



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN
CON ENERGIA UNDIMOTRIZ”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTA:

JUAN DAVID MONTEJO ENCINO

ASESOR DE TESIS:

**DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
DR.GILBERTO GONZALEZ AVALOS**

MORELIA, MICHOACAN, FEBRERO DEL 2018





**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO**



100 años

**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**
Cuna de héroes, crisol de pensadores

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN CON
ENERGIA UNDIMOTRIZ”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

QUE PRESENTA

JUAN DAVID MONTEJO ENCINO

ASESOR

DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

DR. GILBERTO GONZALEZ AVALOS

MORELIA, MICHOACAN

FEBRERO DEL 2018.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

A Dios, Creador del Universo, dueño del conocimiento y la sabiduría e Ingeniero por excelencia.

A MIS PADRES

A mis papás Timoteo y Elena, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor incondicional.

A MIS HERMANOS

A mis hermanos Timoteo, José Calixto, Yesenia, quienes en su momento me brindaron su apoyo y me animaron a seguir adelante con esta etapa de mi vida.

A MI TIA

A mi tía Fabiana, por haberme apoyado con sus palabras, y sus consejos para seguir adelante, pero más que nada por su aprecio que me brindo como hijo.

A MIS ABUELOS

A mis abuelos, que ellos me brindaron sus consejos, su aprecio como su nieto y sus oraciones y bendición.

A MIS AMIGOS

A mis amigos quienes me apoyaron durante este proceso de formación profesional y que hasta ahora, seguimos conservando nuestra amistad.

A MIS PROFESORES

A todos mis profesores, por su profundo conocimiento que me transmitieron en el transcurso de mi formación profesional.

A MI ASESOR

Al Dr. Gilberto González Avalos por el apoyo y su paciencia al ser mi asesor de tesis.

A MIS SINODALES

A la mesa sinodal quienes leyeron y aprobaron esta tesis.

A LA FACULTAD

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE).

A LA UNIVERSIDAD

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

DEDICATORIA

A DIOS

Por su infinita sabiduría y ser el maestro perfecto.

A MIS PADRES

Por ser el motor en mi camino, ya que no desconfiaron y no dudaron de mí, en la capacidad de lograr esta meta en mi vida.

A MIS ABUELOS

Por brindarme sus palabras que me motivaron a cumplir esta meta.

INDICE

| | |
|--|------|
| AGRADECIMIENTOS..... | i |
| DEDICATORIA..... | iii |
| INDICE | iv |
| RESUMEN | viii |
| PALABRAS CLAVES..... | ix |
| ABSTRACT | x |
| KEYWORDS | xi |
| LISTA DE FIGURAS | xii |
| LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS | xvi |
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Las fuentes renovables..... | 1 |
| 1.2 Objetivo..... | 2 |
| 1.3 Justificación | 3 |
| 1.4 Metodología | 3 |
| 1.5 Contenido de la tesis | 4 |
| CAPÍTULO 2 CENTRALES ELÉCTRICAS..... | 5 |
| 2.1 Introducción. | 5 |

| | |
|---|----|
| 2.2 Tipo de centrales eléctricas | 6 |
| a) Centrales de base..... | 6 |
| b) Centrales de punta: | 6 |
| c) Centrales de reserva: | 6 |
| d) Centrales de socorro: | 6 |
| e) Centrales de acumulación o de bombeo: | 6 |
| 2.3 Centrales convencionales | 7 |
| 2.3.1 Centrales térmicas convencionales. | 7 |
| 2.3.2 Centrales térmicas de ciclo combinado. | 8 |
| 2.3.3 Centrales Hidráulicas..... | 9 |
| 2.3.4 Centrales Nucleares | 10 |
| 2.4 Centrales no convencionales..... | 11 |
| 2.4.1 Parques Eólicos..... | 11 |
| 2.4.2 Centrales Solares | 12 |
| 2.4.2.1 Central Termosolar | 12 |
| 2.4.2.2 Centrales Solares Fotovoltaicas | 13 |
| 2.4.3 Central de Biomasa..... | 15 |
| 2.4.4 Centrales Geotérmica..... | 16 |
| 2.4.5 Centrales Mareomotriz | 17 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 3 MODELADO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN CON ENERGIA UNDIMOTRIZ..... | 19 |
| 3.1 Reseña histórica | 19 |
| 3.2 Funcionamiento..... | 20 |
| 3.3 Dispositivos de generación de energía a través de las olas (Undimotriz)..... | 22 |
| 3.3.1 Dispositivos de generación fijos | 22 |
| 3.3.1.1 Columna oscilante de agua (oscillating water column) | 23 |
| 3.3.1.2 Tapchan (tapered channel wave power device)..... | 24 |
| 3.3.1.3 Waveroller | 25 |
| 3.3.2 Dispositivos de generación flotante..... | 26 |
| 3.3.2.1 Pelamis (Pelamis Wave Power)..... | 26 |
| 3.3.2.2 Salter Duck (Pato de Salter) | 27 |
| 3.3.2.3 Wave dragón (dragón de las olas) | 28 |
| 3.3.2.4 Archimedes wave swing (columpio de olas Arquímedes)..... | 30 |
| 3.3.2.5 Mighty whale & jamstec (ballena poderosa y jamstec)..... | 31 |
| 3.3.2.6 Powerbuoy (boya de energía) | 32 |
| 3.4 Modelo del sistema de generación Undimotriz con el dispositivo Pelamis..... | 33 |
| 3.4.1 Modelo del Generador Síncrono..... | 33 |
| 3.4.1.1 Modelo Eléctrico | 34 |
| 3.4.1.2 Modelo Mecánico | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.1.3 Modelo del dispositivo Pelamis..... | 43 |
| CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DEL MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGIA UNDIMOTRIZ CON EL DISPOSITIVO PELAMIS..... | 50 |
| 4.1 Simulación del sistema de generación de energía Undimotriz con el dispositivo Pelamis en Matlab Simulink®. | 50 |
| 4.2 Simulación de la matriz de Clark-Park en Matlab Simulink® | 53 |
| 4.3 Simulación del Sistema de Generación Undimotriz en dq0 en Matlab Simulink® | 55 |
| 4.4 Respuesta del sistema de generación Undimotriz en dq0 y abc en Matlab Simulink® | 62 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO..... | 71 |
| 5.1 Conclusiones | 71 |
| 5.2 Trabajos a futuros | 72 |
| Bibliografía..... | 73 |

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, se presenta el modelo de generación de energía Undimotriz con el dispositivo de conversión de energía Pelamis. Se comienza con una redacción sobre los tipos de generación de energía eléctrica convencional y no convencional. Se investiga los tipos de dispositivos que existen para la generación de energía Undimotriz, en el que se toma para el estudio el dispositivo Pelamis que es de tipo flotante. Se da a conocer los elementos básicos de la teoría general de máquinas eléctricas, en el marco de referencia **abc**, el cual se hace la conversión del modelo general de las máquinas eléctricas, al marco de referencia **dq0**. Siendo el marco de referencia en el cual se realiza el modelo matemático de la generación de energía Undimotriz con el dispositivo Pelamis.

Una vez realizado la conversión del modelo del generador síncrono en el marco de referencia **dq0**, se prosigue a la obtención de las ecuaciones de voltaje, corriente, par eléctrico y la velocidad mecánica del generador síncrono con el dispositivo Pelamis. Una vez encontrado las ecuaciones se prosigue a desarrollar los diagramas de conversión del marco de referencia en **abc** a **dq0**, y los diagramas de simulación del generador síncrono con variables de espacio de estado; en el marco de referencia **dq0** y nuevamente regresarla en el marco de referencia **abc**. Una vez concluido los diagramas de bloques, se prosigue a obtener la respuesta del modelo matemático del generador síncrono con el uso del dispositivo Pelamis en el marco de referencia **dq0**.

PALABRAS CLAVES

Energías Undimotriz, dispositivo Pelamis, Generador síncrono, transformadas, diagrama de bloques, simulación.

ABSTRACT

In the present thesis work, the model of power generation Undimotriz with the Pelamis device is presented. It begins with an essay on the types of conventional and unconventional electric power generation. The types of devices that exist for the generation of wave energy are investigated, in which the Pelamis device, which is a floating type, is taken for the study. The basic elements of the general theory of electrical machines are presented, in the frame of reference abc, which converts the general model of electric machines, to the frame of reference dq0. Being the frame of reference in which the mathematical model of the Undimotriz energy generator with the Pelamis device is made.

Once the conversion of the synchronous generator model into the reference frame dq0 has been carried out, the equations of voltage, current, electrical torque and the mechanical speed of the synchronous generator with the Pelamis device are continued. Once the equations are found, the conversion diagrams of the reference frame in abc to dq0 are continued, and the simulation diagrams of the synchronous generator with state space variables are developed; in the frame of reference dq0 and again in the frame of reference abc. Once the block diagrams have been completed, the response of the mathematical model of the synchronous generator with the use of the Pelamis device in the dq0 reference frame is continued.

KEYWORDS

Energies Undimotriz, Pelamis device, Synchronous generator, transform, block diagram, simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Centrales térmicas convencionales..... | 7 |
| Figura 2.2 Central térmica de ciclo combinado | 8 |
| Figura 2.3 Central hidráulica | 9 |
| Figura 2.4 Central nucleoelectrica | 10 |
| Figura 2.5 Parque Eólico | 12 |
| Figura 2.6 Central Termosolar..... | 13 |
| Figura 2.7 Centrales Solar Fotovoltaico | 14 |
| Figura 2.8 Central Eléctrica Biomasa | 15 |
| Figura 2.9 Central Geotérmica | 17 |
| Figura 2.10 Central mareomotriz..... | 18 |
| | |
| Figura 3.1 Tipos de ondas marinas | 20 |
| Figura 3.2 Parámetros analíticos de aprovechamiento energético de una onda marina | 21 |
| Figura 3.3 Movimiento de una partícula que es atravesada por una onda marina..... | 21 |
| Figura 3.4 Forma de energía presente en una ola marina | 22 |
| Figura 3.5 Ola saliente hacia la turbina | 23 |
| Figura 3.6 Ola saliente por disminución de presión | 23 |
| Figura 3.7 Sistema TAPCHAN | 24 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.8 Planta WaveRoller..... | 25 |
| Figura 3.9 Dispositivo Pelamis..... | 27 |
| Figura 3.10 Dispositivo flotante tipo Salter Duck | 28 |
| Figura 3.11 Embalse de Wave Dragón | 29 |
| Figura 3.12 Rampa de Wave Dragón | 30 |
| Figura 3.13 Sistema Archimedes Wave Swing (AWS)..... | 30 |
| Figura 3.14 Dispositivo flotante conocido como Mighty Whale | 32 |
| Figura 3.15 PowerBuoy (Boya de energía) | 33 |
| Figura 3.16 Devanados del generador y sus ejes | 35 |
| Figura 3.17 Representación del generador síncrono en tres juegos de devanados ficticios | 37 |
| Figura 3.18 circuito equivalente del generador: a) eje directo; b) eje cuadratura | 39 |
| Figura 3.19 Movimiento producido por el sistema..... | 44 |
| Figura 3.20 Aprovechamiento del sistema en los cilindros hidráulicos | 45 |
| Figura 3.21 Aprovechamiento del sistema en los cilindros hidráulicos | 45 |
| Figura 3.22 Articulación de la izquierda | 46 |
| Figura 3.23 Articulación de la derecha..... | 46 |
| Figura 3.24 Diagrama de bloque de acciones de Pelamis | 47 |
| Figura 3.25 Bomba y Motor hidráulico | 48 |
| Figura 3.26 Acumulador hidráulico..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 Bloques de Matlab Simulink® | 50 |
| Figura 4.2 Velocidad del sistema, ángulos de desfase..... | 51 |
| Figura 4.3 Funciones de la fuente trifásica en abc..... | 52 |
| Figura 4.4 Respuesta del voltaje en abc..... | 53 |
| Figura 4.5 Diagrama de simulación de la matriz dq0..... | 54 |
| Figura 4.6 Respuesta dq0..... | 54 |
| Figura 4.7 Diagrama de simulación de id..... | 55 |
| Figura 4.8 Diagrama de simulación de iq..... | 56 |
| Figura 4.9 Diagrama de simulación de i0..... | 57 |
| Figura 4.10 Diagrama de simulación de idq0..... | 57 |
| Figura 4.11 Diagrama de simulación del Par eléctrico Te..... | 58 |
| Figura 4.12 Frecuencia angular de las ondas marinas | 58 |
| Figura 4.13 Ecuación senoidal de las ondas marinas..... | 59 |
| Figura 4.14 Rectificador de las ondas marinas | 59 |
| Figura 4.15 Modelo del dispositivo Pelamis | 60 |
| Figura 4.16 Diagrama de bloque de Ti | 60 |
| Figura 4.17 Diagrama de bloque de la velocidad del generador | 61 |
| Figura 4.18 Diagrama general del sistema de generación Undimotriz Pelamis | 61 |
| Figura 4.19 Tabla de valores del generador Undimotriz tipo Pelamis | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 4. 20 Diagrama general de simulación con las transformadas de Clark-Park en Matlab Simulink® | 64 |
| Figura 4.21 Voltaje del sistema en abc | 64 |
| Figura 4.22 Voltaje directa en dq0 | 65 |
| Figura 4.23 Corriente directa en dq0 | 65 |
| Figura 4.24 Corriente en cuadratura de dq0 | 66 |
| Figura 4.25 Corriente cero en dq0 | 66 |
| Figura 4. 26 Corriente de la fuente de excitación i_f | 67 |
| Figura 4.27 Corriente en abc | 67 |
| Figura 4.28 Par eléctrico..... | 68 |
| Figura 4.29 Entrada de las ondas marinas | 68 |
| Figura 4.30 Respuesta de rectificador de onda..... | 69 |
| Figura 4.31 Par mecánico sin ganancia | 69 |
| Figura 4.32 Par mecánico con ganancia de 1000 | 70 |
| Figura 4.33 Velocidad del sistema de generación | 70 |

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

| | |
|--------------------------|---|
| Waveroller | Dispositivo que convierte las olas del océano en energía eléctrica. |
| m^3 | Volumen |
| A | Amperes |
| Archimedes wave swing | Columpio de olas arquimedes |
| g | Gramos |
| M | Mega |
| m | Metros |
| Mighty whale & jamstec | Ballena poderosa y jamstec |
| Oleaje | Sucesión continuada de olas |
| Oscillating wáter Column | Columna oscilante de agua |

| | |
|-----------------------------------|--------------------|
| Pelamis wave power | Pelamis |
| Powerbuoy | Boya de energia |
| s | Tiempo |
| Salter duck | Pato de agua |
| Tapared channel wave power divice | Tapchan |
| Te | Par eléctrico |
| TI | Par mecánico |
| V | Volts |
| W | Watts |
| Wave dragon | Dragón de las olas |
| ω | Velocidad angular |

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Las fuentes renovables

Con el gran problema que es el calentamiento global, hablar de energía renovables es hablar de soluciones, de cambio, de luchar por la vida en nuestro planeta. Sin lugar a dudas, es la opción de preferencias en lo que a que energía se refiere. Por ello es que a nivel internacional, desde distintos estados se está fomentando su aplicación a diversas escalas y aunque hay algunos a los que la situación del planeta parece no importarles mucho, lo cierto es que los esfuerzos por fomentar el uso de los diferentes tipos de energías renovables van dando sus frutos.

En términos de energía alternativas hay mucho que elegir y todas las opciones tienen beneficios, tanto para nosotros mismos como para nuestra nación y lo más importante: el medio ambiente.

a) **Energía solar**

La energía solar es de las más importantes y eficaces. La energía solar térmica recoge la energía del sol mediante paneles solares fotovoltaicos y además de utilizarse a gran escala, es muy sencillo aplicarla en el hogar, habiendo cada vez más personas alrededor del mundo que utilizan la energía solar.

b) **Energía eólica**

Otro tipo de energía renovable muy conocido. La energía eólica se obtiene a través de la fuerza del viento. Utilizando molinos, esta fuerza produce energía cinética que se transmite a un generador eléctrico.

c) Energía geotérmica

La energía geotérmica es la que se obtiene mediante el calor del centro de la tierra. El centro de nuestro planeta es muy caliente y parte de ese calor llega a la corteza terrestre (5000 °C) a través de las aguas subterráneas y se aprovecha para generar energía.

d) Energía mareomotriz

La energía mareomotriz es el aprovechamiento del fenómeno de mareas. En su generación intervienen, por lo tanto, fuerza gravitatoria entre la luna, la tierra y el sol. No es de las más comunes, pero si es muy útil.

e) Energía hidráulica

Otro de los tipos de energía renovables más populares: la energía hidráulica, que es la acumulada en los saltos de agua. Es la energía de los ríos, la que es aprovechada por las centrales hidroeléctricas para poner en funcionamiento las turbinas que mueven generadores eléctricos.

1.2 Objetivo

En esta tesis se describe el enfoque en la deducción del modelo matemático del sistema de generación de energía por Undimotriz, en el marco de referencia $dq0$, usando la transformada de Clark-Park, (conocida como la matriz de Park). Una vez desarrollado el modelo, se llevará a cabo la realización de los diagramas de simulación y la simulación del modelado; obteniendo así, la respuesta transitoria y estable del sistema de generación Undimotriz del tipo Pelamis, tanto como el marco de referencia $dq0$ y en abc en Matlab Simulink®, en el cuál se observa el comportamiento de sistema de generación.

1.3 Justificación

Es importante conocer el comportamiento de la generación de energía Undimotriz (olas), ya que hasta la fecha las energías renovables, se están implementando con más frecuencia. Países como Francia, Noruega y Escocia, etc. son los principales en la generación de este tipo de energía, llegando a generar 30% en su generación nacional. También a nivel mundial ha crecido la idea de la generación de energía eléctrica de manera limpia y segura; sin el uso de carbón o combustóleo u otro tipo de combustible fósil, también en la generación de nucleoeeléctricas existe un gran riesgo de contaminación por radiación atómica. La razón de la generación de energía eléctrica por fuentes renovables es por el efecto climático, que se ha tenido, como el efecto de invernadero provocado por la contaminación, por el excesivo uso de combustible fósiles. En México existe una meta, que para el año 2024 se debe tener un 35% de generación eléctrica a través de fuentes renovables y para el 2050 se esté generando un 60% en fuentes renovables.

Por lo tanto, la generación de energía por Undimotriz es un tema donde se requiere más su estudio e investigación ya que es una fuente renovable que se podría implementar en el país.

1.4 Metodología

En esta tesis, se empezará por saber una breve historia de la generación de energía Undimotriz, y su principio de funcionamiento con el cuál opera. A continuación, enfocarnos principalmente en el sistema de generación Undimotriz de tipo Pelamis, y obtener el modelo matemático.

Una vez encontrado el modelo matemático se prosigue en desarrollar los diagramas de simulación y a la vez obtener su respuesta dinámica por medio de una simulación en Matlab Simulink®. De igual manera, se dará a conocer el proceso de obtención del modelo matemático y los diagramas de simulación, paso a paso. Una vez hecho estos pasos se obtendrá conclusiones, sobre los resultados observados en la generación Undimotriz de tipo Pelamis.

1.5 Contenido de la tesis

En el capítulo uno contiene una breve introducción de las energías renovables que existen hoy en día, así como el objetivo a lograr, existe una justificación del porque el estudio de este sistema de generación de energía eléctrica y conocer su modelo matemático tal como su comportamiento y su respuesta dinámica; en la metodología se menciona los pasos que se sigue para obtener los resultados de la tesis, por último, la descripción del contenido de esta tesis.

En el capítulo dos, se describe una introducción de las centrales eléctricas que se usan en la actualidad, y mencionando cada una de las centrales en el tipo de uso que se le da, también se dividen las centrales en dos ramas: como las centrales convencionales se encuentra lo que es las centrales térmicas convencionales, centrales térmicas de ciclo combinado, centrales hidráulicas y las centrales nucleares y para las centrales no convencionales se mencionaron los parques eólicos, centrales solares, centrales de biomasa, centrales geotérmicas, y centrales mareomotriz.

Para el tercer capítulo se realiza una breve reseña histórica de los sistemas de generación de energía Undimotriz, sus principios de funcionamiento de este tipo de generación de energía eléctrica, también se menciona los dispositivos de generación que existen el cual se dividen en dos partes: flotantes y fijos; en los dispositivos fijos se encuentran las columna oscilante de agua, los Tapchan y los Waveroller; en los dispositivos flotantes se encuentran los Pelamis, Salter Duck, Wave Dragon, Archimedes Wave Swing, Mighty Whale & Jamstec y la Powerbuoy.

En el capítulo cuatro se desarrolla el modelo matemático del dispositivo de generación de energía Undimotriz de tipo Pelamis, paso a paso. Una vez encontrado el modelo se prosigue a realizar los diagramas de simulación y la simulación del modelo matemático, por medio de Matlab Simulink®, donde se obtendrá las respuestas en su estado dinámico, para conocer y observar el comportamiento de esta generación de energía eléctrica por Undimotriz de tipo Pelamis.

Por último, en el capítulo cinco se incluirán conclusiones, observaciones, obtenidas durante la realización de esta tesis, de igual forma, las propuestas y el impacto a futuro sobre este trabajo.

CAPÍTULO 2 CENTRALES ELÉCTRICAS

2.1 Introducción.

Una central eléctrica es una instalación capaz de convertir la energía mecánica, obtenida mediante otras fuentes de energía primaria, en energía eléctrica.

En general, la energía mecánica procede de la transformación de la energía potencial del agua almacenada en un embalse; de la energía térmica suministrada al agua mediante la combustión del carbón, gas natural, o combustible, o a través de la energía de fisión del uranio. Este tipo de centrales eléctricas son las llamadas convencionales. Las centrales no convencionales son aquellas que transforman en energía eléctrica otras energías primarias, como la energía del viento o la diferencia de mareas, o la energía del sol a través de paneles, etc.

Para realizar la conversión de energía mecánica en eléctrica, se emplean unas máquinas denominadas generadores, que constan de dos piezas fundamentales: el estator y el rotor. La primera de ellas es una armadura metálica cubierta en su interior por unos hilos de cobre, que forman diversos circuitos. La segunda, el rotor, está en el interior del estator y está formada en su parte interior por un eje y en su parte más externa por unos circuitos, que se transforman en electroimanes cuando se les aplica una pequeña cantidad de corriente.

Cuando el rotor gira a gran velocidad debido a la energía mecánica aplicada se producen unas corrientes en los hilos de cobre del interior del estator. Estas corrientes proporcionan al generador la denominada fuerza electromotriz capaz de proporcionar energía eléctrica a cualquier sistema conectado a él.

En este estudio obtendremos las distintas formas que existen hasta la actualidad para generar energía eléctrica y los componentes que interactúan en cada una de ellas.

2.2 Tipo de centrales eléctricas

Según el servicio que haya de prestar las centrales eléctricas se pueden clasificar en:

a) Centrales de base:

Están destinadas a suministrar la mayor parte de la energía eléctrica, de forma continua. Estas centrales llamadas también centrales principales, son de gran potencia y utilizan generalmente como máquinas motrices las turbinas de vapor, turbinas de gas y turbinas hidráulicas.

b) Centrales de punta:

Exclusivamente proyectadas para cubrir las demandas de energía eléctrica en las horas-punta; en dichas horas-punta, se ponen en marcha y trabajan en paralelo con la central principal. Si la central de base es de pequeña potencia, se utilizan grupos electrógenos de los que máquina motriz es un motor de explosión; si la central de base es mayor, se utilizan generalmente pequeñas centrales con motor Diésel.

c) Centrales de reserva:

Tienen por objeto sustituir total o parcialmente a las centrales hidráulicas de base en casos de escasez de agua o avería en algún elemento del sistema eléctrico.

d) Centrales de socorro:

Tienen igual cometido que las centrales de reserva citadas anteriormente pero la instalación del conjunto de aparatos y máquinas que constituyen la central de reserva es fija, mientras que las centrales de socorro son móviles y pueden desplazarse al lugar donde sean necesarios sus servicios. Estas centrales son de pequeña potencia y generalmente accionadas por motores Diésel, se instalan en vagones de ferrocarril, o en barcos especialmente diseñados y acondicionados para esta misión.

e) Centrales de acumulación o de bombeo:

Son siempre hidroeléctricas, se aprovecha el sobrante de potencia de una central hidroeléctrica en las horas de pequeña demanda, para elevar agua de un río o de un lago hasta un depósito, mediante bombas centrífugas accionadas por los alternadores de la central que se utilizan

como motores. En periodos de gran demanda de energía, los alternadores trabajan como generadores accionados por las turbinas que utilizan el agua previamente elevada [1].

