

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Eléctrica

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA CENTRAL DE GENERACIÓN UNDIMOTRIZ COLUMNA OSCILANTE

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniero Electricista

Presenta:

Ubaldo Flores Chamú

Asesor:

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Dr. Gilberto González Avalos

Morelia, Michoacán, Abril del 2018

Dedicatoria

Con Amor y Respeto:

*A mis padres **Teobaldo Flores Gómez** y **Emma Chamú Tapia**, porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante en mis estudios, dándome valores, porque en gran parte es gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y por el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ustedes por lo que valen, admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí.*

*A mis hermanos **Noé**, **Raquel**, y **Ángeles**, que con su gran apoyo económico o moral, supieron inyectarme esa energía para no decaer en los momentos más difíciles de esta etapa de mi formación. A ustedes que también creyeron en mí, a ustedes que con su ayuda, me han convencido de que nada es imposible si se desea seguir adelante.*

*Y en especial va dedicada a mi hermano mayor **César Flores Chamú** por ser el pilar de cada uno de nosotros en nuestra formación profesional, ya que tu sacrificio de siempre estar ahí económicamente y moralmente no ha sido en vano, a ti hermano.*

Agradecimientos

*A la **UMSNH**. Por darme la oportunidad de realizar mis estudios profesionales en sus aulas e instalaciones para mi formación personal y profesional.*

*A la **Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UMSNH**. Por haberme dado la oportunidad de trabajar en sus instalaciones y con sus profesores, de los cuales aprendí muchísimas cosas.*

*A mi asesor el **Dr. Gilberto González Avalos**. Por su guía, sus enseñanzas, su tiempo y su valioso apoyo para conseguir algo tan importante como lo es el título de licenciatura.*

A mis compañeros de aula, que de una u otra forma intervinieron en la preparación y elaboración de esta tesis. Por haber compartido conmigo sus conocimientos, su tiempo, y sus amistad.

Índice

<i>Dedicatoria</i>	i
<i>Agradecimientos</i>	ii
<i>Índice</i>	iii
<i>Lista de Figuras</i>	vi
<i>Lista de Tablas</i>	ix
<i>Glosario de Términos</i>	x
<i>Resumen</i>	xiii
<i>Palabras Claves</i>	xiii
<i>Abstract</i>	xiv
<i>Keywords</i>	xiv
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 La Energía Undimotriz (energía de las olas).....	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	2
1.4 Metodología	3
1.5 Contenido de la Tesis	4
Capítulo 2 Fuentes Alternas Para la Generación de Energía Eléctrica	5
2.1 Introducción	5
2.2 Generación de Energía Eléctrica	6
2.2.1 No Renovables	10
2.2.2 Renovables	13
2.3 Fuentes Renovables de Generación de Energía Eléctrica	14
2.3.1 Centrales Hidroeléctricas	15
2.3.2 Centrales Solares	22
2.3.3 Centrales de Generación Eólica	29
2.3.4 Centrales Geotérmicas	33
2.3.5 Centrales de Biomasa	37
2.3.6 Energía Oceánica	40

Capítulo 3 Desarrollo del Modelo de una Central con Energía Undimotriz	47
3.1 Introducción	47
3.2 Fuente Primaria (Olas)	48
3.2.1 Características de las Olas.....	51
3.2.2 Teoría de Ondas Lineales.....	52
3.2.3 El Desplazamiento de las Partículas del Agua	56
3.3 Centrales con Energía Undimotriz	59
3.3.1 Carnegie Energy CETO 5 y 6	60
3.3.2 OPT's PowerBuoy	62
3.3.3 Eco Wave Power Israel	64
3.3.4 WaveRoller	65
3.3.5 Convertidor Columna de Agua Oscilante (OWC)	66
3.4 Modelado de Una Central de Columna Oscilante	68
3.4.1 Lugar de Construcción	68
3.4.2 La Cámara de Captación	70
3.4.3 Equipo Turbo-Generador	73
3.5 Representación matemática de la Central de Columna Oscilante	75
3.5.1 Dinámica de la Superficie de las Olas.....	77
3.5.2 Modelo Cámara de Captura	78
3.5.3 Modelo de Turbina Wells	80
3.6 La Máquina Síncrona	84
3.6.1 Modelo Matemático de la Máquina Síncrona	85
3.6.2 La Transformación Park.....	86
3.6.3 Ecuaciones Enlace de Flujos.....	90
3.6.4 Ecuaciones de Voltaje-Corrientes	94
3.6.5 Ecuaciones de Par Mecánico.....	98
Capítulo 4 Simulación de un Convertidor Columna de Agua Oscilante	102
4.1 Introducción	102
4.2 Qué es 20-sim	102
4.2.1 Componentes Básicos en 20-Sim.....	103
4.2.2 The Library (Biblioteca)	107
4.2.3 Diagrama de Bloques	108
4.3 Modelo Completo a Simular en 20-Sim.....	109
4.4 Ola incidente de una central OWC	110
4.5 Simulaciones Turbina Wells	112
4.6 Modelo Diagrama de Bloques Generador Síncrono	113
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones	121
5.1 Conclusiones.....	121

