiempo en un embalse, creando una diferencia entre el nivel del mar y la superficie del agua en el embalse. El agua sale del embalse del Wave Dragon a través de varias turbinas generando electricidad en un modo similar al de las plantas de energía hidroeléctrica.

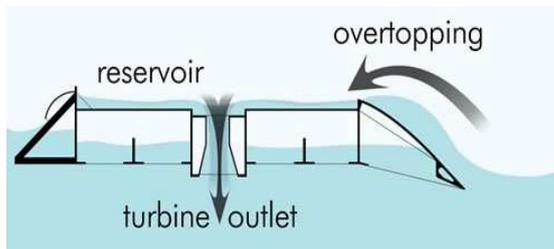


Figura 2.8. Sistema de captación Wave Dragon.

- **Boya de potencia (Power Buoy)**

El sistema (véase la figura 2.10) utiliza una boya marina que aprovecha el movimiento vertical y pendular producido por las olas. La energía mecánica producida por la combinación de ambos movimientos se traslada a una bomba hidráulica situada en la parte baja del cuerpo de la boya, que bombea un fluido (aceite) que acciona un motor hidráulico colocado en el fondo marino, que acciona un generador eléctrico.

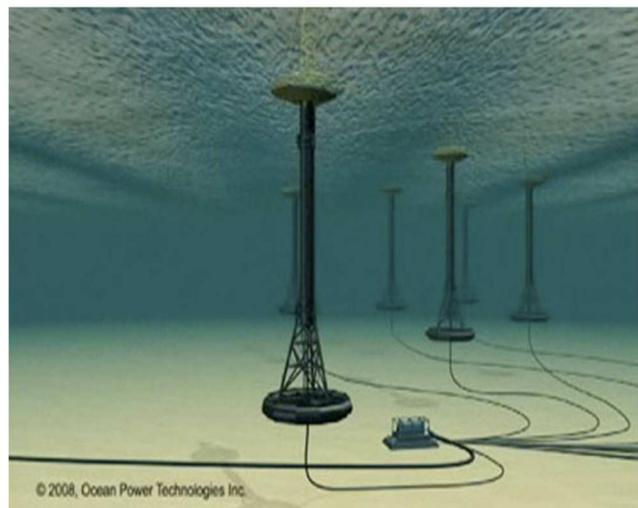
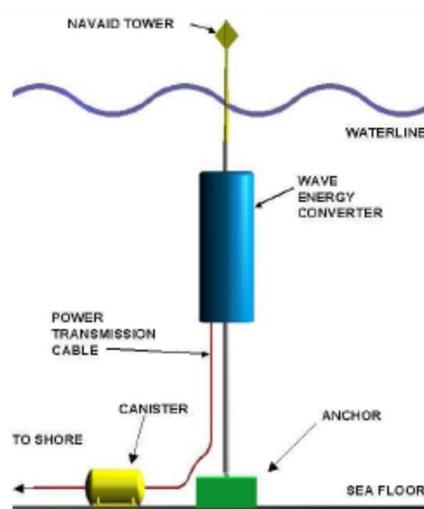


Figura 2.9. Sistema de captación Power Buoy.

- **Columpio de olas de Arquímedes (AWS)**

El columpio de olas de Arquímedes (Archimides Wave Swing, AWS) es un captador totalmente sumergido (véase la figura 2.9). Dispone de dos cilindros, inferior y superior. El cilindro inferior está fijado al lecho marino, mientras que el cilindro superior se mueve hacia arriba y abajo por la influencia de las olas. El interior del AWS está lleno de aire y cuando el cilindro superior se mueve hacia abajo, por efecto de una cresta de ola, el aire interior se presuriza, oponiendo una fuerza contraria que obliga al cilindro superior a subir nuevamente, cuando aparece un vano de ola (principio de Arquímedes). Se extrae energía eléctrica del dispositivo mediante un generador eléctrico lineal. Un inductor, constituido por imanes, es solidario con el cilindro superior y, un inducido, constituido por bobinas está fijado al cilindro inferior.

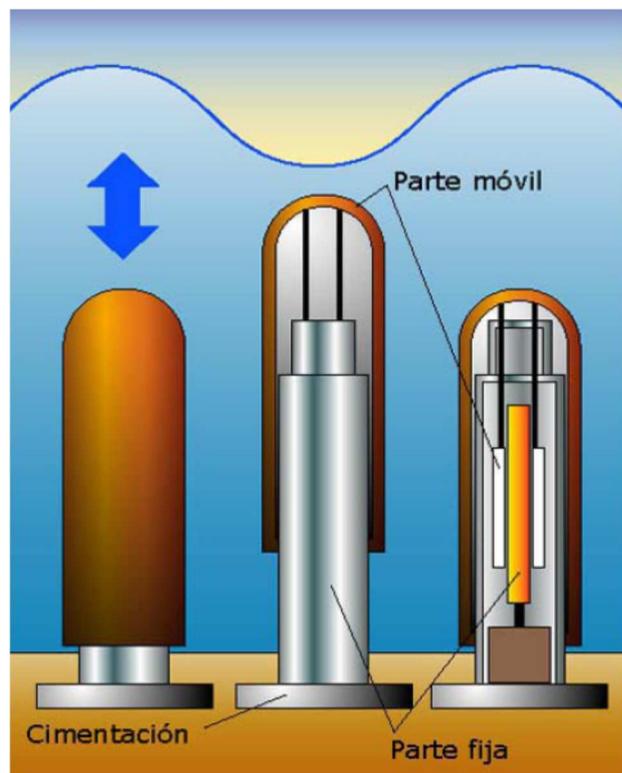


Figura 2.10. Sistema de captación AWS.

3. MODELIZACION DE LA OLA

3.1 Introducción

Como se ha expuesto en el apartado 2.1, las olas son ondas que se desplazan a lo largo de la superficie marina, donde se produce un movimiento vertical, y otro longitudinal, en la dirección de propagación de la onda. En general, el tiempo entre crestas, así como, la altura de las mismas se produce de una forma errática, con una gran variedad.

Desde el punto de vista del mecanismo físico que produce las olas, existe una amplia variedad de ellas en el mar. Sin entrar en su clasificación, perfectamente tipificada y definida, el interés se centra en las olas formadas por el viento, las cuales pertenecen al grupo denominado de gravedad.

Las teorías o modelos de olas son aproximaciones a la realidad. Las olas oceánicas son complejas e irregulares, pero haciendo algunas consideraciones teóricas se idealizan. La teoría de *Oleaje Regular* proporciona expresiones matemáticas simples; suponen trenes de olas largos, suaves y uniformes. Otras veces, las olas reales son de crestas cortas y más aleatorias e irregulares, en este caso deben aplicarse las técnicas del *Oleaje Irregular*, mediante uso de las teorías estadística y probabilística.

3.2 Teoría lineal del oleaje

La teoría lineal del oleaje de Airy es la más sencilla, es de primer orden y de amplitud finita. Muchos problemas de ingeniería pueden resolverse sin dificultad con esta teoría.

Potencial de velocidad

La teoría de Airy supone una onda de gravedad desplazándose con forma constante sobre un fondo de profundidad h , en un fluido sin viscosidad, con densidad del agua, ρ , constante, donde no hay pérdida ni ganancia de energía y con flujo irrotacional, está determinado por el *potencial de velocidad*, $\vartheta(x, z, t)$:

$$\vartheta(x, z, t) = \frac{g H}{2 \omega} \left(\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \right) \sin(k x - \omega t) \quad (3.1)$$

donde:

- g = Aceleración de la gravedad (9,81 m/s).
- ρ = Densidad del agua de mar (1.028 kg/m³).
- H = Altura de ola (m), (distancia vertical desde la cresta hasta el seno de la onda).
- ω = Velocidad angular de la onda (rad/s). $\omega = 2\pi / T$.
- T = Periodo temporal de la onda (s).
- k = Número de onda (rad/m). $k = 2\pi / L$.
- L = Periodo espacial o longitud de onda (m)
- z = Coordenada vertical (origen en la superficie, positiva hacia arriba).
- h = Profundidad del agua (m), (distancia positiva desde la superficie al fondo).
- x = Coordenada horizontal (m).
- t = Coordenada de tiempo (s).
- θ = Fase de la onda (rad), (θ varía entre 0 y 2π). $\theta = k x - \omega t$.

Velocidad y profundidad

Se verifica la *relación de dispersión* para ondas de gravedad, que relaciona el periodo, la longitud de onda y la profundidad:

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (3.2)$$

cuyo valor aproximado, es:

$$L \approx \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 h}{gT^2}\right)} \quad (3.3)$$

Cuando $h/L = 0,5$, el error cometido es del 10%.

La celeridad de la ola, velocidad de propagación o *velocidad de fase*, se expresa:

$$v = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} = \frac{g}{\omega} \quad (3.3)$$

Dependiendo de la profundidad h , la velocidad de onda va cambiando por efecto de la refracción del lecho marino. El cociente h/L , se llama *profundidad relativa*, que permite diferenciar tres niveles de profundidad del mar. Así:

- Aguas profundas, cuando $h/L > 1/2$, es decir, la profundidad es mayor que la mitad de la longitud de onda. Se verifica:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.4)$$

$$v = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \quad (3.5)$$

donde la velocidad de la ola es independiente de la profundidad.

- Aguas someras, cuando $h/L < 1/20$, es decir, la profundidad es menor de un veinteavo de la longitud de onda. Se verifica:

$$L = T \sqrt{gh} \quad (3.6)$$

$$v = \sqrt{gh} \quad (3.7)$$

o sea, la velocidad es función de la profundidad, es decir, la ola nota la existencia del lecho marino, que la condiciona.

- Aguas intermedias, cuando $1/20 < h/L < 1/2$. En este intervalo, la ola empieza a notar el fondo y, la velocidad empieza a depender de la profundidad. Como regla práctica, las ecuaciones completas tienen que utilizarse cuando h/L esté comprendido entre 0,5 y 0,05.

En resumen, las olas pueden clasificarse de acuerdo al criterio de profundidad relativa h/L , como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Clasificación de las aguas según la profundidad del mar.

Clasificación	h/L	$k h$	$\tanh(kh)$
Aguas profundas	$\infty - 1/2$	$\infty - \pi$	≈ 1
Aguas intermedias	$1/2 - 1/20$	$\pi - \pi/10$	$\tanh(kh)$
Aguas someras	$1/20 - 0$	$\pi/10 - 0$	$\approx kh$

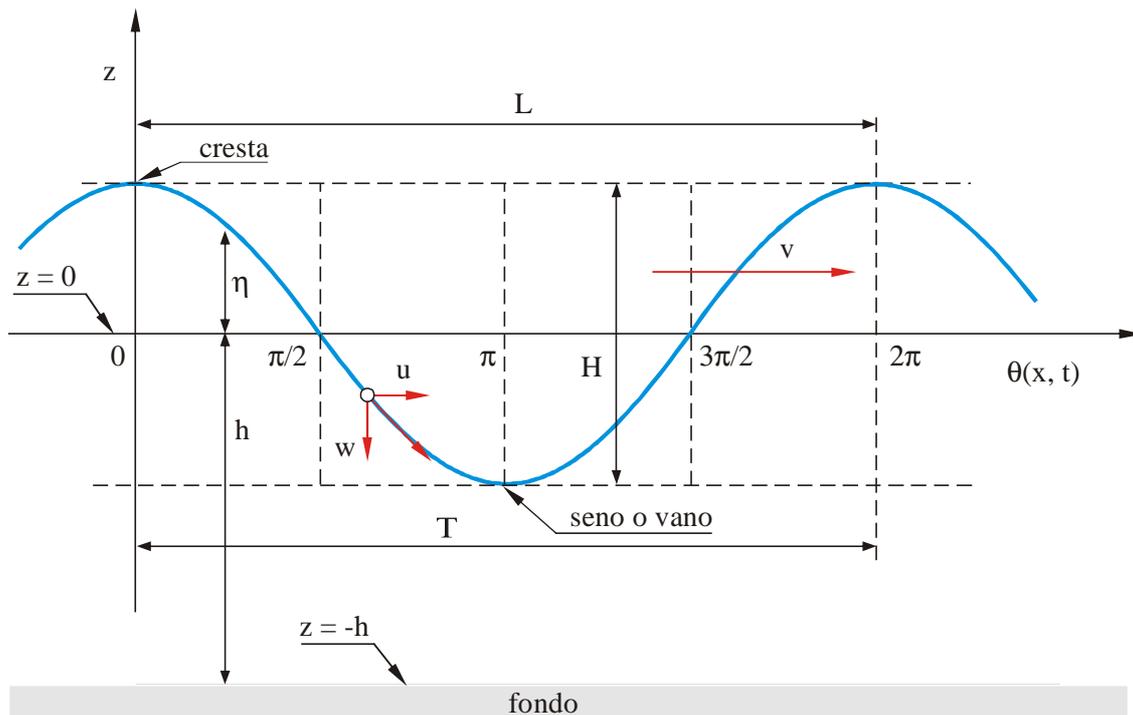
Desplazamiento vertical de ola

A partir del potencial de velocidad $\vartheta(x, z, t)$, se obtienen todas las variables cinemáticas de la ola. En particular:

El *desplazamiento vertical de la superficie libre*, η :

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3.8)$$

O sea, el perfil resultante es sinusoidal, con período T , longitud, L , y altura de ola H . En la figura 3.1, muestra los parámetros de la onda sinusoidal progresiva.



Figuran 3.1. Onda sinusoidal progresiva y parámetros de definición.

Sus principales parámetros, son:

- *Cresta*: parte más alta de la ola.
- *Seno o valle*: parte más baja de la ola.
- *Altura de ola, H (m)*: distancia vertical entre el valle y la cresta.
- *Longitud de ola, L (m)*: distancia entre dos crestas consecutivas.
- *Periodo, T (s)*: tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas o dos valles. También, es el tiempo empleado por una cresta, o un seno, en recorrer una distancia igual a la longitud de ola.
- *Elevación de la ola, $\eta(x,t)$ (m)*: distancia vertical de un punto cualquiera de la superficie libre de la ola, en un instante determinado, sobre el nivel del mar en aguas tranquilas.

Velocidades componentes

Las *componentes de la velocidad* de las partículas bajo la ola, en la horizontal, u , y en la vertical, w , están dadas por:

$$u = v_x = \frac{g HT}{2L} \left(\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \right) \cos(kx - \omega t) \quad (3.9)$$

$$w = v_z = \frac{g HT}{2L} \left(\frac{\sinh k(z+h)}{\cosh kh} \right) \sin(kx - \omega t) \quad (3.10)$$

Ecuaciones, que expresan las componentes de la velocidad local del fluido a cualquier distancia $(z+h)$ sobre el fondo, siendo periódicas en x y t . El fluido bajo la cresta se mueve en la dirección de propagación de la ola y regresa durante el paso del valle. La teoría lineal no predice ningún transporte de masa; por tanto, presenta sólo un movimiento oscilatorio del fluido. La figura 3.2 muestra los perfiles de la elevación superficial, η , y velocidades dados por la teoría lineal.

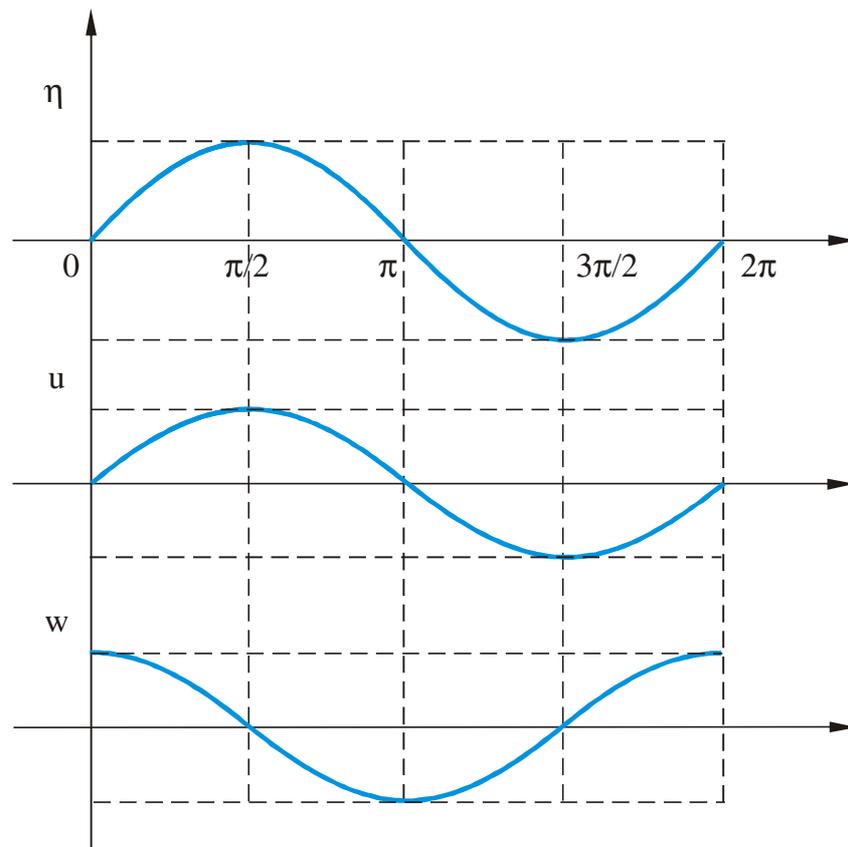


Figura 3.2. Perfiles de la velocidad de las partículas y su relación con la elevación superficial.

Velocidad de grupo

El concepto de *velocidad de grupo* v_g , puede describirse considerando la interacción –interferencia– de dos o más trenes de olas sinusodales que se mueven en la misma dirección con longitudes de onda y períodos ligeramente diferentes. El concepto de velocidad de grupo es importante porque es con esta velocidad con la que se propaga la energía. En general, la velocidad del grupo no es idéntica que la velocidad de las olas individuales v , que conforman el grupo viajero, vale:

$$v_g = \frac{v}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (3.11)$$

En particular, aplicando las condiciones de profundidad relativa, se tiene:

- En aguas profundas,

$$v_g = \frac{v}{2} \quad (3.12)$$

O sea, la velocidad del grupo es la mitad de la velocidad.

- En aguas someras,

$$v_g = v = \frac{L}{T} = \sqrt{gh} \quad (3.13)$$

Es decir, la velocidad del grupo y de fase es iguales.

Por tanto, en aguas someras, como velocidad de la ola está determinada por la profundidad, todas las olas componentes de un tren de olas viajan a la misma velocidad, evitando la cancelación y reforzamiento alternados de los componentes. En aguas profundas y de transición, la celeridad depende de la longitud de la ola, por tanto, olas ligeramente largas viajarán un poco más rápido y producirán las pequeñas diferencias de fase que resultarán en grupos de olas.

Energía y potencia de la ola

Si bien no hay movimiento neto del agua bajo la acción de la ola, ya que las partículas retornan a su posición inicial, el movimiento de la ola misma constituye una transferencia de energía sobre la superficie del mar. El desplazamiento de la ola sobre la superficie le confiere energía potencial, E_p . Al mismo tiempo, el movimiento orbital del agua bajo las olas constituye una energía cinética, E_c .

La energía total E_t por unidad de longitud de cresta de la ola, para una ola definida con la teoría lineal, está dada por la suma de E_p y E_c como sigue:

$$E_t = E_p + E_c = \frac{\rho g H^2 L}{16} + \frac{\rho g H^2 L}{16} = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (3.14)$$

La energía promedio total, denominada *energía específica* o *densidad de energía*, está dada por:

$$\bar{E}' = \frac{E_t}{L} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (3.15)$$

Flujo de energía: potencia

El flujo de energía o potencia de la ola es la tasa a la cual se transmite la energía en la dirección de propagación de la ola a través de un plano perpendicular a la dirección de avance de la misma y que se extiende hasta el fondo. Suponiendo la teoría lineal, la potencia media por unidad de ancho de cresta, es:

$$\bar{P} = E' v_g = \frac{\rho g H^2}{8} v_g \quad (\text{W/m}) \quad (3.16)$$

3.3 Oleaje irregular

El término *olas irregulares* se utiliza para denotar estados de mar naturales, en los cuales se espera que las características de las olas tengan una variabilidad estadística, en contraste con las olas monocromáticas donde se supone que las propiedades son constantes. Por tanto, se hace necesario tratar sus características en términos estadísticos, lo que complica el análisis pero describe de manera más real la superficie del mar.

Si un medidor de oleaje estuviera registrando olas en un punto fijo, el perfil registrado sería algo irregular y aleatorio. En consecuencia, las definiciones de altura, período y duración tienen que ser estadísticas e indicarán simplemente la severidad de las condiciones de olas. En la figura 3.3 muestra un registro de oleaje típico.

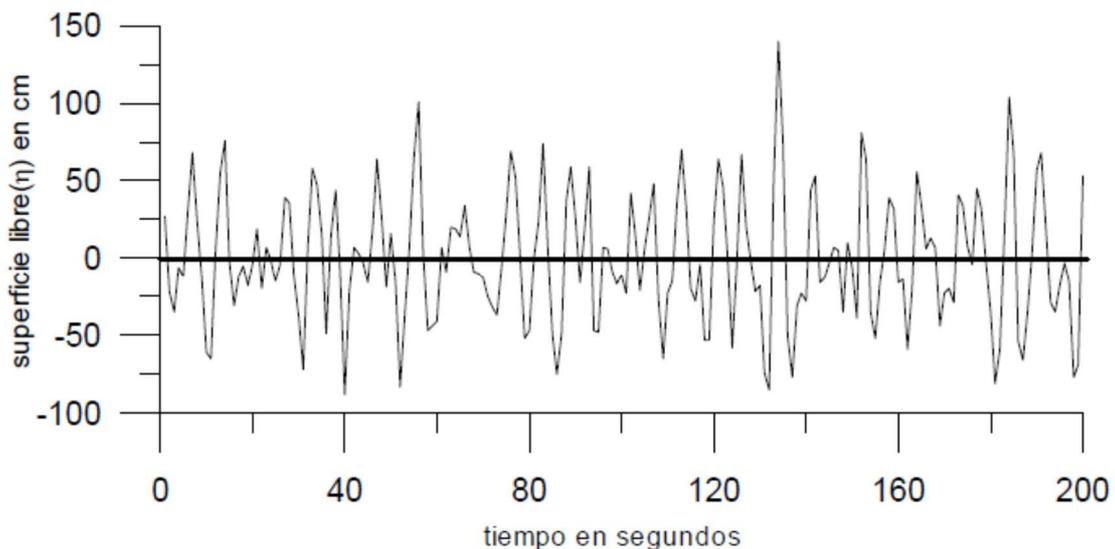


Figura 3.3. Perfil de un estado de mar irregular.

Existen dos maneras de tratar las olas irregulares: el *análisis ola-por-ola* (o del tren de oleaje, en el dominio del tiempo) y los *métodos espectrales* (dominio de la frecuencia). Únicamente se comentarán los primeros.

Análisis en el dominio del tiempo

El procedimiento para el análisis en el dominio del tiempo, se denomina método de cruce por cero. Se define una ola, cuando la elevación de la superficie cruza hacia arriba la línea de cero (o línea de nivel medio del mar) y continúa hasta el siguiente cruce hacia arriba. La altura de la ola de cruce por cero es la diferencia en elevación entre la cresta más alta y el valle más bajo entre dos cruces sucesivos. A cada ola le corresponde un período.

Las propiedades del oleaje se determinarán encontrando cantidades estadísticas a partir de los registros individuales. Los registros tienen que ser suficientemente largos para que la estadística sea fiable. Con la información obtenida, varios estadísticos de oleaje pueden calcularse.

Parámetros estadísticos de los estados de mar

Existen muchos parámetros candidatos que pueden utilizarse para definir la estadística de un estado de mar irregular. Los parámetros más utilizados, son:

- Altura significativa de ola, H_s .- la altura significativa de ola, H_s o $H_{1/3}$, es el parámetro más extendido para describir un estado de mar. Se define como la media aritmética del tercio de olas de mayor altura del registro, es decir:

$$H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (3.16)$$

donde, H_i es la serie de alturas de ola individuales del registro, ordenada de mayor a menor (H_1 , es la altura de ola máxima y, H_N es la altura de ola mínima) y N es el número total de olas individuales del registro.