2.3 Centrales convencionales

Las centrales térmicas (o termoeléctricas) son aquellas que aprovechan la energía térmica (o calorífica) procedente de la combustión de fuentes de energías como el carbón, el petróleo o el gas, para obtener energía eléctrica.

2.3.1 Centrales térmicas convencionales.

En la caldera se realiza la combustión de la fuente energética correspondiente (carbón, petróleo y gas). La energía térmica generada calienta un circuito de agua y la transforma en vapor de agua a alta presión y temperatura. El vapor se lleva hasta una turbina de vapor, donde la mueve y genera un movimiento rotacional del eje. El eje, unido al alternador hace que este genere energía eléctrica la cual se transforma y se vierte a la red. Una vez que el vapor de agua mueve el conjunto de turbina-alternador, se convierte en agua en el condensador y a continuación se enfría en la torre de condensación con el objetivo de reiniciar el ciclo. En la figura 2.1 se muestra el diagrama del proceso de la central termoeléctrica convencional.

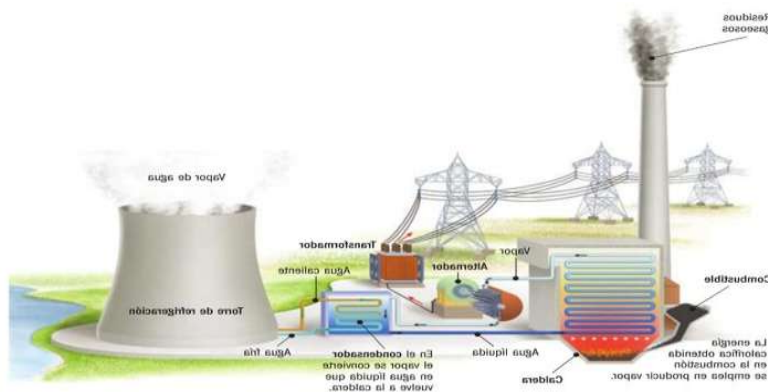


Figura 2.1 Centrales térmicas convencionales

2.3.2 Centrales térmicas de ciclo combinado.

Son centrales que se utilizan como combustible el gas natural y son más eficientes que las convencionales porque reutilizan la energía remanente de los gases de combustión. La energía térmica del combustible se transforma en electricidad mediante dos ciclos: el correspondiente a una turbina de gas y el convencional del agua/turbina de vapor.

En una turbina de gas se produce la combustión de gas. Los gases de combustión que se producen se conducen hasta una turbina de gas donde la energía se transforma en energía mecánica de rotación que se transmite al alternador acoplado, donde se produce la energía eléctrica. A la salida de la turbina de gas, estos gases de combustión que aún están a una temperatura elevada, se usan para generar vapor de agua, que será llevada a una turbina de vapor que acoplada a otro alternador producirán energía eléctrica. Conviene señalar que el desarrollo actual de esta tecnología tiende a acoplar las turbinas de gas y de vapor al mismo eje, accionando así conjuntamente al mismo alternador. En la figura 2.2 se ilustran el proceso de funcionamiento de la central térmica de ciclo combinado.

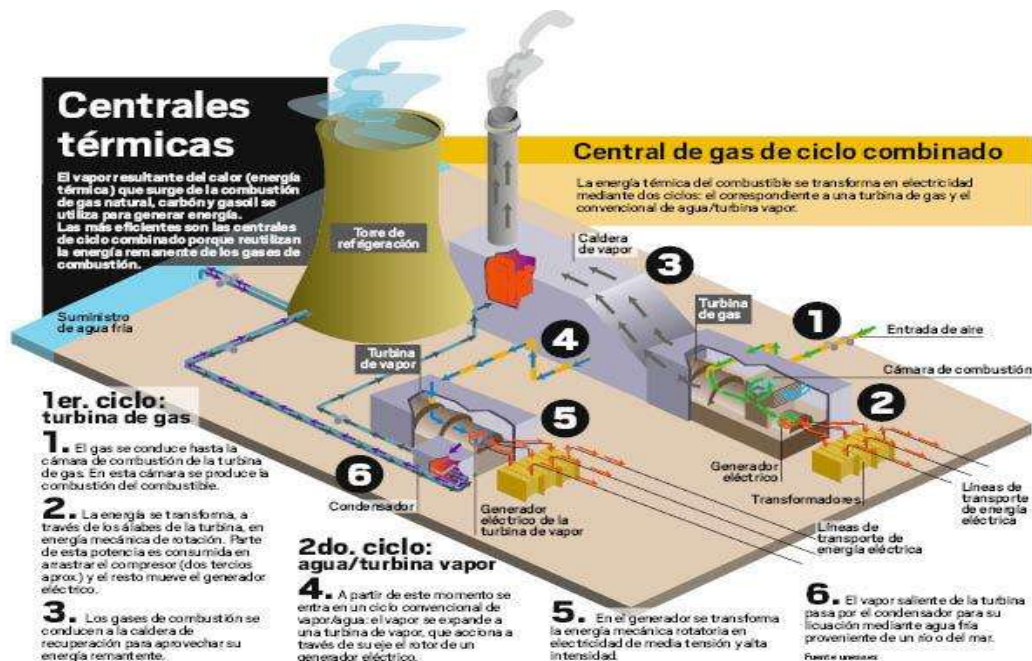


Figura 2.2 Central térmica de ciclo combinado

2.3.3 Centrales Hidráulicas.

Utilizan como fuente de energía el agua almacenada en un embalse, de forma que la potencia aprovechable en un salto hidráulico depende del caudal del salto y de su altura en metros. La energía almacenada en el agua provocará el movimiento de los álabes de la turbina hidráulica transformándose en una energía mecánica igual al producto entre el par mecánico entregando por la turbina y su velocidad angular.

En función del caudal y la altura, el agua dispone de más energía potencial o más energía cinética, y ello permite distinguir dos tipos de centrales hidráulicas.

Centrales hidroeléctricas de agua fluyente. No cuenta con reserva de agua y, por lo tanto, turbinan el agua de la que disponen en cada momento. Son centrales con gran caudal pero poco salto. La construcción se realiza sobre el propio cauce del río.

Centrales hidráulicas de reserva. Necesitan de la construcción de un embalse, donde se almacena energía potencial y, por lo tanto, permiten gestionar la producción. En este caso, el salto es mayor, mientras que el caudal es más pequeño.

Las ventajas de estas centrales consisten en que no contaminan, que el combustible es el agua, y que tienen gran facilidad para su arranque, parada y ajuste mediante la apertura o cierre de la válvula de admisión a la turbina.

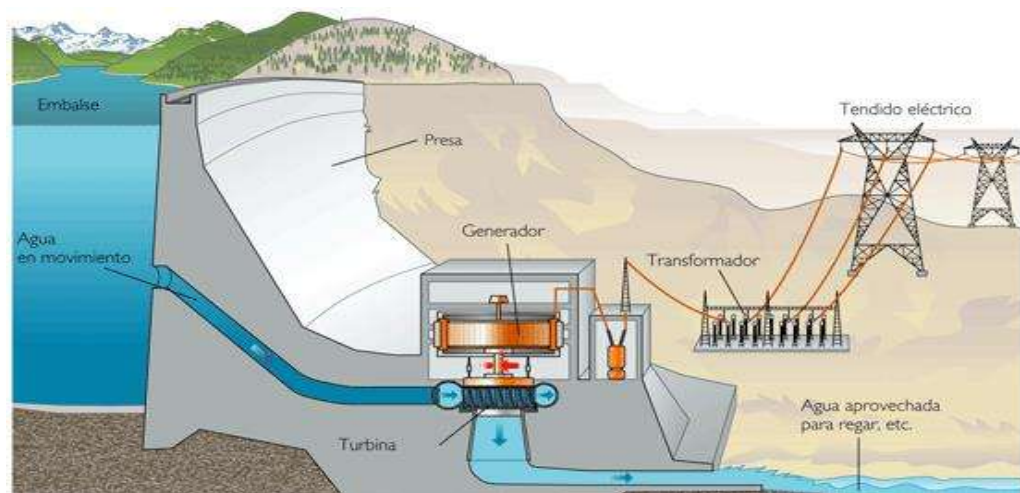


Figura 2.3 Central hidráulica

Por ello se utilizan como centrales de regulación para ajustar la generación de energías eléctrica a la demanda de una forma rápida y gradual. La figura 2.3 ilustra el esquema de una central hidráulica.

2.3.4 Centrales Nucleares

Las centrales nucleares son un tipo de centrales térmicas que se diferencian de las anteriores en que la energía calorífica que mueve la turbina no procede de la combustión del carbón, el gas o el petróleo sino de la fisión de átomos radiactivos. Se caracterizan por su gran potencia.

El funcionamiento de una central nuclear es similar al de una central térmica, pero en lugar de generarse el calor en una caldera por combustión de carbón, el calor se genera en un reactor nuclear. En el reactor se producen reacciones de fisión (ruptura) de los núcleos atómicos del combustible nuclear (generalmente uranio enriquecido). Estas reacciones liberan una gran cantidad de energía en forma de calor, para calentar el agua y transformarla en el vapor a presiones que moverá las turbinas de un generador.

Estas centrales son muy eficientes: proporcionan mucha energía con poco combustible. Además, no emiten gases contaminantes a la atmosfera, tal sólo vapor de agua de la torre de refrigeración.

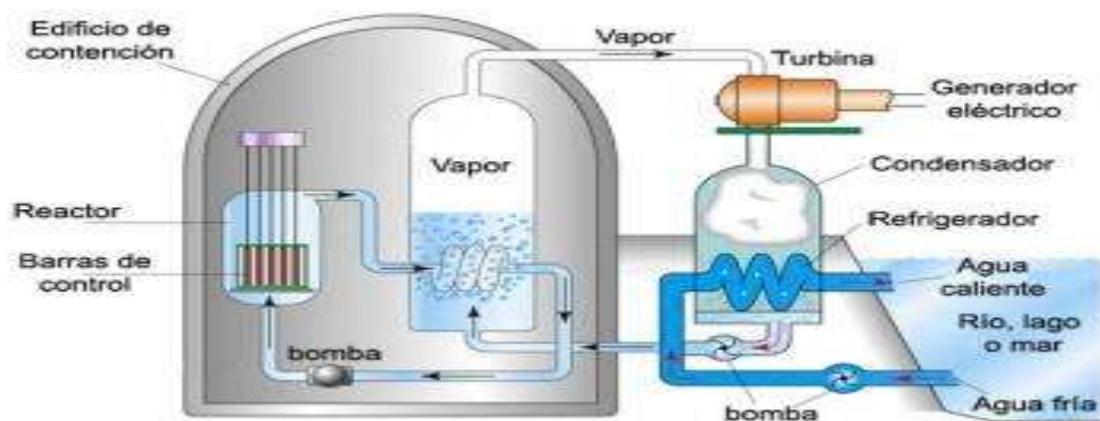


Figura 2.4 Central nucleoelectrica

Sin embargo, la energía nuclear tiene un grave inconveniente: genera residuos radiactivos que son difíciles de almacenar de forma segura y, además, existen riesgos de graves accidentes, como el ocurrido en Chernobyl (Ucrania), en el año 1986, cuando se incendió un reactor y escaparon sustancias radiactivas tóxicas que se extendieron por casi toda Europa [2]. La figura 2.4 muestra el proceso de funcionamiento de una central nuclear.

2.4 Centrales no convencionales

2.4.1 Parques Eólicos

El parque eólico es una central eléctrica donde la producción de la energía eléctrica se consigue a partir de la **fuerza del viento**, mediante aerogeneradores que aprovechan las corrientes de aires. El viento es un efecto derivado del calentamiento desigual de la superficie de la tierra por el sol.

El principal problema de los parques eólicos es la incertidumbre respecto a la disponibilidad de viento cuando se necesita. Lo que implica que la energía eólica ni puede ser utilizada como fuente de energía única y deba estar respaldada por otras fuentes energéticas con mayor capacidad de regulación (térmicas, nucleares, hidroeléctricas, etc.).

Su funcionamiento para producir electricidad con una central eólica es necesario que el viento sople a una velocidad de entre 3 a 25 m/s. El viento hace girar las palas al incidir sobre ellas, convirtiendo así la energía cinética del viento a energía mecánica que se transmite al rotor. Esta energía se transmite mediante un eje de baja velocidad a la caja del multiplicador, de donde sale a una velocidad 50 veces mayor. Es entonces cuando se puede transmitir al eje del generador eléctrico para producir energía eléctrica. En un aerogenerador se crea electricidad estática al producir el roce del viento sobre él. Esta electricidad estática se descarga a través de una presa en el suelo que tienen todos los aerogeneradores. Esta presa en el suelo se instala por que, debido a la altura de la torre, se crea una diferencia de potencial entre el suelo y el aerogenerador [3]. En la figura 2.5 se ilustra un parque eólico.



Figura 2.5 Parque Eólico

2.4.2 Centrales Solares

2.4.2.1 Central Termosolar

Una central termosolar es una instalación que permite el aprovechamiento de la energía del sol para la producción de electricidad. Tiene un ciclo térmico semejante al de las centrales termoeléctricas convencionales: la energía calorífica que se produce en un determinado foco es transformada en energía mecánica mediante una turbina y, posteriormente, en energía eléctrica mediante un alternador.

La única diferencia es que mientras en la central termoeléctrica convencionales el foco calorífico se consigue por medio de la combustión de una fuente fósil de energía (carbón, gas, fuel-oleo), en las solares, el foco calorífico se obtiene mediante la acción de la radiación solar que incide sobre un fluido.

Funcionamiento de una central termosolar del tipo torre central está formado por un campo heliostatos (1) o espejos direccionales de grandes dimensiones, que reflejas la luz del sol y concentran los haces reflejados en una caldera (2) situada a sobre una torre (3) de gran altura.

En la caldera, el aporte calorífico de la radiación solar reflejada es absorbido por un flujo térmico (sales fundidas, agua u otros). Dicho fluido es conducido hacia un generador de vapor (5),

donde transfiere su calor a un segundo fluido, generalmente agua, el cual es convertido así en vapor. A partir de este momento el funcionamiento de la central es análogo al de una central térmica convencional. Por tanto, este vapor es conducido a una turbina (6) donde la energía del vapor es convertida en energía mecánica rotatoria que permite al generador (7) producir electricidad. El fluido es posteriormente licuado en un condensador (8) para repetir el ciclo.

Como la producción de una central solar depende en gran medida de la hora de insolación, para aumentar y estabilizar su producción, suele disponerse de sistemas de almacenamientos térmicos o sistemas de apoyo (4) intercalados en el circuito de calentamiento.

La energía producida, después de ser elevada su tensión en los transformadores (9), son enviadas mediante las líneas de transporte eléctrica (10) a la red general del sistema [4]. En la figura 2.6 se ilustra las partes que conforma una central termosolar.



Figura 2.6 Central Termosolar

2.4.2.2 Centrales Solares Fotovoltaicas

Una central fotovoltaica es un conjunto de instalaciones destinadas al suministro de energía eléctrica a la red mediante el empleo de sistemas fotovoltaicos a gran escala.

El conjunto de las células fotovoltaicas es el elemento básico de una central fotovoltaica ya que son las encargadas de captar la radiación del sol y transformarla en energía eléctrica. Estas células fotovoltaicas generan a la central una corriente continua mediante el efecto fotovoltaico.

Las células fotovoltaicas están integradas en módulos y luego, con estos módulos, se forman los paneles solares.

Otro elemento fundamental para una central fotovoltaica es la meteorología. Dependiendo de la situación meteorológica de cada momento la radiación solar recibirá las células fotovoltaicas va a ser variable. Por este motivo se construye una torre meteorológica en la central para poder controlar y analizar las diferentes condiciones climatológicas.

Se obtiene corriente continua de los paneles fotovoltaicos, pero como la energía eléctrica que circula por la red de transporte lo hace en forma de corriente alterna, la corriente continua debe ser transformada a corriente alterna. En primer lugar, la corriente continua de los paneles solares es conducida a un armario de corriente continua, para ser convertida en corriente alterna por medio de un inversor y finalmente ser transportada a un armario de corriente alterna.



Figura 2.7 Centrales Solar Fotovoltaico

Posteriormente, la energía eléctrica producida pasa por un centro de transformación donde se adapta a las condiciones de intensidad y tensión de las líneas de transporte para su utilización en los centros de consumo [5]. La figura 2.7 ilustra las partes que conforma una central solar fotovoltaica.

2.4.3 Central de Biomasa

Es una instalación industrial diseñada para generar energía eléctrica a partir de recursos biológicos. Así, las centrales de biomasa utilizan fuentes renovables para la producción de energía eléctrica.

En primer lugar, el combustible principal de la instalación y los residuos forestales se almacenan en la central. Ahí se tratan para reducir su tamaño, si fuera necesario. A continuación, pasa a un edificio de preparación del combustible, donde se clasifican en función de su tamaño y finalmente se llevan a los correspondientes almacenes.

Seguidamente son conducidos a la caldera para su combustión, eso hace que el agua de las tuberías de la caldera se convierta en vapor debido al calor. El agua que circula por las tuberías de la caldera proviene del tanque de alimentación, donde se precalienta mediante el intercambio de calor con los gases de combustión aún más lentos que salen de las propias calderas.

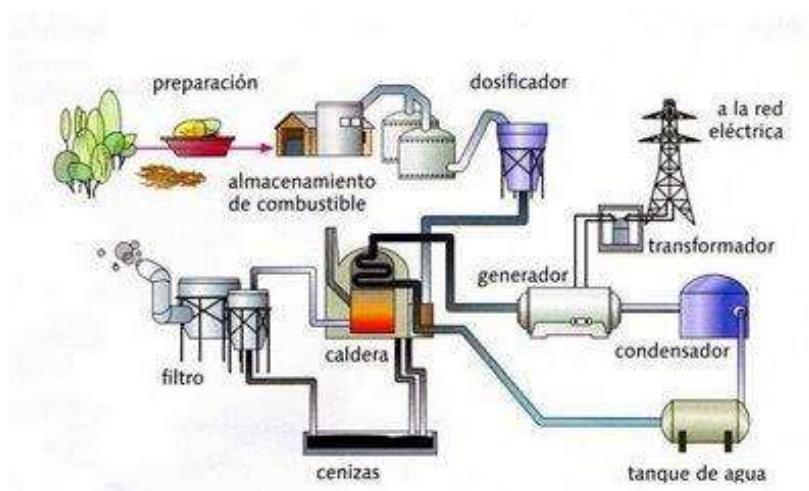


Figura 2.8 Central Eléctrica Biomasa

Del mismo modo que se hace en otras centrales térmicas convencionales el vapor generado a la caldera va hacia la turbina de vapor que está unida al generador eléctrico, donde se produce la energía eléctrica que se transportará a través de las líneas correspondientes. El vapor de agua se convierte en líquido en el condensador, desde aquí es nuevamente enviando al tanque de alimentación cerrándose así el circuito principal agua-vapor de la central [6]. En la figura 2.8 se ilustra el proceso de funcionamiento de una central eléctrica de biomasa.

2.4.4 Centrales Geotérmica

La energía geotérmica es renovable puesto que su tasa de extracción es pequeña en comparación con el calor de la Tierra. La emisión de gases de efecto invernadero es de 45 g de dióxido de carbono de media, menos del 5 % que las de las centrales de carbón. Sin embargo, su aprovechamiento está limitado a determinadas zonas geográficas. Aún así, la Asociación de Energía Geotérmica estima que hoy en día sólo se aprovecha el 6,5 % del potencial mundial de energía geotérmica, teniendo en cuenta el conocimiento y la tecnología actuales.

El funcionamiento de una central geotérmica o geo-termoeléctrica se basa en la compleja operación de un sistema campo-planta.

El campo geotérmico es una extensión de la tierra con una mayor gradiente (temperatura) que lo normal. También se conoce como área con calentamiento anómalo, cuya fuente de calor es un acuífero confinado (depósito de agua) almacenando y limitando por una capa sello, impermeable, que conserva el calor y presión, formando lo que se conoce como reservorio geotérmico. Este yacimiento de agua almacenada y calentado de forma natural en el subsuelo por una fuente de calor no muy profunda denominada cámara magmática, usualmente está relacionado con la actividad volcánica. La alta presión que alcanza estos reservorios (yacimientos de agua y vapor presurizado) muchas veces rompen los estratos rocosos o utilizan las fallas geológicas existentes y salen a la superficie en forma de fumarolas, manantiales de agua caliente, ausoles o geysers.

En el campo geotérmico es el sitio donde se ubican los pozos geotérmicos que desde la superficie conectan con el reservorio y es a través de estos que se extrae el vapor que mediante una red de tubería denominado sistemas de acarreo, se conduce hacia la central generadora, donde la energía calorífica del vapor se convierte en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica.

El proceso inicia con la extracción de una mezcla de vapor y agua geotérmica desde el reservorio geotérmico a través de los pozos productores, ya en la superficie, se separan el vapor del agua geotérmica utilizando equipos llamado separador ciclónico. Una vez separados, se

reinyecta nuevamente al subsuelo, mientras que el vapor-agua en estado gaseoso- ya seco es conducido hasta la central generadora.

El vapor geotérmico, después de haber hecho girar la turbina, es condensado-convertido en agua- y reinyectando al suelo, donde mediante un proceso de tipo reciclable el agua se puede volver a calentar, convertirse en vapor que puede extraerse nuevamente para volver a impulsar una turbina. De esta forma la geotérmica se convierte en una fuente de generación de energía eléctrica limpia, cíclica, renovable y sostenible, ya que con la reinyección se logra recargar el recurso, alargando su vida útil o productiva a través de un aprovechamiento de la fuente. La figura 2.9 muestra el proceso de funcionamiento de la central geotérmica [7].



Figura 2.9 Central Geotérmica

2.4.5 Centrales Mareomotriz

La energía mareomotriz se debe a las fuerzas de atracción gravitatoria entre la luna, la tierra y el sol. La energía mareomotriz es la que resulta de aprovechar las mareas, es decir, la diferencias de altura media de los mares según la posición relativa de la tierra y la luna, y que resulta de la atracción gravitatoria de esta última y del sol sobre las masas de agua de los mares. Esta diferencia de altura puede aprovecharse interponiendo partes móviles del movimiento natural de ascensos o descensos de las aguas, junto con mecanismo de canalización y depósito, para obtener movimiento

en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable. Es un tipo de energía renovable limpia.

La energía de las mareas se transforma en electricidad en las denominadas centrales mareomotrices, que funcionan como un embalse tradicional de río. El depósito se llena con la marea y el agua se retiene hasta la bajamar para ser liberados después a través de una red de conductos estrechos, que aumentan la presión, hasta las turbinas que generan la electricidad. Sin embargo, su alto costo de mantenimiento frena sus proliferaciones. Su funcionamiento es cuando la marea sube, las compuertas del dique se abren y el agua ingresa en el embalse. Al llegar el nivel del agua del embalse a su punto máximo se cierran las compuertas durante la bajamar el nivel del mar descende por debajo del nivel del embalse. Cuando la diferencia entre el nivel del embalse y del mar alcanza su máxima amplitud, se abren las compuertas dejando pasar el agua por las turbinas. En la figura 2.10 se muestra una central mareomotriz [8].

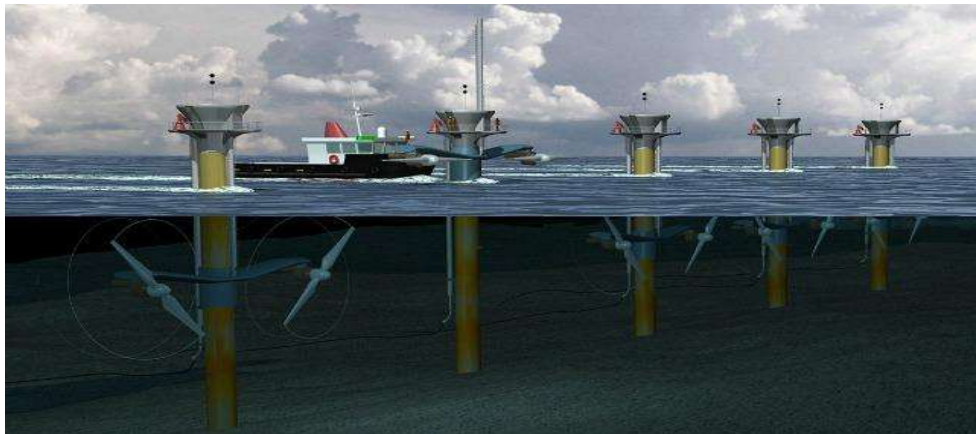


Figura 2.10 Central mareomotriz

CAPÍTULO 3 MODELADO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN CON ENERGIA UNDIMOTRIZ

3.1 Reseña histórica

Los primeros testimonios sobre la utilización de la energía de las olas se encuentran en china, en donde en el siglo XIII empiezan a operar molinos por acción del oleaje. Al principio de este siglo XX, el francés Bouchaux-Pacei suministra electricidad en su casa en royan, mediante un sistema neumático, parecido a las actuales columnas oscilantes. En esta misma época se prueban sistemas mecánicos en California, y en 1920 se ensaya un motor de péndulo en Japón. Desde 1921 el instituto oceanográfico de Mónaco, utiliza una bomba accionada por las olas para elevar agua a 60 metros con una potencia de 400 W. En 1958, se proyecta una central de 20 MW en las islas Mauricio, que no llegó a construirse, consistente en una rampa fija sobre un arrecife, a través de la cual subía el agua a un embalse situado a 3 metros por encima del nivel del mar. Los franceses construyeron en Argelia en los años cuarenta, dos plantas piloto tipo con canal convergente. En 1975 se construye uno similar en Puerto Rico, con el fin de alimentar con agua un puerto deportivo.