5.2 Recomendaciones	122
Bibliografía	124

Lista de Figuras

Figura 2. 1.- Central eléctrica convencional.....	7
Figura 2. 2.- Diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia.	8
Figura 2. 3.- Esquema general de un sistema de energía eléctrica.	9
Figura 2. 4.- Central hidroeléctrica El Cajón.....	16
Figura 2. 5.- Diagrama de una central hidroeléctrica.	17
Figura 2. 6.- Esquema de una turbina Francis y Kaplan.	20
Figura 2. 7.- Diagrama de una turbina Pelton.....	21
Figura 2. 8.- Diagrama de una turbina Schwamkrug.....	22
Figura 2. 9.- Sistemas de concentradores lineales de Fresnel (LFR).	25
Figura 2. 10.- Diagrama de un sistema de receptor central o Torre Solar.....	25
Figura 2. 11.- Esquema de un concentrador Disco-Stirling.....	26
Figura 2. 12.- Sistema de tipo canales parabólicos.....	27
Figura 2. 13.- Efecto fotovoltaico en una celda de Silicio.	28
Figura 2. 14.- Esquema de una central solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica.	28
Figura 2. 15.- Principales corrientes de viento en la Tierra.	29
Figura 2. 16.- Flujo de corriente de aire atravesando la turbina eólica.	30
Figura 2. 17.- Componentes principales que encierra la góndola de un aerogenerador.	31
Figura 2. 18.- Esquema de un parque eólico en Tierra.	31
Figura 2. 19.- Esquema de un parque eólico marítimo en aguas profundas.	32
Figura 2. 20.- Esquema de una central geotérmica de vapor seco (vapor directo).....	34
Figura 2. 21.- Esquema de una central geotérmica de ciclo binario.....	35
Figura 2. 22.- Esquema de una central geotérmica tipo Flash.....	36
Figura 2. 23.- Esquema de las posibles transformaciones de la Biomasa.....	38
Figura 2. 24.- Esquema de una central eléctrica de Biomasa con tecnología de combustión.	39
Figura 2. 25.- Esquema de una central eléctrica de Biomasa con tecnología de gasificación.....	40
Figura 2. 26.- Esquema de la central mareomotriz La Rance, Francia.	41
Figura 2. 27.- Esquema de una turbina de flujo cinético de las corrientes marinas.....	42
Figura 2. 28.- Esquema de un sistema de conversión de energía Térmica-Oceánica.....	43
Figura 2. 29.- Esquema de un sistema de flotadores anclados al lecho marino.....	44
Figura 2. 30.- Dispositivo Pelamis Wave Energy Converter.	45
Figura 2. 31.- Esquema de una central Columna de Agua Oscilante (OWC).....	46
Figura 3. 1.- Esquema anual de distribución de potencia del oleaje a nivel mundial.....	48
Figura 3. 2.- Clasificación de las olas con respecto a la Frecuencia-Energía.....	49
Figura 3. 3.-Acción de un viento constante sobre una zona determinada del océano.	50
Figura 3. 4.- Esquema de una onda ideal senoidal.	51
Figura 3. 5.- Diagrama donde se muestra una onda lineal simple.....	54
Figura 3. 6.- Esquema de la representación de un grupo de olas.....	55