- Altura de ola media, \bar{H} o H_m .- es la media aritmética de todas las olas de un registro,

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (3.17)$$

- Altura de ola media cuadrática, H_{rms} .- es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las alturas de ola del registro,

$$H_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{1/2} \quad (3.18)$$

- Periodo medio, T_z o \bar{T} .- media aritmética de los periodos T_i del registro,

$$T_z = \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (3.19)$$

- Periodo significativo, T_s o $T_{1/3}$.- es la media aritmética de los $N/3$ periodos mayores el registro de N olas,

$$T_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} T_i \quad (3.20)$$

- Periodo energético, T_p (s): (ó periodo pico del oleaje) tiempo medio que transcurre entre dos olas correspondientes a la franja de frecuencias en la que se transmite más energía en el periodo de registro considerado. En un concepto relacionado con la energía que transporta el oleaje.

Potencia media del oleaje

Para un mar irregular típico, la potencia media total, se expresa en función de H_s y T_p , según:

$$P = 0,49 H_s^2 T_p \text{ (kW/m)} \quad (3.21)$$

Funciones de distribución de los parámetros de estados de mar

Las propiedades estadísticas de una señal como la del oleaje pueden obtenerse de un conjunto de muchas observaciones simultáneas llamado *ensamble* o conjunto de señales $\{\eta_1(t), \eta_2(t), \eta_3(t), \eta_4(t), \dots\}$, pero no de un solo registro. Para determinar las propiedades del oleaje a partir del proceso $\eta(t)$, el mismo debe ser estacionario y ergódico.

Las dos funciones de probabilidad más utilizadas en el estudio de las olas, son la distribución *Gauss* y la de *Rayleigh*. La distribución Gauss se utiliza para describir las propiedades de corto plazo de la elevación superficial η . Su densidad de probabilidad o función de densidad, está dada por:

$$f(\eta) = \frac{1}{\sigma(\eta)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\eta - \mu(\eta))^2}{2\sigma^2}} \quad (3.22)$$

donde $\mu(\eta)$, es la media muestral y, $\sigma(\eta)$ la desviación típica muestral.

En la práctica, se trabaja generalmente con alturas H en lugar de elevaciones η . Las alturas de las olas siguen la distribución de Rayleigh. La función de densidad de probabilidad de la distribución de Rayleigh, así como su probabilidad acumulativa, están dadas por:

$$f(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-(H/H_{rms})^2}, \text{ para } H \geq 0 \quad (3.23)$$

$$F(H) = 1 - e^{-(H/H_{rms})^2}, \text{ para } H \geq 0 \quad (3.24)$$

donde se considera el valor eficaz de la altura de ola, H_{rms} .

Utilizando la altura media \bar{H} como parámetro, las distribuciones se expresan:

$$f(H) = \frac{\pi H}{2\bar{H}^2} e^{-\pi(H/\bar{H})^2/4}, \text{ para } H \geq 0 \quad (3.25)$$

$$F(H) = 1 - e^{-\pi(H/\bar{H})^2/4}, \text{ para } H \geq 0 \quad (3.26)$$

O bien, en función de la altura significativa de ola, H_s , son:

$$f(H) = \frac{4,01 H}{H_s^2} e^{-2,005(H/H_s)^2}, \text{ para } H \geq 0 \quad (3.27)$$

$$F(H) = 1 - e^{-2,005(H/H_s)^2}, \text{ para } H \geq 0 \quad (3.28)$$

3.4 Emplazamiento del OWC. Régimen de oleaje

3.4.1 Emplazamiento

El emplazamiento elegido el dispositivo OWC, que soporta el generador eléctrico lineal, se sitúa a 1,5 km de Punta Ballota, frente a la costa de Tagle, Cantabria, España.

Las características del emplazamiento, son:

- Profundidad: 40 m
- Pendiente media del lecho marino: 1% aprox.
- Distancia al puerto de Requejada, para el transporte del OWC: 10 km
- Distancia al puerto de Suances, para operaciones de control y mantenimiento: 5 km

La figura 3.4, muestra gráficamente el lugar de emplazamiento.



Figura 3.4. Emplazamiento del generador.

Régimen de oleaje

En la figura 3.8, se muestra que, aproximadamente, a 1 km del emplazamiento, se encuentra el punto Simar 3130035, de coordenadas: latitud 4,21W, longitud 43,46N.

Las principales características estadísticas del oleaje de dicho punto Simar, se obtienen por simulación, en base a boyas reales del oleaje, por la entidad Puertos del Estado. Los datos son, en general, de disposición pública.

Los datos estadísticos, son:

Altura significativa de ola.- Se suministran series temporales de la altura significativa de ola mensuales en valores máximos y medios. En la tabla 3.2 se detallan las series temporales de los valores medios mensuales desde los años 2005 hasta agosto de 2015.

Tabla 3.2. Series temporales de altura significativa de ola H_s (m). Valores medios mensuales.

Mes	Año										
	2005	6	7	8	9	10	11	12	13	14	2015
Enero		2,09	2,10	2,29	2,42	1,49	1,33	2,03	2,44	3,06	2,63
Febrero		1,79	2,28	1,72	1,41	1,57	2,31	1,59	2,39	3,31	2,61
Marzo	1,21	1,82	2,53		1,71	1,27	1,50	1,52	1,46	2,30	2,04
Abril	1,65	1,38	0,89	1,62	1,31	1,17	1,42	2,10	1,85	1,50	1,34
Mayo	0,97	1,33	1,74	0,82	1,28	1,09	1,42	0,99	1,84	1,32	1,20
Junio	0,84	0,94	0,85	1,05	0,71	1,16	1,21	1,18	1,29	0,85	1,17
Julio	1,04	0,83	1,16	1,12	0,98	1,16	1,40	1,06	0,92	1,02	1,09
Agosto	1,17	1,13	1,40	1,35	0,86	0,92	0,85	1,13	1,10	1,06	1,36
Septiembre	1,34	1,36	1,23	1,45	1,02	1,14	1,44	1,44	1,25	1,03	
Octubre	1,18	1,35	1,25	1,73	0,99	1,49	1,43	1,49	1,27	1,64	
Noviembre	2,08	2,03	1,26	1,96	2,59	2,36	1,64	2,16	2,43	2,17	
Diciembre	1,75	1,59	2,30	2,16	1,70	1,28	2,64	2,16	2,18	2,39	

El promedio del total de muestras, de la altura significativa de ola, es:

$$\bar{H}_s = 1,56 \text{ m} .$$

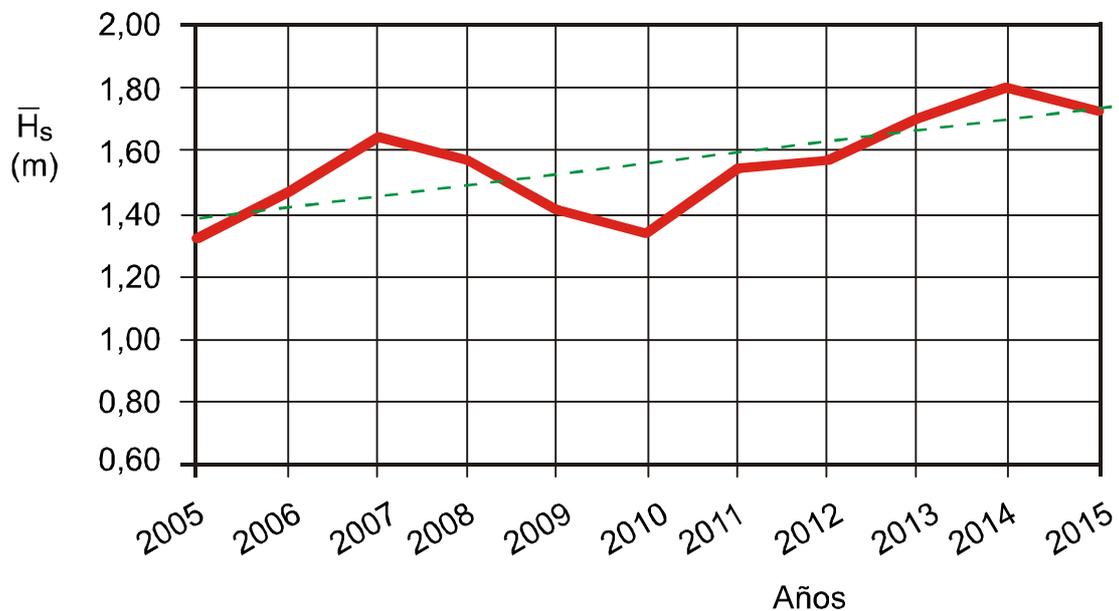


Figura 3.5. Evolución de los valores medios anuales de la altura significativa de ola.

La figura 3.5, muestra la evolución anual de las medias de H_s , observándose un crecimiento medio de 3,2 cm al año.

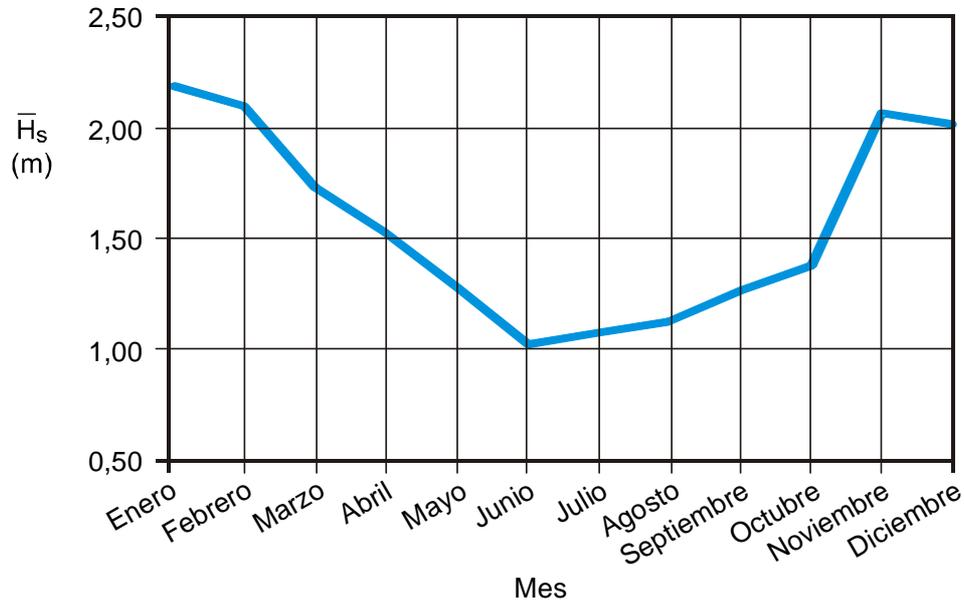


Figura 3.6. Evolución de los valores medios mensuales de la altura significativa de ola.

La figura 3.6, muestra los valores medios mensuales durante los 11 años de datos. Desde noviembre hasta abril, las alturas de ola se sitúan por encima de 1,5 m y, desde mayo a octubre, se sitúan por debajo de 1,5 m, aunque siempre por encima de 1 m.

Periodo de pico del oleaje.- Se suministran series temporales de los periodos de ola mensuales en valores medios y de pico. En la tabla 3.3, se detallan las series temporales de los valores medios mensuales desde los años 2005 hasta agosto de 2015.

Tabla 3.3. Series temporales del periodo de pico de ola T_p (s). Valores medios mensuales.

Mes	Año										
	2005	6	7	8	9	10	11	12	13	14	2015
Enero		13,14	12,08	13,39	12,00	9,26	10,37	12,65	12,71	13,96	13,40
Febrero		10,82	12,55	13,06	8,63	9,42	14,25	10,30	11,06	14,26	11,58
Marzo	10,38	10,21	12,24		10,16	8,65	11,38	12,76	10,21	12,67	12,08
Abril	10,53	10,64	8,55	9,78	8,74	9,08	11,99	10,06	11,56	11,84	11,14
Mayo	8,60	9,46	10,35	8,48	9,22	8,84	11,18	8,87	10,08	9,41	10,12
Junio	8,63	8,31	8,58	8,63	6,94	9,29	9,10	8,84	9,40	7,83	9,84
Julio	8,14	8,06	8,48	9,03	8,21	9,79	8,77	8,17	8,64	8,60	8,89
Agosto	8,79	7,87	8,70	9,81	7,87	7,94	6,48	9,25	9,33	8,67	9,64
Septiembre	9,97	10,80	8,84	11,25	7,61	10,24	11,10	10,82	10,40	10,86	
Octubre	11,42	10,74	10,83	11,54	8,82	9,98	11,66	10,85	11,00	12,07	
Noviembre	11,34	12,23	9,90	9,76	12,04	10,95	12,85	11,80	11,47	12,86	
Diciembre	13,14	12,30	13,73	10,82	9,93	8,48	11,85	12,49	13,55	12,32	

El promedio del total de muestras, del periodo de pico de ola, es:

$$\bar{T}_p = 10,41 \text{ s.}$$

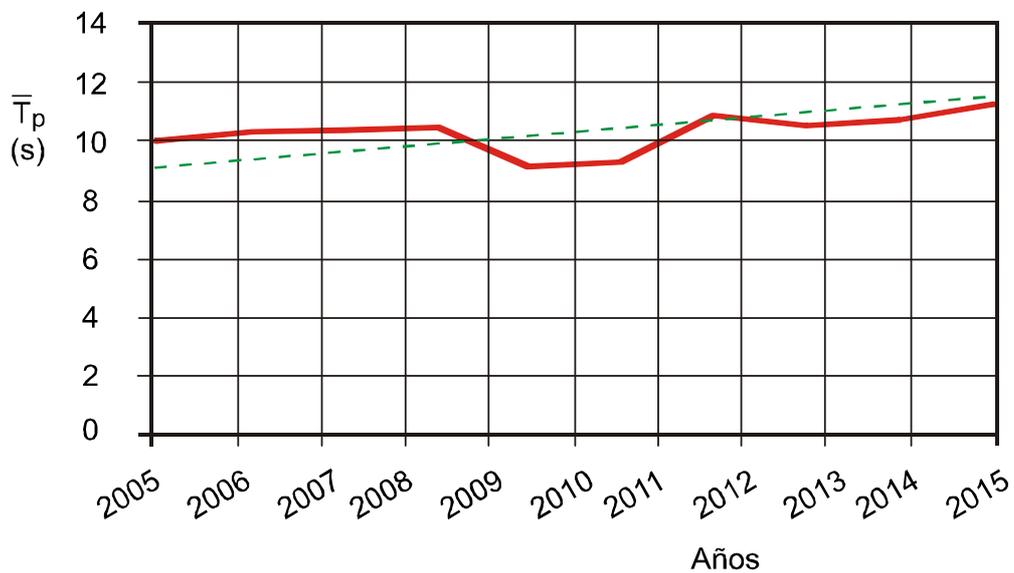


Figura 3.7. Evolución de los valores medios anuales del periodo de pico de ola.

La figura 3.7, muestra la evolución anual de las medias de T_p , observándose un crecimiento medio de 1 s cada año.

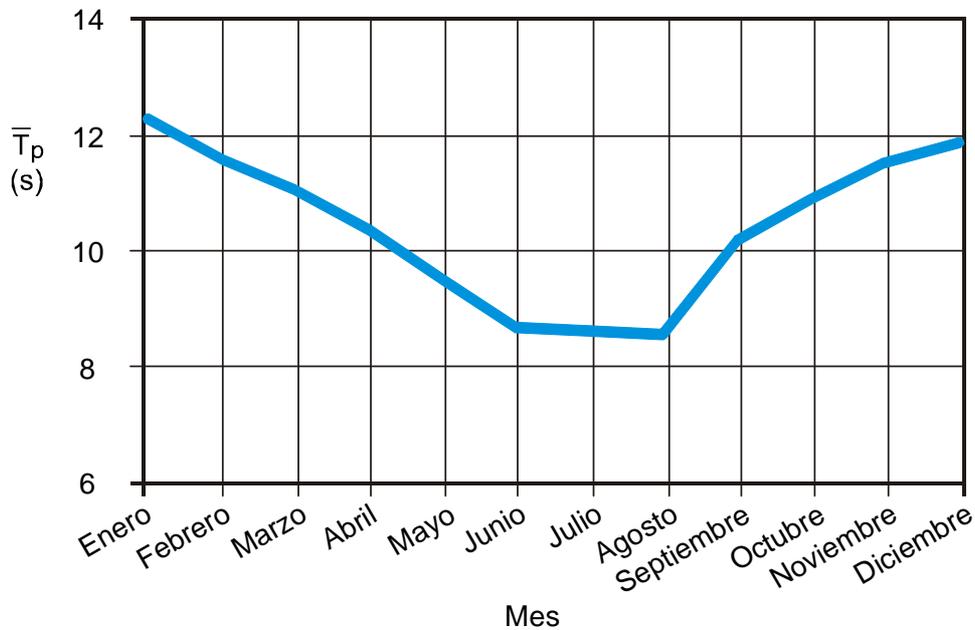


Figura 3.8. Evolución de los valores medios mensuales del periodo de pico de ola.

La figura 3.8, muestra los valores medios mensuales de T_p durante los 11 años de datos. Desde septiembre hasta abril, los periodos de ola se sitúan por encima de 10 s y, desde mayo a agosto, se sitúan por debajo de los 10 s, aunque siempre por encima de 8,5 s. Existe una cierta correlación temporal de T_p con H_s , en el sentido de que en los meses del verano la potencia de las olas es bastante inferior que en otoño-invierno.

Histograma de frecuencias de H_s . - La figura 3.9, muestra el histograma de frecuencias de la altura significativa de ola, correspondiente a las series temporales, tomando intervalos de medio metro. Claramente, se observa que se ajusta a una función de densidad de probabilidad de Rayleigh.

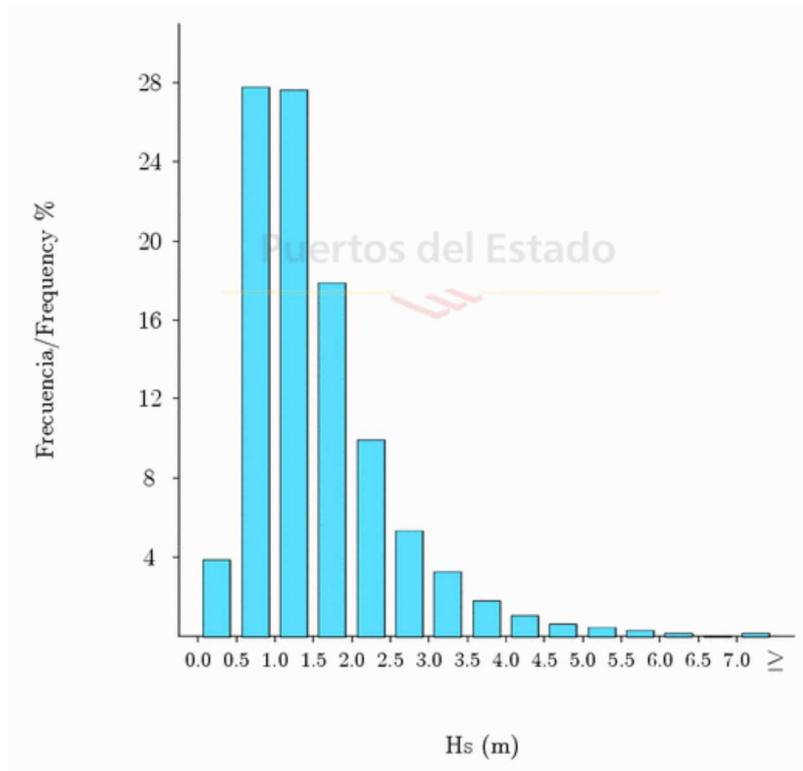


Figura 3.9. Histograma de frecuencias de la altura significativa de ola.

Histograma de frecuencias de T_p .- La figura 3.10, muestra el histograma de frecuencias del periodo de pico de ola, correspondiente a las series temporales, tomando intervalos de 3 s. Claramente, se observa que se ajusta a una función de densidad de probabilidad de Gauss o Rayleigh.

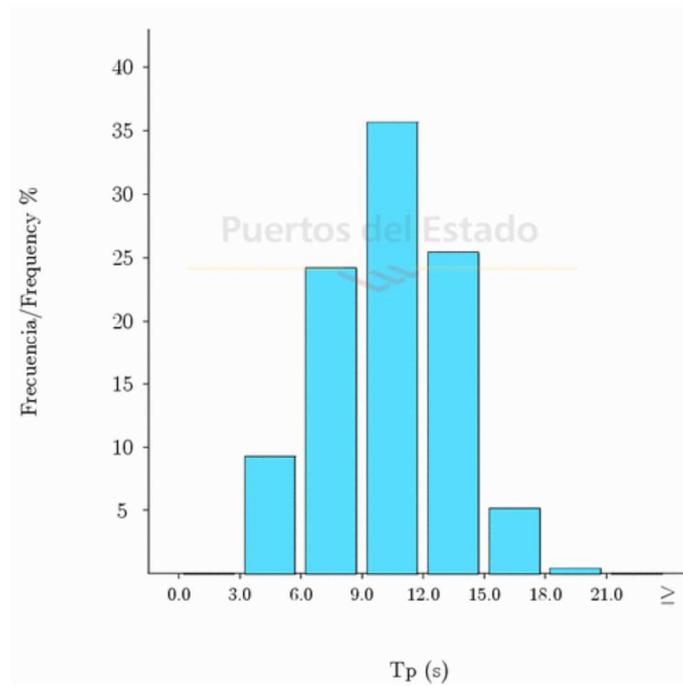


Figura 3.10. Histograma de frecuencias del periodo de pico de ola.

Mar en calma.- Se considera una mar en calma, sin oleaje, cuando la altura de ola es inferior a 0,2 m. En el emplazamiento, las calmas de mar, suponen únicamente el 0,15% anual.

4. OSCILADOR DE OLA DE ARQUÍMEDES (OWS)

4.1 Características

El conversor de energía de las olas Archimedes Wave Swing (AWS), consiste en una boya de forma cilíndrica fijada al lecho marino. Con el paso de las olas se mueve una campana superior llena de aire contra un vaso inferior fijo, imprimiendo un movimiento vertical que se transforma en electricidad.

Al acercarse la cresta de la ola se incrementa la presión del agua sobre la campana, y la parte superior (o flotador) comprime el gas que hay dentro del cilindro para equilibrar las presiones. Al pasar la ola y expandirse el cilindro ocurre exactamente lo contrario. El movimiento relativo entre el flotador y la parte inferior del silo se transforma en electricidad mediante un sistema hidráulico y un conjunto motor - generador.

El dispositivo es intrínsecamente simple, y sólo tiene una pieza móvil: el flotador o campana. Sus sistemas auxiliares son limitados y se han diseñado para ofrecer un alto nivel de fiabilidad por medio de redundancias duales y del uso de componentes industriales y submarinos de probada eficacia.

El concepto de absorción energética fue testado a gran escala en 2004 por medio de una planta piloto instalada en las proximidades de la costa portuguesa. En la actualidad se está desarrollando un proyecto de ingeniería detallado para crear un sistema de demostración precomercial optimizado de 250 kW.

El AWS es un generador de alta potencia destinado a la producción de electricidad a granel para una red pública. Ofrece una respuesta mejor ante el mar de fondo. Las ubicaciones en las cuales se debe instalar han de cumplir los siguientes requisitos específicos:

- Deben estar expuestas al mar de fondo: costa occidental de las Islas Británicas, Irlanda, Francia, España o Portugal suponen una localización idónea.
- Deben tener entre 40 y 100 m de profundidad de agua y estar alejadas de las principales rutas comerciales marítimas
- Deben contar con una red eléctrica segura en costa
- Deben tener un puerto industrial a un máximo de 12 horas de navegación para las labores de construcción, montaje y mantenimiento del sistema.
- El lecho marino debe ser adecuado para tender cableado eléctrico hasta la costa

4.2 Justificación del sistema escogido

Se ha escogido el AWS por delante de los otros sistemas de obtención de energía por una serie de características, que dan a este sistema una ventaja sobre los demás, estas características son:

- Durabilidad: El sistema AWS está sumergido un mínimo de 6 metros bajo la superficie marina, y por tanto evita las elevadas cargas derivadas de las tormentas que otros dispositivos deben soportar. Esto reduce los costes de anclaje y los riesgos de daños.
- Densidad energética: Dado que en el futuro producirá hasta 1 MW y tendrá factores de carga en torno al 25-30%, el dispositivo AWS es una opción real para las empresas eléctricas públicas que busquen desarrollos de varios MW. Su densidad energética es 10

veces mayor que la de los dispositivos flotantes, dado que hacen un mejor uso del recurso disponible.