Uno de los pioneros en el campo del aprovechamiento de la energía de las olas fue el japonés Yoshio Masuda, que empezó sus investigaciones en 1945 y ensayo en el mar, en 1947, el primer prototipo de un Raft; a partir de 1960 desarrolla un sistema neumático para la carga de baterías en boyas de navegación, con una turbina de aire de 60 W.

En los años 70 se construye en Japón una plataforma flotante, de 80 metros de largo y 12 metros de ancho, llamada Keimei, que alberga 11 cámaras para ensayo de turbinas de aire. La investigación a gran escala del aprovechamiento de la energía de las olas se inicia a partir de 1974 en varios centros del reino unido, estudiándose sofisticados sistemas para grandes aprovechamientos,

actividad que se abandona casi totalmente en 1982, por falta de recursos económicos. A mediados de los ochenta entran en servicio varias plantas piloto de distintos tipos en Europa y Japón.

3.2 Funcionamiento

Las ondas marinas se forman, principalmente, a partir de las fuerzas de arrastre que ejercen los vientos sobre las capas superficiales de agua en el mar. La generación de ondas está afectada en menor grado por las fuerzas gravitatorias y el efecto Coriolis y el movimiento de placas tectónicas.

En la figura 3.1 se observa los distintos tipos de onda, su periodo y la fuerza que la genera en función de la capacidad de almacenar energía.

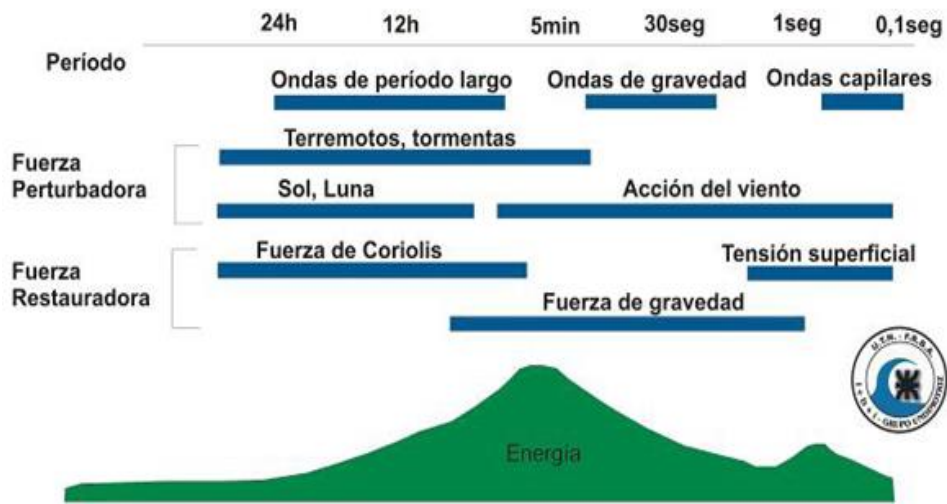


Figura 3.1 Tipos de ondas marinas

Las ondas marinas poseen la capacidad de almacenar su energía y trasladarse grandes distancias sin perder prácticamente su potencia; de tal forma que es posible la aparición de ondas en lugares donde no hay viento, esta es una interesante diferencia con la energía eólica donde necesariamente se necesita la presencia del viento y las ondas pueden aparecer aun sin viento.

Tanto los sistemas satelitales como los sensores marinos proporcionan una cantidad importante de datos que permiten predecir con bastante precisión la magnitud de los vientos y como consecuencia de ello, esto proporciona con antelación la altura, periodo y dirección de las ondas.

Las ondas se caracterizan por los parámetros que se indican en la figura 3.2.

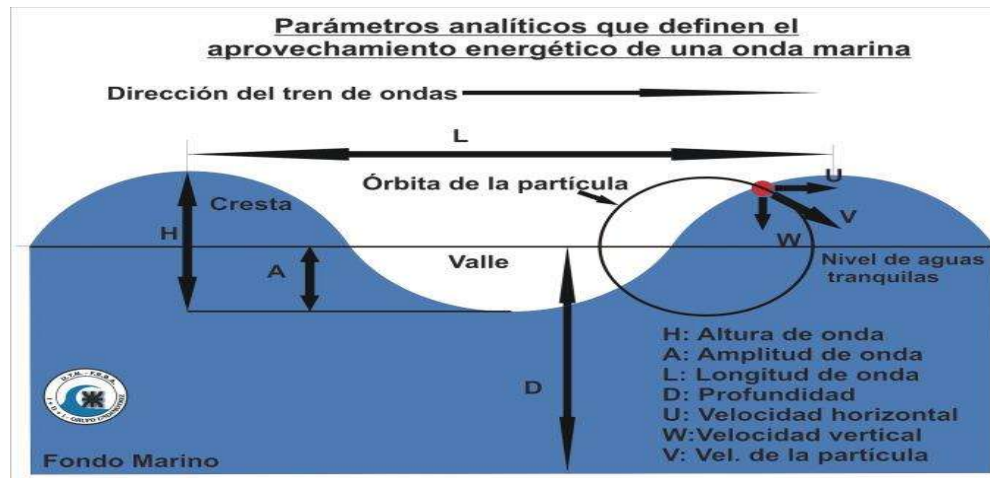


Figura 3.2 Parámetros analíticos de aprovechamiento energético de una onda marina

En la figura 3.3 se describe el comportamiento de una partícula que hace parte de una onda marina, según sea la distancia al fondeo, la altura y longitud de onda dicha partícula puede describir distintos tipos de trayectoria que van desde las circulares a las elípticas.

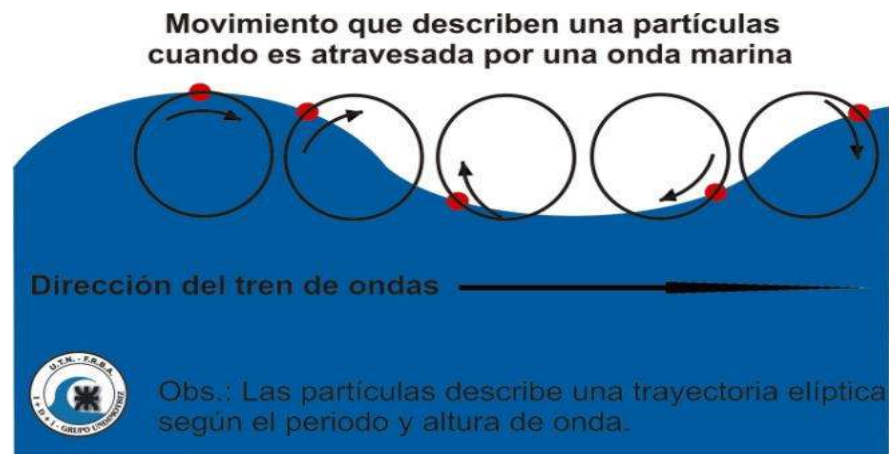


Figura 3.3 Movimiento de una partícula que es atravesada por una onda marina

Las formas de energía presente en una onda marina se puede descomponer en varias expresiones como se muestra de igual manera en la Figura 3.4:

1. La energía cinética que es función de la velocidad de la onda.
2. La energía potencial que es función de la altura de la ola.
3. La energía hidráulica que es función del empuje del agua.

Según el tipo de energía que se desea captar, se diseña el dispositivo pertinente [9].



Figura 3.4 Forma de energía presente en una ola marina

3.3 Dispositivos de generación de energía a través de las olas (Undimotriz)

Los dispositivos de generación de energía a través de las olas se pueden clasificar en fijos o flotantes.

3.3.1 Dispositivos de generación fijos

Estos dispositivos son los que están contruidos en la línea costera (en la rompiente de las olas) 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. Más adelante están descritos por Oscillating Water Column (Columna Oscilante de Agua), así como el sistema TAPCHAN, Waveroller que son ejemplos de dispositivos de generación de energía a través de las olas (Undimotriz).

3.3.1.1 Columna oscilante de agua (oscillating water column)

La columna de agua oscilante (Oscillating Water Column u OWC) genera electricidad en un proceso de dos pasos. Cuando la ola entra en la columna, fuerza al aire de la columna al pasar por la turbina e incrementa la presión dentro de la columna. Cuando la ola sale, el aire vuelve a pasar por la turbina, debido a la disminución de la presión de aire en el lado del océano de la turbina como se muestra en la figura 3.5 y 3.6. Sin importar la dirección de la corriente de aire, la turbina (conocidas como turbinas Wells, como su inventor) gira a la misma dirección y hace que el generador produzca electricidad.

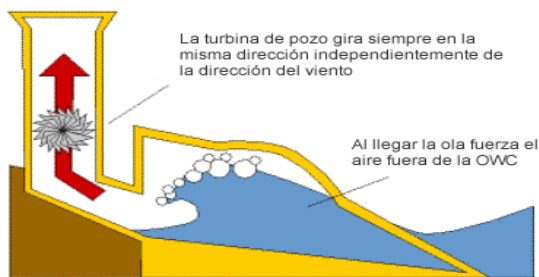


Figura 3.5 Ola saliente hacia la turbina

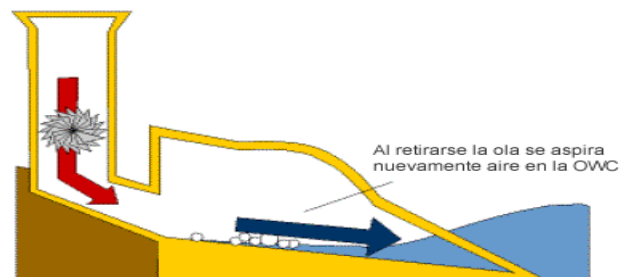


Figura 3.6 Ola saliente por disminución de presión

La tecnología OWC se está utilizando en las islas de Islay en Escocia, donde hay un sistema instalado desde el año 2000 llamado LIMPET. Este sistema tiene una producción máxima de 500 kW. Es ideal para lugares donde existen una fuente de energía de olas, como en la rompiente de olas, defensas costeras, proyectos de recuperación de territorios y escolleras de puertos. Esta forma de generación de energía es apropiada para la producción de energía para la red nacional. En las

islas de Islay, la electricidad generada se está utilizando para hacer funcionar un bus eléctrico, el primer bus del mundo que utiliza energía de las olas como combustible.

El rendimiento ha sido mejorado para un promedio anual de intensidad de olas entre 15 y 25 kW/m. la columna de agua alimenta a un par de turbinas de contra-rotación, y cada una de ellas opera a una generador de 250 kW, produciendo un rango de 500 Kw. El diseño de LIMPET es fácil de construir e instalar, además de generar pocas obstrucciones y ser poco visible, por lo que no genera molestias en el paisaje costero.

3.3.1.2 Tapchan (tapered channel wave power device)

El sistema TAPCHAN, o sistema de canal estrechado, consiste en un canal estrechado que alimenta un embalse que está construido en un acantilado, como se muestra en la figura 3.7.

El estrechamiento del canal hace que las olas aumenten su amplitud (altura de las olas) cuando se acercan a la pared de acantilado. Eventualmente las olas se desbordan sobre las paredes del canal dentro del embalse, que está ubicado varios metros por debajo del nivel del mar. La energía cinética de las olas en movimiento se convierte en energía potencial cuando el agua se conserva en el embalse. La generación de la electricidad es similar a la de una planta hidroeléctrica. El agua en depósito pasa por una turbina Kaplan.

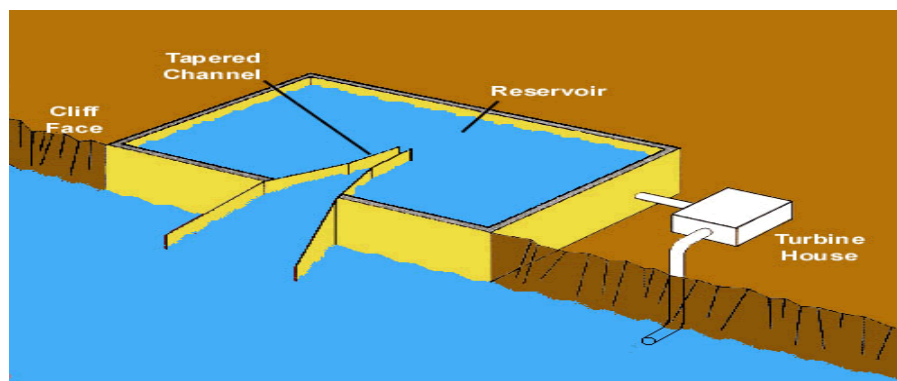


Figura 3.7 Sistema TAPCHAN

El concepto de TAPCHAN es una adaptación de la producción de energía hidroeléctrica tradicional. Con muy pocas partes móviles, y todo contenido dentro del sistema de generación, los

sistemas TAPCHAN tienen pocos costos de mantenimiento y son confiables. Los sistemas TAPCHAN también superan los problemas de demanda de la energía, ya que el embalse puede reservar la energía hasta que sea requerida.

Desafortunadamente, los sistemas TAPCHAN no son apropiados para todas las regiones costeras. Las regiones deben tener olas continuas, con un buen promedio de energía, 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.

3.3.1.3 Waveroller

El dispositivo WaveRoller es una placa amarrada al fondo del océano por su parte interior que pivotea hacia atrás y adelante. Este movimiento de las olas bajas mueven 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 WaveRoller, o por un sistema hidráulico cerrado en combinación con un sistema de generador/turbina. El WaveRoller es un concepto modular, en las prácticas esto significa que la capacidad de la planta está formada por la conexión de una cantidad determinada de módulos de producción a una planta WaveRoller como se muestra en la figura 3.8. Debido al diseño modular, la planta WaveRoller puede entrar en producción gradualmente, módulo por módulo. AW-Energy señala que el mantenimiento de los módulos es sencillo y la producción de electricidad se puede mantener durante el mantenimiento de las unidades.

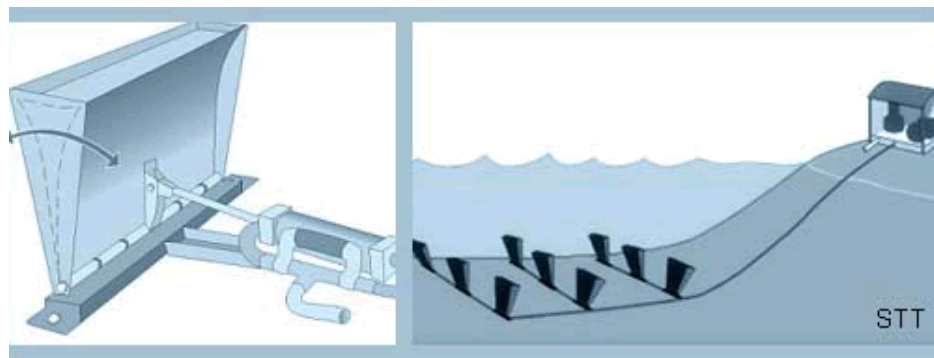


Figura 3.8 Planta WaveRoller

La compañía que está desarrollando WaveRoller, AW-Energy, ha realizado pruebas marinas con el WaveRoller en el European Marine Energy Centre (centro europeo de energía marina) en Orkney, Escocia, que van verificando el potencial de generación de energía y la aptitud del WaveRoller en la conversión de este recurso energético en electricidad. Los resultados del WaveRoller podrán superar ampliamente a otras tecnologías de energías marinas, ya sea en términos de rendimiento y como en cuestiones económicas. El WaveRoller es más apto para regiones con periodos de olas largas y con distancias fuertes. Debido a la naturaleza de las olas de fondo, los niveles de energía obtenidas a lo largo del año en estas regiones fluctúan bastante menos que en los dispositivos de olas de superficie o energía eólica. Logrando un producto de energía nominal de 13 KW por placas WaveRoller, los costos de inversión se elevan a aproximadamente 2100 KW en la etapa piloto [10].

3.3.2 Dispositivos de generación flotante

Los dispositivos de generación de energía de las olas flotantes son sistemas que se encuentran flotando en el océano ya sea cerca de la costa u offshore. Se mencionarán algunos dispositivos de generación flotantes.

3.3.2.1 Pelamis (Pelamis Wave Power)

El Pelamis como se muestra en la figura 3.9 es una estructura semi-sumergible y articulada compuesta por secciones unidas por juntas de bisagra. El movimiento de estas juntas es resistido por arietes hidráulicos, que bombean aceite a alta presión a través de los motores hidráulicos.

Estos motores hacen que los generadores produzcan electricidad. Se pueden conectar varios dispositivos juntos y unidos a la costa a través de un sólo cable que va por el fondo marino. La estructura se mantiene en posición por un sistema de anclaje compuesto por una combinación de flotantes y pesas, que previenen que los cables del anclaje estén tirantes al mantener el Pelamis en su posición, y que además permiten un movimiento de vaivén con las olas entrantes. El prototipo, a escala completa, de 750 kW, tiene un largo de 120 m y un diámetro de 3.5 m y contiene tres

módulos de conversión de energía, de 250 kW cada uno. Cada módulo contiene un sistema completo de generación de energía hidroeléctrica.



Figura 3.9 Dispositivo Pelamis

El Pelamis es construido por Ocean Power Delivery (OPD) que reciente anuncio la firma por una orden con un consorcio portugués, dirigido por Enersis, para fabricar la fase inicial de la primera granja de olas comercial en todo el mundo. La fase inicial consistirá en tres máquinas Pelamis P-750 ubicadas a 5 km de la costa portuguesa, cerca de Povoia de Varin. El proyecto de 8 millones de euros tendrá una capacidad instalada de 2.25 MW, y se espera que podrá suplir las necesidades de electricidad de 1500 hogares portugueses. A la espera del éxito de esta primera fase, se anticipa una orden de otras 30 máquinas Pelamis (20 MW). Estos nuevos dispositivos flotantes es una de las historias exitosas de la industria de la energía de las olas y parece tener un futuro brillante [11].

3.3.2.2 Salter Duck (Pato de Salter)

El Salter Duck es otro dispositivo flotante de energía de las olas, como el Pelamis, que genera electricidad a través del movimiento armónico de la parte flotante del dispositivo (al contrario de los sistemas fijos que utilizan una turbina que se activa por el movimiento de las olas). En estos sistemas, los dispositivos suben y bajan de acuerdo al movimiento de la ola y la

electricidad se genera debido a este movimiento. El Duck (Pato) rota con un movimiento de cabeceo a medida que la ola pasa. Este movimiento bombea fluido hidráulico que activa el motor hidráulico, que a su vez, activa el generador eléctrico. El Salter Duck como se observa en la figura 3.10 puede producir energía en un modo muy eficiente, sin embargo este proyecto fue frenado durante los años ochenta debido a errores en los cálculos de los costos de producción de energía por un factor de 10, y solamente en los últimos años, cuando esta tecnología fue revalorada, se identificó este error.

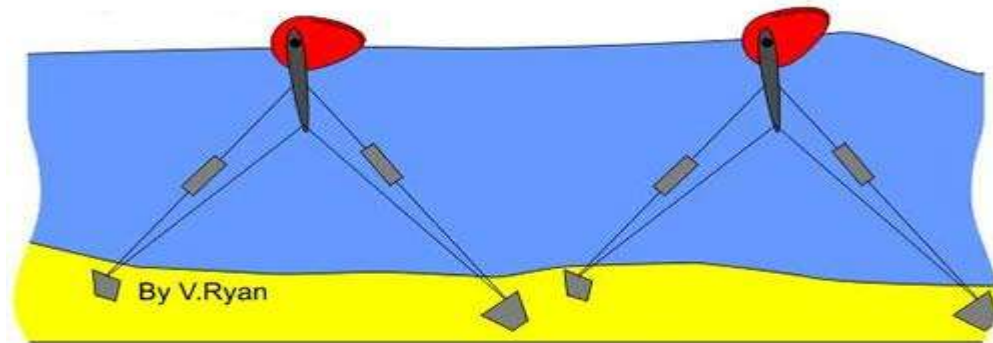


Figura 3.10 Dispositivo flotante tipo Salter Duck

Sin embargo, la producción de energía eléctrica no es la única aplicación práctica de este dispositivo; Salter y su equipo han desarrollado un procedimiento para desalinizar agua utilizando este dispositivo. La base de este sistema es que las variaciones de presión que se produce en el pato generan vapor de agua, vapor que puede ser separado y condensado, obteniendo así agua pura.

Se están probando modelos a escala, y se considera que el modelo definitivo medirá 10 metros de diámetro por 20 metros de longitud [12].

3.3.2.3 Wave dragón (dragón de las olas)

El Wave Dragón 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 genera electricidad como se muestra en la siguiente figura 3.11. La construcción del Wave

Dragón es muy simple y sólo tiene como parte móvil a las turbinas, lo que es útil para operar offshore bajo condiciones extremas. El Wave Dragón está anclado en aguas relativamente profundas para tomar ventaja de las olas marinas antes que pierda energía cuando llegan al área costera. 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 cabeza, esto quiere decir, una diferencia entre el nivel del mar y la superficie del agua en el embalse. El agua sale del embalse de Wave Dragón a través de varias turbinas generando electricidad en un modo similar al de las plantas de energía hidroeléctrica.

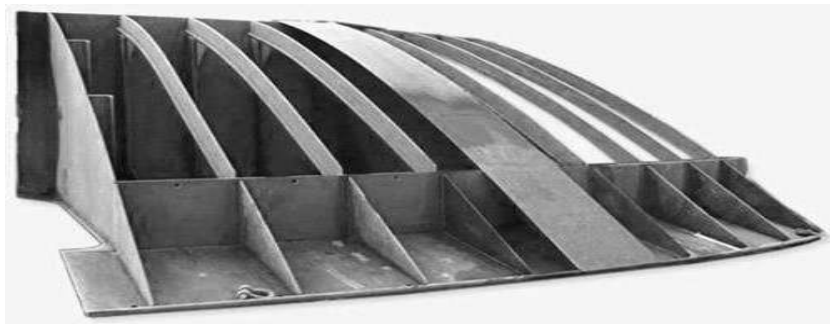


Figura 3.11 Embalse de Wave Dragón

La rampa del Wave Dragón como se muestra en la siguiente figura 3.12 se puede comparar con una playa. La rampa del Wave Dragón es muy corta y bastante empinada para minimizar las pérdidas de las energías que cada ola sufre cuando alcanza una playa. Una ola que se acerca a la playa cambia su geometría. La particular forma elíptica de la rampa optimiza este efecto, y el experimento del modelo ha demostrado que la fuerza aumenta significativamente. El Wave Dragón está diseñado para ubicarse offshore, a más de 20 a 30 metros de profundidad, para producir entre 4 y 11 MW, dependiendo de la actividad de las olas.

Wave dragón es una construcción muy simple y tiene solo un tipo de partes móviles: las turbinas. Esto es esencial para cualquier dispositivo destinado a operar en alta mar donde las fuerzas extremas y ensuciamiento, etc., afectan cualquier pieza en movimiento.

La generación de energía en el wave dragón se basa en la energía potencial en el agua que sobrepasa la rampa y se almacena temporalmente en el depósito. Este depósito contiene

aproximadamente $8,000 \text{ m}^3$ de agua que debe ser lanzada a través de las turbina entre dos ondas [13].