Figura 3. 7.- Desplazamiento partículas de agua profundas hasta aguas poco profundas.	57
Figura 3. 8.- Partículas de agua en una ola profunda inciso (a), y poco profunda (b).	57
Figura 3. 9.- Dispositivo CETO 5 durante maniobra de mantenimiento.	61
Figura 3. 10.- Dispositivo CETO 6 de la compañía Carnegie Wave Energy.	62
Figura 3. 11.- OPT's PowerBuoy.	63
Figura 3. 12.- Los dispositivos Eco Wave Power en la central eléctrica en Gibraltar.	64
Figura 3. 13.- El sistema Pelamis Wave Power.	65
Figura 3. 14.- Central eléctrica convertidor Columna de Agua Oscilante Mutriku.	67
Figura 3. 15.- Construcción conceptual cámara de captación Columna de Agua Oscilante.	69
Figura 3. 16.- Sección transversal cámara de captación de un convertidor OWC.	70
Figura 3. 17.- Esquema Cámara de captación de vista de lado.	71
Figura 3. 18.- Turbina Wells bidireccional durante mantenimiento.	74
Figura 3. 19.- Esquema de arreglo equipo Turbina-Generador.	75
Figura 3. 20.- Diagrama de bloques de un sistema de Columna de Agua Oscilante.	76
Figura 3. 21.- Cámara de captura en un dispositivo OWC.	78
Figura 3. 22.- Esquema de una turbina tipo Wells.	80
Figura 3. 23.- Triángulos de velocidad en una turbina Wells.	81
Figura 3. 24.- Onda incidente de flujo de aire rectificado.	82
Figura 3. 25.- Modelo turbina Wells en diagrama de bloques.	82
Figura 3. 26.- Esquema de la máquina síncrona.	85
Figura 3. 27.- Esquema fasorial máquina síncrona mostrando ejes $a-b-c$ y $d-q$	87
Figura 3. 28.- Diagrama voltaje-corrientes máquina síncrona.	94
Figura 4. 1.- Esquema de ingeniería reconstruido con el software 20-Sim.	103
Figura 4. 2.- Pantalla principal Editor en 20-Sim.	104
Figura 4. 3.- Ventana Simulador en 20-Sim.	105
Figura 4. 4.- Modelo tutorial de un ServoMotor.	106
Figura 4. 5.- Plots que se obtiene al simular el modelo tutorial ServoMotor.	106
Figura 4. 6.- Pestaña donde se localiza la biblioteca (Library) 20-Sim.	107
Figura 4. 7.- Esquema 20-Sim diagrama de bloques.	108
Figura 4. 8.- Modelo completo de un OWC en 20-Sim.	109
Figura 4. 9.- Representación ola incidente en 20-Sim.	110
Figura 4. 10.- Diagrama de bloques etapa rectificación de Ola Cámara de Captura.	111
Figura 4. 11.- Resultados Ola incidente y Ola de salida rectificada en 20-Sim.	111
Figura 4. 12.- Resultados Par mecánico $T (N.m)$ de la turbina Wells.	112
Figura 4. 13.- Resultados Velocidad angular de la turbina Wells en (rad-sec).	112
Figura 4. 14.- Sistema trifásico balanceado máquina síncrona en 20-Sim.	113
Figura 4. 15.- Diagrama de bloques Transformada de Park y Transformada Inversa de Park.	114
Figura 4. 16.- Resultados proyección marco de referencia abc a $dq0$ y $dq0$ a abc	115
Figura 4. 17.- Diagrama de bloques generador síncrono 20-Sim.	116
Figura 4. 18.- Diagrama de bloques para obtener la corriente i_F en 20-Sim.	117

Figura 4. 19.- Sistema de control de lazo cerrado f_3	117
Figura 4. 20.- Resultados de corrientes trifásicas de la máquina síncrona 20-Sim.....	118
Figura 4. 21.- Resultados de corrientes en el eje $dq0$ al aplicar Transformada de Park.....	118
Figura 4. 22.- Resultados Par T_e y velocidad angular w del generador 20-Sim.....	119
Figura 4. 23.- Diagrama de bloques de una central OWC completa 20-Sim.....	120

Lista de Tablas

Tabla 3. 1.- Resultados de la teoría lineal (Airy).	59
Tabla 3. 2.- Características dispositivo CETO 5 de Carnegie Wave Energy.	61
Tabla 3. 3.- Características de una OPT's PowerBuoy.....	63
Tabla 3. 4.- Características de los convertidores Eco Wave Power.	65
Tabla 3. 5.- Características del dispositivo Pelamis Wave Power.	66
Tabla 3. 6.- Características de la central Eléctrica Mutriku.....	67
Tabla 3. 7.- Alturas de referencia Cámara de Captura.....	73
Tabla 3. 8.- Parámetros básicos de una turbina tipo Wells.	74