- **Simplicidad:** El sistema AWS tiene una única pieza móvil y un número limitado de elementos auxiliares, lo que reduce en gran medida el riesgo de averías y los requisitos de mantenimiento.
- **Mantenibilidad:** El sistema AWS está diseñado para que todas las piezas que necesiten mantenimiento resulten accesibles a vehículos por control remoto, lo que permite realizar el mantenimiento sea cual sea el estado del mar, salvo en las condiciones más duras. Con un dispositivo en superficie se pierde la producción de varias semanas en caso de avería, pero el AWS puede volver a estar listo y en funcionamiento de un día para otro.
- **Ecología:** Otra ventaja de este sistema sumergido es que no tiene impacto visual. El sistema AWS emplea ruidoso equipamiento rotante de alta velocidad, por lo que su impacto ambiental es prácticamente nulo. Su impacto visual también resulta casi imperceptible.
- **Economía:** Por último, el sistema AWS presenta un ratio de energía producida por kilogramo de acero empleado más elevado que el sus principales competidores, lo que unido a unos requisitos de mantenimiento reducidos lleva a unos costes de generación eléctrica más bajos que los de cualquier otro generador de energía de las olas.

4.3 Funcionamiento

El AWS consta de un cuerpo principal dividido en dos partes, ambas cilíndricas: la campana o flotador (1) y el vaso o silo (2) anclado al fondo marino (figura 4.1) Ambos cilindros encajan uno en el otro; la campana, dispuesta exteriormente, se desliza sobre el vaso mediante una membrana sellada (6),

fabricada con un compuesto de Kevlar y caucho. Interiormente, existe aire o nitrógeno.

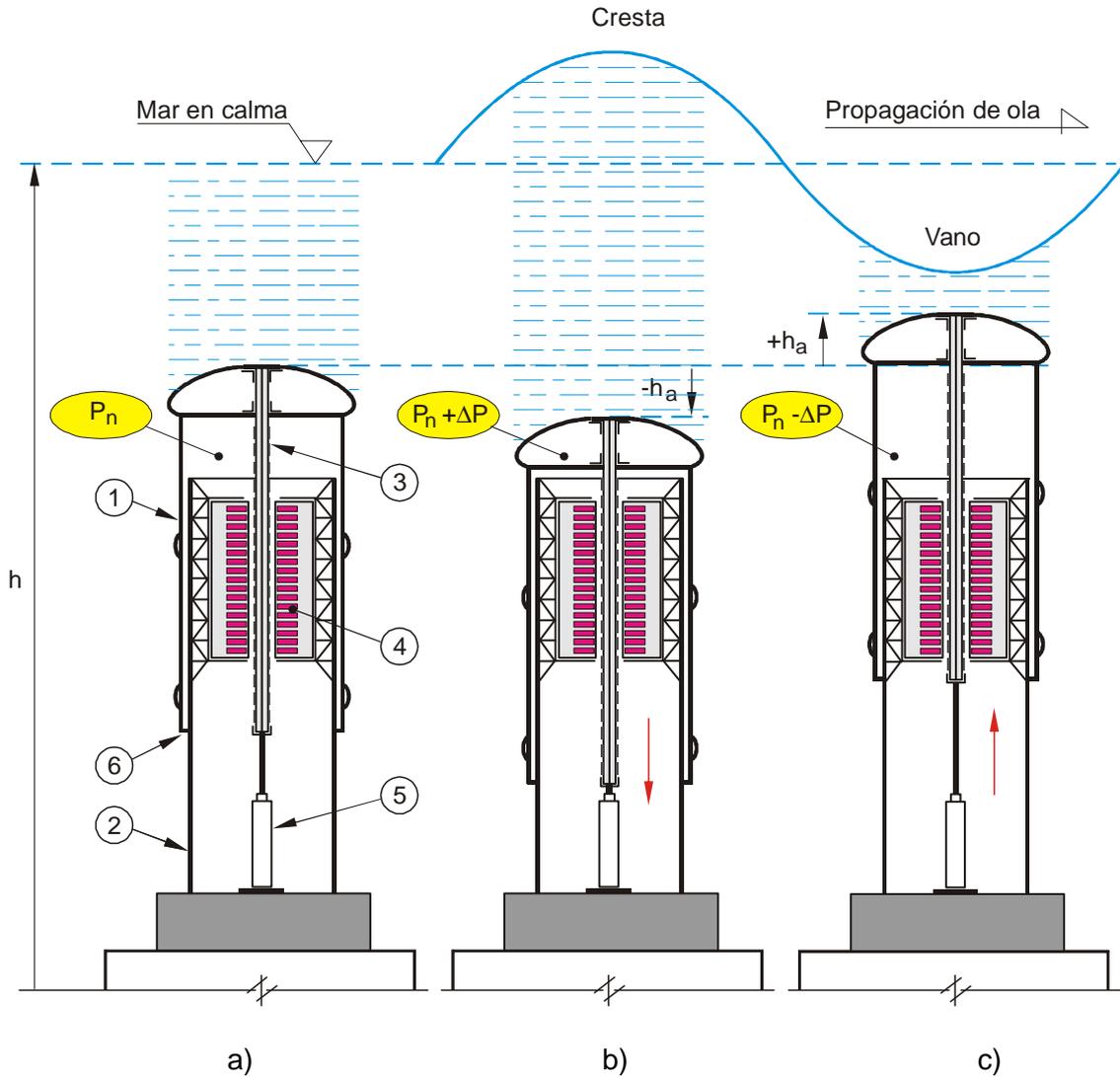


Figura 4.1. Esquema de funcionamiento del AWS.

Solidario con la campana, está el dispositivo traslador (3), que inferiormente está acoplado a uno o dos arietes hidráulicos (5), fijados a la base de vaso.

Bajo un mar en calma, la presión hidrostática ejercida por el agua y las fuerzas de los arietes junto con el aire a presión (P_n) se compensan, por lo que la campana permanece en una posición de reposo; en cambio, cuando la ola pasa por encima de éste, la campana tendrá que subir o bajar, para mantener el

equilibrio de fuerzas internas y externas, tal como se ilustra en las figuras 4.1. Cuando por encima del AWS pasa el valle de la ola, la presión hidrostática decrece y el aire dentro de la campana se expande ($P_n - \Delta P$). Es decir, los muelles empujan la campana hacia la superficie ante un efecto de expansión del aire; al revés, al paso de la cresta de la ola, la campana es forzada hacia la base comprimiendo los muelles y el aire interior ($P_n + \Delta P$). De este modo, la campana actúa como un resorte amortiguador de aire.

El vaso o cilindro inferior está fijado al fondo marino a través de un bloque de acero fijado sobre una cimentación de hormigón. La campana en su movimiento se desliza sobre cuadro cilindros de acero fijados a una estructura metálica exterior fijada al hormigón. Véase el plano nº 1.

En el caso que nos ocupa, la conversión energética se realiza mediante un generador lineal montado en el interior del AWS. Un doble estator inducido trifásico (4), se monta solidario con la carcasa del vaso; el inductor, de imanes permanentes se dispone sobre el trasladador (3).

4.4 Modelado mecánico

El planteamiento exacto del problema, conlleva la escritura de ecuaciones no lineales del movimiento. Sin embargo, no es objeto del presente trabajo extenderse sobre dicho tema. A fin de modelar, aproximadamente, es suficiente la ecuación diferencial lineal descrita por Polinder et al ,[ref.], consistente en aplicar al sistema la segunda ley de Newton. La posición $y(t)$ de la campana, desde la referencia cero, del suelo marino, se describe, según:

$$(m_{fl} + m_{ad}) \frac{d^2y}{dt^2} + (\beta_h + \beta_g) \frac{dy}{dt} + C_{AWS} y = F_w \quad (4.2)$$

donde, m_{fl} = masa de la campana o flotador.
 m_{ad} = masa de agua por encima de la campana hasta la superficie.

- $\beta_h =$ coeficiente de amortiguamiento hidrodinámico del AWS.
 $\beta_g =$ coeficiente de amortiguamiento del generador.
 $C_{AWS} =$ constante elástica del muelle aire en el AWS.
 $F_w =$ fuerza de difracción de la ola sobre la campana o flotador.

La situación ideal de funcionamiento es aquella en la que se extrae la máxima energía del sistema, es decir, cuando éste es resonante. En tales condiciones, los coeficientes de amortiguamiento tienen el mismo valor ($\beta_h = -\beta_g$), siendo, en este caso la ecuación de gobierno del movimiento:

$$(m_{fl} + m_{ad}) \frac{d^2 y}{dt^2} + C_{AWS} y = F_w \quad (4.3)$$

Además, conlleva que la fuerza de la ola que actúa sobre la campana, la posición de ésta y su velocidad son funciones sinusoidales del tiempo, con el mismo periodo de oscilación que las olas. Así mismo, como el generador debe provocar un amortiguamiento, la fuerza del generador también es una función sinusoidal, proporcional a la velocidad del flotador, del periodo y de la altura de ola.

Por otra parte, para conseguir que el convertidor sea resonante para olas de distinta frecuencia, la constante del muelle ejercido por el aire, C_{AWS} , debe poder cambiar su valor, variando el volumen y la presión en el interior de la cámara.

Finalmente, la energía mecánica que el dispositivo AWS puede extraer de una ola, definida por una amplitud y un periodo de oscilación determinado, vale:

$$E_w = \int_0^{T_w} p_w dt = \int_0^{T_w} \beta_h \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 dt = \int_0^{T_w} \frac{F_w^2}{4\beta_h} dt = \frac{T_w \hat{F}_w^2}{8\beta_h} \quad (4.4)$$

Deben tenerse en cuenta algunas limitaciones en cuanto a las pérdidas y el rendimiento. En primer lugar, debe tenerse en cuenta que muchas olas originan velocidades y desplazamientos del traslador bastante mayores que los valores máximos admisibles. En este caso, el generador aumenta su fuerza (amortiguamiento β_g) para reducir la magnitud de estos parámetros,

disminuyendo la velocidad y la carrera del trasladador lo que hace que la energía obtenida sea inferior.

En segundo lugar, la fuerza que puede realizar el generador tiene un límite superior (659 kN con CSI o 933 kN con VSI). Por ello, se deben emplear amortiguadores hidráulicos en las ocasiones en que la fuerza requerida sea mayor que dichos valores límites, lo que conlleva una disminución del rendimiento mecánico del orden del 30%.

Finalmente, en (4.3) se asume que el sistema trabajaba en resonancia, lo cual es difícil de ocurrir, en tanto la frecuencia del oleaje no es perfectamente constante en el tiempo. Aún así, las simulaciones verificadas con el movimiento real de la campana muestran que los rendimientos son del orden de los calculados en resonancia

4.5 Dispositivo de conversión energética

Si bien existes diversas variantes de convertidores de la energía mecánica del trasladador en energía eléctrica, se proyecta el uso de un *generador lineal con arrastre directo*.

Los generadores lineales son aquellos que extraen la energía en forma de un movimiento oscilante de vaivén, a velocidad reducida. En el montaje sobre la OWS, el generador está, por un lado unido a la campana o flotador, por lo que su movimiento es solidario al de aquel y por otro, al vaso del dispositivo y a la base que reposa sobre el fondo marino. (Ver figura 4.1). Tienen el inconveniente que la potencia eléctrica de salida necesita de un procesado electrónico para su adecuación a la conexión con la red

De otra parte, el arrastre directo es aquél mecanismo que mueve un eje directamente, sin engranaje o dispositivo mecánico intermedio, lo que origina un sistema más sencillo y de menor mantenimiento, al eliminarse las pérdidas por la transmisión mecánica. Sin embargo, este tipo de conversión no es sencilla, en

tanto se necesitan áreas de entrehierro muy grandes debido a la baja velocidad de traslación de la máquina.

5. LA MÁQUINA SÍNCRONA

5.1 Descripción básica del generador síncrono rotativo

5.1.1 Introducción

Si bien en el Trabajo se proyectará un generador síncrono lineal, se describe en primer lugar, las características de la máquina rotativa, para proseguir con las particularidades que se deben aplicar a la máquina lineal, derivada de la anterior. En la máquina lineal el rotor también es conocido como trasladador, de aquí que, en adelante, se mencionará indistintamente.

La máquina sincrónica clásica es un convertidor electromecánico de energía rotativo; consta de dos partes diferenciadas, una de ellas móvil, que es conocida por rotor, inductor o campo. Éste, puede estar formado por una bobina que se excita mediante la inyección de un corriente continuo o, formado por imanes permanentes. La parte fija de la máquina se denominada estator, armadura o inducido, por cuyos devanados circula corriente alterna.

Las máquinas síncronas se utilizan, de forma mayoritaria, como generadores de corriente alterna más que como motores, ya que éstos no presentan par de arranque y deben emplearse diferentes métodos de arranque y aceleración hasta conseguir la velocidad de sincronismo. También, se utilizan para controlar la potencia reactiva de la red por su capacidad para, manteniendo la potencia activa desarrollada constante, variar la potencia reactiva que absorbe

o cede a la red. En la figura 5.1, se muestran el estator y rotor de un alternador de potencia.



a) Estator con el devanado inducido.

b) Rotor de polos salientes.

Figura 5.1. Máquina síncrona rotativa de polos salientes.

5.1.2 Funcionamiento

En carga, la corriente alterna que circula por los devanados del estator, producen un campo magnético rotativo que gira en el entrehierro de la máquina con la frecuencia angular de las corrientes del estator que lo indujeron. El rotor, debe girar a la misma velocidad del campo magnético rotatorio producido por el estator, la velocidad de sincronismo, para que el par eléctrico medio sea diferente a cero. Por esta razón, a este tipo de máquina se la denomina síncrona: el rotor gira mecánicamente a la misma velocidad que el campo magnético rotativo del estator durante la operación en régimen permanente. La velocidad de sincronismo, en régimen permanente, está ligada con la frecuencia de la tensión en bornes y el número de pares de polos de la máquina, según:

$$n = \frac{60 f}{p} \text{ (min}^{-1}\text{)} \quad (5.1)$$

Para que el rotor produzca una fuerza magnetomotriz se debe aplicar a sus devanados una corriente continua de una forma externa. Otra forma de conseguir generar un campo magnético, es la realización del rotor mediante imanes permanentes, en este caso, son ellos mismos los que crean un campo magnético de forma autónoma y continúa, esta será la forma utilizada en el proyecto, como se explicará más adelante.

En la figura 5.2, se muestra el esquema simplificado de la máquina rotativa síncrona trifásica bipolar, donde N_e , son el número de espiras por fase del devanado del estator, N_r , el número de espiras del devanado rotórico, i_a, i_b e i_c , los valores eficaces de las corrientes trifásicas del estator e I_e , la corriente continua del rotor. θ , es la posición angular del rotor, respecto de la referencia.

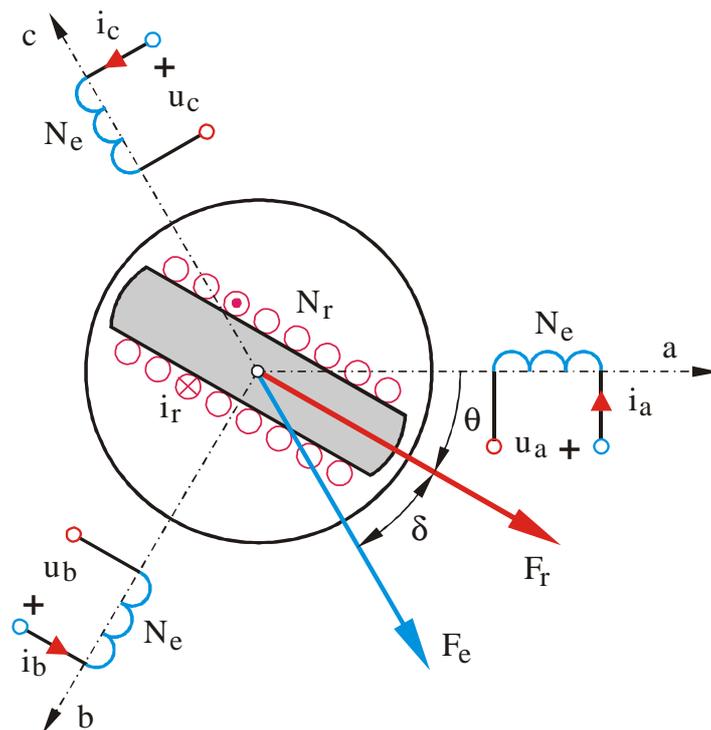


Figura 5.2. Esquema simplificado de una máquina síncrona trifásica bipolar.

De esta forma, se obtienen dos campos magnéticos rotativos que giran a la misma velocidad, uno producido por el estator (\bar{F}_e) y otro por el rotor (\bar{F}_r).

Así:

$$\text{F.m.m. del rotor:} \quad \bar{F}_r = N_r I_r \quad (\text{Av}) \quad (5.2)$$

$$\text{F.m.m. fase a del estator:} \quad \bar{F}_a = N_e \bar{I}_a \quad (\text{Av}) \quad (5.3)$$

$$\text{F.m.m. fase b del estator:} \quad \bar{F}_b = N_e \bar{I}_b \quad (\text{Av}) \quad (5.4)$$

$$\text{F.m.m. fase c del estator:} \quad \bar{F}_c = N_e \bar{I}_c \quad (\text{Av}) \quad (5.5)$$

$$\text{F.m.m. del estator:} \quad \bar{F}_e = \bar{F}_a + a \bar{F}_b + a^2 \bar{F}_c \quad (\text{Av}) \quad (5.6)$$

donde, $a = 1 \angle 120^\circ$, $a^2 = a a = 1 \angle -120^\circ$.

Estos campos interactúan produciendo un par eléctrico medio, llevando de esta forma a cabo el proceso de conversión electromagnética de energía. El valor de dicho par, se evalúa a través de la expresión:

$$T_e = k F_e F_r \sin(\delta) \quad (5.7)$$

Donde, $k =$ constante de proporcionalidad, que depende únicamente de la geometría de la máquina y la disposición física de las bobinas del estator.

$\delta =$ es el ángulo existente entre las amplitudes de las dos fuerzas magnetomotrices, conocido generalmente como ángulo de carga.

Las fuerzas magnetomotrices del estator como del rotor son de magnitud constantes, así, que para que el par medio resulte constante, debe asegurarse que el ángulo de carga no varíe. Para ello, es suficiente con garantizar que ambas fuerzas giren a la misma velocidad angular.

Cuando la máquina rotativa es bipolar, la posición mecánica y eléctrica del rotor, respecto de la referencia son idénticas. Si la máquina no es bipolar, sino que contiene p , pares de polos, la relación entre el ángulo eléctrico θ_e y el ángulo mecánico θ_m en una máquina rotativa, se relacionan, mediante,

$$\theta_e = p \theta_m \quad (5.8)$$

Derivando (4.8) con respecto al tiempo, se obtiene la relación entre las velocidades angulares mecánica, ω_m , y eléctrica, ω_e :

$$\omega_e = p \omega_m \quad (5.9)$$

5.2 Generador síncrono rotativo de imanes permanentes

5.2.1 Aspectos generales

El espectacular desarrollo de aleaciones de alto magnetismo remanente ha hecho posible que los generadores síncronos de imanes permanentes representen una alternativa muy interesante en aplicaciones a velocidad variable. El empleo de imanes permanentes elimina la necesidad de anillos rozantes, lo que implica la eliminación de las pérdidas en el cobre del rotor y con ello, la necesidad de refrigeración del rotor, además se disminuye considerablemente el volumen de la máquina. Como se posibilita disminuir el paso polar, también es posible construir generadores de mayor número de polos, que eliminan la necesidad de utilizar un multiplicador de velocidad para adecuar la velocidad de giro de la turbina y del generador. En la figura 5.3, se muestra un generador rotativo de imanes permanentes y flujo radial.



Figura 5.3. Generador síncrono de imanes permanentes.

Tradicionalmente, el material más empleado en la fabricación de máquinas síncronas de imanes permanentes era la ferrita, debido a su bajo coste y excelente linealidad en la desmagnetización; sin embargo, su bajo magnetismo remanente limita su utilización.

Los nuevos materiales empleados, son imanes fabricados mediante tierras raras, como el Samario-Cobalto (SmCo_5 o Sm_2Co_7), o el Neodimio-Hierro-Boro (Nd-Fe-B). Este último, presenta un magnetismo remanente muy alto y una gran linealidad en la curva de desmagnetización aunque tiene el inconveniente de que la intensidad de campo decrece con la temperatura. El Samario-Cobalto, presenta la mejor combinación de características pero es caro y solamente utilizable en aplicaciones especiales, donde la reducción en tamaño y peso, justifique el incremento en el coste. En la figura 4.4, se muestran las diferencias en el ciclo de histéresis de un imán permanente y un material magnético blando.

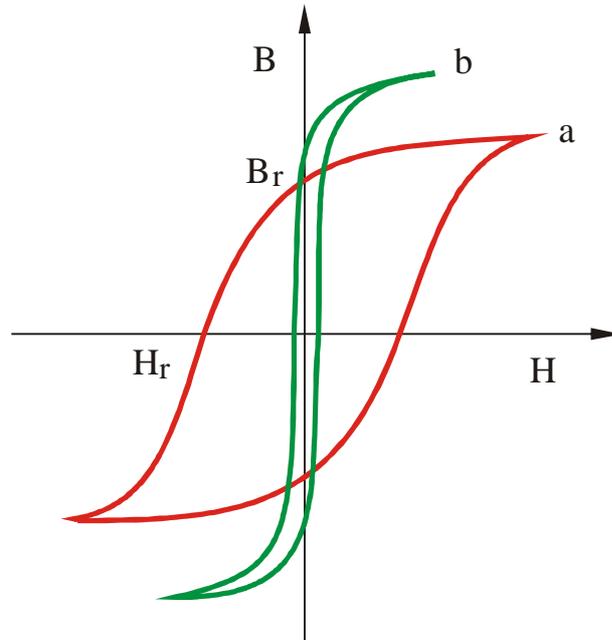


Figura 5.4. Ciclos de histéresis: (a) de un imán permanente.
(b) material magnético blando.

Una de las configuraciones básicas de los generadores de imanes permanentes es aquella en la que los imanes van montados en la superficie del rotor mediante potentes adhesivos (generadores de flujo radial). Para dotar de rigidez al rotor, el espacio interpolar se rellena de material no-ferromagnético y el conjunto va zunchado con materiales de alta rigidez, como fibra de vidrio o incluso zapatas polares atornilladas. La permeabilidad relativa de los diferentes tipos de imanes permanentes se sitúa en el rango de 1,02 y 1,2; además, son materiales de alta resistividad; por ello, cuando los imanes van montados en la superficie, se puede considerar a la máquina como de polos lisos y con un entrehierro alto. Esto, da lugar a que la inductancia de reacción de inducido sea la misma en los ejes directo y en cuadratura, como revisará en los siguientes capítulos. Además, como el entrehierro es grande, la inductancia síncrona (suma de la inductancia de reacción de inducido y la de dispersión) es menor que en una máquina convencional.

Se consigue una mayor robustez mecánica, si los imanes se encuentran embutidos en el interior del material ferromagnético del rotor (máquina de imanes interiores); por ello, esta configuración se emplea en aplicaciones que exijan mayores velocidades de giro. En este caso la reluctancia en la dirección del eje en cuadratura con el eje de los imanes es mucho menor que la reluctancia del eje directo.