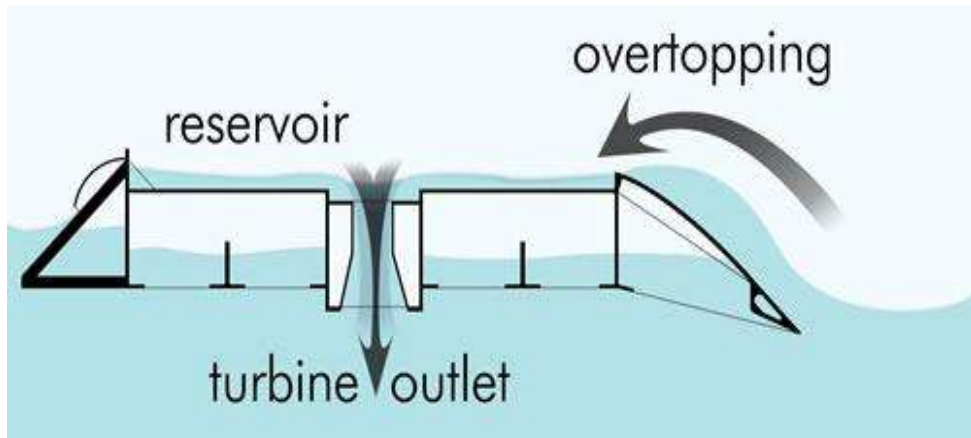


Figura 3.12 Rampa de Wave Dragón

3.3.2.4 Archimedes wave swing (columpio de olas Arquímedes)

El Archimedes Wave Swing (AWS) genera electricidad de la energía generada por marejada marina. Es un sistema simple de cámaras de aire conectadas, que utilizan el efecto flyheel, utilizando el empuje del mar para producir energía eléctrica.



Figura 3.13 Sistema Archimedes Wave Swing (AWS)

El AWS consiste de dos cilindros. El cilindro inferior está fijado al lecho marino, mientras que el cilindro superior se mueve hacia arriba y abajo la influencia de las olas tal como se muestra en la figura 3.13. En forma simultánea, los imanes, que están fijados en el cilindro superior, se mueven a lo largo de una bobina. Como resultado, el movimiento del flotante se reduce y se genera electricidad. El interior del AWG está lleno de aire y cuando el cilindro superior se mueve hacia abajo, el aire interior se presuriza. Como resultado, se genera una fuerza contraria que fuerza el cilindro superior a subir nuevamente. Para las olas largas, la amplificación puede ser de tres veces la elección de las olas, y es mayor para las olas cortas. La amplificación se puede comparar con el efecto de un columpio. Si uno empuja el columpio en el momento exacto, el movimiento se ampliará [14].

3.3.2.5 Mighty whale & jamstec (ballena poderosa y jamstec)

El desarrollo de Japón comienza con los experimentos de Yoshio Masuda en los 40 (JAMSTEC, 1998). Se alcanzaron altos niveles en los 70 y desde entonces una buena cantidad de prototipos se han probado exitosamente en Japón. En los años 70 el grupo de energía de las olas de JAMSTEC desarrolló un prototipo flotante a gran escala, llamado Kaimei. Este dispositivo fue probado en el mar de Japón, cerca de la ciudad de Yura en la Prefectura Yamagata. Se completaron dos series de pruebas, una de las mismas con los auspicios de la international Energy Agency (Agencia internacional de Energía). En los 80 JAMSTEC desarrolló un dispositivo fijo en la costa, para realizar pruebas cerca de Sanze, Prefectura Yamagata. Desde 1987, el foco ha estado en otro dispositivo flotante conocido como Mighty Whale como se muestra en la figura 3.14. Las aplicaciones proyectadas para un grupo de este tipo de dispositivos incluyen el suministro de energía para granjas de peces en las aguas calmas detrás de los dispositivos, y la aireación y purificación de agua del mar. Las dimensiones del prototipo son de 50 m de largo, por 30 m de ancho y 12 m de profundidad.

El diseño está hecho para flotar en equilibrio en un prototipo de 8 m, el Mighty Whale genera electricidad cuando la ola entra a las 3 cámaras de aire ubicada en la parte delantera del dispositivo.

La superficie interna de agua se mueve hacia arriba y abajo generando una presión neumática, o que hace girar las turbinas de aire. Esto hace que los generadores conectados a las turbinas generen electricidad aun razón máxima de 110 KW [15].



Figura 3.14 Dispositivo flotante conocido como Mighty Whale

3.3.2.6 Powerbuoy (boya de energía)

Ocean Power Technologies (OPT) ha desarrollado un Sistema de generación a través de las olas conocidas como PowerBuoy. El sistema se compone de un flotador, un larguero y una placa de apoyo como se muestra en la figura 3.15. El flotador se mueve hacia arriba y hacia abajo, y el larguero en respuesta al movimiento de las olas. La placa de apoyo mantiene el larguero en una posición relativamente estacionaria. El movimiento relativo del flotador con respecto al larguero impulsa un sistema mecánico contenido en el larguero que convierte el movimiento lineal del flotador en un giratorio. El movimiento rotatorio impulsa generadores eléctricos que producen electricidad para la carga útil o para la exportación a aplicaciones marinas cercanas usando un cable eléctrico submarino. Este sistema de conversión de energía de onda de alto rendimiento genera energía incluso en ambientes de onda moderada.

Los sistemas de conversión y control de potencia de PowerBuoy proporcionan energía continua para aplicaciones en las condiciones marinas más difíciles. El larguero contiene espacio para la capacidad adicional de la batería si es necesario para asegurar que se suministre potencia a una aplicación dada incluso bajo condiciones de onda extendida [16].



Figura 3.15 PowerBuoy (Boya de energía)

3.4 Modelo del sistema de generación Undimotriz con el dispositivo Pelamis

3.4.1 Modelo del Generador Síncrono

Existen dos tipos de máquinas síncronas, las de rotor liso y las de polos salientes. Las del rotor liso son usadas frecuentemente en las plantas termoeléctricas, cuya característica más notable es la alta velocidad de rotación de sus ejes, la cual es proporcionada por su turbina. La construcción del rotor de forma cilíndrica, se hace necesaria para reducir las altas fuerzas centrífugas y el rozamiento con el aire que se generaría en este tipo de máquinas al girar a altas velocidades. Las unidades de generación de polos salientes, por el contrario, son más útiles conectadas a turbinas de bajas velocidades, típicas en centrales hidráulicas que aprovechan caídas de agua.

El principio de funcionamiento del generador síncrono se basa en la alimentación de una bobina ubicada en el rotor, alimentada por una tensión de corriente continua, llamada devanado de campo. Mediante el giro continuo del rotor se produce una fuerza magnetomotriz en los arrollamientos del estator por el principio de inducción magnética. Esta fuerza creada por el campo

magnético giratorio del devanado de campo cortando las espiras del estator, produce una tensión y corriente senoidales en el estator, cuya frecuencia está determinada por el número de pares de polos y la velocidad del rotor.

Dado que la operación del sistema de potencia y del mismo generador no es estable en todo el tiempo, algunas variaciones en la potencia de la turbina, la carga o la tensión en el estator, pueden provocar oscilaciones en el rotor que afectan la estabilidad de la máquina. Por esa razón los fabricantes comúnmente adicionan devanados extra cortocircuitados en las cabezas polares, con el propósito de amortiguar estas oscilaciones y hacer mucho más estable la operación de los generadores, estas bobinas son llamados devanados de amortiguadores. Los modelos matemáticos detallados deben considerar las dinámicas aportadas por los devanados de campo, estator y amortiguadores para una correcta representación del generador [17].

En términos prácticos el modelamiento matemático de la máquina síncrona puede separarse en la dinámica eléctrica y mecánica.

3.4.1.1 Modelo Eléctrico

El modelado matemático puede ser llevado a cabo considerando un marco de referencia fijo en el estator, en cuyo caso las variables electromagnéticas tendrían variaciones en el tiempo, debido al movimiento del rotor, y a que el circuito magnético entre estator y rotor sería diferente en cada instante de tiempo, con lo cual el modelado se torna en un problema muy complejo. Con el fin de hacerlo mucho más simple se ha usado un marco común de referencia que rota conjuntamente con el rotor y que deriva en que las tensiones y corrientes del estator son transformadas en dos conjuntos de variables ortogonales. Una de ellas alineadas con el flujo magnético del devanado de campo llamado eje directo y la otra alineado con un eje 90° eléctricos atrasados con respecto al primero, llamado eje de cuadratura. Esta manipulación es llamada transformación de Park o dq0 [17].

Para ilustrar la ubicación de los ejes de referencia y los devanados de rotor, estator y amortiguadores, se presenta la siguiente figura 3.16, que además es la base para la determinación final del modelo del generador.

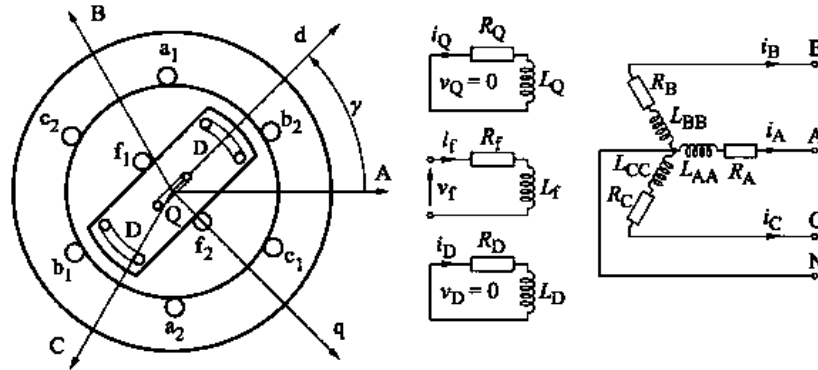


Figura 3.16 Devanados del generador y sus ejes

En la figura 3.16 se presenta un diagrama esquemático de la sección transversal de un generador síncrono trifásico, con devanados de estator (A, B y C), un devanado de rotor (F) y dos devanados de amortiguadores, uno en el eje directo (D) y otro en el eje de cuadratura (Q). El centro de la fase A es tomado como referencia. El diagrama de la figura 3.16 cumple con las convenciones del IEEE recomendadas en el artículo [17]. Para el desarrollo del modelo matemático se asume lo siguiente:

- El devanado trifásico del estator es simétrico.
- Las capacitancias de todos los devanados pueden ser despreciadas.
- Todos los devanados distribuidos puede ser representados de forma concentrada.
- El cambio en la inductancia de los devanados del estator debido a la posición del rotor es sinusoidal y no contiene armónicos.
- Las pérdidas por histéresis son despreciables, pero las asociadas a las corrientes de Eddy pueden ser incluidas en el modelo de los devanados amortiguadores.
- En los estados de transitorio y subtransitorio la velocidad del rotor es aproximadamente la velocidad síncrona ($\omega \approx \omega_n$).
- Todos los circuitos magnéticos son lineales y no presentan saturación, además su inductancia no varía con la corriente.

Para transformar las variables de corriente y tensión del marco de referencia abc a dq0, se usa la matriz de transformación W, así:

$$W = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\emptyset) & \cos(\emptyset - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\emptyset + \frac{2}{3}\pi) \\ \text{sen}(\emptyset) & \text{sen}(\emptyset - \frac{2}{3}\pi) & \text{sen}(\emptyset + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

La transformada inversa igualmente puede ser usada:

$$i_{ABC} = W^{-1} i_{0dq}$$

Dado que las variables de los devanados de campo y amortiguadores ya se encuentran en el marco de referencia del rotor, el conjunto completo de ecuaciones de corriente puede ser escrito de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ABC} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix}$$

Y usando la transformada inversa,

$$\begin{bmatrix} i_{ABC} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix}$$

La figura 3.17 muestra el arreglo de los devanados de acuerdo con su acoplamiento magnético en el marco de referencia dq0:

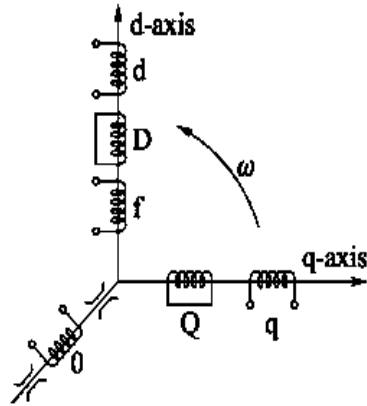


Figura 3.17 Representación del generador síncrono en tres juegos de devanados ficticios

Se observan tres juegos de devanados perpendiculares entre sí; tres en el eje directo, dos en el eje de cuadratura y uno en el eje 0.

Los flujos magnéticos pueden expresarse en términos de las inductancias mutuas y propias y las corrientes en cada devanado en el marco de referencia dq0 de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_f \\ \psi_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & kM_f & kM_D \\ kM_f & L_f & L_{fD} \\ kM_D & L_{fD} & L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_D \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_q & kM_Q \\ kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Donde $k = \sqrt{\frac{3}{2}}$, M_f es la inductancia mutua entre el devanado de campo y el de directo, M_D la inductancia mutua entre el devanado amortiguador D y el de eje directo M_Q , la inductancia mutua entre el devanado amortiguador Q y el de eje de cuadratura, L_{fD} la inductancia mutua entre el devanado de eje directo y el de campo y las L_i las inductancias propias del devanado i.

Para el circuito de la figura 3.16 se escribe las ecuaciones de las tensiones así:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ -v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & & & & & \\ & R_B & & & & \\ & & R_C & & & \\ & & & R_F & & \\ & & & & R_D & \\ & & & & & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ -i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix}$$

En forma compacta las tensiones se pueden expresar así:

$$\begin{bmatrix} v_{ABC} \\ v_{fDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{ABC} & \\ & R_{fDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ABC} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ABC} \\ \Psi_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Donde R_{ABC} y R_{fDQ} son matrices de resistencia diagonales de los devanados A, B y C y de campo, amortiguador en D y amortiguador en Q. Los términos con el Ψ denotan el flujo magnético concentrado en el devanado correspondiente.

Al pasar las variables de la ecuación 3.4 al marco de referencia dq0 y después de aplicar un poco de álgebra tenemos la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{fDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{ABC} & \\ & R_{fDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{fDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Psi_{0dq} \\ \Psi_{fDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega & \\ & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{0dq} \\ \Psi_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Donde:

$$\Omega \Psi_{0dq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_0 \\ \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega \Psi_q \\ \omega \Psi_d \end{bmatrix}$$

La ecuación (3.5) es el término $\Omega \Psi_{0dq}$ describe la ley de Kirchoff de tensiones para el circuito de la figura 3.17. El término $\Omega \Psi_{0dq}$ describe las tensiones electromagnéticas inducidas en los devanados del estator debido a la rotación del campo magnético.

Si se considera el generador bajo operación balanceada, entonces no se tendrá la secuencia 0. Adicionalmente, si se asume que los cambios de la velocidad alrededor del punto de operación son muy pequeñas ($\omega \approx \omega_n$) y que las tasas de variaciones en el flujo magnético Ψ_d y Ψ_q son

igualmente pequeñas, comparadas con las tensiones electromagnéticas rotacionales $\omega\Psi_q$ y $\omega\Psi_d$, entonces la ecuación (3.5) puede ser expresada en forma expandida en un conjunto de ecuaciones diferenciales y otro de ecuaciones algebraicas de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \approx - \begin{bmatrix} R & \\ & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Las ecuaciones (3.6) y (3.7), junto con las ecuaciones (3.2) y (3.3) constituyen el modelo completo del generador síncrono considerando despreciables las tasas de cambio en los flujos magnéticos. No obstante, para que este modelo pueda ser usado en estudios sistémicos, debe ser simplificado y expresado en forma diferente para que pueda ser acoplado a las ecuaciones de red del sistema de potencia.

Típicamente los modelos del generador usados en análisis de sistemas de potencia se encuentran expresados en términos del comportamiento del generador en sus fases temporales; esto es: estado estacionario, transitorio y subtransitorio. Al determinar como el flujo magnético afecta las tensiones electromotrices en cada uno de estos estados temporales, pueden deducirse circuitos equivalentes en el eje directo y en el eje de cuadratura que representan el comportamiento eléctrico del generador. Estos circuitos son fuentes de tensión transitoria y subtransitoria, conectados a través de reactancias de eje directo y cuadratura en estados estacionario, transitorio y subtransitorio. En la figura 3.18 se presentan los circuitos equivalentes del modelo del generador síncrono cuando se desprecia la resistencia del estator.

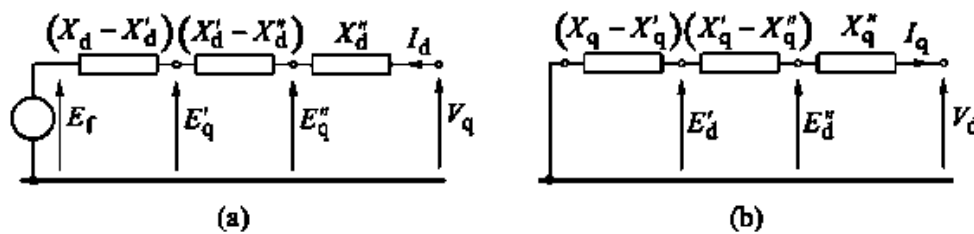


Figura 3.18 circuito equivalente del generador: a) eje directo; b) eje cuadratura

La reactancia de los circuitos equivalentes está en función de las inductancias propias y mutuas vista anteriormente:

$$X'_d = \omega L'_d \quad X''_d = \omega L''_d \quad X'_q = \omega L'_q \quad X''_q = \omega L''_q$$

Con

$$L'_d = L_d - \frac{k^2 - M_f^2}{L_f}$$

$$L''_d = L_d - \frac{k^2 M_f^2 L_D + k^2 M_f^2 L_f - 2k M_f k M_D L_{fD}}{L_D L_f - L_{fD}^2}$$

$$L'_q = L_q$$

Al estudiar en los estados estacionarios, transitorio y subtransitorio, como el flujo rotativo del estator penetra en el devanado del rotor, cuando un disturbio ocurre, se pueden deducir las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de las tensiones del eje directo y del eje de cuadratura para los circuitos de la figura 3.18.

$$T'_{d0} \dot{E}'_q = E_f - E'_q + I_d (X_d - X'_d) \quad (3.8)$$

$$T'_{d0} \dot{E}'_q = -E'_D + I_d (X_q - X'_q) \quad (3.9)$$

$$T''_{d0} \dot{E}''_q = E'_q - E''_q + I_d (X'_d - X''_d) \quad (3.10)$$

$$T''_{d0} \dot{E}''_q = E'_d - E''_d + I_q (X'_q - X''_q) \quad (3.11)$$

Las constantes de tiempo que acompañan las derivadas de las fuerzas electromotrices de eje directo y cuadratura en el lado derecho de las ecuaciones (3.8) a (3.11) representan como decaen estas tensiones, en los estados transitorios y subtransitorio, después de ocurrida una perturbación. Estas constantes de tiempo igualmente son expresadas en términos de inductancias propias y mutuas del generador:

$$T'_{d0} = \frac{L_f}{R_f}$$

$$T'_{d0} = (L_D - \frac{L_{fD}^2}{L_f}) \frac{1}{R_D}$$

$$T''_{d0} = \frac{L_Q}{R_Q}$$

Dado que no hay devanado de campo en el eje de cuadratura para el modelo de la figura 3.17, no se tiene constante de tiempo de transitoria en el eje de cuadratura

3.4.1.2 Modelo Mecánico

Para completar el conjunto de ecuaciones necesarias para representar el comportamiento del generador, se requiere de un modelo apropiado de su dinámica mecánica. Se parte de la segunda ley de Newton aplicada a masas rotativas. El momento de inercia J multiplicado por la aceleración angular $\ddot{\theta}_m$ es igual al torque acelerante aplicado sobre el eje

$$J\ddot{\theta}_m = T_a = T_m - T_e \quad (3.12)$$

Donde $\ddot{\theta}_m$ representa el ángulo mecánico del rotor del generador medido con respecto a una referencia fija, y T_a es el torque acelerante, el cual sale de la diferencia entre el torque mecánico y el torque eléctrico aplicado sobre el eje del generador. Al igual que para la determinación del modelo en la parte eléctrica, desde el punto de vista mecánico, es conveniente definir un nuevo marco de referencia, girando solidariamente con el rotor a la velocidad sincrónica; esto con el fin de simplificar los cálculos. El ángulo del rotor con respecto a esta nueva referencia rotativa será ahora llamado δ_m , y estará dado por:

$$\delta_m(t) = \theta_m(t) - (\omega_n t + \alpha + \frac{\pi}{2})$$

Donde ω_n es la velocidad nominal (sincrónica) y $(\omega_n t + \alpha + \frac{\pi}{2})$ define el marco de referencia girante. Si se asume que en $t = 0$ se encuentran alineados el eje de cuadratura con el eje de referencia fijo en el estator, entonces α será el ángulo de desfase entre la referencia fija en el estator y la referencia girante. Adicionalmente δ sería el ángulo entre el eje de cuadratura y el marco de referencia girante. Al aplicar esta premisa, la ecuación (3.8) puede ser escrita de la siguiente forma en el marco de referencia girante:

$$J\ddot{\delta}_m = T_a = T_m - T_e \quad (3.13)$$

Con el fin de expresar las ecuaciones del generador en términos eléctricos, es conveniente cambiar el ángulo mecánico delta δ_m , en ángulo eléctrico δ_e , el cual determina el desfase entre el eje del campo magnético rotativo que se produce en el estator y el eje de cuadratura. La relación entre los ángulos eléctrico y mecánico se da en función del número de polos del rotor p:

$$\delta_e = \frac{p}{2} \delta_m$$

Por su parte la velocidad del campo giratorio se define de forma similar:

$$\omega_e = \dot{\delta}_e = \frac{p}{2} \dot{\delta}_m$$

Usando el concepto de ángulo eléctrico la ecuación (3.13) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{2J}{p} \ddot{\delta}_e = \frac{2J}{p} \dot{\omega}_e = T_a = T_m - T_e \quad (3.14)$$

En los modelos matemáticos del generador es comúnmente usada la constante de inercia H en reemplazo del momento de inercia J. La constante de inercia se define como la energía almacenada en el rotor a velocidad nominal dividida por la potencia aparente nominal S_n . H se relaciona con J de la siguiente forma:

$$H = \frac{J\omega_n^2}{2S_n}$$

Donde $T_B = \frac{S_n}{\omega_n}$ se define como el torque base.

La velocidad angular nominal eléctrica de campo giratorio estará dada por:

$$\omega_{ne} = \frac{p}{2} \omega_{nm}$$

De acuerdo a las anteriores definiciones, la ecuación (3.10) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{2H}{\omega_{ne}} \dot{\omega}_e = \frac{T_m}{T_B} - \frac{T_e}{T_B} \quad (3.15)$$

Si se considera que la velocidad angular ω_m tiene variaciones muy pequeñas durante transitorios, se puede considerar que el momento angular del rotor $M_m = J\omega_m$ es relativamente constante. Si se multiplica la ecuación (3.15) en ambos extremos por ω_m , se obtiene una nueva ecuación que incorpora el momento angular M_m . La anterior hipótesis incorpora un error en la formulación, que puede ser compensado por la inclusión de un nuevo término en la ecuación; el amortiguamiento mecánico D aplicado lo anterior, la ecuación (3.15) queda.

$$M_m \dot{\omega}_m = P_m - P_e \quad (3.16)$$

M y H se relacionan de las siguientes formas:

$$M = \frac{H}{\pi f_0}$$

Sustituyendo M en la ecuación (3.16) y despejando la derivada de la velocidad se tiene:

$$\dot{\omega}_u = \frac{1}{2H} (P_m - P_e - D\dot{\omega}_u) \quad (3.17)$$

$$\delta = \dot{\omega}_u \quad (3.18)$$

3.4.1.3 Modelo del dispositivo Pelamis

El Pelamis es una estructura flotante, semi-sumergida, compuesta por tramos cilíndricos articulados entre sí, que permiten la flexión en dos direcciones (vertical y horizontal). El movimiento de las olas acciona cilindros hidráulicos, que bombean aceite a alta presión hacia un sistema de motores hidráulicos a través de acumuladores hidráulicos reguladores. Los motores hidráulicos accionan generadores eléctricos para la producción de energía eléctrica. El dispositivo está anclado, manteniéndose en una ubicación fija. Las uniones utilizadas para conectar cada tramo tubular están configuradas para aprovechar la energía de las olas desde estados calmos del mar. El movimiento en las articulaciones puede ser controlado activamente para hacer uso del fenómeno de la resonancia, lo que permite a la generación ser maximizada cuando el mar está calmo y reducir

la respuesta durante las tormentas. La energía generada se envía a la costa mediante cables submarinos estándar. El Pelamis está amarrado al fondo del mar utilizando anclas estándar. La estructura completa tiene 180 m de largo, 4 m de diámetro, y pesa 1,300 toneladas. Gran parte de este peso es del lastre de arena, según Pelamis.