Glosario de Términos

Término	Significado
$\dot{f}_{11}$	Derivada en el eje q
$\dot{f}_{18}$	Derivada de la velocidad angular ω
$\dot{f}_3$	Derivada a lo largo del eje d
$\dot{f}_5$	Derivada en el devanado de campo F
I_3	Matriz de identidad
L_{FD}, L_{FQ}, L_{DQ}	Inductancias mutuas del rotor
L_{FF}, L_{DD}, L_{QQ}	Inductancias propias en el rotor
L_{aD}, L_{bD}, L_{cD}	Inductancias devanados de amortiguamiento D
L_{aF}, L_{bF}, L_{cF}	Inductancias mutuas de estator a rotor
L_{aQ}, L_{bQ}, L_{cQ}	Inductancias devanados de fase al devanado Q
L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}	Inductancias propias devanado del estator
L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}	Inductancias mutuas en el estator
P^{-1}	Transformación inversa de Park
$Q_a(t)$	Flujo de aire instantáneo
T_J	Momento de inercia turbina-generador [$kg \cdot m^2$]
T_e	Par electromecánico generador [$N \cdot m$]
T_m	Par mecánico de turbina [$N \cdot m$]
V_F	Voltaje en el devanado de campo F
V_{abc}	Voltaje trifásico
V_d	Voltaje en el eje directo d
V_{dq0}	Voltajes marco de referencia dq0

Término	Significado
V_{dq0}	Voltaje marco de referencia dq0
V_q	Voltaje en el eje de cuadratura q
e_1	Voltajes a lo largo eje directo
e_{12}	Voltaje a lo largo eje cuadratura
e_{16}	Variable par mecánico turbina
e_6	Voltaje en el devanado de campo
f_5	Velocidad angular de la turbina [rad-sec]
i_a, i_b, i_c	Corrientes de fase máquina síncrona
i_{dq0}	Corrientes marco de referencia dq0
$\vec{u}$	Vector velocidad
$\lambda_F, \lambda_D, \lambda_Q$	Enlaces de flujo magnético del rotor
$\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$	Enlaces de flujo magnético del estator
λ_d, λ_q	Enlace de flujo en el eje d y q
$\dot{\omega}$	Oscilación electromecánica
A	Amplitud de la onda
abc	Fases máquina síncrona
C	Velocidad de onda (celeridad)
C1	Par centrífugo de la turbina
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
d	Profundidad del agua
d y q	Eje directo y eje de cuadratura
FEM	Fuerza electromotriz

Término	Significado
g	Constante de gravedad $9.8 [m/s^2]$
H	Diferencia altura de una cresta de onda y valle
J	Momento de inercia turbina
K_v	Kilovoltio
kW	Kilowatt
L	Inductancia
MW	Megawatt
OWC	Columna de agua oscilante
Q	Caudal en $[m^3/s]$
$R1$	Coeficiente de fricción
RPM	Revoluciones por minuto
SEP	Sistema eléctrico de potencia
T	Periodo de una onda
v	Voltaje
$V(t)$	Volumen de aire cámara de captura
$Y(x, t)$	Dinámica de una onda lineal
P	Transformación de Park
η	Perfil de la superficie de la ola
λ	Longitud de onda
ρ	Densidad del agua $1 \times 10^3 [kg/m^3]$
$\omega(k)$	Relación de dispersión
$\omega(t)$	Velocidad angular $[rad-seg]$
ϕ	Perturbación primer orden

Resumen

El uso de la energía de las olas provenientes de los océanos es relativamente nueva, la energía que viene del oleaje, prácticamente es generada por las grandes corrientes de aire que se generan en partes específicas del globo terráqueo. Esta energía se cede hacia la superficie del mar, transfiriendo la energía cinética del viento hacia sus superficies, creando así el movimiento de agua denominado oleaje que a su vez recorre grandes distancias sin perder casi nada de su energía hasta que llega a las costas de los continentes. Es esta energía que en las últimas décadas se ha estado investigando para su aprovechamiento y mover turbinas aerodinámicas que acopladas a un generador eléctrico, se obtiene energía eléctrica.

En esta tesis se enfoca completamente en la realización de un modelado de una central de Columna de Agua Oscilante instalada a la orilla de la costa. De esta forma se considera su localización estratégica para el aprovechamiento de la energía de las olas, existiendo un recurso energético que sea potencialmente aprovechable. Así mismo, que se encuentre cerca de la red eléctrica existente del país a instalar. Facilitando el transporte de la energía eléctrica a través de la red nacional.

También en esta tesis se desarrollará un análisis y simulaciones de las tres etapas de un central de Columna de Agua Oscilante. Mediante el uso del software 20-Sim (The power of modeling), desarrollado por un grupo de investigadores Holandeses.

Palabras Claves

Océano, oleaje, energía de las olas, potencia de la ola, columna de agua oscilante, orilla, potencia, eléctrica, partículas, profundidad, presión, cámara, neumática, mecánica, turbina, aerodinámica, Wells, generador, síncrono, electromagnética, rotor devanado, aire, energía renovable, undimotriz.