5.2.2 Ventajas de la utilización de imanes permanentes

Las máquinas de imanes permanentes tienen una serie de ventajas técnicas y económicas sobre las máquinas excitadas eléctricamente. Algunas de dichas ventajas, son:

- No necesitan potencia extra para alimentar el campo de excitación magnética.
- Mejoras de la eficiencia y de las características térmicas del motor debido a la ausencia de pérdidas de campo.
- Reducción de los niveles de vibración, sin comprometer las prestaciones.
- Bajo nivel de ruido, incluso altas revoluciones.
- Ningún efecto de holgura, o de muelle asociado, a los componentes de transmisión mecánica.
- Al no producirse fricción, se abaratan los costes de mantenimiento, lo que supone una larga vida de servicio y fiabilidad del sistema.

5.3 Generador síncrono lineal de imanes permanentes

5.3.1 Principio de funcionamiento

La figura 5.5, muestra como se evoluciona, constructivamente, de una máquina rotativa a una máquina lineal. En términos generales, toda máquina rotativa puede ser fabricada como máquina lineal.

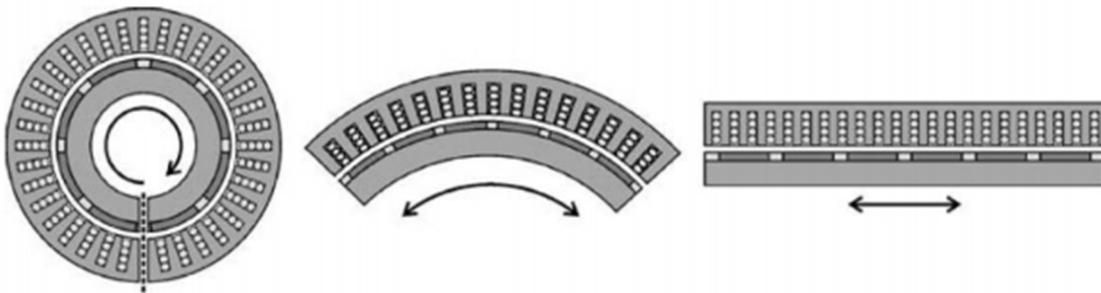


Figura 5.5. Evolución de la máquina rotativa a la máquina lineal.

Las aplicaciones más conocidas para las máquinas lineales están relacionadas con el área de transporte. En esta área, cabe destacar que las corrientes en las bobinas, además de proporcionar propulsión, generan levitación, por lo que, con frecuencia, son usadas en transportes de alta velocidad, evitando el rozamiento.

El análisis de las máquinas lineales es bastante similar al de las máquinas rotativas. En términos generales, las dimensiones y desplazamientos angulares son reemplazadas por dimensiones y desplazamientos lineales; además, debe remplazarse los pares por fuerzas. Salvo estos detalles, tanto las expresiones para los parámetros de la máquina como la estructura de los resultados se obtienen de forma semejante que para las máquinas rotativas.

En la figura 5.6, representa un esquema de un generador lineal,

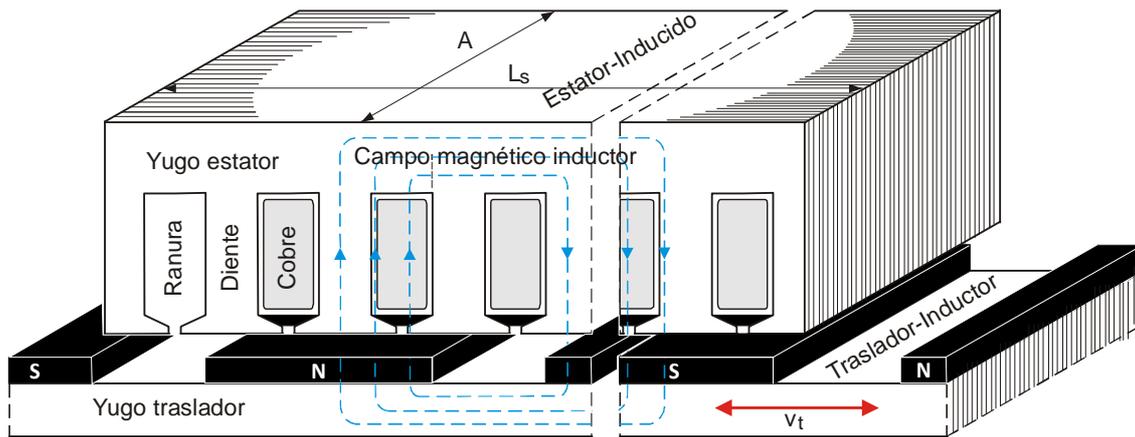


Figura 5.6.- Partes constituyentes del generador síncrono lineal de imanes permanentes

La velocidad lineal síncrona de la máquina v_s , es equivalente a la velocidad tangencial de una máquina síncrona rotativa de radio r , luego:

$$v_s = \omega_m r \quad (5.10)$$

Despejando ω_m de (5.9) y reemplazándola en la expresión (5.10), se tiene:

$$v_s = \frac{\omega_e}{p} r \quad (5.11)$$

Siendo τ_p el paso polar de la máquina rotativa, el número de polos en la circunferencia del generador rotativo, es:

$$2p = \frac{2\pi r}{\tau_p} \quad (5.12)$$

La pulsación eléctrica ω_e , es función de la frecuencia f , de las corrientes del estator, según:

$$\omega_e = 2\pi f \quad (5.13)$$

Sustituyendo (5.12) y (5.13) en (5.11), se obtiene la expresión que gobierna la velocidad síncrona en máquinas lineales:

$$v_s = 2 f \tau_p \quad (5.14)$$

Sustituyendo por la expresión (6.4) que se verá a continuación, obtenemos:

$$v_s = 2 f \tau_p = \frac{f L_s}{\rho} \quad (5.15)$$

Por tanto, la frecuencia de las tensiones generadas, es,

$$f = \frac{\rho}{L_s} v_s \quad (5.16)$$

De (5.14), se observa, como la velocidad del deslizador (traslador) de un generador/motor síncrono lineal no depende del número de pares de polos, sino, de la frecuencia de la fuente de alimentación f y del paso polar, τ_p .

De (5.15) se obtiene que v_s , es la velocidad del traslador, gobernado por la boya, y por tanto, por el oleaje.

El ángulo y la velocidad angular de la fuerza magnetomotriz inducida pueden representarse en función de la velocidad lineal y de la posición del convertidor mediante las relaciones:

$$\theta_e = \frac{2\pi}{\tau_p} x \quad (5.17)$$

$$v_e = \frac{2\pi}{\tau_p} v \quad (5.18)$$

5.3.2 Ventajas, inconvenientes y aplicaciones de las máquinas síncronas lineales

Las máquinas lineales son máquinas impulsoras cuya fuerza de accionamiento es lineal. Ello, proporciona una serie de ventajas sobre los accionamientos tradicionales basados en transmisiones mecánicas rotativas; algunas de ellas, son:

- Mayor velocidad.
- Mayor aceleración; en ocasiones es más importante que el valor de velocidad máxima, por ejemplo, para reducir el tiempo de mecanizado.
- Reducción de los niveles de vibraciones.

A su vez, este tipo de motores/generadores presenta algunos inconvenientes:

- Necesidad de disponer de sistemas de refrigeración para disipar el calor generado.
- El incremento térmico provoca dilataciones en los materiales lo que tiene como consecuencia reducción de los niveles de precisión.
- Incremento del coste de las soluciones basadas en motores lineales.
- La inexistencia de elementos de transmisión mecánica que amortigüen los cambios de carga o cualquier otra perturbación mecánica, hace que esta tarea deba realizarse por un controlador electrónico que deberá ser extremadamente rápido para mantener la estabilidad.
- Para evitar resonancias mecánicas, cuando se utilizan en condiciones dinámicas exigentes, es habitual usar técnicas de filtrado.

A continuación, se enumeran una serie de aplicaciones y se establecen los dos grupos principales de utilización de los motores lineales.

- *Usos en sistemas de control de movimiento y sistemas de deslizamiento:*

- Sistemas de transporte y manipulación.
 - Sistemas de pórticos de carga.
 - Sistemas de embalaje.
 - Sistemas de procesado de madera.
 - Sistemas de perforación y corte.
 - Sistemas de prensas pequeñas.
 - Fabricación de maquinaria de utilización específica.
 - Mecanizado de alta velocidad.
- *Usos de un motor lineal para la propulsión del trenes:*
 - Sobre raíles convencionales.
 - Con la levitación magnética.
- *Otras aplicaciones no citadas anteriormente:*
 - Uso en aceleración de montañas rusas.
 - Uso en diseño de armas.
 - Uso en sistema de despegue electromagnético de aviones de guerra.
 - Estudio sobre un posible uso en propulsión de naves espaciales.

6. DIMENSIONADO DEL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES

6.1 Consideraciones previas del generador lineal con arrastre directo

6.1.1 Fuerza del accionamiento: esfuerzo cortante

En ausencia de interfaz mecánica, la velocidad de translación del generador es igual a la de la parte móvil del OWS, del orden de 0,5 a 2 m/s, la de la campana exterior que oscila verticalmente.

Para poder generar una potencia razonable, a una velocidad tan reducida, el generador deberá poder soportar grandes esfuerzos. Este es el principal inconveniente de este tipo de generación. Para un generador de 500 kVA de potencia y considerando la velocidad máxima de translación posible (2 m/s), el esfuerzo cortante en el entrehierro de la máquina, sería:

$$P = F v \Rightarrow \begin{cases} P = 500 \text{ kW} \\ v = 2 \text{ m/s} \end{cases} \Rightarrow F = \frac{P}{v} = \frac{500 \text{ kW}}{2 \text{ m/s}} = 250 \text{ kN}$$

En la tabla 6.1, se muestran los valores máximos del esfuerzo cortante en el entrehierro de distintas máquinas eléctricas.

Tabla 6.1.- Valores del esfuerzo cortante máximo en máquinas eléctricas.

	f_s (kN / m^2)
Máquinas de corriente continua	20 - 40
Máquinas síncronas	30 - 300
Máquinas de inducción	20 - 40
Máquina síncrona de imanes permanentes	30 - 80

Tomando un valor razonable del esfuerzo cortante en el entrehierro, de 40 kN/m², el área del entrehierro necesario (A_δ) para desarrollar la potencia de 500 kVA, será:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = 250 \text{ kN} \\ f_s = 40 \text{ kN} / m^2 \end{array} \right. \Rightarrow A_\delta = \frac{F}{f_s} = \frac{250}{40} = 6,25 \text{ m}^2$$

Por tanto, la generación directa, implica dispositivos muy grandes, de mucha masa, por lo que se entiende que se esté impulsando la búsqueda de otras formas de generación eléctrica con dispositivos menos voluminosos, tales como los generadores de reluctancia variable.

6.1.2 Fuerza de Maxwell

Otro aspecto que ha de ser tener en cuenta son las fuerzas de atracción entre estator y traslador (fuerzas de Maxwell), que actúan principalmente sobre la superficie del entrehierro. Su valor, es:

$$\hat{F}_{st} = \frac{\hat{B}_{\delta 0} A_\delta}{2 \mu_0} \quad (6.1)$$

Donde, $\hat{B}_{\delta 0}$ = inducción máxima en el entrehierro (T).

Dichas fuerzas deben considerarse en una doble vertiente: por un lado, se oponen al movimiento del traslador y, por otro, afecta al soporte de la estructura del generador y al mantenimiento de un entrehierro constante entre la parte móvil y fija de la máquina. A continuación, se revisa su orden de magnitud.

El valor de la inducción magnética máxima en el entrehierro de una máquina eléctrica oscila entre 0,6 y 0,7 T. Si se considera el área de entrehierro de los párrafos anteriores, resulta una fuerza de atracción normal entre estator y traslador, de:

$$\hat{F}_{st} = \frac{\hat{B}_{\delta 0}^2 A_{\delta}}{2 \mu_0} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \hat{B}_{\delta 0} = 0,7 \text{ T} \\ A_{\delta} = 6,25 \text{ m}^2 \\ \mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{ H/m} \end{array} \right. \Rightarrow \hat{F}_{st} = \frac{0,7^2 \cdot 6,25}{2 \cdot 4 \pi 10^{-7}} = 1.218 \text{ kN}$$

Por unidad de superficie, resulta, ser:

$$\hat{f}_{st} = \frac{\hat{F}_{st}}{A_{\delta}} = 195 \text{ kN/m}^2$$

6.1.3 Dimensionado del OWS

En el apartado 6.1.1, se ha mostrado que para obtener una potencia de 500 kW, cuando la campana-flotador oscila a la velocidad máxima de 2 m/s, el OWS debe suministrar una fuerza de 250 kN. Para el dimensionamiento de la campana no tendremos en cuenta la velocidad máxima a la que puede trabajar, deberemos utilizar a velocidad mínima, con el fin de cuando alcance esta velocidad de comienzo el movimiento. Entonces para una velocidad de 0,2 m/s la fuerza que se debe suministrar es de 2500 kN, pensando en el caso más desfavorable en cuanto a la columna de agua se refiere, es la posición cuando la campana se encuentra totalmente fuera, por lo tanto tenemos:

La presión que ejerce la fuerza de gravedad sobre la campana, se expresa:

$$p_c = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{H_2O} \quad (Pa) \quad (6.2)$$

Donde, ρ_{H_2O} = densidad del agua de mar (1.028 kg/m³).
 g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).
 h_{H_2O} = altura de agua por encima de la campana (25 m)

El diámetro de la campana (d_c), en función de la fuerza y la presión,

$$d_c = \frac{F}{\pi p_c} \quad (m) \quad (6.3)$$

Operando (6.2) y (6.3), la presión y el diámetro, de la campana, valen respectivamente:

$$p_c = 252,17 \text{ kPa} \quad d_c = 3,15 \text{ m} .$$

6.2 Esquemas y cotas del generador lineal

Teniendo en cuenta lo expuesto en las secciones anteriores (6.1.1), (6.1.2), pueden destacarse tres importantes problemas asociados a los generadores lineales, son:

- Las fuerzas de atracción entre estator y translador dan lugar a fallos en los cojinetes, que por el tipo de funcionamiento –sumergido– del sistema OWS, interesan tengan un nulo mantenimiento.
- Es interesante disminuir, lo más posible las pérdidas del generador, para evitar problemas de refrigeración y aumento del rendimiento.
- El generador es grande y caro para la potencia que suministra; para su explotación industrial dimensiones y precio deben de disminuir.

Una de las soluciones que se proponen en la literatura [8], [9], es la utilización de máquinas lineales de doble cara síncrona de imanes permanentes.

En el plano 2 del anexo II, se muestra un esquema detallado de la sección transversal del estator y traslador del generador síncrono de imanes permanentes de doble cara proyectado, con un doble estator trifásico y un traslador con imanes montados sobre ambas caras del mismo. Con ello, se consigue, principalmente, que las fuerzas de ambas partes se equilibren; se observa, la anulación, al menos parcial, del flujo en el yugo del traslador. Así mismo, la oposición de los imanes enfrentados, colabora en su fijación al yugo del traslador.

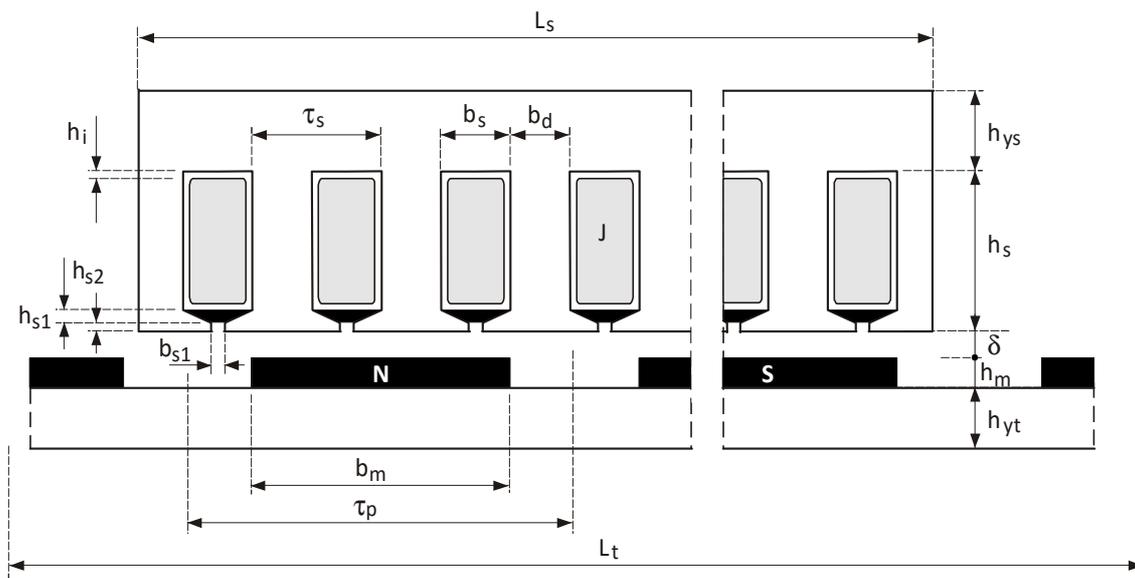


Figura 6.1. Cotas principales del generador (una cara).

6.3 Variables y parámetros de diseño

Como primer paso en el dimensionado de la máquina síncrona lineal, se establecen unas variables de diseño básicas, derivadas de la experiencia y datos de generadores de imanes permanentes ya construidos, lo que posibilita el ajuste del diseño, así como optimizar su funcionamiento. Las magnitudes fundamentales de diseño tomadas, son:

- Longitud del estator, L_s (m).

- Ancho del generador, A_s (m).
- Altura de ranura, h_s (m).
- Densidad de corriente en conductores, J (A/mm²).
- Inducción del aire en el entrehierro, $B_{\delta 0}$ (T).
- Inducción del aire en los dientes, B_{d0} (T).
- Número de pares de polos, p .

Otros parámetros de utilizados para el dimensionado son constantes, propias materiales utilizados en el generador, o bien, tomados de otros generadores ya realizados que han sido utilizados como referencia, los parámetros de diseño son:

- Inducción en el yugo del estator, B_{ys} (T)
- Campo magnético en el yugo del trasladador, B_{yt} (T)
- Altura de diente, h_{s1} (m)
- Altura de cuña de ranura, h_{s2} (m)
- Abertura de ranura, b_{s1} (m)
- Espesor aislamiento ranura, h_i (m)
- Número de fases, $m = 3$.
- Factor de llenado de los conductores en ranura,
- Factor de apilamiento de las chapas del estator,
- Fuerza coercitiva del imán, H_c (A/m)
- Permeabilidad relativa del imán, $\mu_r m$
- Permeabilidad del aire en vacío, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ (H/m).
- F.e.m. de fase nominal: E_f (V)

- Tensión de fase por en bornes de la máquina, U_f .
- Número de circuitos en derivación, a

6.4 Expresiones para el dimensionado

6.4.1 Formulaciones generales

A continuación, se exponen el conjunto de expresiones, que definen y caracterizan el dimensionado geométrico y las características eléctricas del generador.

- *Paso polar.*- la longitud del estator o inducido, L_s y el número de pares de polos, p , determinan el paso polar,

$$\tau_p = \frac{L_s}{2p} \quad (6.4)$$

Para la optimización del hierro y cobre del generador, deberá verificarse la relación:

$$8 \leq \frac{A_s}{\tau_p} \leq 14 \quad (6.5)$$

Siendo A , el ancho del inducido.

- *Paso de ranura.*- si m es el número de fases del devanado y q , el número de ranuras por polo y fase, resulta:

$$\tau_s = \frac{\tau_p}{mq} \quad (6.6)$$

- *Anchura de ranura.*- el ancho de ranura es descrito por b_s y, su altura por h_s . El ancho de ranura, vale:

$$b_s = \tau_s - b_d \quad (6.7)$$

Siendo- b_d , el ancho de diente.

- *Altura del devanado.*- se expresa, según,

$$h_{s3} = h_s - h_{s1} - h_{s2} \quad (6.8)$$

- *Dimensiones del cobre en ranura.*- la altura h_{Cu} y el ancho b_{Cu} del cobre de ranura, están determinadas por la altura del devanado en ranura y el espesor del aislamiento de la bobina, h_i ,

$$h_{Cu} = h_{s3} - 2h_i \quad (6.9)$$

$$b_{Cu} = b_s - 2h_i \quad (6.10)$$

- *Ancho del imán.*- el ancho del imán permanente es definido como un valor proporcional al paso polar, que debe permanecer entre 0,6 y 0,9 del mismo, por lo tanto:

$$b_m = 0,7 \tau_p \quad (6.11)$$

- *Longitud media de las espiras.*- se asume la longitud media de una cabeza de bobina l_{cb} , es de:

$$l_{cb} = 2 \tau_p \quad (6.12)$$

Y, la longitud media de la espira l_{esp} , se expresa:

$$l_{esp} = 2(A_s + l_{cb}) \quad (6.13)$$

- *Anchura útil núcleos de hierro estator y traslador:* la anchura neta de hierro de los núcleos, vale:

$$A_u = k_{Fe} A \quad (6.14)$$

Donde k_{Fe} , es el factor de apilado de las clapas magnéticas.

- *Anchura equivalente núcleos de hierro estator y traslador:* expresión utilizada en otras, toma el valor:

$$A_e = A_s + 2\delta \quad (6.15)$$

- *Entrehierro mecánico:* el entrehierro debe ser lo menor posible, con el objeto principal –existen otros– de minimizar el volumen de imanes permanentes. En las máquinas rotativas estándar, se toma como valor del límite superior del entrehierro, tomando una milésima parte del diámetro de entrehierro de la máquina. Así:

$$\delta = 0,001 \frac{L_s}{\pi} \quad (6.16)$$

De otra parte, para que la onda de inducción en el entrehierro en carga, no resulte muy deformada, se deberá verificar la relación:

$$12 \leq \frac{\tau_p}{\delta} \leq 32 \quad (6.17)$$

6.4.2 Formulaciones del circuito magnético

Las alturas correspondientes al yugo del estator y del traslador, así como el ancho del diente, son dados mediante las expresiones:

- *Altura yugo estator:*
$$h_{ys} = \frac{\hat{B}_{\delta 0} b_m A_e}{2 \hat{B}_{ys} A_u} \quad (6.18)$$

- *Altura yugo traslador:*
$$h_{yt} = \frac{\hat{B}_{\delta 0} b_m A_e}{2 \hat{B}_{yt} A} \quad (6.19)$$

- *Ancho de diente:*
$$b_d = \frac{\hat{B}_{\delta 0} \tau_s A_e}{\hat{B}_{d0} A_u} \quad (6.20)$$

Donde $\hat{B}_{\delta 0}$, es la inducción máxima en aire del entrehierro y \hat{B}_{d0} , la inducción máxima en el aire en los dientes.

Por otra parte, en cuanto a la rigidez y sollicitaciones mecánicas de los dientes de hierro del inducido, se deberá verificar:

$$b_d > \frac{h_s}{4} \quad (6.21)$$

Sobre el circuito magnético constituido por dos polos (N-S), yugos de estator y traslador, entrehierro y dientes, la suma algebraica de ff.mm.mm. debe ser igual a la suma de caídas de tensión magnética, es decir:

$$2 H_c h_m = \hat{V}_{ys} + \hat{V}_{yt} + \hat{V}_d + \hat{V}_\delta + \hat{V}_m \quad (6.22)$$

- *Caídas de tensión magnética en yugos del estator y del traslado valen, respectivamente:*

$$\hat{V}_{ys} = 0,5 \left[\tau_p + \frac{\pi (h_s + 0,5 h_{ys})}{p} \right] H_s(\hat{B}_{ys}) \quad (6.23)$$

$$\hat{V}_{yt} = 0,5 \left[\tau_p - \frac{\pi (\delta + h_m + 0,5 h_{yt})}{p} \right] H_t(\hat{B}_{yt}) \quad (6.24)$$

Donde, $H_s(\hat{B}_{ys})$ y $H_t(\hat{B}_{yt})$, son las intensidades de campo (A/m), en función de las inducciones en los yugos. Dichos valores se

obtienen de las curvas de magnetización de los hierros utilizados.
Como primera aproximación, se tomará , $h_m = 2\delta$.