Accionamientos de los cilindros hidráulicos:

En la Figura 3.19 se muestra el movimiento producido sobre la estructura por la acción de las olas del mar.

En la Figura 3.20 y en la Figura 3.21 se puede apreciar, en forma esquemática, como se aprovecha el movimiento de la estructura del Pelamis debido a las olas, para accionar los pistones de los cilindros hidráulicos.

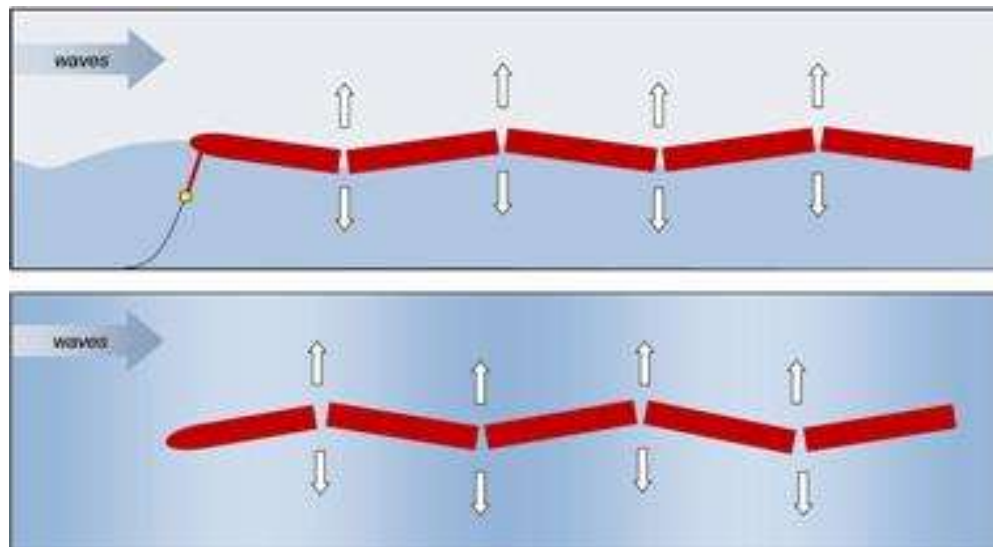


Figura 3.19 Movimiento producido por el sistema

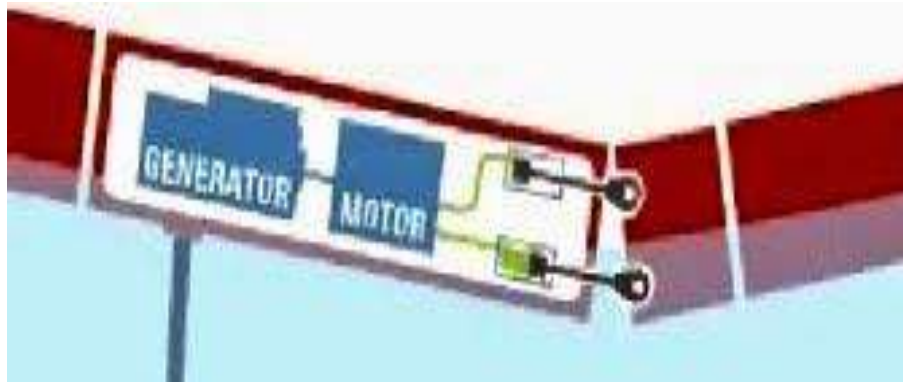


Figura 3.20 Aprovechamiento del sistema en los cilindros hidráulicos

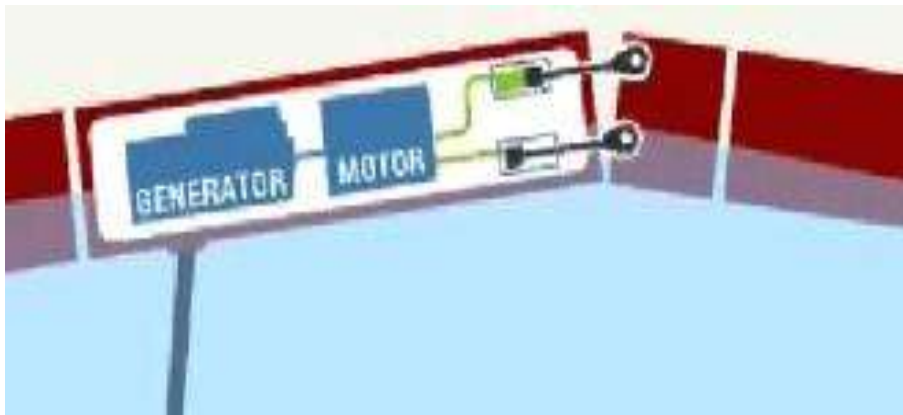


Figura 3.21 Aprovechamiento del sistema en los cilindros hidráulicos

Las articulaciones permiten el movimiento en dos direcciones (vertical y horizontal)

En las Figuras 3.22 y 3.23 se puede ver que la articulación de la izquierda permite el movimiento en la dirección vertical y la derecha en la dirección horizontal. En ambos casos los pistones de los cilindros hidráulicos son accionados por el movimiento.

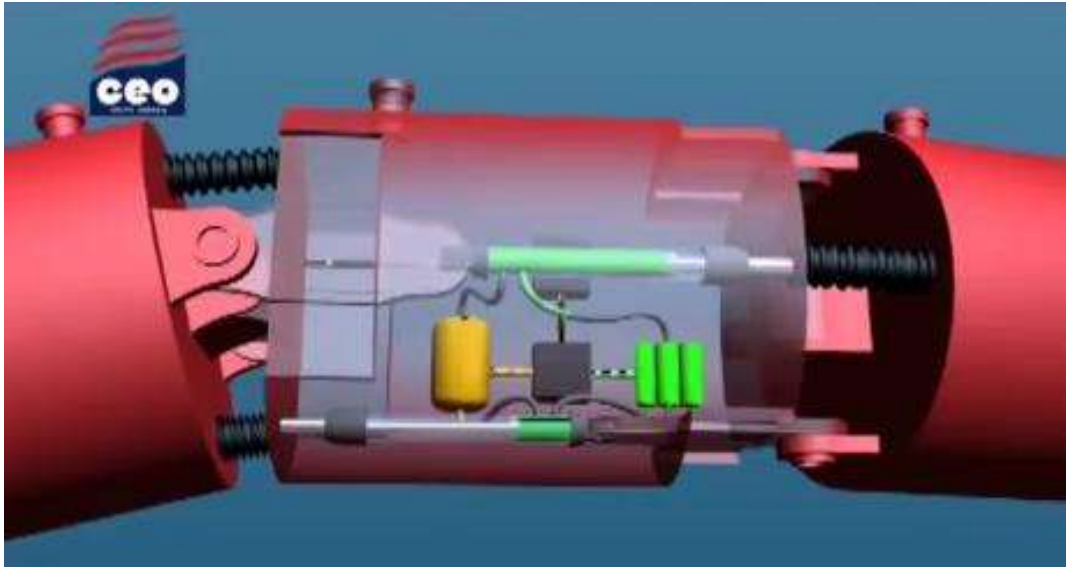


Figura 3.22 Articulación de la izquierda

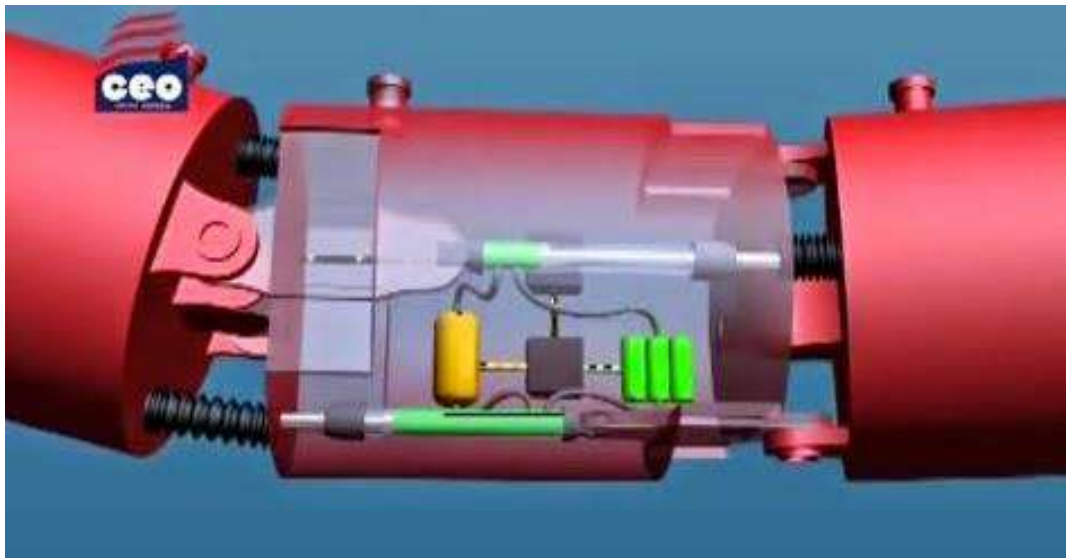


Figura 3.23 Articulación de la derecha

El diagrama en bloques de las acciones de Pelamis se ilustra en la siguiente figura 3.24.

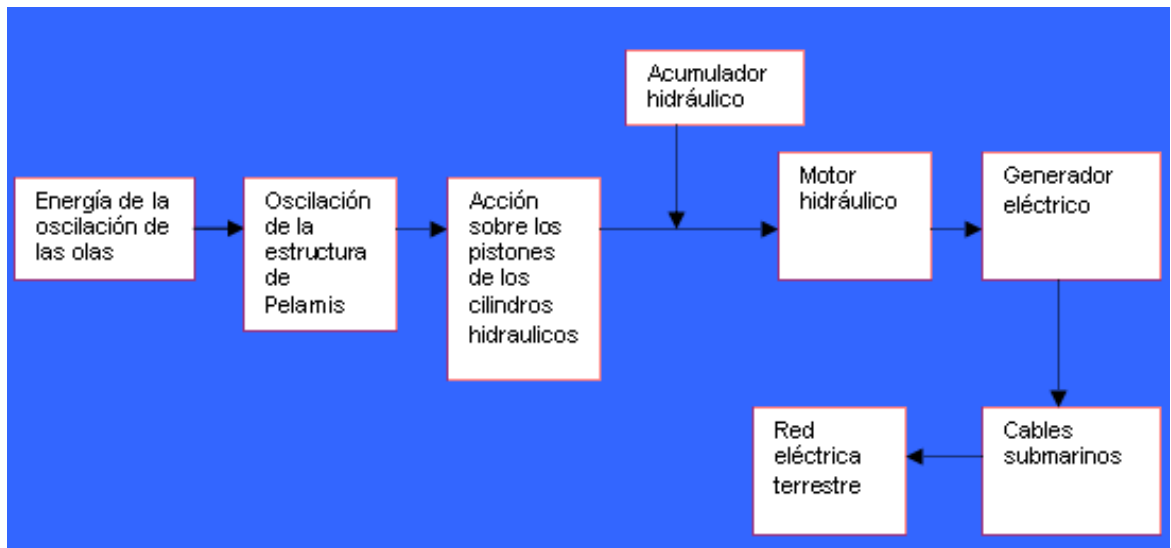


Figura 3.24 Diagrama de bloque de acciones de Pelamis

Un tipo de motor hidráulico es el representado de la figura 3.25, junto con una bomba hidráulica, para asociar que su funcionamiento es opuesto al de la bomba. En la bomba los engranajes giran accionados por un motor externo, no representado en la figura, produciendo la elevación de la presión del aceite que entra por la izquierda y sale con mayor presión por la derecha. En el caso del motor hidráulico, el aceite ingresa con alta presión por la izquierda, hace girar los engranajes y sale por la derecha con baja presión.

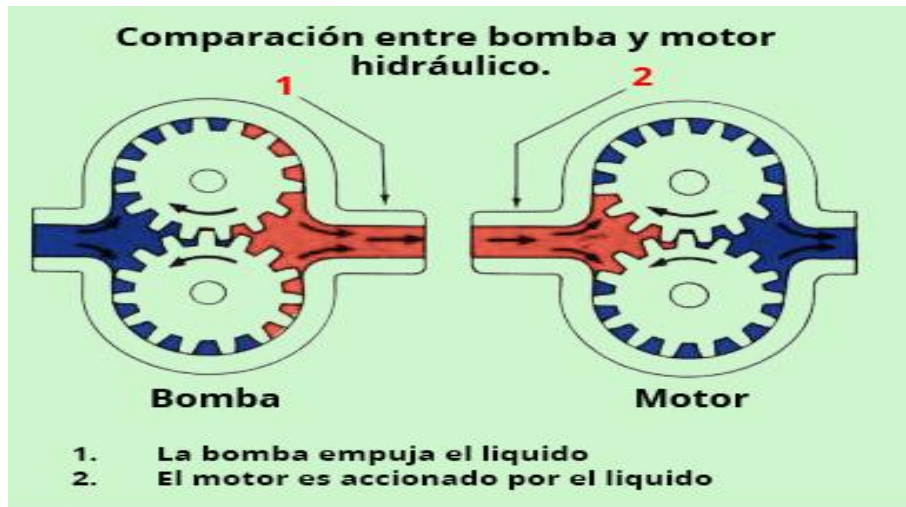


Figura 3.25 Bomba y Motor hidráulico

En un acumulador hidráulico a resorte, como el mostrado en la Figura 3.26. Cuando la presión del aceite es alta, el resorte se comprime, “memorizando” dicha presión y cuando la presión del aceite baja, el resorte se elonga, manteniendo la presión en el aceite alta dentro de ciertos límites.

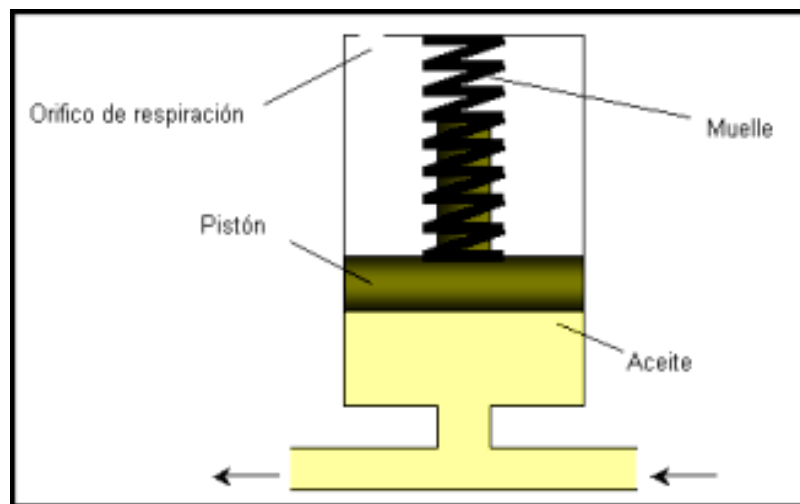


Figura 3.26 Acumulador hidráulico

El modelo matemático del sistema Undimotriz Pelamis, está definido por

$$\dot{x} = \frac{-b}{m^2(n^2C_1 + C_2) + J}x + \frac{n^2m^2C_1}{m^2(n^2C_1 + C_2) + J}u$$

$$y = \frac{1}{nmC_1}x$$

Donde

b es la fricción de los elementos mecánicos del motor hidráulico, en $N - s/m^5$.

J es el momento de inercia del motor hidráulico, en $N - m - s^2$.

m es la constante de conversión del motor hidráulico. De energía hidráulica a energía mecánica.

C_2 es la constante del sistema amortiguamiento de las olas

n es la constante de conversión de los pistones

C_1 es la constante de almacenamiento del sistema Pelamis

u es la entrada de velocidad de las olas, en m/s .

x es la variable de estado de la variación de volumen de almacenamiento del sistema Pelamis, en m^5/N .

y es la velocidad angular de salida del motor hidráulico del sistema Pelamis, para ser la entrada al generador eléctrico, en rad/s .

CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DEL MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGIA UNDIMOTRIZ CON EL DISPOSITIVO PELAMIS

4.1 Simulación del sistema de generación de energía Undimotriz con el dispositivo Pelamis en Matlab Simulink®.

En el capítulo anterior se obtuvo el modelo del sistema de generación de energía Undimotriz con el dispositivo Pelamis, en el marco de referencia dq0. A continuación se describen los diagramas de simulación de dicho modelo general. En la simulación del sistema, se realizan las consideraciones expuestas en la sección 3.4.1.1.

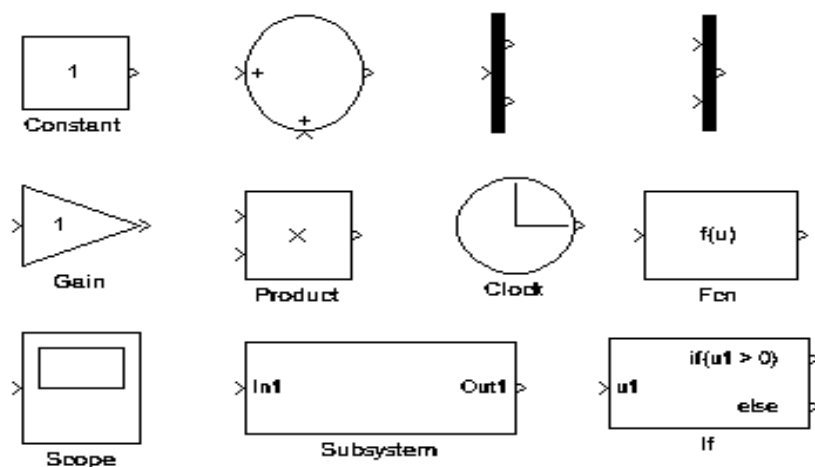


Figura 4.1 Bloques de Matlab Simulink®

Se hacen varios diagramas de simulación, tal como el de la matriz de transformación de Clark-Park, para obtener una respuesta de los voltajes y corrientes en el marco de referencia **dq0**, al igual que los diagramas de simulación de la inversa de dicha matriz para saber la respuesta en **abc**. Después se prosigue a crear los diagramas de simulación del modelo del sistema Undimotriz, obtenido en la sección 3.4.1.3 en el marco de referencia dq0. Donde se utiliza la matriz de transformación de Clark-Park, y su inversa para así poder obtener la respuesta del sistema en el marco de referencia **dq0** y **abc**. Todo el desarrollo de la simulación se realiza en la plataforma de Matlab Simulink®, por lo que se utilizan los diagramas de bloques de este simulador como sumadores, multiplicadores, integradores, etc. Véase la figura 4.1.

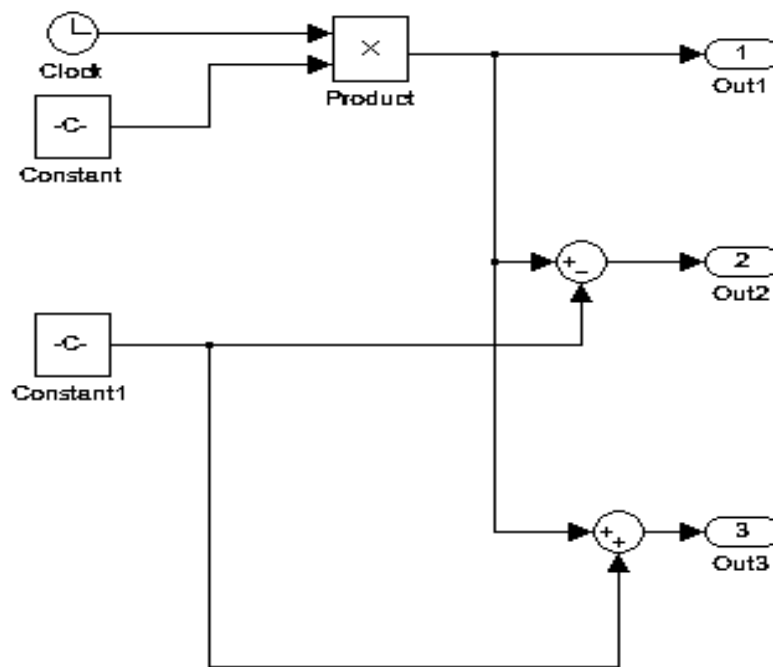


Figura 4.2 Velocidad del sistema, ángulos de desfase

Antes de realizar la simulación de la transformada de Clark-Park, lo primero que se debe realizar es una fuente trifásica, que a continuación se muestran los diagramas de simulación en las figura 4.2 y 4.3.

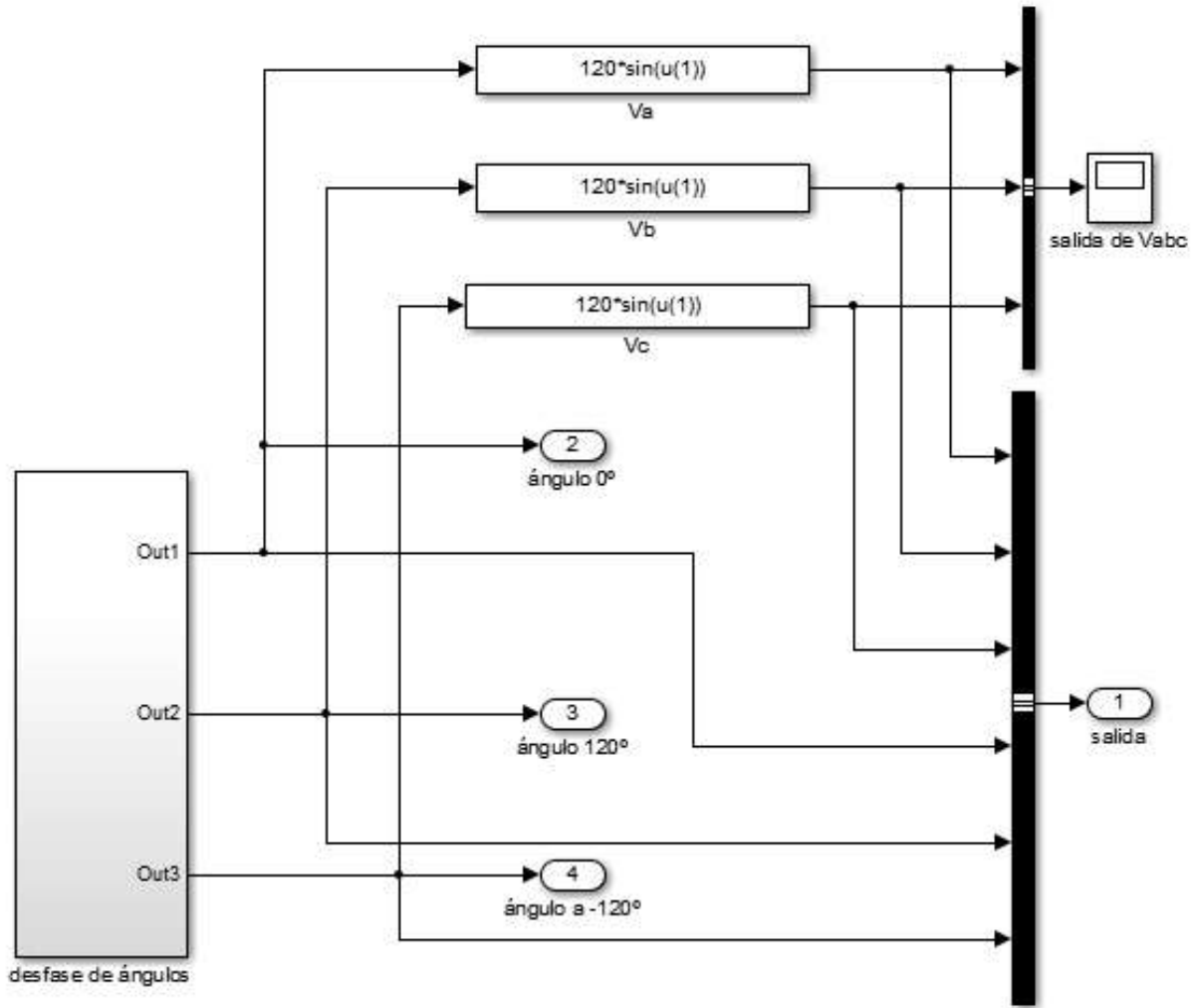


Figura 4.3 Funciones de la fuente trifásica en abc

En la figura 4.4 se realiza la simulación de las variables trifásicas como el voltaje pico, la velocidad del sistema, donde se incluye la frecuencia que se utiliza para este caso es de 60 Hz, el cuál es un sistema balanceado desfasado a 120° , todo esto da origen a los ángulos eléctricos, sumando a su correspondiente desfasamiento. Una vez que se tiene el resultado en la salida ángulos y magnitud, donde esto pasa a la simulación de la figura 4.4 para obtener el voltaje trifásico donde en la salida de los ángulos se tiene a rotación eléctrica del sistema $\theta_e = 2 * \pi * f$ el cual será útil para la transformación de **dq0**.