- *Caída de tensión magnética en los dientes:*

$$\hat{V}_d = (2 h_{s3} + h_{s2}) H_s(\hat{B}_{d0}) + (2 h_{s1} + h_{s2}) H_s(\hat{B}_{\delta 0}) \quad (6.25)$$

- *Caída de tensión magnética en imanes permanentes:*

$$\hat{V}_m = 2 \frac{\hat{B}_{\delta 0}}{\mu_0 \mu_m} h_m \quad (6.26)$$

- *Caída de tensión magnética en el entrehierro:*

$$\hat{V}_\delta = 2 \frac{\hat{B}_{\delta 0}}{\mu_0} \delta_{ef} \quad (5.27)$$

Siendo,

$$* \text{ Entrehierro efectivo: } \quad \delta_{ef} = k_{Ca} \delta_t \quad (6.28)$$

$$* \text{ Coeficiente de Carter: } \quad k_{Ca} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma \delta_t} \quad (6.29)$$

$$\text{Siendo, } \quad \gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_{s1}}{2 \delta_t} \arctan \left(\frac{b_{s1}}{2 \delta_t} \right) - \log \sqrt{1 + \left(\frac{b_{s1}}{2 \delta_t} \right)^2} \right] \quad (6.30)$$

$$* \text{ Entrehierro total: } \quad \delta_t = \delta + \frac{h_m}{\mu_{rm}} \quad (6.31)$$

Sustituyendo en (5.24), (5.25) y (5.27), resulta:

$$\hat{V}_\delta = 2 \frac{\hat{B}_{\delta 0}}{\mu_0} k_{Ca} (\delta + h_m) = 2 \frac{\hat{B}_{\delta 0}}{\mu_0} k_{Ca} \delta + 2 \frac{\hat{B}_{\delta 0}}{\mu_0} k_{Ca} h_m = \hat{V}'_\delta + \hat{V}''_\delta \quad (6.32)$$

- *Altura de imán permanente.*- sustituyendo en (5.19), las expresiones (5.20) a (5.24), permite despejar la altura del imán permanente h_m , y así, poder probar las sucesivas iteraciones en su cálculo:

$$h_m = \frac{0,5 (\hat{V}_{ys} + \hat{V}_{yt} + \hat{V}_d + \hat{V}'_{\delta})}{H_c - \frac{B_{\delta 0}}{\mu_0} \left(\frac{1}{\mu_m} + k_{Ca} \right)} \quad (6.33)$$

- *Componente fundamental de la inducción en el entrehierro.*- la onda de inducción en el entrehierro depende de la geometría del imán, el paso polar y con un entrehierro uniforme es, idealmente, cuadrada. Debido al efecto borde, la curva real está algo alisada. Como el devanado será de paso diametral, los armónicos de la onda de inducción originan ff.ee.mm. armónicas. Las tensiones armónicas pueden contribuir a la producción de potencia activa armónica. Generalmente, la contribución de los armónicos es muy pequeña de forma que, únicamente, se considera la onda fundamental de la inducción y de la tensión. El valor eficaz de la componente fundamental de la inducción en el entrehierro, vale:

$$\hat{B}_{\delta(1)} = B_{rm} \left[\frac{4 h_m}{\pi \mu_{rm} \delta_{ef}} \sin \left(\frac{\pi b_m}{2 \tau_p} \right) \right] \quad (6.34)$$

6.4.3 Formulaciones del devanado

A la hora de definir el devanado del generador se deberá determinar, en primer lugar, el número de conductores por ranura del estator.

- *Número de conductores por ranura.*- es función de la f.e.m. por fase E_f , el número de ranuras por fase $Q_f = 2pq$, el número de circuitos en derivación por fase a , la longitud equivalente de conductor A_e , la

inducción eficaz en el entrehierro $B_{\delta(1)}$, la velocidad lineal del trasladador v_t y el factor de devanado $\xi_{w(1)}$, según:

$$Z_Q = \frac{a E_f}{2 p q \xi_{w(1)} B_{\delta(1)} A_e v_t} \quad (6.35)$$

En los devanados de una capa, el número de conductores por ranura, coincide con el número de espiras de una bobina.

- *Factor de devanado.*- el factor de devanado, para la componente fundamental ,de la onda de inducción en el entrehierro, se expresa, en función de los factores de distribución $\xi_{d(1)}$ y paso $\xi_{p(1)}$,

$$\xi_{w(1)} = \xi_{d(1)} \xi_{p(1)} \quad (6.36)$$

$$\xi_{d(1)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)} \quad (6.37)$$

$$\xi_{p(1)} = \cos\left[\frac{2}{\pi}\left(1 - \frac{Q}{2mq}\right)\right] \quad (6.38)$$

Por tratarse de un inducido lineal, las primeras y últimas de ranuras no están separadas un paso de ranura, como ocurre en los alternadores circulares convencionales, sino toda la longitud del inducido, L_S ; por tanto, la longitud de las cabezas de las bobinas dispuestas en las primeras y últimas ranuras, tienen, aproximadamente, la longitud total del inducido. Ello origina, en primer lugar, que las f.e.m. generadas por las diferentes fases sean distintas y, en segundo lugar, un aumento de las pérdidas en el cobre. Por esta razón, no deberán ejecutarse devanados en doble capa.

En general, el devanado del generador será trifásico de una capa, ejecutado por polos consecuentes, con grupos de bobinas concéntricas (devanado en cadena), con grupos separados, que originan una amplitud de ranura nula entre los lados activos del grupo de bobinas.

- *Número total de ranuras:* $Q = 2 p q m$ (6.39)

- *Número de ranuras por fase:* $Q_f = \frac{Q}{m} = 2 p q$ (6.40)

- *Número total de conductores:* $Z = Q Z_Q$ (6.41)

- *Número de conductores por fase:* $Z_f = \frac{Z}{m} = 2 p q Z_Q$ (6.42)

- *Número de espiras por fase:* $N_f = \frac{Z_f}{2} = p q Z_Q$ (6.43)

- *Número total de bobinas (una capa):* $B = \frac{Q}{2} = p q m$ (6.44)

- *Número bobinas por fase:* $B_f = \frac{B}{m} = p q$ (6.45)

- *Número espiras por bobina:* $N_B = \frac{N_f}{B_f} = Z_Q$ (6.46)

- *Paso polar en ranuras:* $Y_p = \frac{Q}{2p} = q m$ (6.47)

- *Paso de principios de fases, expresado en ranuras:*

$$Y_{120} = \frac{Q}{3p} = \frac{2}{3} q m \quad (6.48)$$

6.4.4 Grado de aislamiento del devanado

La temperatura del devanado es un factor limitante de la corriente nominal, la máxima temperatura permitida en el devanado, también es vital para el funcionamiento del generador. El generador diseñado en este trabajo, está realizado con aislamiento de los devanados Clase Térmica 130 (antigua denominación, clase B). De acuerdo con las Normas, el calentamiento permitido para el aislamiento clase B es de 90 °C y los cálculos térmicos nominales han de ser realizados para una temperatura ambiente de 40 °C. En consecuencia, la temperatura máxima que podrán alcanzar los devanados, será de 130 °C.

6.4.5 Resistencia e inductancia del inducido

Para calcular la potencia de salida del generador, debe conocerse la resistencia e inductancia del inducido por fase.

- **Resistencia por fase**

La sección del hilo, o pletina, conductor-a de cobre, se formula:

$$A_{Cu} = \frac{k_{Cu} h_{Cu} b_{Cu}}{Z_Q} \quad (6.49)$$

Donde, k_{Cu} es el factor de llenado de conductores en ranura.

El valor de la resistencia por fase del inducido, se escribe:

$$R_f = \rho_{Cu} \frac{l_{Cus}}{A_{Cu}} = \rho_{Cu} \frac{p q Z_Q l_{esp}}{a A_{Cu}} \quad (6.50)$$

Donde la resistividad del cobre ρ_{Cu} , depende de la temperatura ϑ :

$\rho_{Cu} = \rho_{Cu}(\vartheta)$; es decir, es función del índice de carga del generador y

de la temperatura ambiente. Normalmente, la resistividad del cobre es dada para 20 °C.

La resistividad del cobre varía con la temperatura, según:

$$\rho_{Cu}(\vartheta_2) = \rho_{Cu}(\vartheta_1) \left(\frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1} \right) \quad (6.51)$$

En condiciones nominales, ha de considerarse la temperatura ambiente de 40 °C, según indica la Norma, con un calentamiento de 90 °C, resulta una temperatura máxima del devanado de $\vartheta_N = 130^\circ\text{C}$, como se había mencionado anteriormente.

- **Inductancia por fase**

La inductancia por fase L_f , está compuesta por dos inductancias diferenciadas, la inductancia de dispersión, L_σ , y la inductancia principal o de magnetización, L_m :

$$L_f = L_m + L_\sigma \quad (6.51)$$

* *Inductancia de magnetización.*- la inductancia de magnetización por fase, se expresa [Referencia],

$$L_m = \frac{6 \mu_0 p \tau_p A_e (q \xi_{w(1)} Z_Q)^2}{\pi^2 \delta_{ef}} \quad (6.52)$$

* *Inductancia de dispersión.*- la inductancia de dispersión está formada, a su vez, por la suma de las inductancias de dispersión en ranura, L_s , en la cabeza de los dientes, L_d , y en la cabeza de los bobinados, L_{cb} ; vienen determinadas, respectivamente, por las expresiones []:

$$L_s = 2 p q Z_Q^2 \mu_0 A_e \lambda_s \quad (6.53)$$

$$L_d = 2 p q Z_Q^2 \mu_0 A_e \lambda_d \quad (6.54)$$

$$L_{cb} = 2 p q Z_Q^2 \mu_0 l_{cb} \lambda_{cb} \quad (6.55)$$

donde λ_s , λ_d y λ_{cb} son las permeancias específicas de dispersión de ranura, en cabezas de dientes y en cabezas de bobina, respectivamente. Para un devanado de una capa, puede aproximarse [], según:

$$\lambda_s = \frac{2 (h_{s1} + h_{s2})}{b_s + b_{s1}} \quad (6.56)$$

$$\lambda_d = \frac{\delta_t}{b_{s1} + 0,8 \delta_t} \quad (6.57)$$

$$\lambda_{cb} = \frac{q}{A_e} (0,6 l_{cb} - 0,3 q m \tau_s) \quad (6.58)$$

Por tanto, la inductancia de dispersión total, por fase, es:

$$L_\sigma = L_s + L_d + L_{cb} \quad (6.59)$$

6.5 Volúmenes y pesos de los materiales activos

A partir del cálculo de los volúmenes de los diferentes materiales activos del generador y, una vez multiplicados por el peso específico de cada material, originan el peso total del cobre de los devanados, m_{Cu} , del hierro del yugo estático, m_{Feys} , de los dientes del estator, m_{Fed} , del yugo trasladador, m_{Feyt} , y del material de los imanes, m_m . Así, son:

- Cobre:
$$V_{Cu} = m N_f l_{esp} A_{Cu} \quad (6.60)$$

$$m_{Cu} = \gamma_{Cu} V_{Cu} \quad (6.61)$$

- *Yugo del trasladador:* $V_{Feyt} = h_{yt} L_t A_u \quad (6.62)$

$$m_{Feyt} = \gamma_{Fe} V_{Feyt} \quad (6.63)$$

- *Dientes del estator:*

$$V_{Fed} = A_u Q \left(b_d h_{s3} + \frac{(\tau_s - b_{s1}) + b_d}{2} h_{s2} + (\tau_s - b_{s1}) h_{s1} \right) \quad (6.64)$$

$$m_{Fed} = \gamma_{Fe} V_{Fed} \quad (6.65)$$

- *Yugo del estator:* $V_{Feys} = h_{ys} L_s A_u \quad (6.66)$

$$m_{Feys} = \gamma_{Fe} V_{Feys} \quad (6.67)$$

- *Imanes permanentes:* $V_m = 2 p A h_m b_m \quad (6.68)$

$$m_m = \gamma_m V_m \quad (6.69)$$

donde, γ_{Cu} , γ_{Fe} y γ_m , son, respectivamente, los pesos específicos del cobre, hierro e imanes.

El peso total de las partes activas del generador, es:

$$m_t = m_{Cu} + m_{Feys} + m_{Feyr} + m_{Fed} + m_m \quad (6.70)$$

6.6 Pérdidas del generador

6.6.1 Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre, para una temperatura de devanado de ϑ_{Cu} , se determinan a través de la resistividad del cobre $\rho_{Cu}(\vartheta_{Cu})$, la densidad eficaz de corriente admisible J , y el volumen del cobre V_{Cu} , según:

$$P_{Cu}(\vartheta_{Cu}) = \rho_{Cu}(\vartheta_{Cu}) J^2 V_{Cu} \quad (6.71)$$

El diseño térmico del generador debe desarrollarse para la temperatura ambiente máxima, que junto con la clase térmica del aislamiento utilizado, determina la temperatura nominal de operación: $\vartheta_{CuN} = 130$ °C. En consecuencia, las pérdidas en el cobre máximas, en régimen nominal, son:

$$P_{CuN} = P_{Cu}(\vartheta_{CuN}) \quad (6.72)$$

6.6.2 Pérdidas en el hierro

Las pérdidas en el hierro son determinadas para cada parte del hierro del generador. Estas, son de dos tipos, pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault. Las pérdidas en el hierro se calculan a través de los datos suministrados por los fabricantes. En el Apéndice A: Materiales, se detallan las características de la chapa de hierro con que se construye el estator y traslador.

Como las pérdidas específicas (ρ_H, ρ_F), expresadas en W/kg, se suministran para la frecuencia e inducción normalizadas, de 50 Hz y 1,5 T, deben adaptarse a la frecuencia e inducción del generador.

- *Pérdidas en el estator*

Las pérdidas en el hierro del estator o inducido, por histéresis y Foucault, valen respectivamente:

$$P_{Hys} = k_{Hys} m_{Feys} \rho_{Hy} \left(\frac{f}{50}\right) \left(\frac{\hat{B}_{ys}}{1,5}\right)^2 \quad (6.73)$$

$$P_{Fys} = k_{Fys} m_{Feys} \rho_{Fy} \left(\frac{f}{50}\right)^2 \left(\frac{\hat{B}_{ys}}{1,5}\right)^2 \quad (6.74)$$

Donde las constantes empíricas k_{Hys} , k_{Fys} , valen, aproximadamente:

$$k_{Hys} = 2, \quad k_{Fys} = 1,8 \quad (6.75)$$

- *Pérdidas en los dientes*

$$P_{Hd} = k_{Hd} m_{Fed} \rho_{Hy} \left(\frac{f}{50}\right) \left(\frac{\hat{B}_{d0}}{1,5}\right)^2 \quad (6.76)$$

$$P_{Fd} = k_{Fd} m_{Fed} \rho_{Fy} \left(\frac{f}{50}\right)^2 \left(\frac{\hat{B}_{d0}}{1,5}\right)^2 \quad (6.77)$$

Donde las constantes empíricas k_{Hd} , k_{Fd} , valen:

$$k_{Hd} = 1,2, \quad k_{Fd} = 2,5 \quad (6.78)$$

- *Pérdidas en el traslador*

Las pérdidas en el hierro del yugo del traslador, inductor en este caso, son pequeñas, debido a que el flujo principal es constante y se anula al disponer dos generadores simétricos.

- *Pérdidas en los imanes*

Las mayores pérdidas en el estator son debidas a las corrientes inducidas en los imanes, debido a los armónicos del flujo. El flujo armónico se origina en vacío por las ranuras del inducido y, en carga, por los armónicos presentes en la corriente. Las pérdidas en los imanes permanentes se reducen en gran medida construyendo los polos magnéticos con varios imanes de menor superficie. Las pérdidas en los imanes, se aproximan, según:

$$P_{Fm} = 2 \rho b_m A_s \rho_{Fm} \quad (6.79)$$

Para el generador propuesto, se estiman unas pérdidas específicas de los imanes, de:

$$\rho_{Fm} = 300 \text{ W / m}^2 \quad (6.80)$$

Aunque esta estimación de las pérdidas en los imanes (70) es muy grosera, el error cometido no es importante, en tanto, que la temperatura que alcanzan los imanes está determinada en una parte muy pequeña por los mismos.

- *Pérdidas adicionales*

Las pérdidas adicionales en los generadores síncronos son debidas a las pérdidas por el flujo disperso de ranura, por flujo disperso de cabezas de bobina, por cortocircuitos en el hierro debidos a la f.m.m. del inducido y a las pérdidas de los imanes. Las pérdidas en la superficie de los imanes, P_{Fm} , son tratadas por separado, no siendo incluidas en las pérdidas adicionales. Se asume que estas pérdidas, a potencia nominal, suponen un 20% de las pérdidas en el hierro y que son proporcionales al cuadrado de la corriente del inducido:

$$P_{ad} = 0,2 (P_{Hyr} + P_{Fyr} + P_{Hd} + P_{Fd}) \quad (6.81)$$

Las pérdidas por fricción mecánica y del devanado, son originadas por las pérdidas en los cojinetes y por el roce de las bobinas con el aire. El par de frenado de los cojinetes, no está determinado por el diseño del generador, sino por el apoyo del péndulo. Debido a la baja velocidad del aire, las pérdidas de rozamiento del aire con el devanado son despreciables. La refrigeración interna por medio de ventiladores se estima de 100 W para un generador de 500 kW.

Finalmente, las pérdidas totales por fricción a la velocidad nominal se estiman en un 0,5% de la potencia nominal y ser independientes de la velocidad.

$$P_{\mu} = 0,005 P_N \quad (6.82)$$

La potencia de ventiladores de refrigeración externa, como ventiladores para de enfriamiento de conductos o de superficies exteriores del generador, no son incluidos en los cálculos.

Las pérdidas totales a la carga nominal, valen:

$$P_{pN} = P_{CuN} + P_{Fyr} + P_{Hyr} + P_{Fd} + P_{Hd} + P_{Fm} + P_{ad} + P_{\mu} \quad (6.83)$$

7. RESULTADOS DEL DIMENSIONAMIENTO

7.1 Datos numéricos del dimensionamiento

Utilizando las ecuaciones desarrolladas en el Capítulo 6 y utilizando una serie de datos tomados de otros autores se realizan los cálculos pertinentes para el dimensionamiento del generador, apoyándonos en una tabla Excel, con el fin de obtener las dimensiones geométricas y eléctricas del generador para la potencia deseada, siendo las dimensiones geométricas parámetros de entrada a los cálculos, pero a su vez desconocidas por lo que habrá que realizar un proceso de tanteo. La potencia obtenida es de 250 kW ya que los cálculos están realizados para una de las caras del generador, por lo que habría que multiplicar por dos esta potencia cuando contemplamos el generador completo:

Tabla 7.1.- Valores de las características .del generador.

Longitud (L_s)	7	m
Ancho (A_s)	0,5	m
Número de pares de polos (p)	50	
Altura de la ranura (h_s)	0,0683	m
Campo magnético vacío entrehierro ($B_{\delta 0}$)	0,77	T
Campo magnético vacío diente (B_{d0})	1,64	T

Densidad de Corriente (J_{rms})	3,5	A/mm^2
Número de fases (m)	3	
Número de ranuras por polo y fase (q)	1	
Factor de apilado de chapas magnéticas (K_{fs})	0,97	
Espesor aislamiento (h_i)	0,001	m
Factor de llenado (K_{cu})	0,8	
Densidad cobre (ρ_{cu})	8,94	kg/dm^3
Campo magnético en el yugo del rotor (B_{yt})	1,2	T
Campo magnético en el yugo del estator (B_{ys})	1,2	T
Fuerza coercitiva del imán (H_c)	915000	A/m
Permeabilidad relativa del imán (μ_m)	1,1	
Permeabilidad del aire en el vacío (μ_0)	1,2566E-06	H/m
Abertura de la ranura (b_{s1})	0,003	m
Altura del diente (h_{s1})	0,002	m
Altura de la cuña de ranura (h_{s2})	0,004	m
Número de circuitos en derivación (a)	1	
Tensión en bornes del generador (E_{pn})	415	V

Tabla 7.2.- Valores calculados de las características .del generador.

Paso polar (τ_p)	0,07	<i>m</i>
Número ranuras generador (Q)	300	
Número ranuras generador por fase (Q_f)	100	
Paso por ranura (τ_s)	0,023	<i>m</i>
Entrehierro (δ)	0,002	<i>m</i>
Anchura media equivalente (A_e)	0,504	<i>m</i>
Anchura útil (A_u)	0,485	<i>m</i>
Anchura del diente (b_d)	0,0114	<i>m</i>
Anchura de ranura (b_s)	0,0119	<i>m</i>
Altura yugo estator (h_{ys})	0,0163	<i>m</i>
Altura yugo rotor (h_{yr})	0,0163	<i>m</i>
Longitud del imán (b_m)	0,049	<i>m</i>
Caída de tensión. en el yugo del estator (\hat{V}_{ys})	7,445	<i>A/v</i>
Caída de tensión en el yugo del trasladador (\hat{V}_{yt})	6,878	<i>A/v</i>

Caída de tensión en los dientes	617,204	A/v
Caída de tensión. en el imán(\hat{V}_m)	9017,11	A/v
Caída de tensión. en el entrehierro (\hat{V}_δ)	39596,77	A/v
Anchura de cobre (b_{cu})	0,00993	m
Altura del cobre (h_{cu})	0,029	m
Altura útil de ranura (h_{s3})	0,0623	m
Resistencia estator (R_s)	1,099	Ω
Número de conductores por ranura (z_Q)	8	
Primer armónico del campo magnético del entrehierro ($B_{\delta(1)}$)	0,527	T
Entrehierro total (δ_t)	0,0291	m
Permeancia de dispersión ranura (λ_s)	0,668	
Permeancia de dispersión diente (λ_d)	0,994	
Permeancia de dispersión bobina (λ_{cb})	0,042	
Permeancia de los imanes (λ_m)	31,416	

Inductancia de dispersión ranura (L_s)	0,0025	H
Inductancia de dispersión diente (L_d)	0,00383	H
Inductancia de dispersión bobina (L_{cb})	0,000641	H
Inductancia mutua (L_m)	0,00253	H
Inductancia total por fase (L_f)	0,00959	H
Coef. Carter (K_{ca})	1,1078	
Entrehierro efectivo (δ_{ef})	0,0323	m
Sección de cobre (S_{cu})	30	mm^2
Volúmenes cobre	0,0792	m^3
Masa cobre	708,623	kg
Volumen rotor	0,0572	m^3
masa rotor	434,949	kg
Volumen yugo estator	0,0572	m^3
Masa yugo estator	434,94	kg
Volumen diente estator	0,12	m^3
Masa diente estator	914,29	kg

Volumen imanes	0,13	m^3
Masa imanes	1003,09	kg
Masa total	3495,91	kg
Pérdidas en el cobre	17477,80	W
Pérdidas yugo (Histéresis)	595,31	W
Pérdidas yugo (Foucault)	367,11	W
Pérdidas diente (Histéresis)	0,30	W
Pérdidas diente (Foucault)	1441,36	W
Pérdidas imanes	39,59	W
Pérdidas adicionales	480,82	W

8. ECUACIONES PARA LA SIMULACIÓN DEL PMSG

8.1 Bases consideradas para la modelización de la máquina eléctrica

En el capítulo siguiente se desarrollan las ecuaciones utilizadas para el modelado dinámico, que se utilizara para la simulación del generador lineal de imanes permanentes en el que se basa el proyecto. El modelo deberá tener en cuenta los parámetros eléctricos que gobiernan los fenómenos electromagnéticos del sistema. Después de desarrollar las ecuaciones del sistema serán implementadas en SIMULINK, con el que realizaremos la posterior simulación.

Se asumen las siguientes hipótesis simplificadoras en el modelado de la máquina eléctrica:

- El entrehierro entre la superficie del rotor y el estator es despreciable.
- No tendremos en cuenta los efectos de borde del campo magnético.
- La saturación del hierro es despreciable.

- Se desprecian igualmente la saturación de los circuitos magnéticos, la histéresis, las pérdidas de Foucault y la dispersión del campo magnético en los extremos de la máquina.
- La fuerza electromotriz inducida es de naturaleza sinusoidal perfecta ya que el flujo magnético en el entrehierro es sinusoidal.

8.2 Desplazamiento mecánico y eléctrico

Se deberá tener en cuenta que estamos trabajando con un generador de cincuenta pares de polos, por lo que cabe diferenciar la posición mecánica del traslador con su posición eléctrica:

$$x_e = p \cdot x \quad (8.1)$$

$$v_e = \frac{dx_e}{dt} \quad (8.2)$$

8.3 Ecuaciones del generador en coordenadas primitivas

Las siguientes ecuaciones rigen el comportamiento electromagnético del inducido expresado en forma matricial en régimen trifásico:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

$$u_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_s \cdot i_a \quad (8.4)$$

$$u_b = \frac{d\psi_b}{dt} - R_s \cdot i_b \quad (8.5)$$

$$u_c = \frac{d\psi_c}{dt} - R_s \cdot i_c \quad (8.6)$$

Si la máquina consta de n par de polos y siendo el flujo por polo, los flujos concatenados responden a la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \phi_m \cdot \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) \\ \phi_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \phi_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

8.4 Transformada de Park

La transformación de Park o d-q convierte las componentes abc del sistema trifásico a otro sistema de referencia $dq0$. El objetivo de la transformación consiste en convertir los valores trifásicos abc , variables senoidalmente en el tiempo, a valores constantes $dq0$, en régimen permanente.

El vector con componentes del nuevo sistema de referencia X_r se obtiene al multiplicar el vector de coordenadas en coordenadas primitivas X por la matriz de transformación T según la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = X_r = T \cdot X = T \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (8.9)$$

La expresión de la matriz de transformación de Park es la siguiente:

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

Se consideran las componentes homopolares como componentes nulas, se obtendrá una reducción del número total de ecuaciones de un total de cuatro ecuaciones, en el caso de las ecuaciones de fase, a tres ecuaciones que corresponden a las componentes de tensión del eje directo y de cuadratura del arrollamiento estatístico más la ecuación rotórica. El número de componentes de la matriz de impedancias se verá igualmente reducido.

8.5 Ecuaciones U-I del PMSLG en la referencia ortogonal d-q

Las ecuaciones que relacionan tensiones e intensidades de un generador síncrono lineal de imanes permanentes, expresadas en la referencia ortogonal d-q, están dadas por:

$$u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot \psi_q - R_s \cdot i_d \quad (8.11)$$

$$u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot \psi_d - R_s \cdot i_q \quad (8.12)$$

siendo los flujos concatenados:

$$\psi_d = \phi_m - L_d \cdot i_d \quad (8.13)$$

$$\psi_q = -L_q \cdot i_q \quad (8.14)$$

8.6 Inductancias del generador síncrono en ejes d-q

Las inductancias del generador expresadas en la referencia ortogonal d-q están compuestas, matemáticamente, de los siguientes términos:

$$L_d = L_{md} - L_{\sigma s} \quad (8.15)$$

$$L_q = L_{mq} + L_{\sigma s} \quad (8.16)$$

siendo:

$$L_{md} = \frac{3}{2}(L_A + L_B) \quad (8.17)$$

$$L_{mq} = \frac{3}{2}(L_A - L_B) \quad (8.18)$$

siendo también, al mismo tiempo:

$$L_A = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l \cdot \varepsilon_1 \quad (8.19)$$

$$L_B = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l \cdot \varepsilon_2 \quad (8.20)$$

donde:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\delta_{min}} + \frac{1}{\delta_{max}} \right) \quad (8.21)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\delta_{min}} - \frac{1}{\delta_{max}} \right) \quad (8.22)$$

Para las máquinas de rotor liso y por consiguiente también las máquinas de imanes permanentes y del mismo modo nuestra máquina, el espesor del entrehierro es constante en todo el generador, por lo que tenemos:

$$\varepsilon_2 = 0 \quad (8.23)$$

con lo cual:

$$L_B = 0 \quad (8.24)$$

por consiguiente:

$$L_{md} = L_{mq} = \frac{3}{2} \cdot L_A \quad (8.25)$$

$$L_d = L_q = L_s \quad (8.26)$$

Al final, se reduce a un solo parámetro, que representa la inductancia por fase el estator del generador.

De este modo se puede volver a representar las ecuaciones que relacionan tensiones e intensidades en ejes d-q teniendo en cuenta lo anteriormente descrito:

$$u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot \psi_q - R_s \cdot i_d \quad (6.27)$$

$$u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot \psi_d - R_s \cdot i_q \quad (6.28)$$

siendo:

$$\psi_d = \phi_m - L_s \cdot i_d \quad (8.29)$$

$$\psi_q = -L_s \cdot i_q \quad (8.30)$$

8.7 Carga del generador

Se considera el generador síncrono lineal de imanes permanentes y considerando una carga trifásica equilibrada, cuyo valor de carga resistiva es R_c y el valor de inductivo es L_c , las ecuaciones que relacionan las intensidades y las tensiones en el plano de los ejes primitivos abc , se representan a continuación:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_c & 0 & 0 \\ 0 & L_c & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_c & 0 & 0 \\ 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8.31)$$

Se realiza la transformación de Park en la representación de las ecuaciones en ejes primitivos, para representarlas en el dominio dq :

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (8.32)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R_c \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_c \left[\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right] \quad (8.33)$$

de donde obtenemos:

$$u_d = R_c \cdot i_d + L_c \cdot \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot i_d + L_c \frac{di_d}{dt} \quad (8.34)$$

$$u_q = R_c \cdot i_q + L_c \cdot \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot i_q + L_c \frac{di_q}{dt} \quad (8.35)$$

Para poder realizar la simulación del sistema y simplificar los cálculos que se realizan, tomaremos una simplificación más del sistema, se toma como la carga de generador como una carga puramente resistiva, con lo cual tenemos:

$$u_d = R_c \cdot i_d \quad (8.36)$$

$$u_q = R_c \cdot i_q \quad (8.37)$$

Ahora se sustituye en las ecuaciones del PMSLG que fueron desarrolladas con anterioridad, las ecuaciones de carga que hemos desarrollado en el apartado anterior, nuestro objetivo en este apartado es desarrollar las funciones hasta obtener las ecuaciones que serán utilizadas para la simulación del sistema.

Se sustituye flujos en las ecuaciones generales de tensión e intensidad que desarrollamos anteriormente, tenemos:

$$u_q = R_c \cdot i_q \quad (8.37)$$

$$u_q = R_c \cdot i_q \quad (8.38)$$

$$u_d = \frac{d(-L_s \cdot i_d + \phi_m)}{dt} - \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot L_s \cdot i_q - R_s \cdot i_d \quad (8.39)$$

$$u_q = \frac{d(-L_s \cdot i_q)}{dt} + \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot (-L_s \cdot i_q + \phi_m) - R_s \cdot i_q \quad (8.40)$$

Se sustituye a su vez las intensidades de estas expresiones por la relación tensión intensidad obtenida para la resistencia de carga obtenemos:

$$u_d = \frac{d}{dt} \left(-L_s \cdot \frac{u_d}{R_c} + \phi_m \right) - \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot L_s \cdot \frac{u_q}{R_c} - R_s \cdot \frac{u_d}{R_c} \quad (8.41)$$

$$u_q = \frac{d}{dt} \left(-L_s \cdot \frac{u_q}{R_c} \right) + \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot \left(-L_s \cdot \frac{u_d}{R_c} + \phi_m \right) - R_s \cdot \frac{u_q}{R_c} \quad (8.42)$$

Agrupando términos, e integrando las ecuaciones con el fin de representarlas en su forma integral ya que Matlab opera de forma más eficaz con operaciones integrales que con operaciones derivativas, se opta por representar las ecuaciones del sistema de la forma más adecuada para su posterior simulación. Las ecuaciones en su forma integral son:

$$u_d = \frac{1}{L_s} \int \left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot u_q - (R_s + R_c) \cdot u_d \right) \quad (8.43)$$

$$u_q = \frac{1}{L_s} \int \left(R_c \cdot \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot \phi_m - (R_s + R_c) \cdot u_q - \frac{2\pi}{\tau_p} \cdot v_e \cdot u_d \right) \quad (8.44)$$

El diagrama de bloques que se muestra en la figura 8.1 es el utilizado en Simulink y que representa las ecuaciones anteriores, el cual será utilizado para la simulación de las mismas para obtener los datos del sistema es:

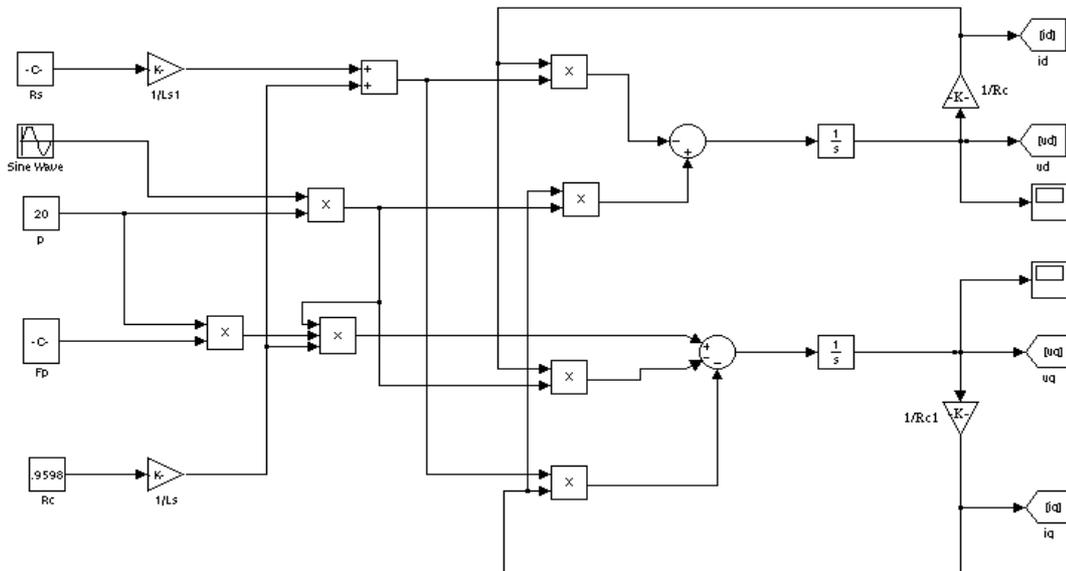


Figura 8.1. Diagrama de bloques para la simulación del generador.

8.8 Transformación de Intensidades y tensiones a fase a-b-c del PMSLG

Una vez que hemos obtenido en apartado anterior las intensidades y las tensiones en ejes d-q del generador lineal de imanes permanentes, se procederá a la transformación de estas magnitudes a ejes a-b-c mediante el uso de la transformada inversa de Park que explicamos en uno de los capítulos anteriores. Una vez realizada esta transformación, observaremos la respuesta trifásica del sistema, donde se representaran los valores de tensión e intensidad.

Como hemos dicho para la representación en ejes a-b-c se usara la transformada inversa, lo cual provoca un cambio de coordenadas desde el dominio ortogonal al dominio trifásico. La transformación a realizar es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (8.45)$$

Siendo la transformada inversa de Park la representada en la siguiente matriz:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (8.46)$$

Aplicando la matriz a las tensiones de cuadratura:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (8.47)$$

obtenemos:

$$u_a = u_d \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) + u_q \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) \quad (8.48)$$

$$u_b = u_d \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) + u_q \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (8.49)$$

$$u_c = u_d \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) + u_q \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (8.50)$$

El diagrama de bloques de Simulink que representa la transformación a tensiones trifásicas es el siguiente:

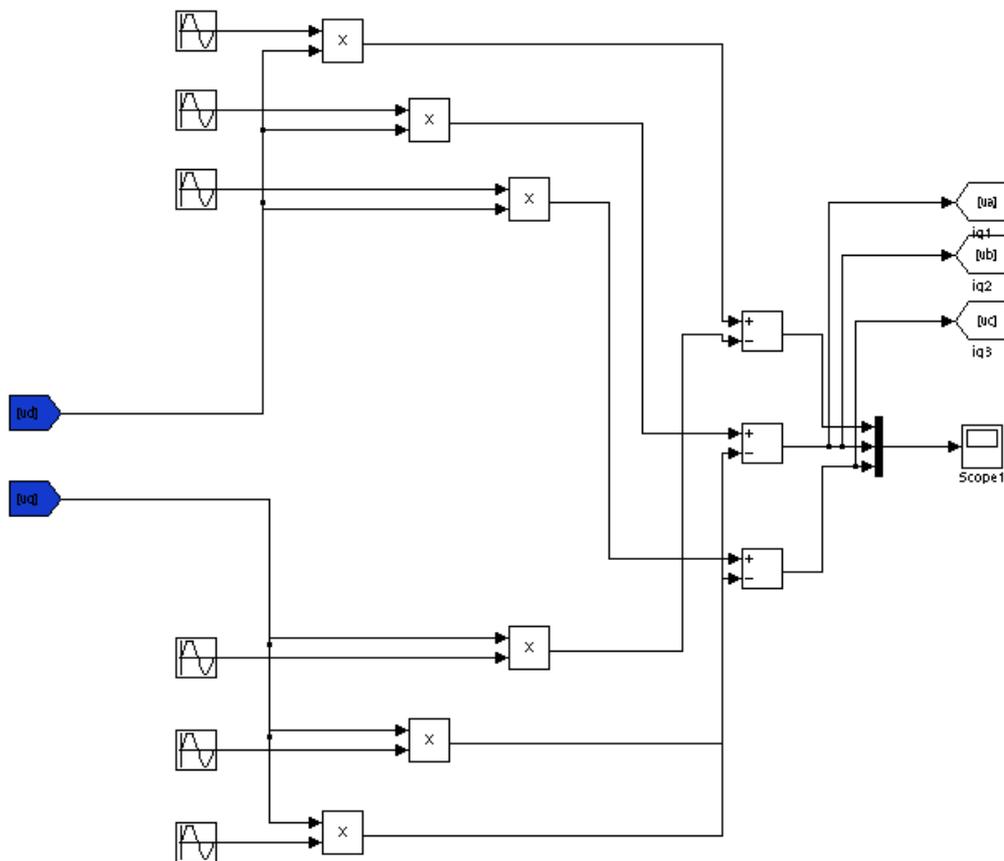


Figura 8.2. Diagrama de bloques para transformar las tensiones a coordenadas trifásicas

Aplicando el mismo proceso a las intensidades en ejes de cuadratura se obtiene, del mismo modo, las intensidades trifásicas del sistema, primero aplicamos la transformada inversa de Park:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (8.51)$$

obtenemos:

$$i_a = i_d \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) + i_q \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e\right) \quad (8.52)$$

$$i_b = i_d \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (8.53)$$

$$i_c = i_d \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} \cdot x_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (8.53)$$

El diagrama de bloques de Simulink que representa la transformación a intensidades trifásicas es el siguiente

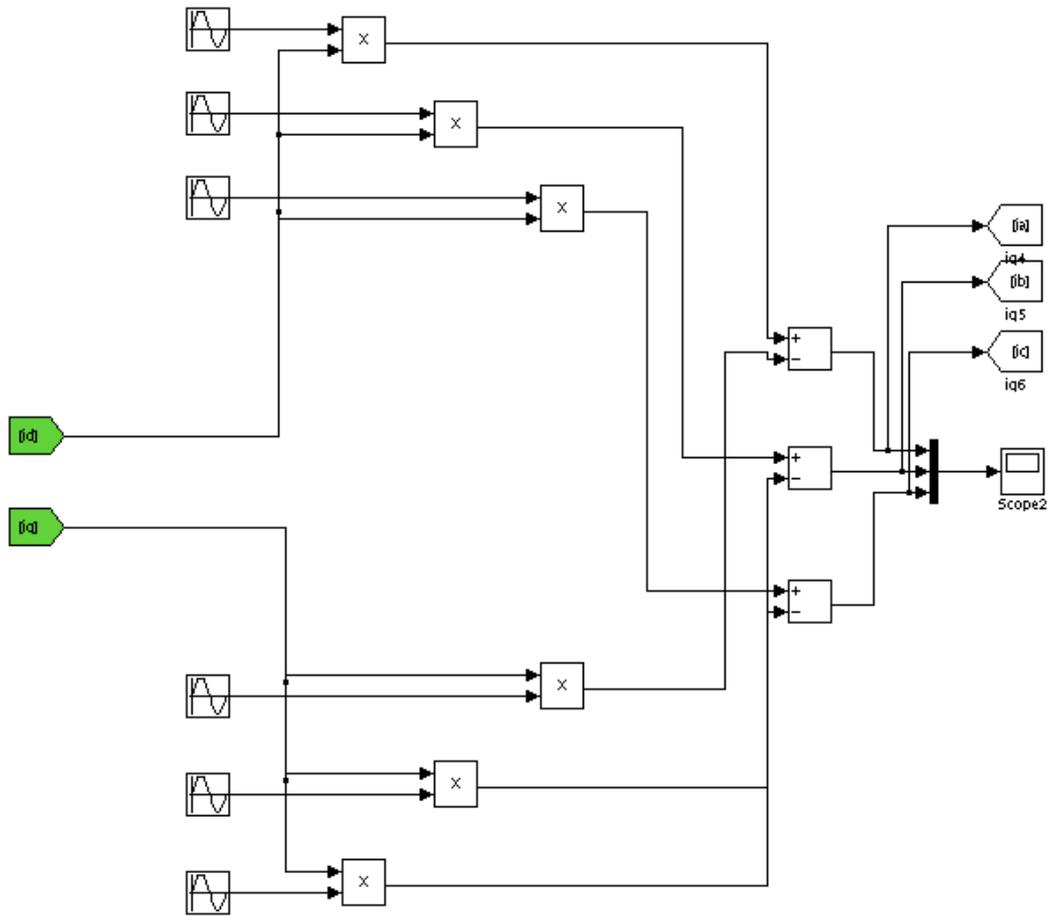


Figura 8.3. Diagrama de bloques para transformar las intensidades a coordenadas trifásicas.

8.9 Potencias del generador lineal síncrono de imanes permanentes

El balance de potencias en el generador, se representa por la siguiente expresión:

$$P_u = P_e - P_{cu} - P_{mag} \quad (8.54)$$

donde:

- P_u : Potencia útil instantánea del generador en bornes.
- P_e : Potencia electromagnética o del entrehierro.
- P_{cu} : Perdidas efecto Joule en los devanados.
- P_{mag} : Potencia de energía magnética almacenada.

Teniendo en cuenta las simplificaciones tomadas al inicio del capítulo, en la cual dijimos que no se tiene en cuenta la saturación de los circuitos magnéticos. Lo que es lo mismo, la histéresis magnética, las corrientes de Foucault y la dispersión del campo magnético y por lo cual no se tiene en cuenta la pérdida de potencia por la variación de la energía magnética almacenada.

De este modo, el balance de potencia queda de la siguiente forma:

$$P_u = P_e - P_{cu} \quad (8.55)$$

En los pasos siguientes se desarrolla las expresiones para las diferentes potencias, que intervienen en el balance de potencias.

La expresión que define la potencia útil del sistema tanto en términos de tensión e intensidad trifásica como en términos de los ejes d-q. También se expresa el diagrama de bloques que se usara en Simulink para la simulación:

$$P_u = (V_a \cdot i_a + V_b \cdot i_b + V_c \cdot i_c) = \frac{3}{2} \cdot (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \quad (8.56)$$

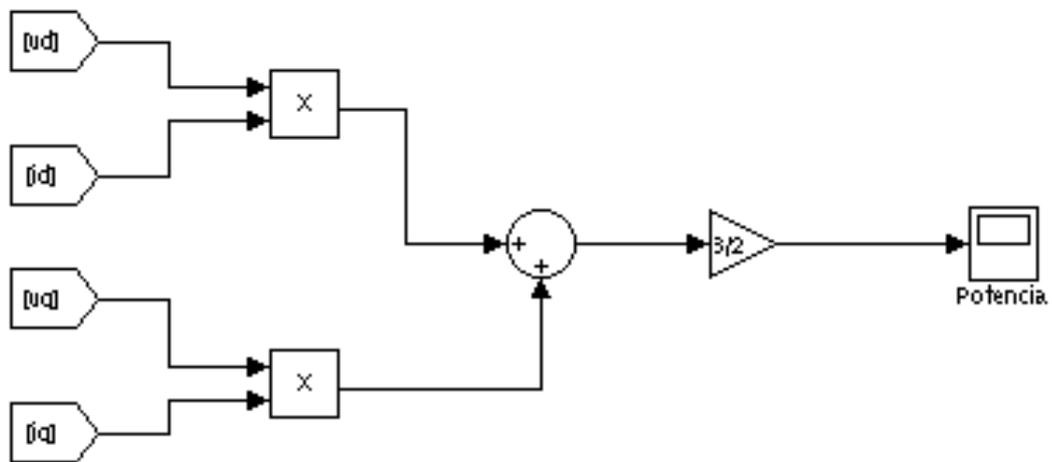


Figura 8.4. Diagrama de bloques para el cálculo de la potencia del generador.

Las pérdidas debidas al cobre, al igual que en el apartado anterior expresadas en ambos sistemas de ejes y el diagrama de bloques de Simulink que se usara para la simulación, es la siguiente:

$$P_{cu} = \frac{3}{2} \cdot (i_d^2 \cdot R_s + i_q^2 \cdot R_s) \quad (8.57)$$

9. SIMULACIONES

Tomando las ecuaciones representadas en el capítulo anterior e implementándolas en los diagramas de bloques también expuestos en el anterior capítulos, se prosigue con la simulación del generador, para ello será necesario usar una variable de entrada, la cual, controla el movimiento del trasladador, de la expresión (5.15) se obtenía que esta velocidad concuerda con la velocidad de la ola. Para la simulación debemos contemplar la velocidad vertical de la ola, expresión (3.10) y tomando los datos expresados en el capítulo 3, se obtienen dos olas diferentes, la ola de velocidad máxima y la ola de velocidad promedio, las cuales vienen expresadas mediante las siguientes funciones:

$$w_{m\acute{a}x} = 2 \sin(0,6 t) \quad (9.1)$$

$$w_{prom} = 0,5 \sin(0,6 t) \quad (9.2)$$

9.1 Simulación de las tensiones trifásicas

Haciendo uso del diagrama de bloques de la figura 8.2, se obtienen las tensiones trifásicas cuando el generador está sometido a la acción de una ola promedio o a la ola máxima considerada.