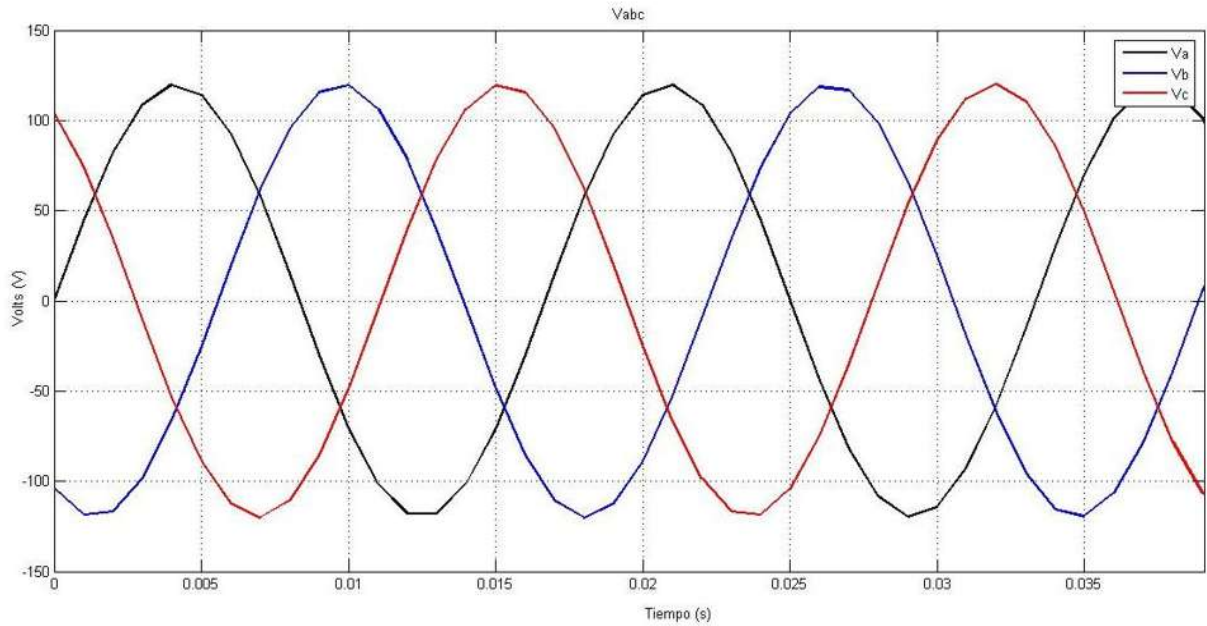


Figura 4.4 Respuesta del voltaje en abc

La respuesta de la fuente de voltaje en Matlab Simulink® se muestra en la figura 4.4, el cuál es la fuente propuesta en el capítulo 3.4, se tiene un $V_m = 120$ volts con la frecuencia dicha.

4.2 Simulación de la matriz de Clark-Park en Matlab Simulink®

Sabiendo que el marco de referencia $dq0$ es un marco de referencia estático el cual se tiene el diagrama de simulación mostrado en la siguiente figura 4.5, que se representa la matriz de Park.

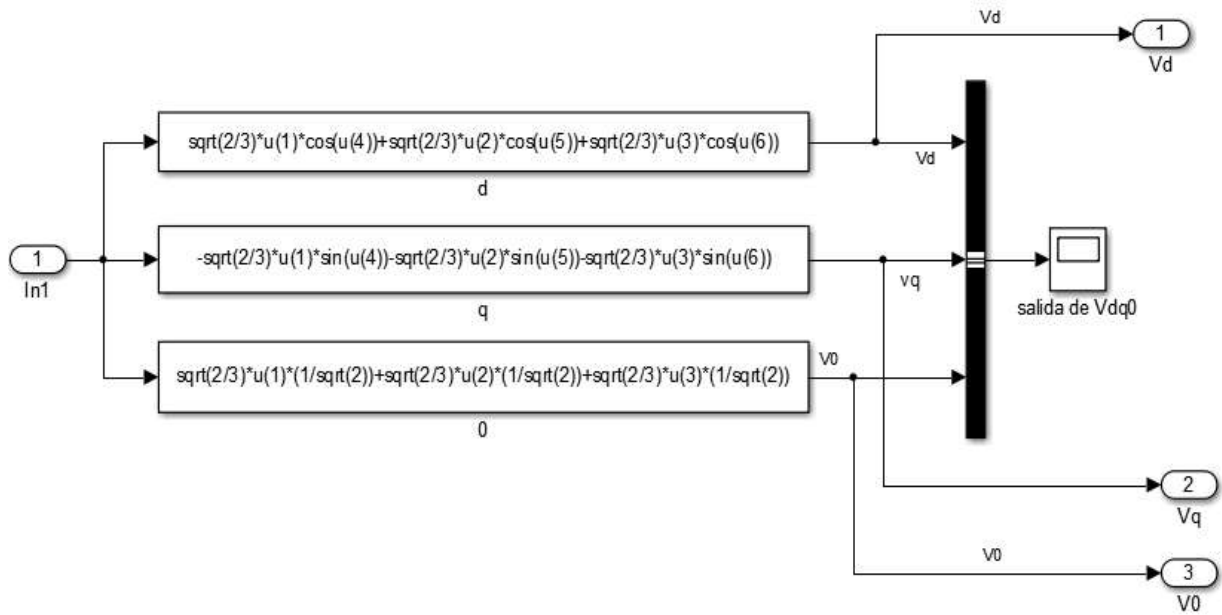


Figura 4.5 Diagrama de simulación de la matriz dq0

La respuesta que se obtiene en el marco de referencia dq0, se aprecia en la figura 4.6, donde se ve claramente que la variación del sistema oscilatorio desaparece, quedando componentes constantes.

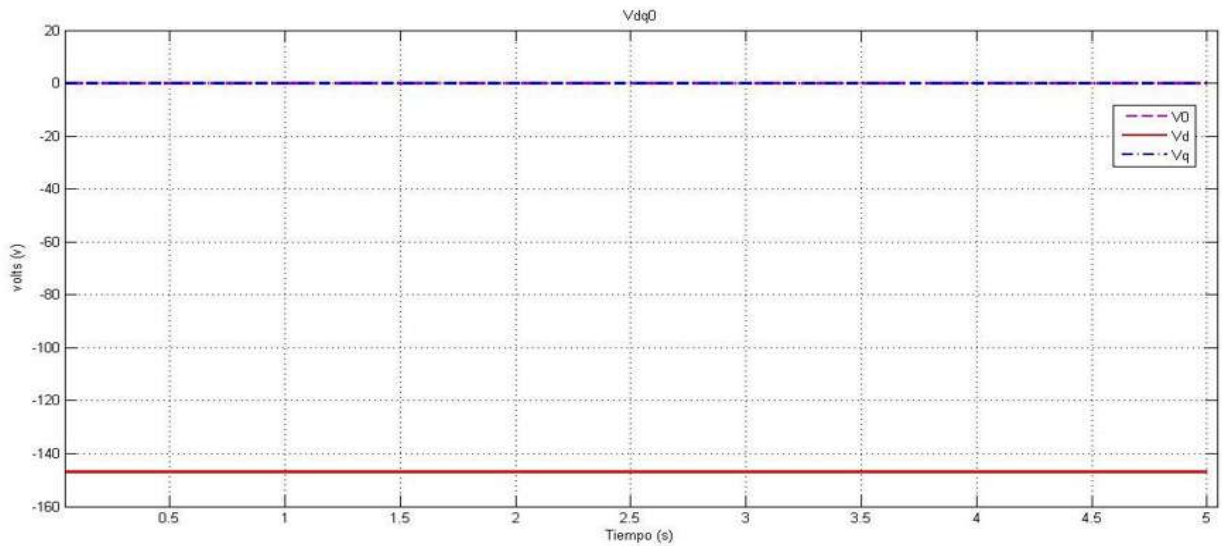


Figura 4.6 Respuesta dq0

4.3 Simulación del Sistema de Generación Undimotriz en dq0 en Matlab Simulink®

A partir de aquí se presenta el modelado del sistema de generación Undimotriz del tipo Pelamis, cuyo modelo está en el marco de referencia $dq0$, tal como se expone en la sección 3.4.1 de esta tesis. Lo primero que se realiza, es el diagrama de simulación de la corriente $idq0$, que son las ecuaciones de (3.1) incluyendo i_0 . Sabiendo que en un sistema trifásico balanceado sus valores es cero.

Una vez que se realiza el diagrama de simulación de las corrientes $idq0$; se realiza el diagrama de simulación del par eléctrico T_e , cuya ecuación es (3.18) y por último se realiza el diagrama de simulación, la parte en donde se logra encontrar la velocidad mecánica.

Para los sistemas dinámicos sobre todo en las máquinas eléctricas; se considera que el voltaje es contante y sinusoidal variante en el tiempo a la salida, por lo que se representa con variables de estado, en este capítulo, se realizan los diagramas de simulación de las corrientes en $dq0$, donde se usa la transformada de Clark-Park; para obtener el voltaje en $dq0$ y obtener el comportamiento de la corriente del sistema de generación de energía Undimotriz. La corriente i_d se encuentra en el eje de directa, su relación es colineal con el campo magnético del estator, la cual el diagrama de simulación se muestra en la figura 4.7.

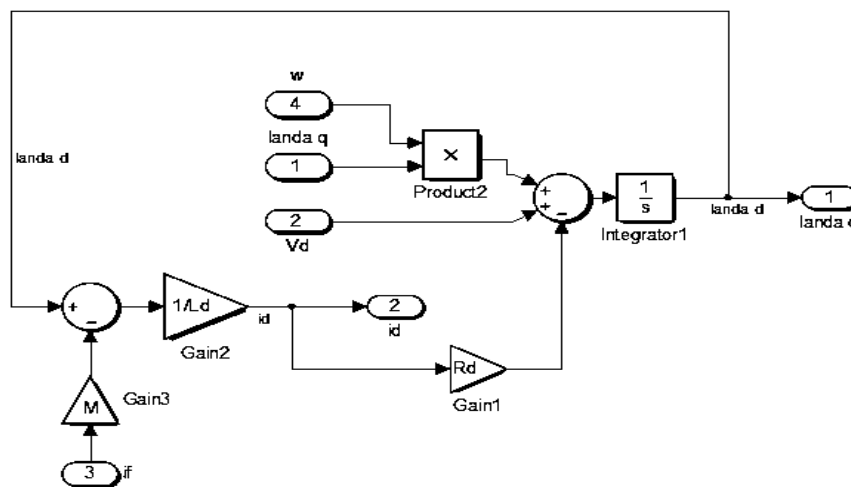


Figura 4.7 Diagrama de simulación de i_d

La corriente i_q , está ubicada en el eje de cuadratura a 90° del campo magnético del estator. El diagrama de simulación de la ecuación de i_q (3.1); se muestra en la figura 4.8, por el cual esta corriente i_q está dada directamente, por el flujo magnético del generador.

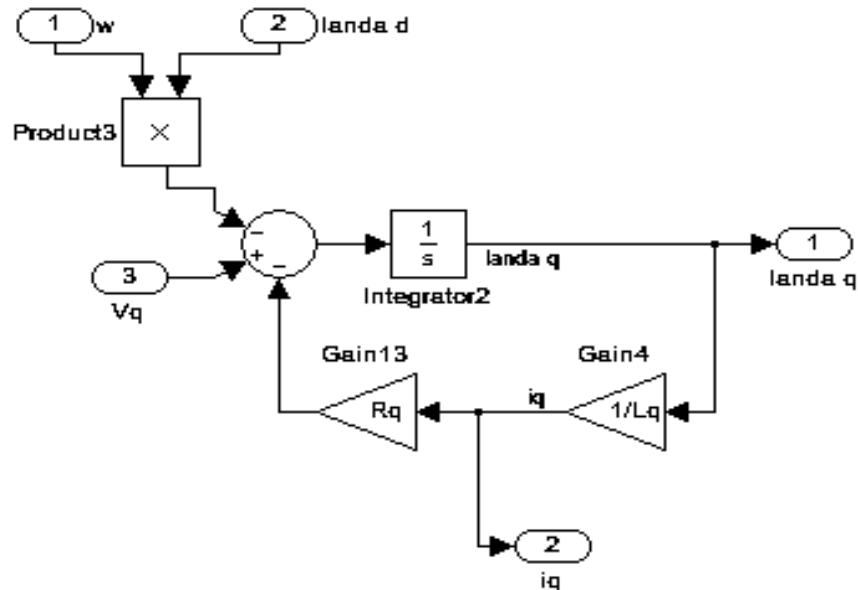


Figura 4.8 Diagrama de simulación de i_q .

El diagrama de simulación de la corriente i_0 , se presenta en la figura 4.9, se está desacoplado del sistema magnético, pero su importancia reside que al existir i_0 el sistema entra en desbalance. Al tener desarrollado los diagramas de simulación de las corrientes i_{dq0} , se presenta el diagrama general de las ecuaciones en la figura 4.10. De esta manera se obtiene el diagrama de las corrientes del sistema, el paso siguiente será el del diagrama del par eléctrico y el par mecánico.

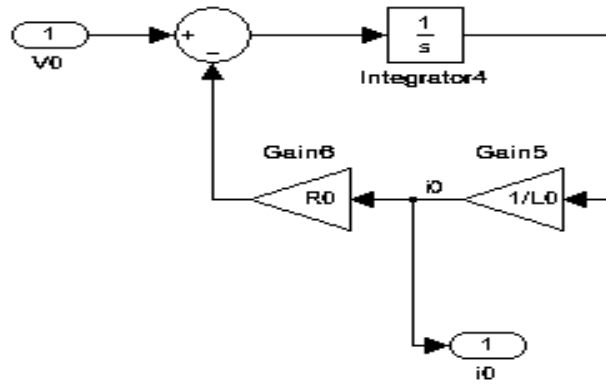


Figura 4.9 Diagrama de simulación de i_0 .

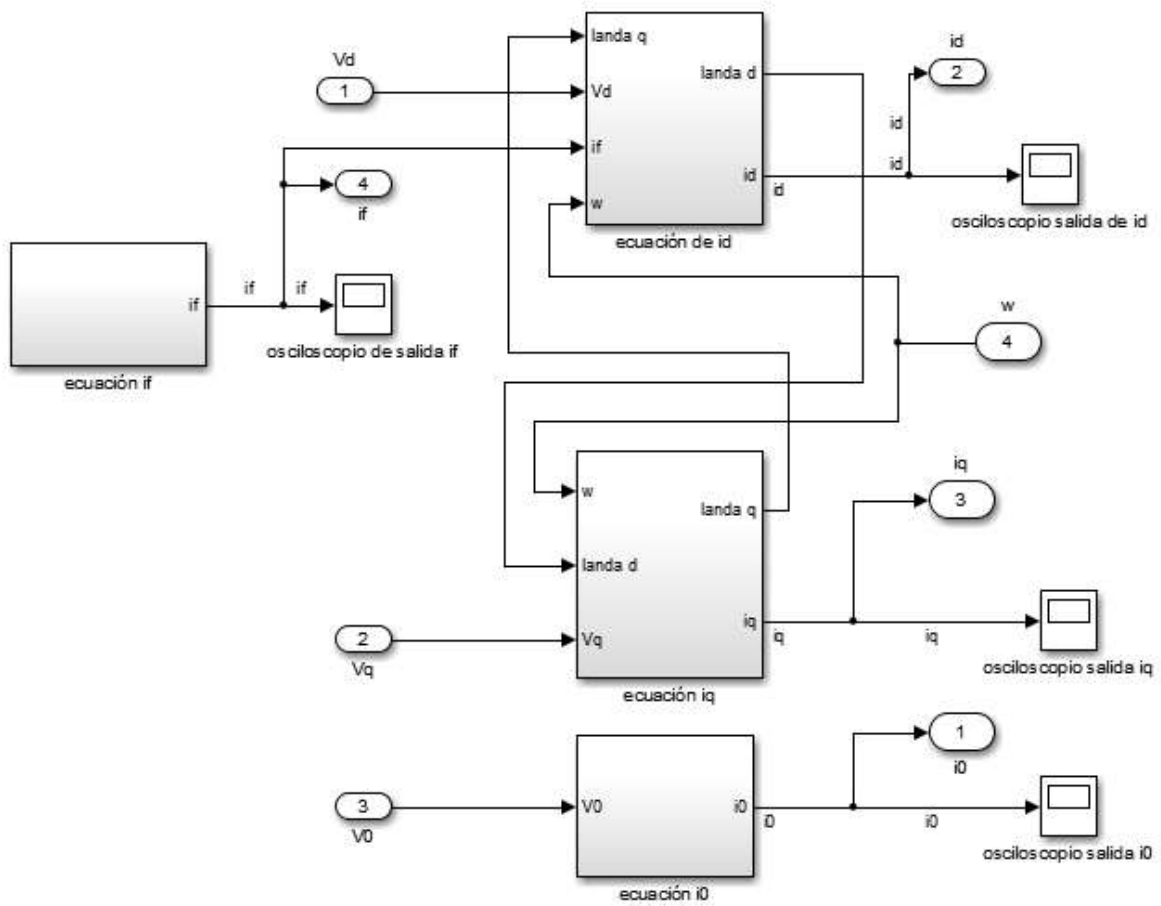


Figura 4.10 Diagrama de simulación de $idq0$.

En la figura 4.11, se presenta el diagrama de simulación del Par eléctrico T_e , cuya ecuación es (3.18), la función del Par eléctrico es importante; y depende de las corrientes de i_d e i_q , al igual que el flujo magnético y también del número de polos, como se menciona anteriormente.

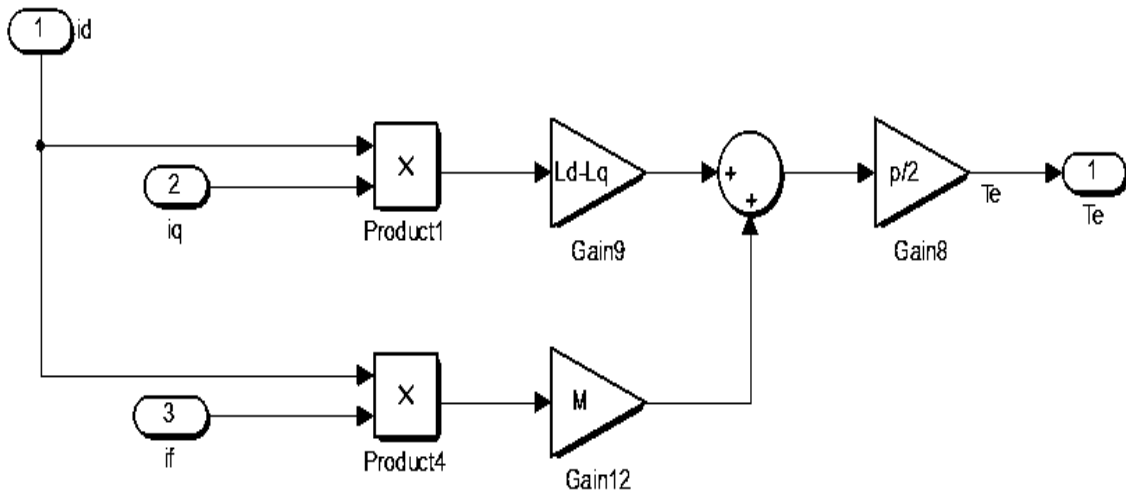


Figura 4.11 Diagrama de simulación del Par eléctrico T_e .

De este modo, el par eléctrico se relaciona con el sistema mecánico de la máquina, es donde se empieza el modelo de diseño del dispositivo Pelamis, comenzando por partes hasta obtener el par mecánico del sistema.

En la figura 4.12 se observa el diagrama de la frecuencia angular de las ondas marinas

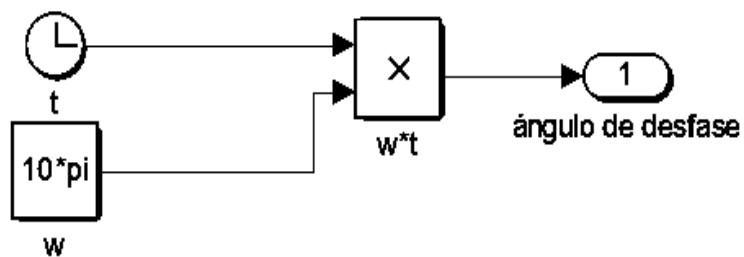


Figura 4.12 Frecuencia angular de las ondas marinas

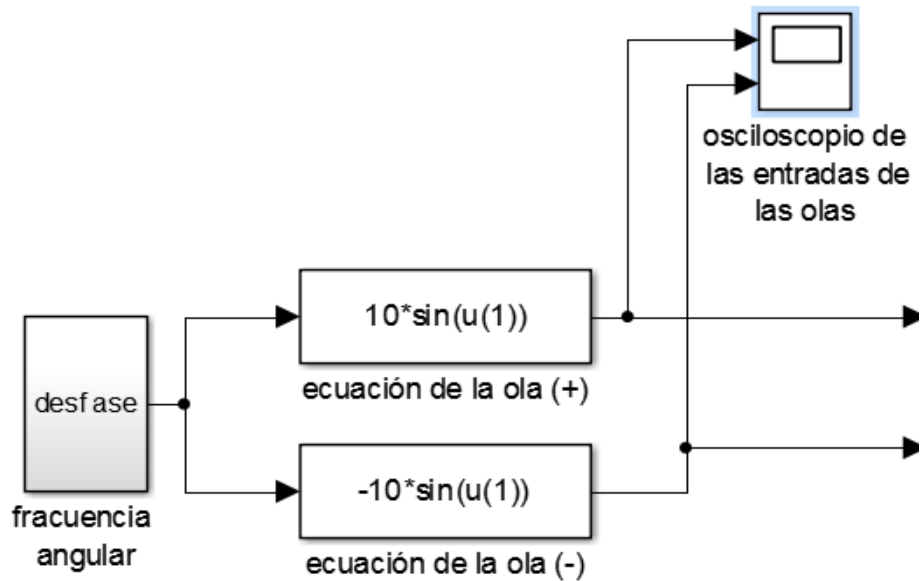


Figura 4.13 Ecuación senoidal de las ondas marinas

Continuando con la secuencia del dispositivo Pelamis, como entrada al sistema se implementa la ecuación senoidal de las ondas marinas. El diagrama de bloque se muestra en la figura 4.13, tomado de la ecuación mencionada en la sección 3.4.1.3.

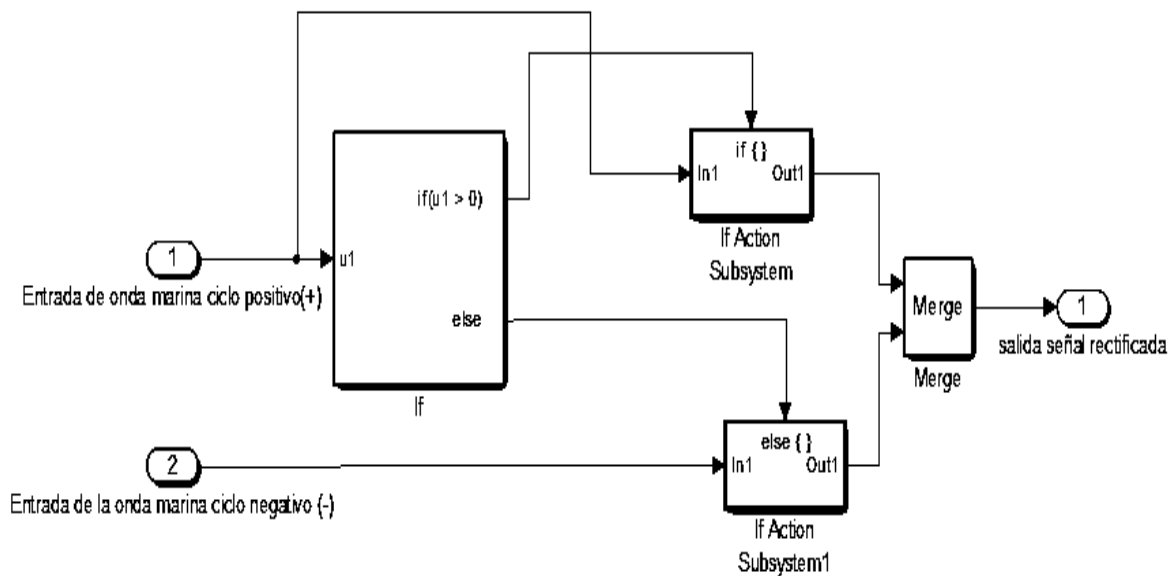


Figura 4.14 Rectificador de las ondas marinas

El modelo del dispositivo Pelamis se utiliza un motor hidráulico el cuál se substituyó por condicionar las salidas de las ondas marinas tal como se implementa en el siguiente diagrama de bloque, que se observa en la figura 4.14, con la finalidad de mandar la señal de entrada al dispositivo Pelamis.