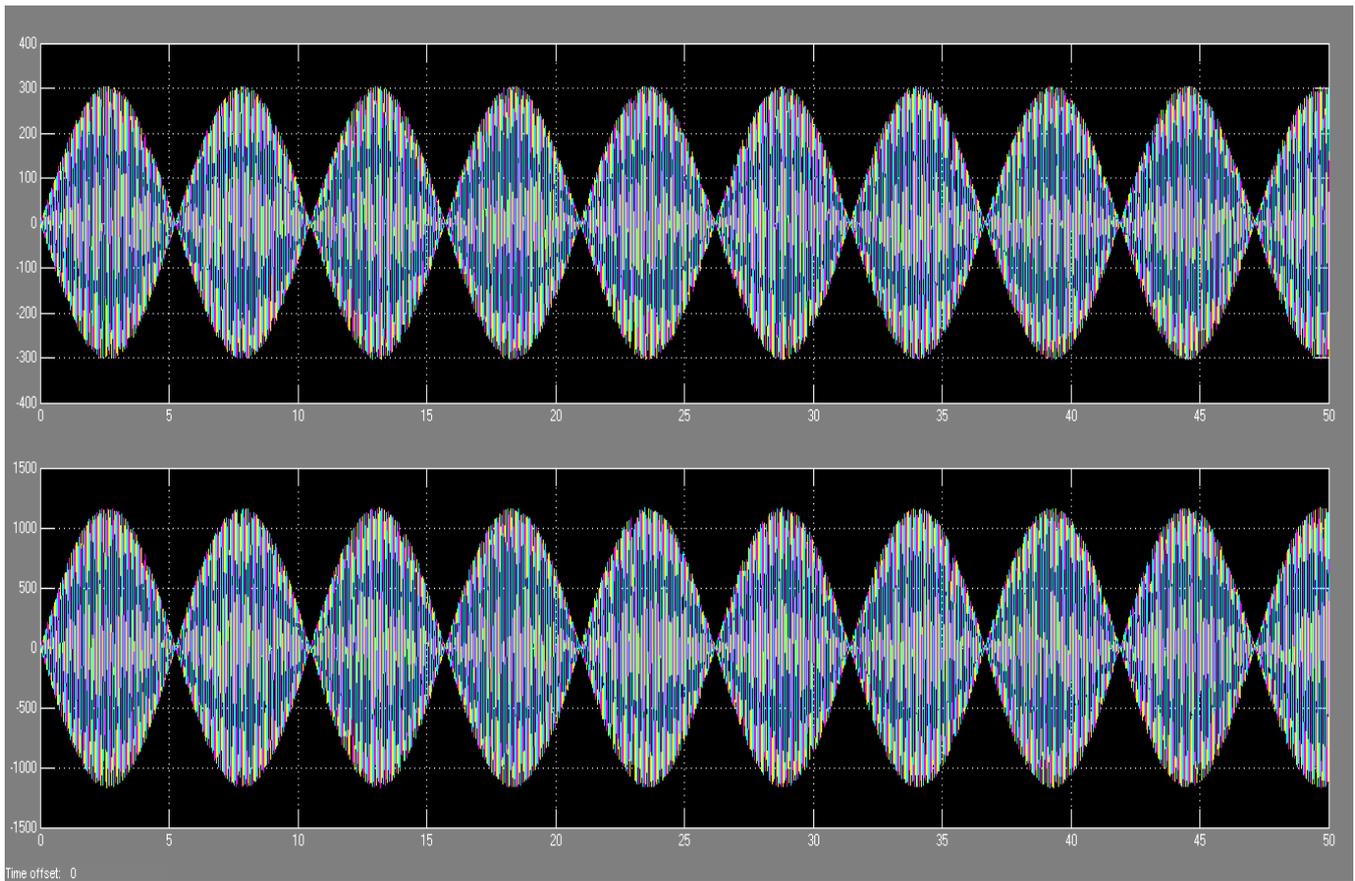


Figura 9.1. Simulación de las tensiones trifásicas del generador.

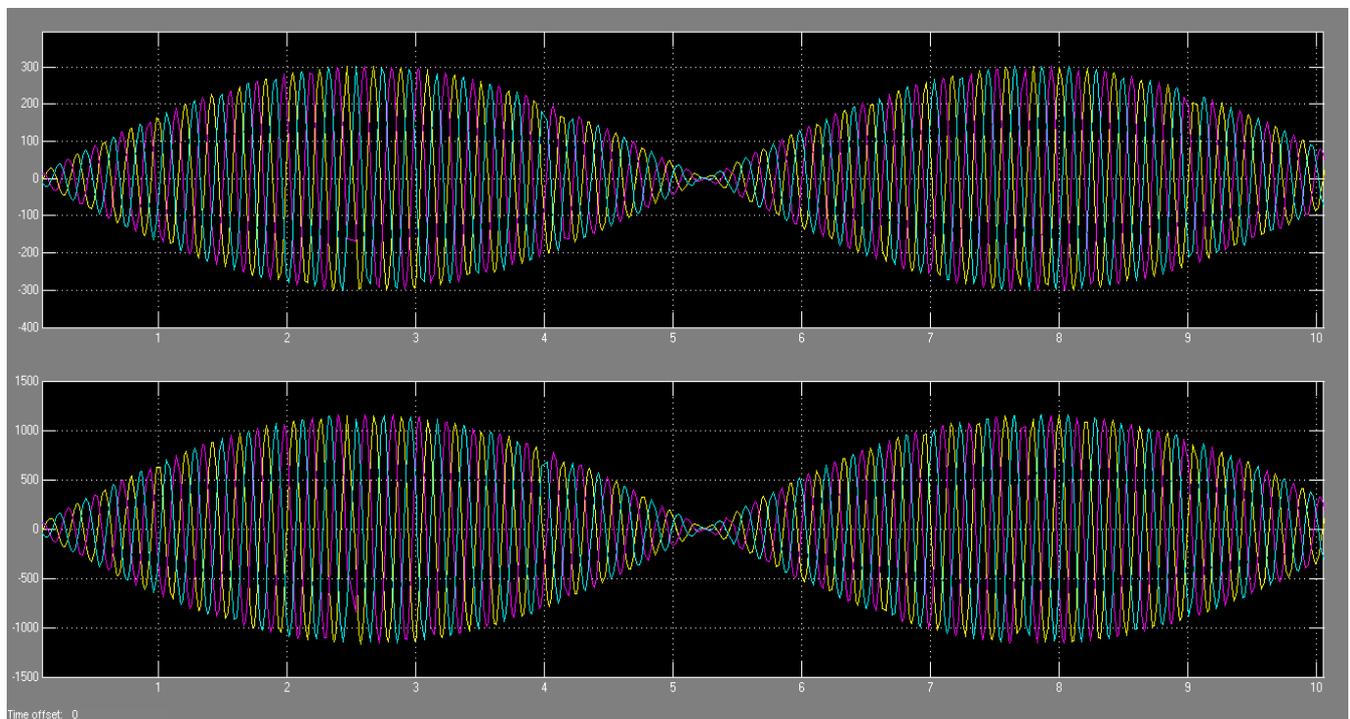


Figura 9.2. Ampliación de la simulación de las tensiones trifásicas.

9.2 Simulación de las intensidades trifásicas

Haciendo uso del diagrama de bloques de la figura 8.3, se obtiene las intensidades trifásicas cuando el generador está sometido a la acción de una ola promedio o a la ola máxima considerada.

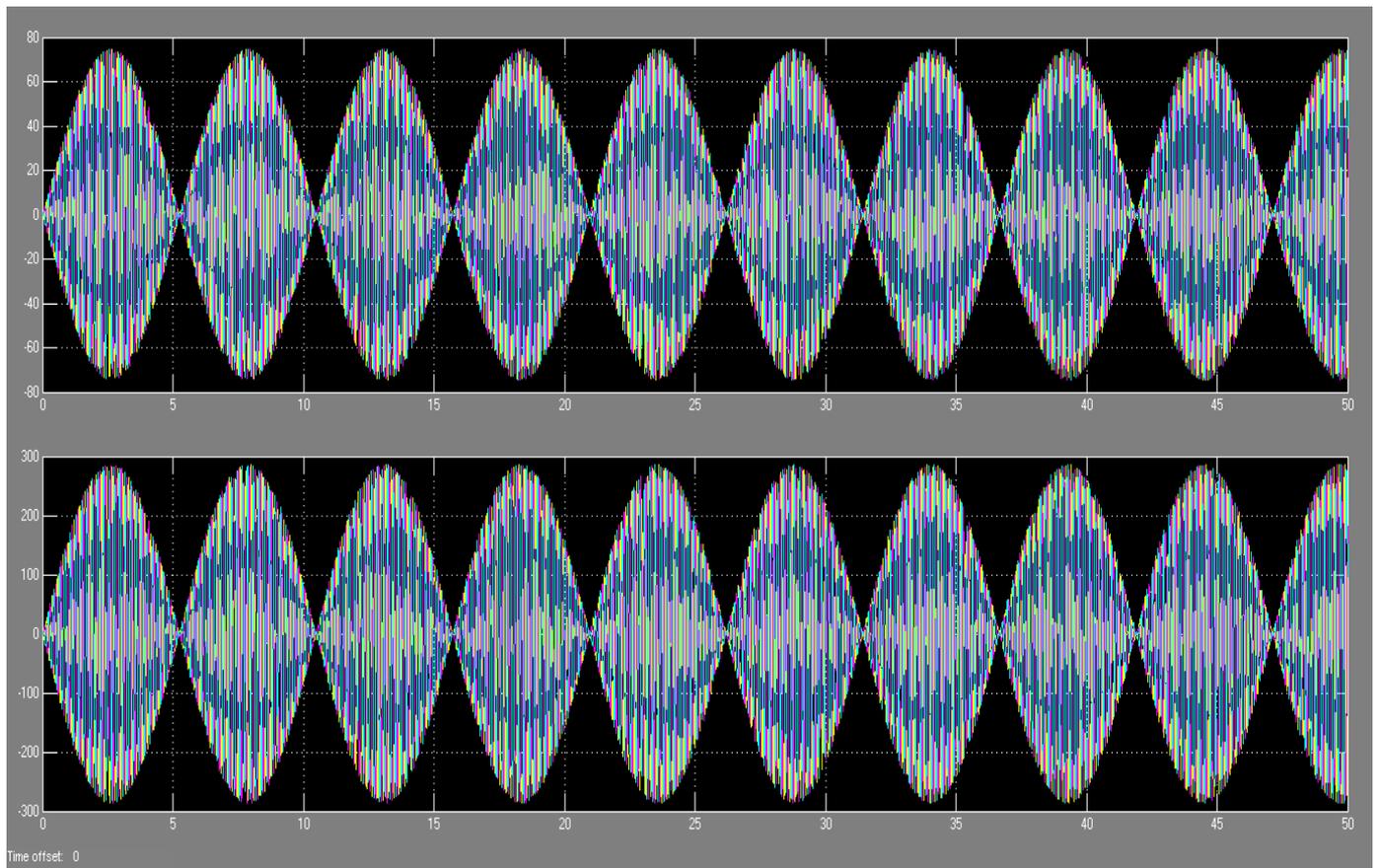


Figura 9.3. Simulación de las intensidades trifásicas del generador.

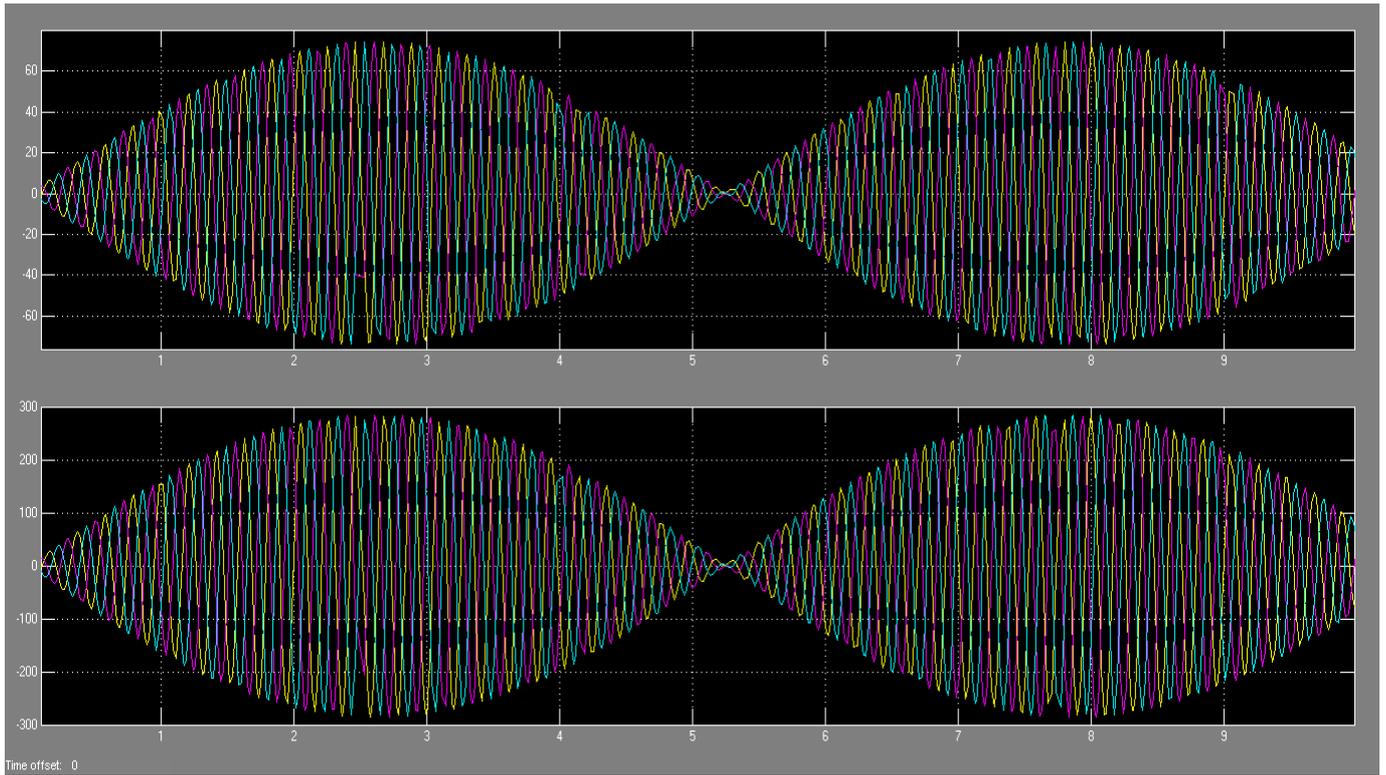


Figura 9.4. Ampliación de la simulación de las intensidades trifásicas.

9.3 Simulación de la potencia del generador

Haciendo uso del diagrama de bloques de la figura 8.4, se obtiene la potencia producida por el generador cuando se encuentra sometido a la acción de una ola promedio o a la ola máxima considerada.

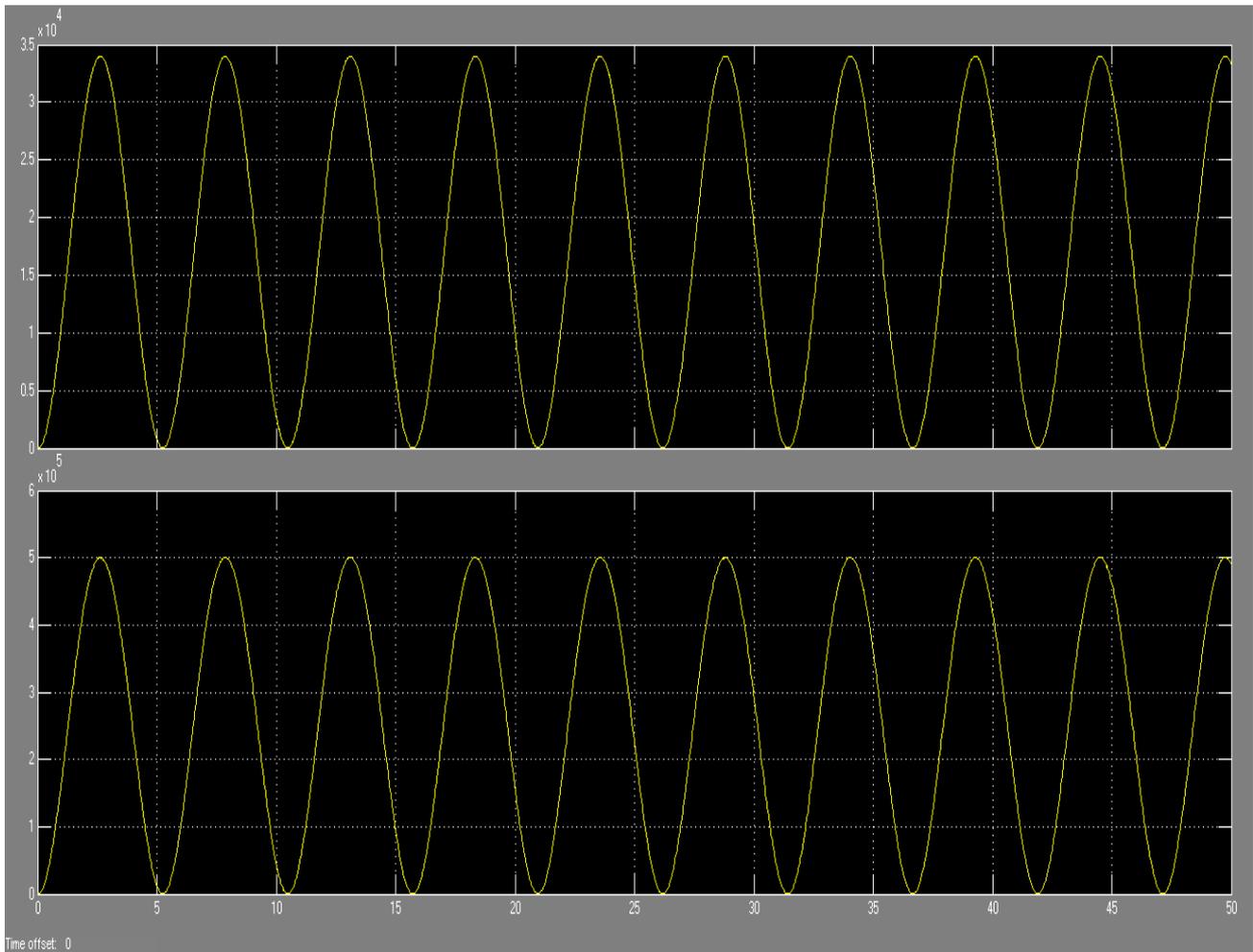


Figura 9.5. Potencia del generador

10. CONCLUSIONES

Desde el comienzo de este proyecto se ha marcado la necesidad de la evolución de energías alternativas a las fósiles, la integración de este tipo de energías en nuestro sistema energético actual y con desarrollo de las tecnologías y con el tiempo ir ganando peso dentro del mix energético. Se han dado datos del inmenso potencial de los océanos como fuente de energía, además, de contar con uno de los mares más propicios para dicho aprovechamiento debido a la gran regularidad de las olas y su tamaño, hace de la energía undimotriz como una de las más adecuadas aprovecharnos de este gran potencial.

Dentro de las diversas formas de explotación de la energía de las olas que se expusieron como tecnologías ya existentes, se optó por este sistema de generación lineal mediante la inducción de un campo magnético mediante imanes permanentes porque sus propiedades, la hacen una de las más adecuadas, presenta grandes ventajas frente a otros sistemas offshore, ya que muchos cuentan con sistemas hidráulicos los cuales son únicamente un paso intermedio entre la energía de las olas y la producción de energía eléctrica, lo cual ocasiona pérdidas, además, es un punto más a la hora de realizar mantenimiento este se ha considerado un punto de gran importancia ya que los sistemas estarán dispuestos en alta mar, sumergidos y su acceso es limitado por lo que reducir el mantenimiento a realizar es un gran punto a su favor, por este motivo la creación del campo mediante imanes permanentes reduce su mantenimiento.

El concepto de generador lineal se basa en que la velocidad de trabajo del generador está directamente impuesta por la velocidad de la ola, a tener en cuenta en el generador lineal son las altas eficiencias que presenta por encima del 90% de muchos casos y un mejor comportamiento en bajas velocidades que las maquinas rotativas una de las condiciones que nos impulsó a la elección del generador lineal por encima del generador rotativo convencional.

Después de todo el análisis que se ha realizado de los diferentes tipos de energías undimotrices y de los generadores lineales se expresan a continuación las distintas conclusiones a las que se ha llegado y recomendaciones generadas durante la evolución del proyecto:

- La energía undimotriz no es una energía barata en estos momentos por lo que se requiere grandes inversiones que deben estar apoyadas directamente desde el ámbito gubernamental.
- Es una tecnología joven que todavía requiere de evolución, la construcción de pequeñas plantas es perfecta para su estudio operativo y mejora continua de la tecnología.
- Se deben de tener en cuenta las condiciones adversas del mar cuando se construyen es tipo de instalaciones, ya que requieren una gran inversión no puede permitirse que sufran grandes desperfectos por lo que hay que tener en cuenta las situaciones más agresivas a las que pueden estar sometidos y desarrollar sistemas de seguridad que preserven la instalación de los grandes temporales, al igual que los molinos eólicos son bloqueados cuando las condiciones de viento son perjudiciales.

- Sería interesante el desarrollo de un sistema en el que varíe la profundidad a la que nuestra boya está sumergida, en relación a la columna de agua que provoca el movimiento del sistema y que varía a lo largo de las mareas para que el movimiento total de la boya no se vea reducido.
- El plano económico no se puede dejar de lado, de este modo, se debe hacer un estudio del lugar en el que se vaya a realizar la instalación por lo que es aconsejable antes de construir un gran parque comenzar con la instalación de un único dispositivo que nos garantice que los estudios realizados sobre las condiciones marinas de la zona son correctos y que la producción eléctrica será la estudiada.
- Los generadores lineales nos presentan eficiencias más que aceptables pero para superar las bajas velocidades verticales que nos produce el oleaje hay que realizar generadores de grandes dimensiones para poder extraer potencias aceptables.
- Para optimizar estos sistemas de producción de energía sería interesante contar con un sistema de predicción de oleaje.
- Desde el punto de vista de transporte sería interesante el estudio de las diferentes formas de transporte en cuanto al transporte submarino se refiere puede ser interesante realizarlo en corriente continua, ya que esto minimiza pérdidas, para luego conectarlo a

la red, utilizando de nuevo electrónica de potencia para adecuarlo a las necesidades de la red.

- Se consigue una forma de onda más adecuada, de cara a su integración en red, mediante el uso de múltiples dispositivos de mediana potencia en lugar de un bajo número de estos de gran potencia.
- Al igual que la mayoría de energías renovables nos encontramos el gran problema de la disponibilidad de la energía, ya que pueden darse situaciones de mar en calma donde no se pueda producir o situaciones en el que la producción supere la demanda, por lo que sería interesante pensar en la utilización de elemento de acumulación de energía.
- La reducción de costes es una de las vías a atacar para aumentar la viabilidad económica, uno de los campos de acción debe ser el estudio de materiales alternativos a las metálicas o nuevas aleaciones que soportes las condiciones agresivas del mar en cuanto a vida útil en dicho medio se refiere.
- Hay que tener en cuenta que estamos colocando un sistema extraño dentro de un habita natural por lo que también habrá que tener en cuenta el impacto ecológico que provocamos e intentando minimizar el mismo en la medida de lo posible.

- Con todo lo expuesto el generador lineal para este tipo de aplicaciones solo es viable si se trata de una pequeña instalación, ya que estamos hablando de una tecnología por desarrollar pero con un gran potencial.

ANEXOS I: MATERIALES

Características del hierro

La tabla I.1 muestra las principales características del hierro seleccionado para ser utilizado en los cálculos de nuestro generador.

Tabla I.1.- Características del hierro.

Tipo	Acero eléctrico de grano no orientado
Denominación según EN10106	M250-50
Espesor	0,5 mm
Densidad	7,6 kg/dm ³
Resistividad	59 Ω /mm ² m
Perdidas 50Hz, 1,5 T:	
- Por histéresis, P_h	1,734 W/kg
- Por corrientes de Foucault, P_F	0,646 W/kg
Factor de apilamiento, k_{Fe}	0,97

Curva de inducción del hierro									
Intensidad de campo, H_{max} (A/m)	30,6	40,7	47,9	54,5	61,3	69	77,8	88,6	102
Inducción, B_{max} (T)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Intensidad de campo, H_{max} (A/m)	120	145	186	278	584	1600	3680	6890	116000
Inducción, B_{max} (T)	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

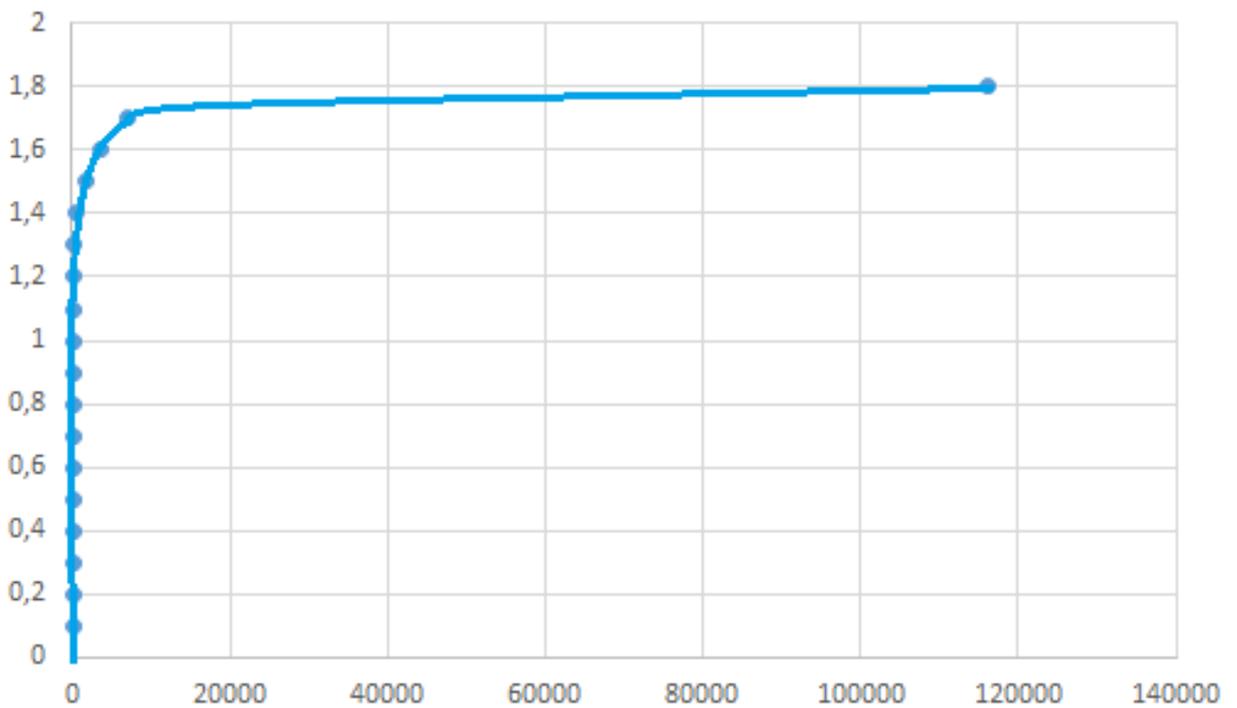


Figura I.1. Curva de inducción del hierro

La curva de inducción del hierro se calcula a partir de un ajuste polinomial:

$$H = 131,8B, \quad \text{para } 0 \leq B \leq 1,1 \text{ T}$$

$$H = 50242,86 B^3 - 179621,40 B^2 + 214204,90 B - 85011,66 \quad \text{para } B \geq 1,1 \text{ T}$$

Características del cobre

La tabla I.2 muestra las principales características del cobre utilizado para los cálculos del devanado del generador.

Tabla I.2.- Características del cobre.

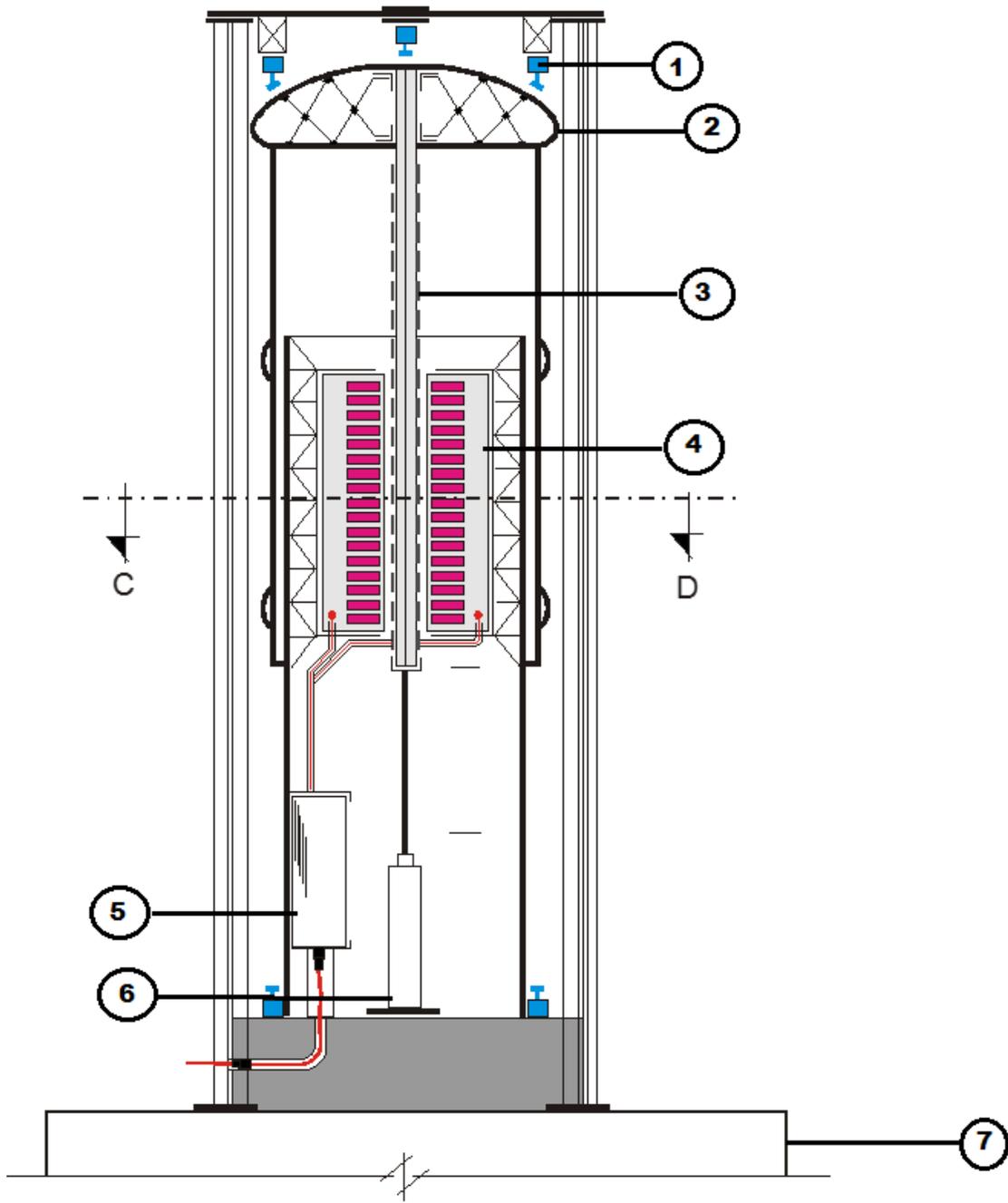
Tipo	Cobre electrolítico comercial
Resistividad a 20°	1/56 mm ² /m
Coeficiente de temperatura	68 10 ⁻⁶ mm ² /m°C
Densidad	8,94 g/cm ³

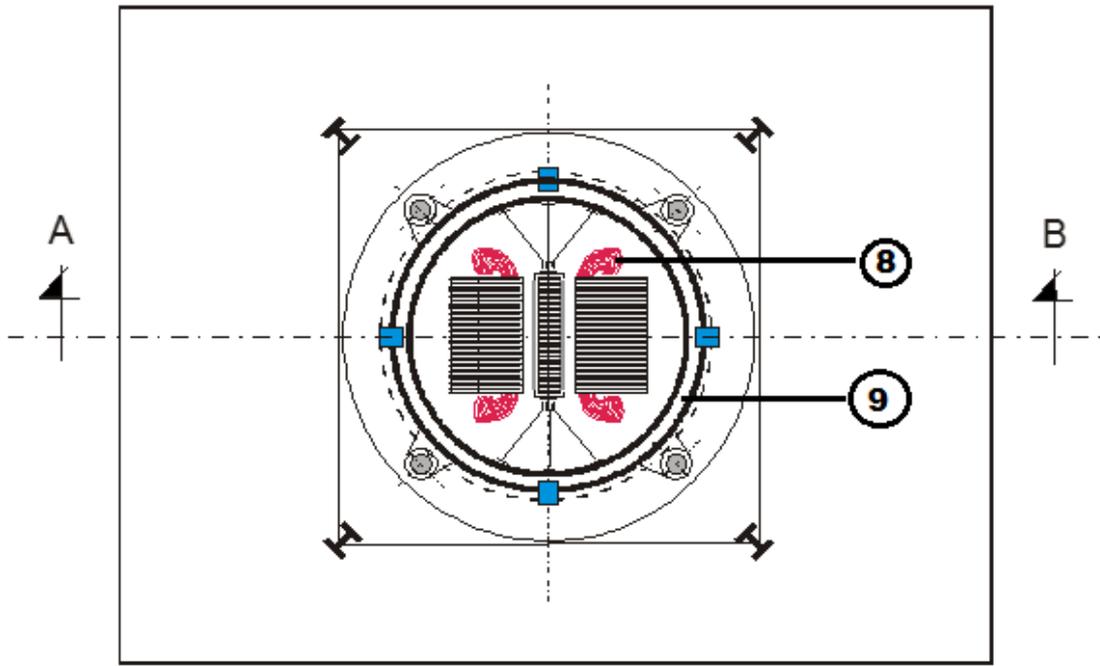
ANEXOS II: PLANOS

Plano 1: OWS

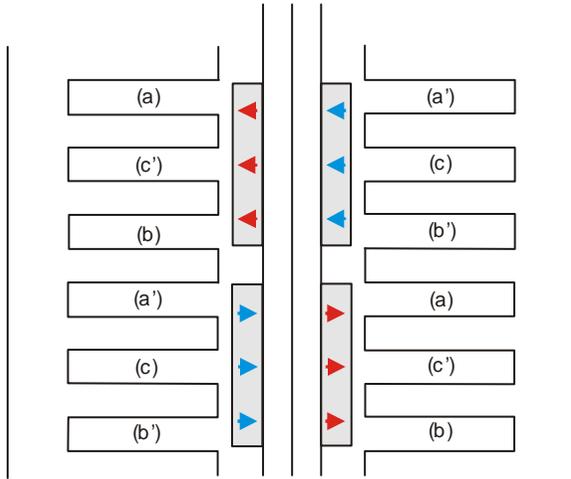
En los siguientes planos se observa el alzado y planta del OWS, en los cuales se indican los principales elementos del dispositivo. Los cuales son:

1. Sensores y protecciones mecánicas.
2. Flotador.
3. Traslador del generador.
4. Estator del generador.
5. Caja de electrónica de potencia.
6. Amortiguamiento hidráulico del traslador.
7. Cimentación de la estructura en el lecho marino.
8. Cabezas de las bobinas.
9. Estructura externa del OWS.





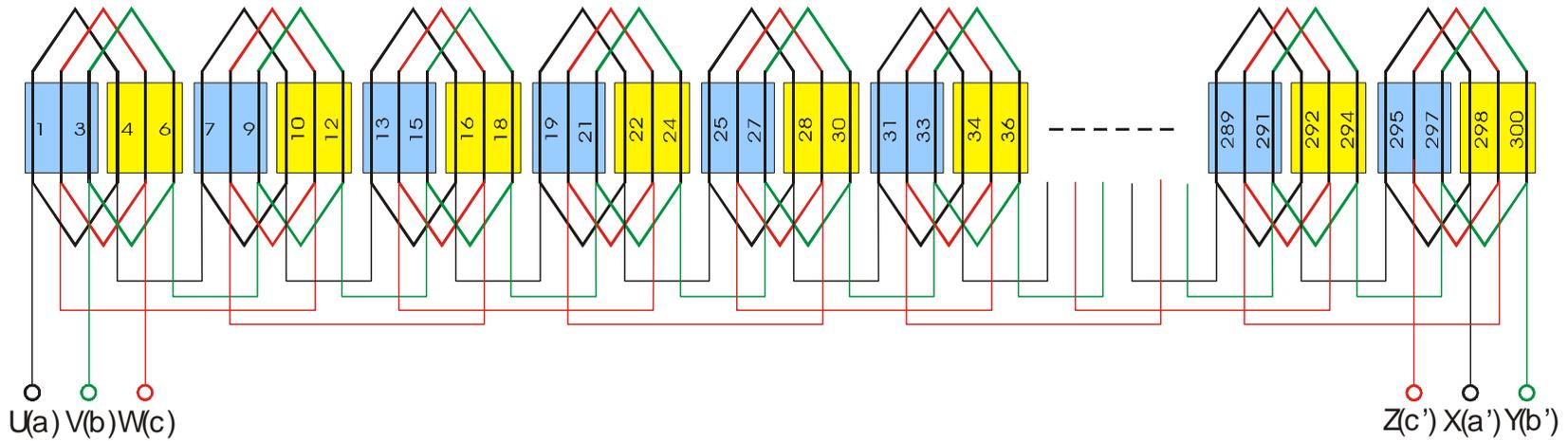
Sección del generador lineal de doble cara



Características devanado de una cara

- Número de polos, $2p$: 100
- Número de ranuras, Q : 300
- Número de ranuras por polo y fase, q : 1
- Número total de grupos, G : 150
- Número de bobinas por grupo, B_G : 1
- Número total de bobinas, B : 150
- Número de bobinas por fase, B_p : 50
- Número de bobinas por fase en serie, B_{ps} : 50
- Número de ranuras de amplitud, Y_a : 2
- Pasos de bobina Y_1 : 1, Y_3 : 3, Y_5 : 5
- Paso polar, Y_p : 3
- Paso principios de fase, Y_{120} : 2
- Número de espiras por bobina, N_B : 8
- Sección cobre de la espira S_{Cu} 30 mm²

Devanado trifásico de una cara, por polos consecuentes, concentrado, bobinas superpuestas, de una capa.



Plano 4: Situación geográfica del OWS

En el plano de situación hay indicadas ciertas distancias de interés, como son:

- Distancia mínima en línea recta a tierra desde la situación del OWS: 1,5 km.
- Longitud del cable submarino desde el OWS hasta una subestación: 2,3 km.
- Ruta y distancia puerto (puerto de Suances o Requejada): 4,8 y 10 km respectivamente.



ANEXOS III: ESTIMACIONES DE OTROS PESOS Y COSTES

El Coste del material activo del generador en relación a su peso es el referido en la tabla III.1, con estos precios del material y habiendo sido calculados los pesos de los diferentes elementos del generador, realizamos una aproximación del coste en la tabla III.2 de los diferentes elementos y del total del generador:

Tabla III.1.- Coste unitarios de los materiales.

<i>Coste del hierro (€/kg)</i>	3
<i>Coste del cobre (€/kg)</i>	10
<i>Coste de los imanes (€/kg)</i>	30

Tabla III.2.- Coste de los elementos del generador.

<i>Coste del hierro (€)</i>	5352,53
<i>Coste del cobre (€)</i>	7086,23
<i>Coste de los imanes (€)</i>	30092,7
Coste total (€)	42531,47

Para hacernos una idea del peso total de la estructura del OWS realizamos una interpolación con los valores obtenidos de una planta piloto a la que se hace referencia en [Brito e Melo, 2002]

Tabla III.3.- Estimación del peso del OWS.

Elemento	Peso (t)
<i>Flotador</i>	68
<i>Estructura guía</i>	60
Peso total	128

ANEXO IV: CONEXIÓN A LA RED

Con el fin de conectar la energía eléctrica generada por el dispositivo al sistema eléctrico que interese, la tensión y la potencia saliente del parque de olas necesitan un proceso electrónico. La primera etapa es un rectificador, que convierte la salida del generador en alterna a continua; seguidamente hay un enlace de continua (o cable de transmisión) que termina en un convertidor DC/AC, o lo que es lo mismo, una fuente inversora.

En el modelo a escala real instalado en Portugal se utilizó una fuente inversora de corriente (CSI, Current Source Inverter), pero también cabe la posibilidad de utilizar una fuente inversora de tensión (VSI, Voltage Source Inverter), como se muestra en el esquema de la figura IV.1. En este apartado de comentaran las diferencias entre utilizar ambos sistemas.

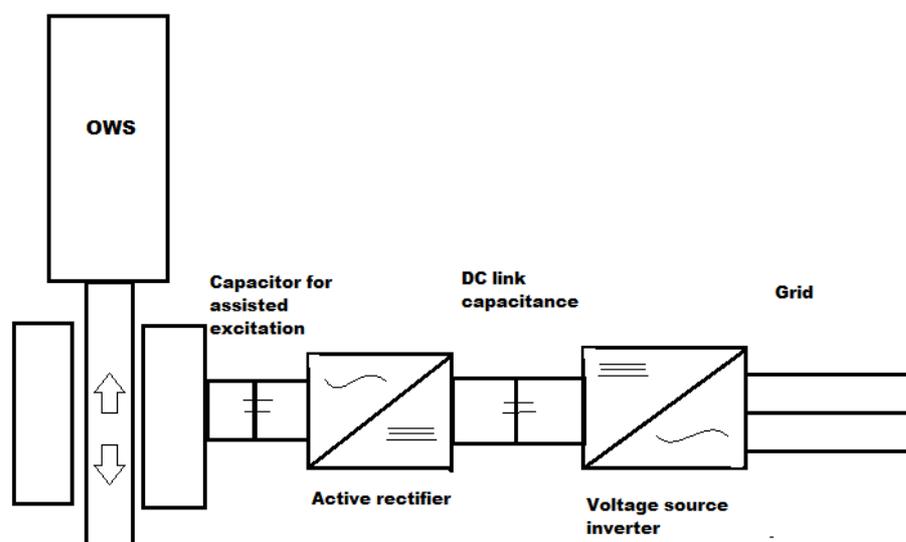


Figura IV.1. Configuración básica de la conexión a la red de un dispositivo de energía undimotriz con generación directa.

Ventajas de la fuente CSI frente a VSI:

- No necesita una información precisa de la posición del traslator
- Es más barata
- Es más eficiente, pues las pérdidas por conducción y por conmutación son menores

La elección de este inversor para el modelo a escala real se debió, principalmente, a su primera ventaja, puesto que desarrollar un sector de posición preciso del dispositivo era muy caro y requerida mucho tiempo.

Ventajas de la fuente VSI frente a CSI:

- Permite controlar el factor de potencia en el lado de la red
- Permite conseguir una intensidad senoidal en el lado de la red
- Permite aumentar la fuerza del generador
- Permite controlar el factor de potencia del generador y, de esta manera, reducir las pérdidas del generador y los cables
- Permite conseguir que las corrientes en el generador sean senoidales

A continuación se comparan las dos fuentes inversoras, asumiendo una tensión máxima de línea de 3000V y una corriente máxima de 400 A; ambas con variación senoidal.

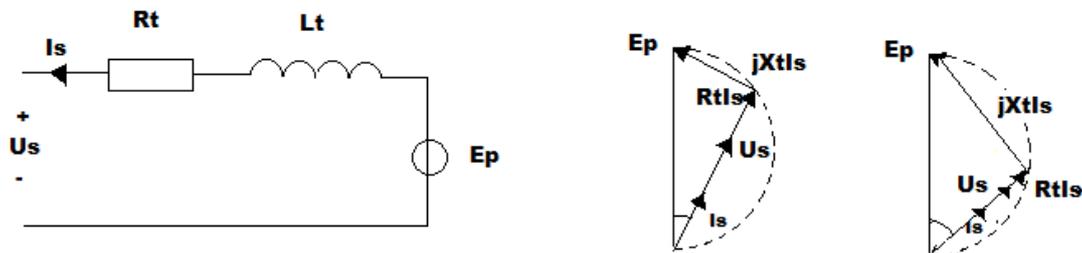


Figura IV.2. Circuito equivalente de PMLSM y diagrama de fasores, con CSI.

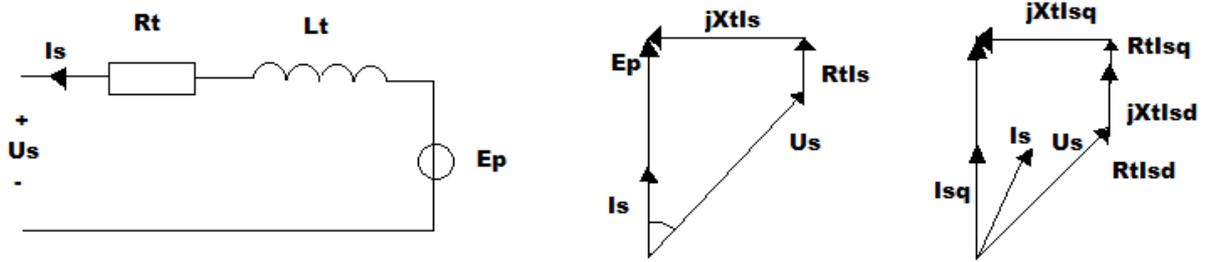


Figura IV.3. Circuito equivalente de PMLSM y diagrama de fasores, con CSI.

En el inversor CSI, en el lado del generador es un puente rectificar de diodos modelado como una carga resistiva (primer diagrama fasorial de la figura IV.2). Para esta carga, la máxima fuerza aparece cuando la corriente retrasa 45° a la tensión en el inversor VSI la corriente se mantiene por fase con E_p para minimizar las pérdidas en el cobre. Si la tensión de salida es mayor que la nominal, la corriente se le añade una componente negativa a la dirección del eje d (diagrama fasorial de la derecha figura IV.3).

También se ha calculado la eficiencia de ambos inversores, definida como la energía eléctrica cedida a la red dividida por la energía mecánica utilizada por el generador. Los resultados son los siguientes:

- CSI: la energía anual entregada a la red es 1,64 GWh. Si se aumenta la circulación de corriente, el rendimiento no mejora (con 400 A se extrae la máxima potencia).
- VSI: la energía anual entregada a la red es de 1,94 GWh, lo que supone un aumento del 18% respecto al sistema CSI. Esta diferencia de rendimientos se debe a la combinación de una fuerza y una eficiencia mayor. Aunque un aumento de corriente no implique mejores rendimientos, la fuerza del generador sí que aumenta.

A modo de conclusión, se puede afirmar que hay razones suficientes para utilizar el inversor VSI frente al CSI, pues mejora el factor de potencia, las formas de onda de la corriente, la eficiencia y la fuerza dl generador, de modo que el rendimiento anual aumenta un 18%.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Aaron H. V. Novel Control of a Permanent Magnet Linear Generator for Ocean Wave Energy Applications
- [2] Bravo Moya, A. N. Sistema de conversión mecánica eléctrica para un generador undimotriz.
- [3] Andolz Bielsa, J. Calculo y diseño de un motor lineal tubular de imanes permanentes.
- [4] Bhag, S; et al. Electric Machiner and transformers.
- [5] Chapman, S. J. Máquinas eléctricas. Mc Graw Hill,2000.
- [6] Corrales Martín, J. Calculo industrial de máquinas eléctricas.
- [7] Eriksson, M. Modelling and experimental verification of direct wave energy conversion.
- [8] Fernández Chozas, Julia. Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para generación de electricidad. Proyecto Fin de Carrera. UPM. Septiembre, 2008
- [9] Fernández Diez, P. Energía de las olas.
- [10] Fraile Mora, J. Máquinas eléctricas.

- [11] Fitzgerald, A.E; et al. Máquinas eléctricas.
- [12] Gómez León, D. Análisis de los generadores de accionamiento directo en tecnología undimotriz.
- [13] González Morales, L. G. Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable
- [14] González Cubrero, J. Análisis de los requisitos eléctricos para el diseño de un parque offshore de energía undimotriz.
- [15] H. Polinder; et al. Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator.
- [16] Ibáñez Martín, M. Generador de flujo axial estatorico de imanes permanentes.
- [17] IDAE ; Evaluación del Potencial de la energía de las olas. Estudio Técnico PER 2011-2020.
- [18] Joao M.B.P. Cruz; et al. Sea state characterisation of the test site of an offshore wave energy plant.
- [19] Méndez Sánchez, P. Fundamentos para el dimensionamiento eléctrico de un alternador de imanes permanentes.
- [20] R. Torres, Carlos. Mecánica de Olas. iio/aubc.2008.
- [21] Red eléctrica de España [En línea]. <http://www.ree.es/en>
- [22] Rodríguez Pozueta, M.A. Campos magnéticos de dispersión. 2011
- [23] Sá da Costa, José; et al. Modeling of an ocean waves power device AWS

- [24] Sara Hoya Arika, Sara. Diseño eléctrico de una boya para energía olamotriz.
- [25] Suárez Arrabal, J.R. Concepción, dimensionamiento y simulación de generador undimotriz para boya marina.
- [26] Szabó, L; et al. Novel permanent magnet tubular linear generator for wave energy converters.
- [27] Valério, Duarte; et al. Optimisation os wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing
- [28] Vanfretti, L. Modelado y simulación de la máquina síncrona y su operación en sistemas de potencia.
- [29] Vates Aviles, A. Sistemas de conversión de la energía de las olas.
- [30] Wikipedia. [En línea] <http://www.wikipedia.org>