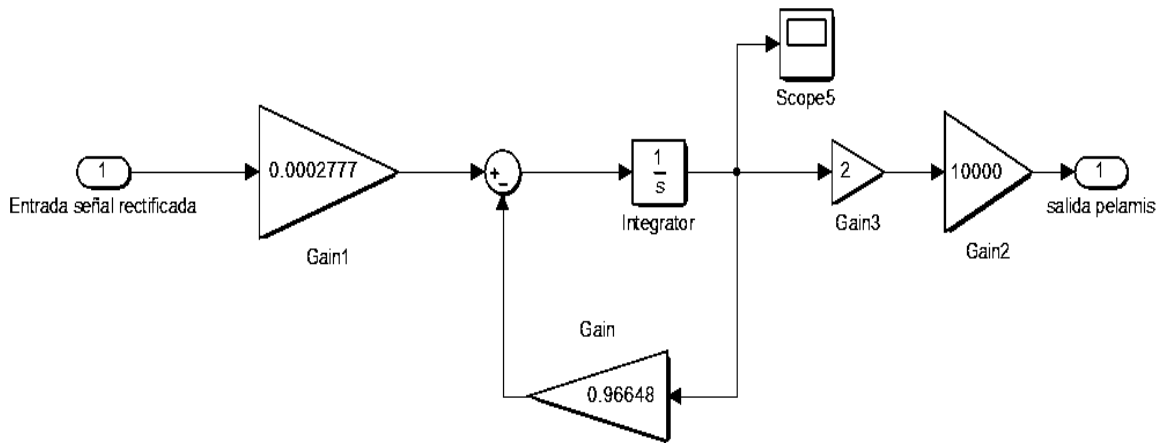


Figura 4.15 Modelo del dispositivo Pelamis

Usando las ecuaciones del modelo del dispositivo Pelamis se prosigue a obtener los diagramas de bloques, tomando en cuenta lo mencionado en la sección 3.4.1.3. El diagrama de bloques del Pelamis se observa en la figura 4.15.

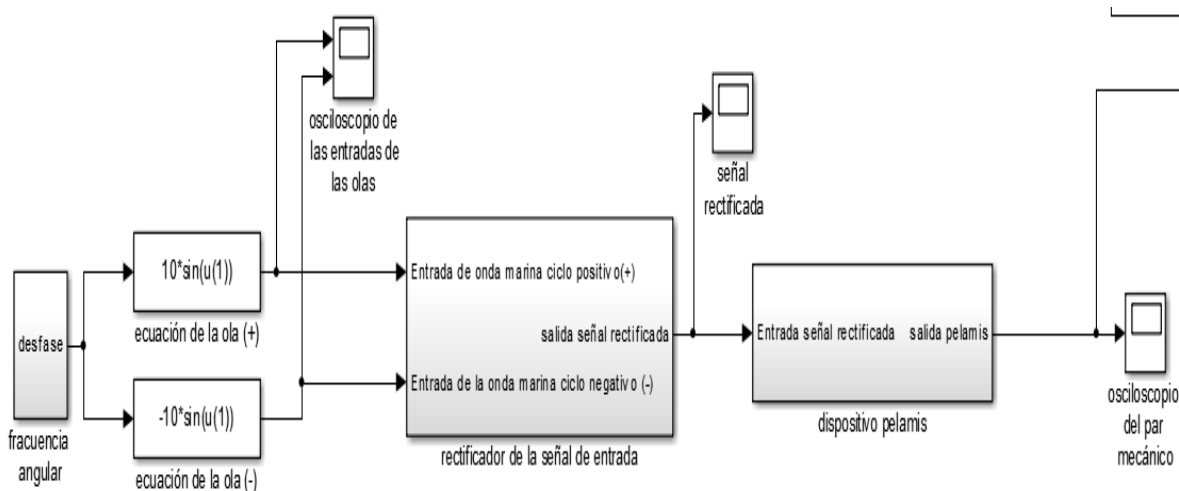


Figura 4.16 Diagrama de bloque de T_i

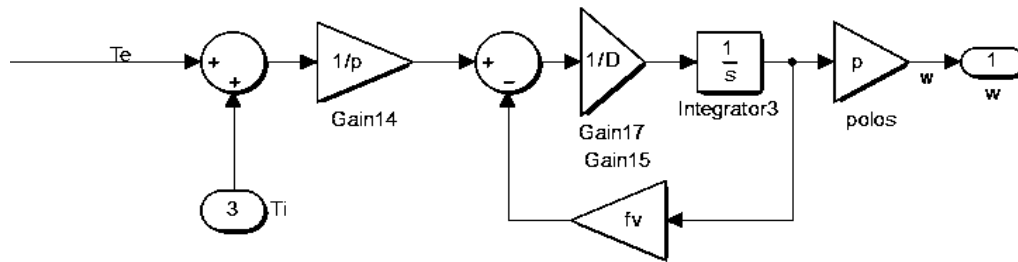


Figura 4.17 Diagrama de bloque de la velocidad del generador

Una vez obtenido el diagrama general del sistema de generación Undimotriz de tipo Pelamis, las variables eléctricas, queda más que relacionarlas el par mecánico y eléctrico, el cual queda definido como se muestra en la figura 4.17.

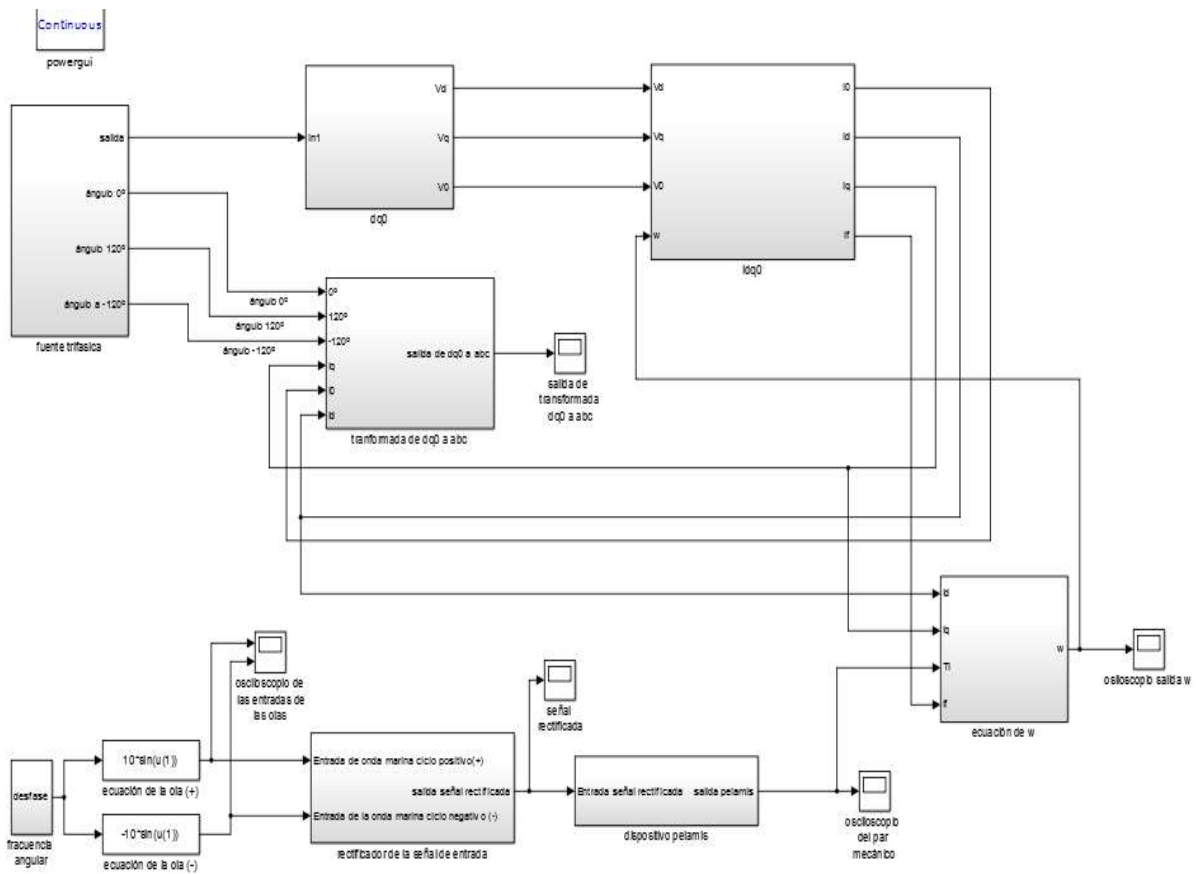


Figura 4.18 Diagrama general del sistema de generación Undimotriz Pelamis

Tal como se muestra en la figura 4.18, se incluye la fuente trifásica, la transformada de Clark-Park y su respuesta inversa, así como el modelo del dispositivo Pelamis, donde se puede observar y ver la respuesta de las corrientes en dq0 y en abc, así concluimos el modelado del sistema de generación Undimotriz con el dispositivo Pelamis.

Por último, lo que falta es ver las respuestas del sistema, tales como corrientes y voltajes en dq0 y abc, como también conocer el par eléctrico y la velocidad del rotor.

4.4 Respuesta del sistema de generación Undimotriz en dq0 y abc en Matlab Simulink®

Para finalizar la simulación de generador Undimotriz, en este capítulo y sección se presenta la respuesta del sistema, tomando en cuenta los valores de la tabla 4.19, con características para la simulación.

Para realizar la prueba se simula los siguientes diagramas con los valores mencionados en la tabla 4.19, el diagrama de bloque general se observa en la figura 4.20.

| Parámetro | Valor |
|-----------|-----------|
| L_d | 0.0070 H |
| L_q | 0.0064 H |
| L_0 | 0.0070 H |
| L_f | 0.00265 H |

| | |
|-------------|-------------------|
| R_d | 1.001096 Ω |
| R_q | 1.001096 Ω |
| R_0 | 1.001096 Ω |
| R_f | 1.000742 Ω |
| P_{polos} | 4 |
| fv | 0.0517 |
| M | 0.0055 |
| D | 0.003192 |
| V_f | 12 volts |

Figura 4.19 Tabla de valores del generador Undimotriz tipo Pelamis

El voltaje para este sistema se mantendrá constante y sinusoidal sin transitorios por lo que se tiene la figura 4.21, donde se muestra el voltaje en abc, tal como se propuso en el capítulo 3, que es la ecuación (3.6), la razón de cambio de magnitud del voltaje es porque se multiplicó por la constante de Clark que es $\sqrt{\frac{2}{3}}$, esto se hace para la transformada de dq0, o se tenga la magnitud original propuesta. En la respuesta de voltaje de dq0, se tiene en la figura 4.22, por lo que Vd se logra observar que tiene la magnitud propuesta, y en los voltajes de Vq y V0 son casi nulos por lo que se genera un ruido numérico por el integrador.

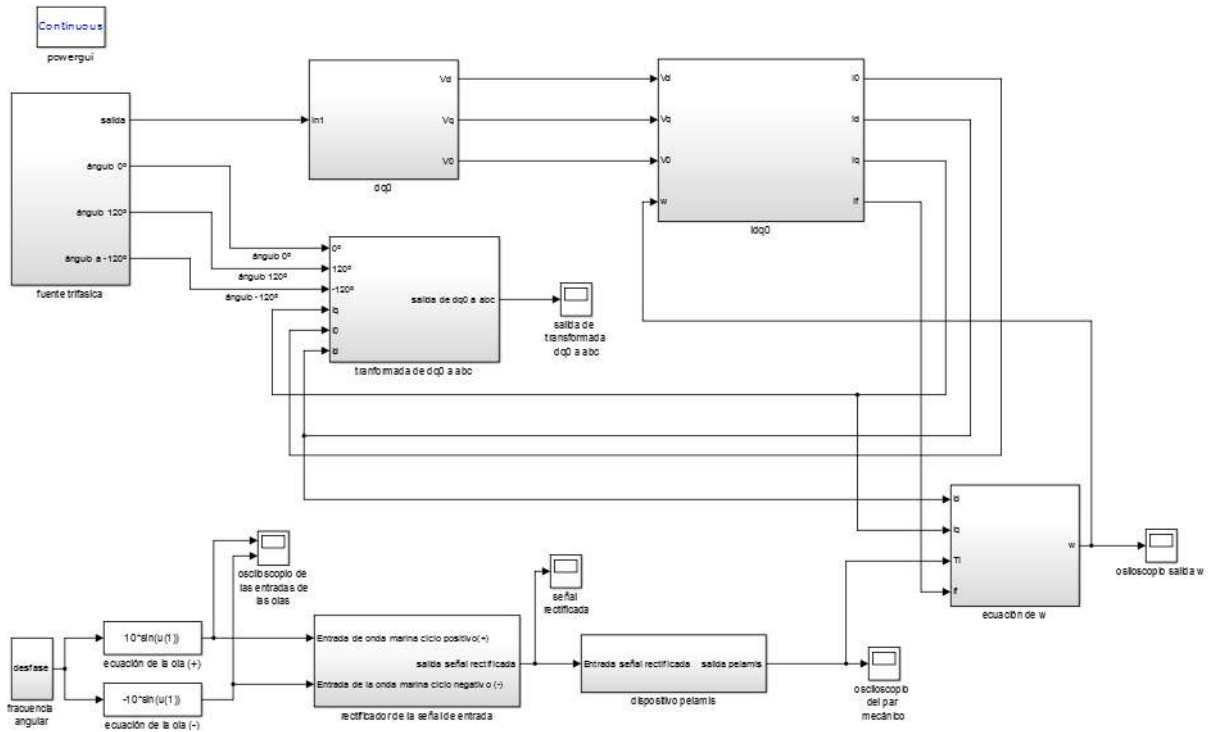


Figura 4. 20 Diagrama general de simulación con las transformadas de Clark-Park en Matlab Simulink®

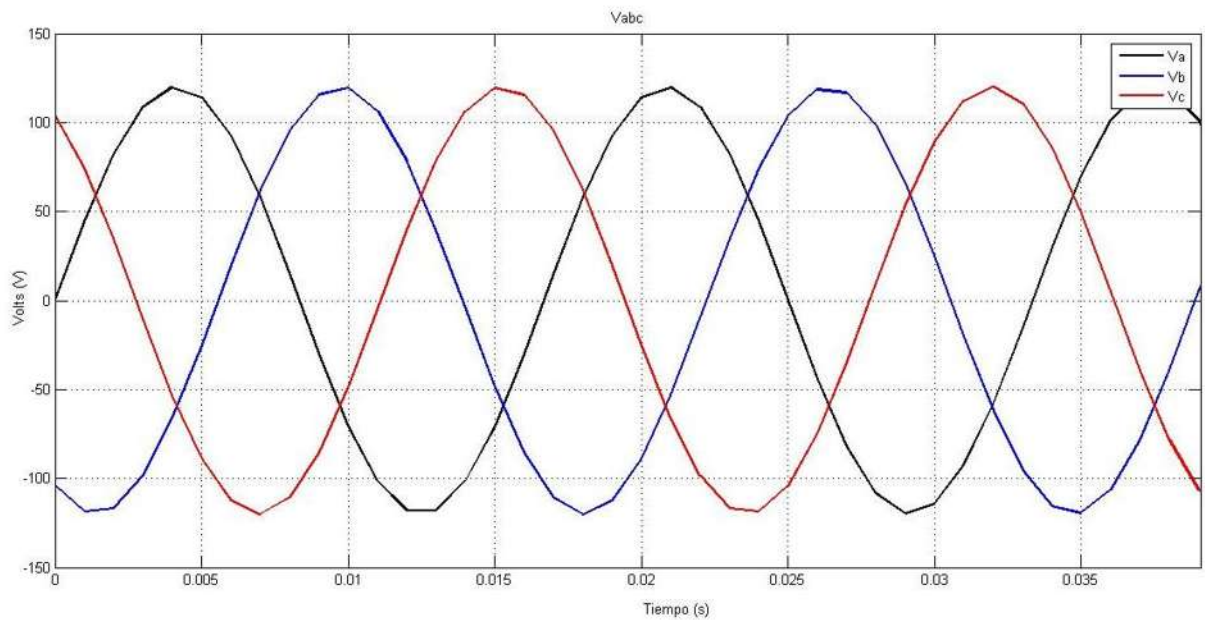


Figura 4.21 Voltaje del sistema en abc

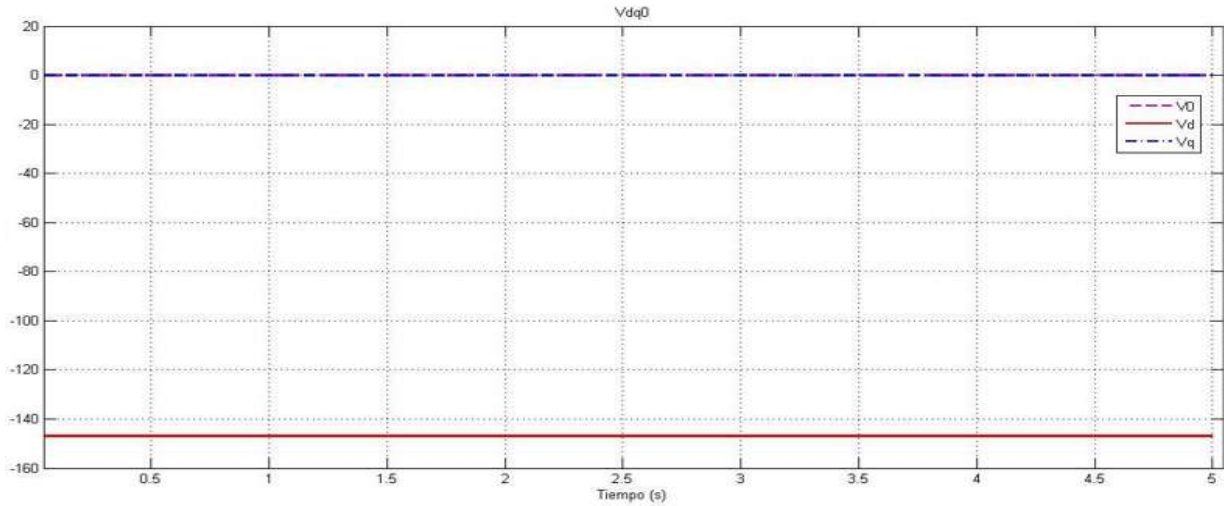


Figura 4.22 Voltaje directa en dq0

Las corrientes $idq0$ del sistema de generación Undimotriz, tiene una respuesta como se muestra en las figuras 4.23, 4.24 y 4.25 donde la corriente id es opuesta y con una magnitud mayor que iq y los que corresponde a la corriente $i0$ tiende a cero, esto significa que el sistema está balanceado, por lo que iq tiene más relación con el trabajo como generador o como motor.

La corriente id se muestra en la siguiente figura 4.23.

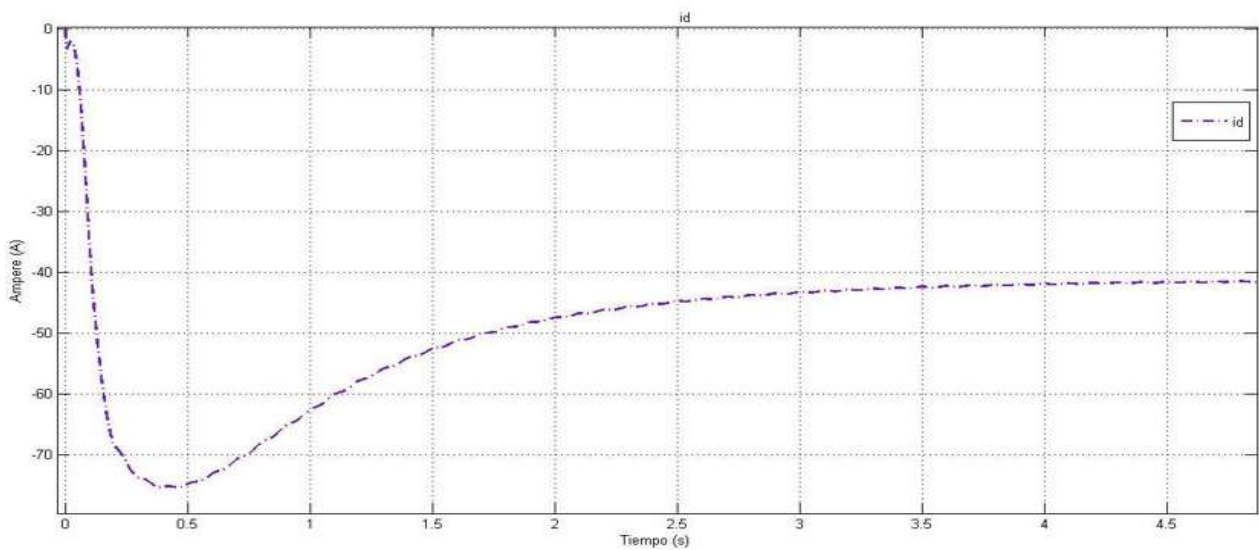


Figura 4.23 Corriente directa en dq0

En la figura 4.24 se observa la respuesta de la corriente en cuadratura en dq0

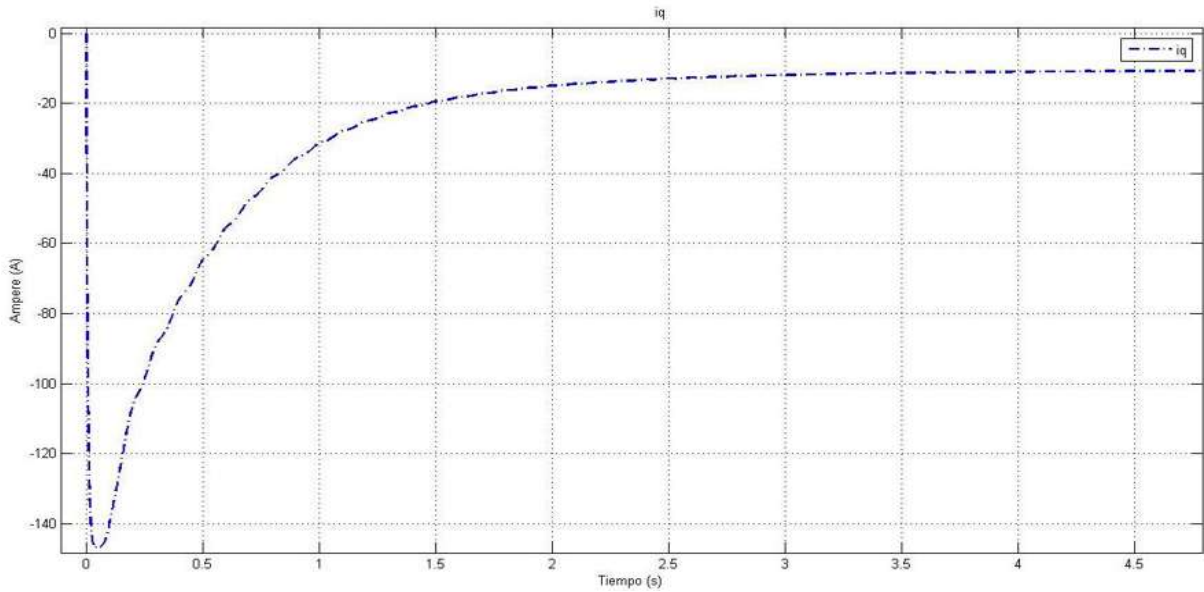


Figura 4.24 Corriente en cuadratura de dq0

En la figura 4.25 se observa la respuesta de la corriente en cero el cual se observa simplemente como un ruido.

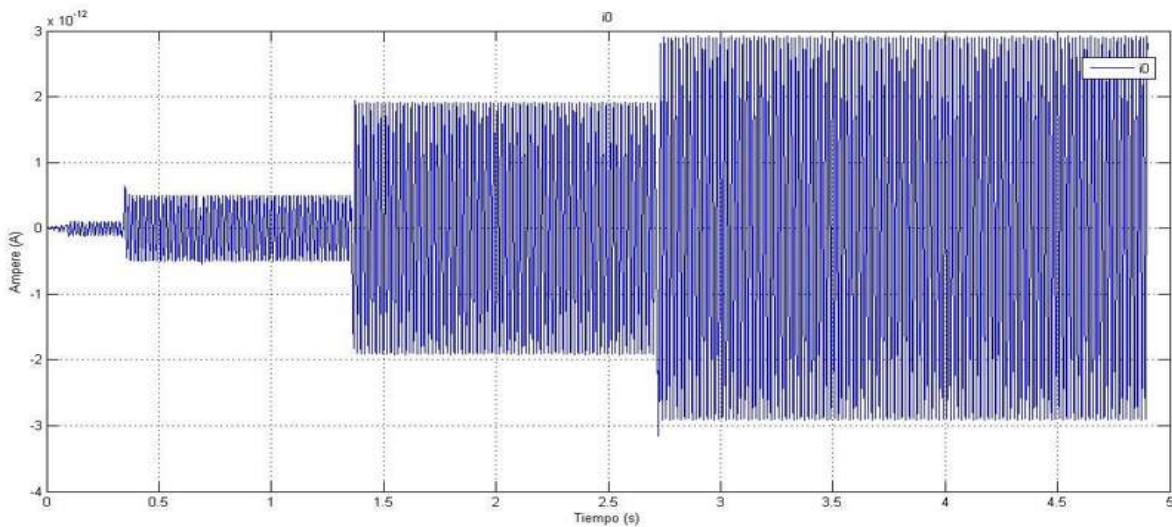


Figura 4.25 Corriente cero en dq0

En la figura 4.26 se obtiene la respuesta de la fuente de excitación del generador.

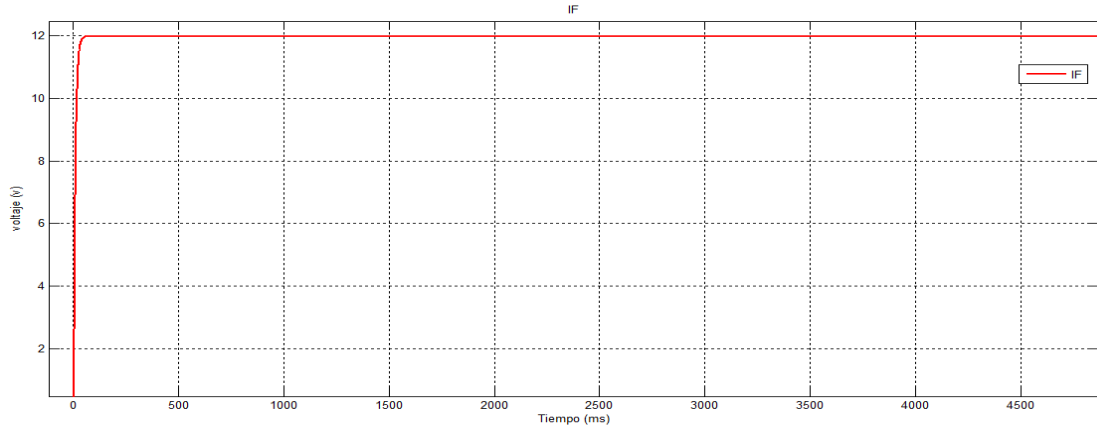


Figura 4. 26 Corriente de la fuente de excitación i_f

Las corrientes en abc como se muestra en la figura 4.27, se muestran la respuesta, por lo que no es afectado por la transformación de Clark-Park.

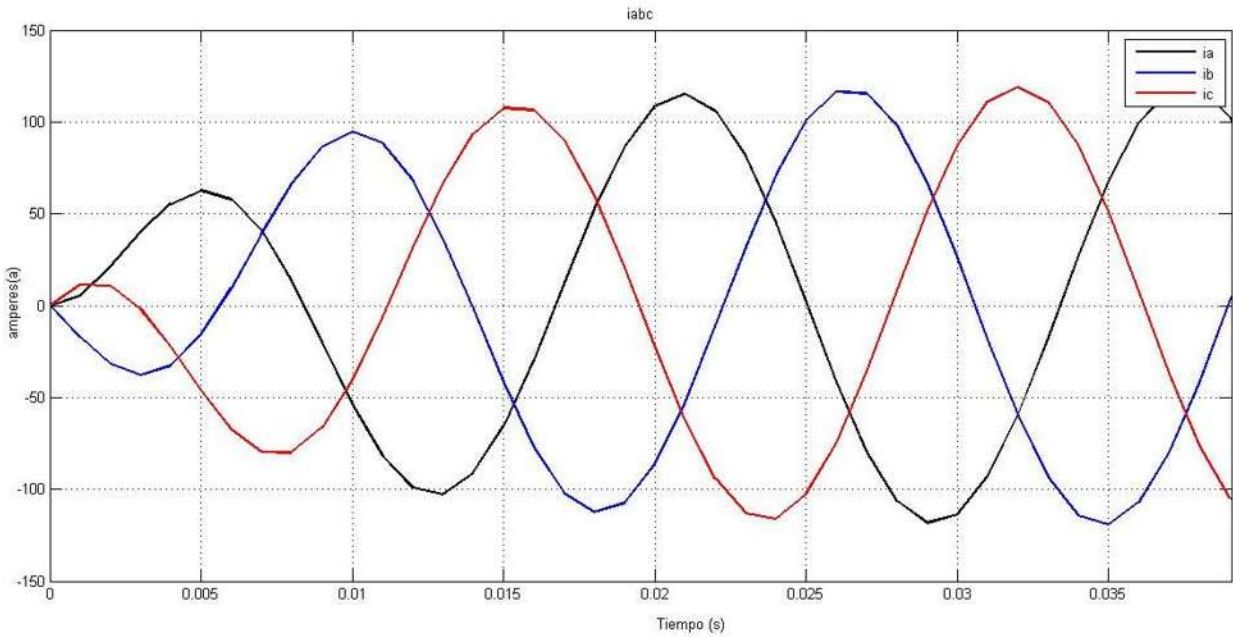


Figura 4.27 Corriente en abc

El par eléctrico es muy importante porque se encuentra íntimamente ligado con las corrientes, los polos de la máquina y las inductancias. Para esto se da a conocer la respuesta del par eléctrico en la figura 4.28. El signo negativo significa que se está trabajando como generador eléctrico.

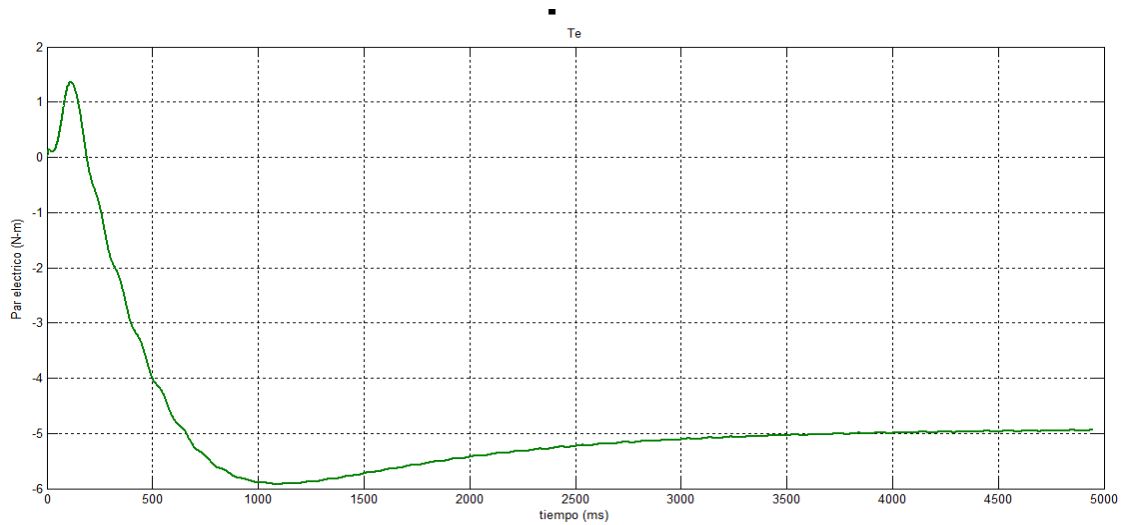


Figura 4.28 Par eléctrico

Para implementar el par mecánico T_i , se empezó obteniendo las respuestas de la ecuación de la onda, tal como se muestra en la siguiente figura 4.29.

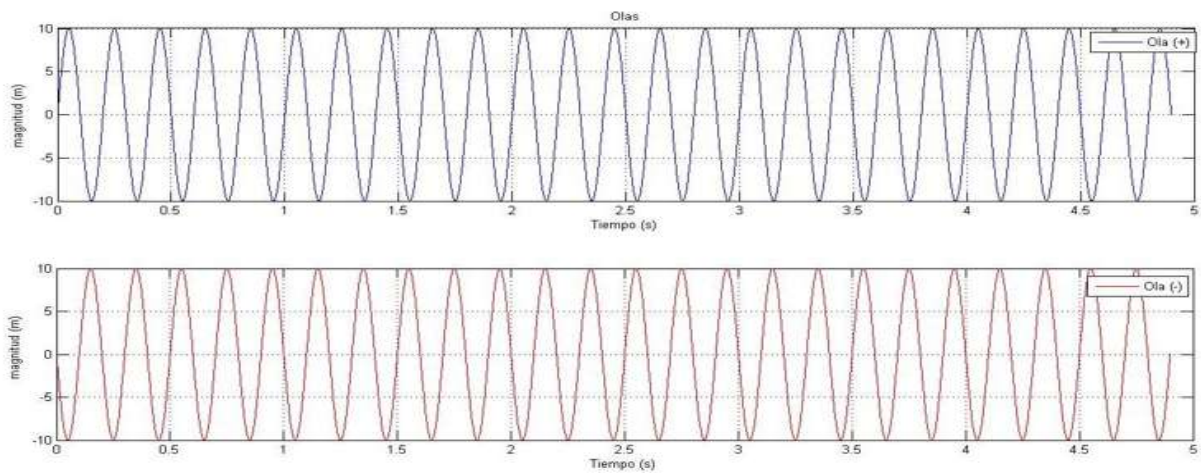


Figura 4.29 Entrada de las ondas marinas

Encontrado las entradas de las ondas marinas, se implementa el rectificador de onda; con el fin de sustituir un motor hidráulico y la respuesta se muestra en la figura 4.30.

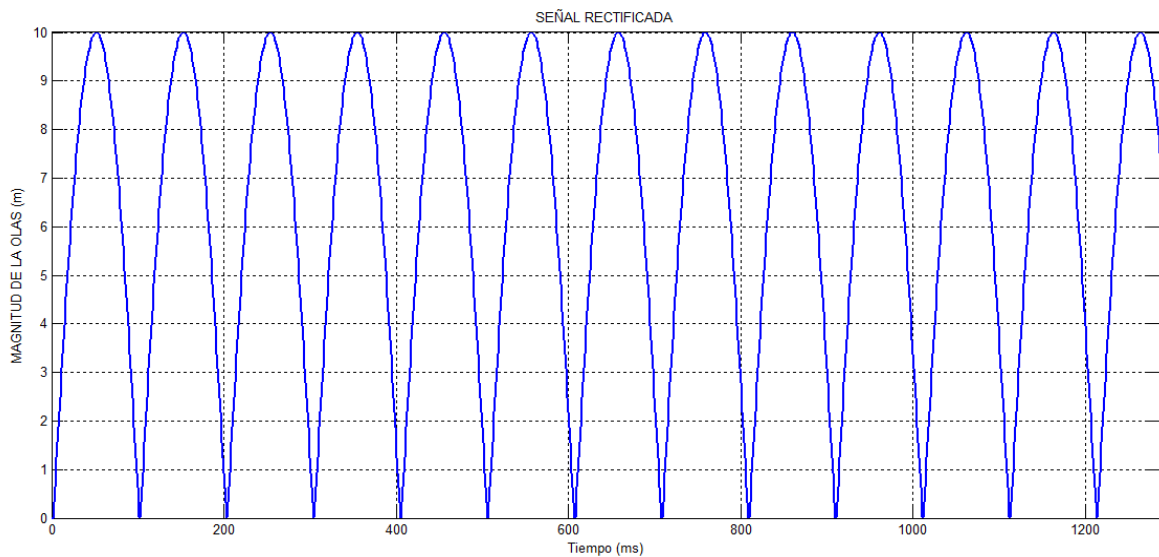


Figura 4.30 Respuesta de rectificador de onda

En la figura 4.31 se encuentra la respuesta del dispositivo Pelamis observando que la magnitud del par mecánico es muy pequeña.

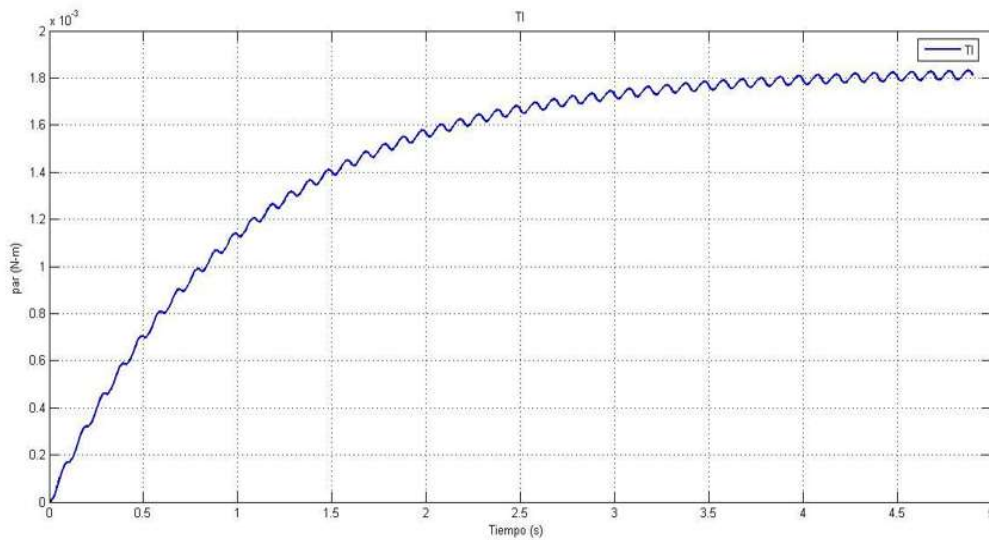


Figura 4.31 Par mecánico sin ganancia

En la siguiente figura 3.32 se observa la respuesta del par mecánico multiplicado por una ganancia de 10,000. Esto para poder aumentar el valor de la salida del par mecánico en la salida.

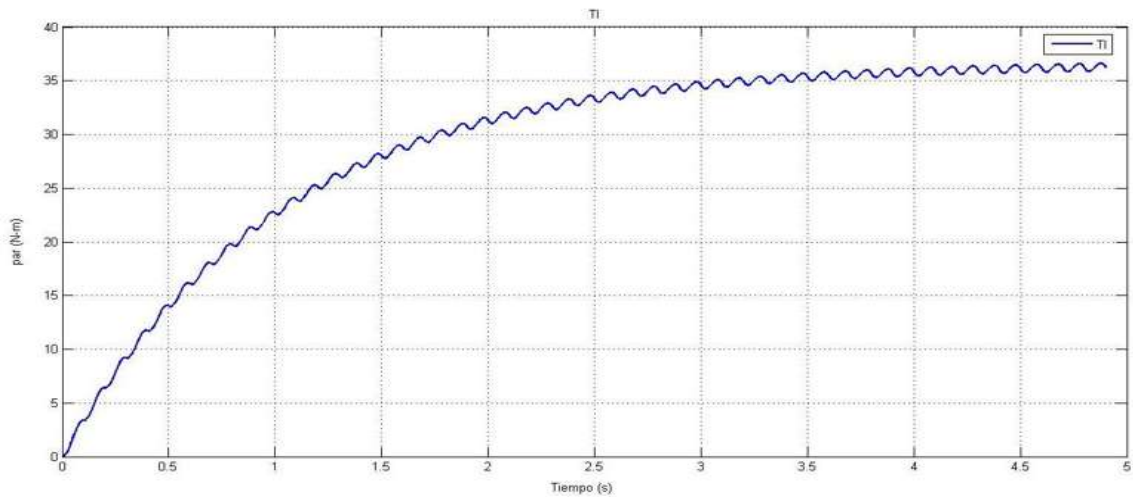


Figura 4.32 Par mecánico con ganancia de 1000

La velocidad mecánica está relacionada con la velocidad del rotor a través de los polos de la máquina o del generador mostrado en la figura 4.33, la velocidad del rotor tiene que ver con los voltaje inducido de la máquina o del generador.

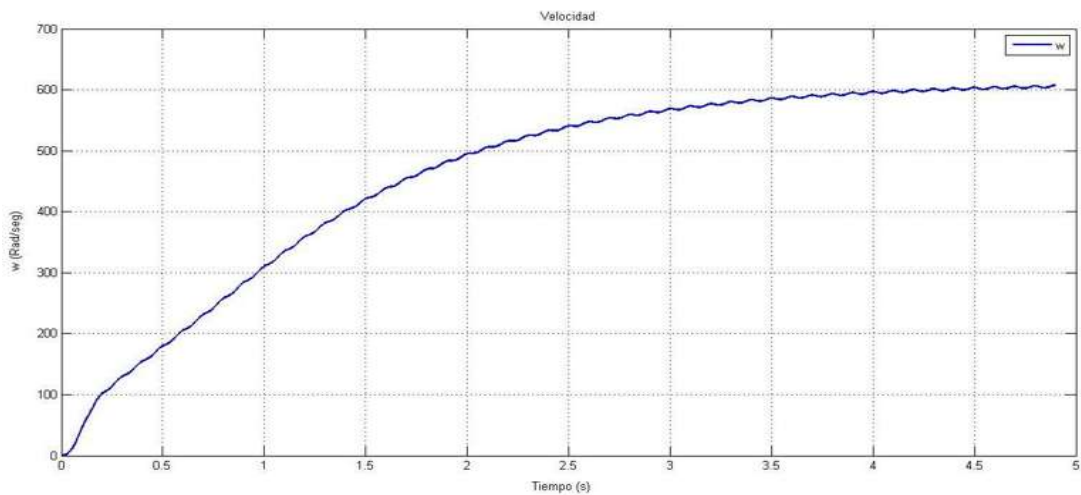


Figura 4.33 Velocidad del sistema de generación

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

5.1 Conclusiones

En esta tesis se presenta el modelo de generador eléctrico Undimotriz del tipo Pelamis, se describe el modelo del dispositivo a utilizar y se trabaja en el marco de referencia abc y dq0.

Para el modelo del sistema, usando las transformaciones al marco de referencia dq0, hace que el sistema sea más sencillo para el análisis y su simulación. Al realizar el modelo matemático del sistema en el marco de referencia dq0 simplificamos muchos detalles y si se llegará a realizar el modelo en el marco de referencia abc enfrentaría ciertos detalles. Para eso al usar el marco de referencia dq0 existe un desacoplo magnético, pasando a un sistema lineal, obteniendo las respuestas más favorables.

Conociendo las partes que lo conforma el dispositivo, su funcionamiento y la configuración del sistema, la respuesta transitoria es de gran ayuda para nuestro conocimiento. El modelo matemático en el marco de referencia dq0, dependerá de muchas variables lo conforma la velocidad angular, par eléctrico, posición angular, las corrientes y como también el voltaje inducido.

Hasta la fecha se está aumentando la importancia a la generación de energía eléctrica por medio de las fuentes renovables. Para ello se relaciona este trabajo con energías limpias la generación de energía Undimotriz, este tipo de generación varios países la tienen en operación como Inglaterra, Dinamarca entre otros. Nuestro país poco a poco va optando al uso de energías renovables y una de ellas podría ser implementada lo estudiado ya que nuestro país está rodeado de zonas marinas.

Las ventajas de uso de un sistema de generación con energía Undimotriz, es que es energía limpia, ya que no implica emisiones de los nocivos gases de efecto invernadero; es rentable, ya que es originado por la calor del sol; potencial energético, ya que la cantidad de energía que contiene

las olas es enorme, con valores de 1 metro de altura de olas podrá generar hasta 20 o 40 Kw; son fuentes seguras y eficientes con respecto al espacio con 259 hectáreas de superficie se pronostica generar 30 Mw.

Unas de las desventajas de este sistema de generación con energía Undimotriz, es el efecto del medioambiente, ya que se podría ocasionar un conflicto con los intereses turísticos o con la aceptación de instalación de una población local; los costos, ya que a la fecha se encuentra elevado el costo de instalación de uno de estos tipo de generación; en el mantenimiento de igual forma es un trabajo laborioso que toma tiempo, y solo personas especializadas pueden laborar en el mantenimiento.

5.2 Trabajos a futuros

Con este trabajo de tesis sería de gran utilidad tener estudios del tipo de generación Undimotriz ya que en un futuro podrían ser implementados en las zonas marinas que pertenecen a nuestro país, y como bien se menciona que México tiene que tener un 35% de generación eléctrica por medio de energías limpias, aquí podría entrar este sistema analizado.

Bibliografía

- [1] T. Cientificos.com, «Textos Cientificos.com,» 18 mayo 2006. [En línea].
<https://www.textoscientificos.com/energia/centrales-electricas>. [Último acceso: 2017 octubre 23].
- [2] f. muriel, «edu.xunta.gal,» 21 noviembre 2013. [En línea].
<http://www.edu.xunta.gal/centros/iesfelixmuriel/system/files/La%20Energ%C3%ADa.pdf>.
[Último acceso: 2017 noviembre 08].
- [3] E. EDUCA, «ENDESA EDUCA,» 11 julio 2012. [En línea].
http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiii.-las-centrales-eolicas. [Último acceso: 15 noviembre 2017].
- [4] a. e. d. l. i. electrica, «UNESA,» 30 junio 1999. [En línea].
<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1350-central-solartermica>. [Último acceso: 20 noviembre 2017].
- [5] e. solar, «ENERGIA SOLAR,» 13 abril 2017. [En línea].
<https://solar-energia.net/definiciones/central-fotovoltaica.html>. [Último acceso: 27 noviembre 2017].
- [6] Endesa, «Endesa Educa,» 11 julio 2002. [En línea].
http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa. [Último acceso: 28 noviembre 17].

- [7] L. G. G. CEL, «Energía limpia para un planeta mejor,» 25 noviembre 2013. [En línea]. <http://www.lageo.com.sv/?cat=1009>. [Último acceso: 28 noviembre 2017].
- [8] I. p. d. I. vida, «Proyectopv.org,» 18 mayo 2017. [En línea]. Available: <http://www.proyectopv.org/2-verdad/energiamarem.htm>. [Último acceso: 29 noviembre 2017].
- [9] I. H. P. Alejandro, «Cámara Argentina de Energías Renovables,» 07 marzo 2012. [En línea]. http://www.clubderoma.org.ar/documentos/Undimotriz_Haim.pdf. [Último acceso: 01 diciembre 2017].
- [10] W. P. I. W. ENERGY, «AW-ENERGY,» 2012. [En línea] <http://aw-energy.com/es>. [Último acceso: 05 diciembre 2017].
- [11] p. w. power, «pelamis wave power,» junio 2013. [En línea]. <http://www.pelamiswave.com/>. [Último acceso: 10 diciembre 2017].
- [12] teleobjetivo.org, «teleobjetivos.org,» 26 noviembre 2006. [En línea]. <https://www.teleobjetivo.org/blog/sistema-de-desalinizacion-de-agua-que-aprovecha-la-energia-de-las-olas.html>. [Último acceso: 12 diciembre 2017].
- [13] w. Dragon, «Wave Dragon,» 2005. [En línea]. <http://www.wavedragon.net/index.php>. [Último acceso: 15 abril 2017].
- [14] AWS, «Waveswing El futuro del poder de las olas,» 2004. [En línea]. <http://www.awsocan.com/archimedes-waveswing.html>. [Último acceso: 18 abril 2017].

- [15] JAMSTECR, «JAMSTECR,» 27 MARZO 1992. [En línea].
http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/data/doc_catalog/media/shiken27_10.pdf. [Último acceso: 04 mayo 2017].
- [16] OPT, «OCEAN POWER TECHNOLOGIES,» 2016. [En línea].
<http://www.oceanpowertechnologies.com/powerbuoy-technology/>. [Último acceso: 05 mayo 2017].
- [17] I. John Wiley & Sons, "Synchronous Machines. Theory and Performance.", New York: Concordia, C., 1951.