Abstract

The use of wave energy from the oceans is relatively new, energy coming from waves, is practically generated by large air currents created in specific parts of the globe. This energy is transferred to the surface of the sea, transferring the kinetic energy of the wind into the ocean's surface, creating water movement called surge that in turn travels great distances without losing hardly any energy until it reaches the shores of the continents. It is this type of energy that in recent decades has been investigated for its use and to be able to move an aerodynamic turbine coupled to an electric generator, hence generating electrical power.

This thesis is entirely focused on the realization of a modeling of an oscillating water column power station installed at the edge of the coast. Considering a strategic location for harnessing wave energy, having an energy resource that is potentially profitable. Also, to be able to be cost efficient, this power station must be close to an existing electrical network in the county to be installed, so that it will be relatively easy for the transportation of electrical power to urban areas.

Also in this thesis an analysis and simulations of the three main stages of the Oscillating Water Column system will be performed using the software 20-Sim the Power of Modeling, developed by a group of Dutch researchers.

Keywords

Renewable energy, wave energy, wave power, wave energy conversion, wave resources, ocean energy, OWC, oscillating water column, shoreline, Wells turbine, near shore waves, pneumatic power, generator, synchronous, capture chamber, water depth, swell, fetch.

Capítulo 1 Introducción

1.1 La Energía Undimotriz (energía de las olas)

Todo tipo de oscilación en la superficie de agua que sea de forma periódica se le denomina ola. Las olas en los océanos son originadas por diversas causas. Entre estas causas se pueden señalar el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol sobre las masas oceánicas, los maremotos, las tormentas etc. Sin embargo, de todas ellas, el viento constituye el agente que generan las olas más comunes y de mayor intensidad energética. Por ello, se suele decir que la energía que poseen las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar, ya que el viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el Sol produce en la superficie terrestre, y el viento, al actuar sobre el agua del mar le transmite energía y la pone en movimiento [1].

Al soplar el viento sobre el océano, existe la iteración aire-mar en la superficie, esta transfiere la energía proveniente del viento hacia el agua, formando las olas, que almacenan esta energía en energía potencial (en base a la masa de agua desplazada desde el fondo del mar hasta la superficie) y después en energía cinética (en base al movimiento de las partículas de agua). El tamaño y periodo de las olas resultantes depende de la cantidad de energía transferida, que está en función de la velocidad del viento, y la duración de tiempo que el viento sopla. Las olas son muy eficientes en cuanto a la transmisión de energía, ya que pueden viajar grandes distancias sobre la superficie del océano sin tener mucha pérdida de energía. Las olas con mayor energía en la Tierra, son producidas en las latitudes 30° y 60° de los hemisferios Norte y Sur, debido a que en estas zonas existen mayores corrientes de viento y posteriormente se encuentran mejores oleajes para el aprovechamiento de este tipo de energía renovable emergente. [2]

1.2 Objetivo

La realización de esta Tesis, es con el objetivo de analizar el modelo de una central de generación convertidor Columna de Agua Oscilante. Así como simular cada una de las etapas del convertidor Columna de Agua Oscilante de este tipo de dispositivo con energía undimotriz.

1.3 Justificación

Debido a la demanda a nivel mundial de consumo de electricidad en la humanidad, se tiene la necesidad de implementar estrategias nuevas en cuanto a la generación de energía limpia y renovable. Con el propósito de reducir las toneladas de emisiones de dióxido de carbono hacia la atmosfera, así como atenuar el efecto invernadero producido por el CO_2 . Esto es atribuido, en gran medida a la quema de combustibles fósiles. Durante casi toda la historia de la humanidad, el hombre ha utilizado las energías renovables como fuente de energía; no fue hasta después de la revolución industrial cuando se inicia la utilización generalizada de las energías no renovables. A raíz de estos eventos importantes, el mercado del petróleo se enfrentó a un encarecimiento notable de esta fuente de energía principalmente en la década de los 70's. A causa estos eventos, surgieron preocupaciones sobre el suministro y precio futuro de la energía. Como consecuencia, los países consumidores, enfrentados a los altos costos del petróleo y a una dependencia casi total de este tipo de energía, empezaron a modificar sus costumbres y a buscar opciones para reducir su dependencia de fuentes no renovables.

Este último periodo, se ha categorizado por un consumo creciente e intensivo de energía que prácticamente está acabando con los combustibles fósiles. El agotamiento de los combustibles fósiles que son el petróleo, carbón, gas natural, se debe al gran consumo en la actualidad de energía eléctrica y materiales derivados que se construyen de estos, en especial en países industrializados. A este ritmo en las próximas décadas se espera que se duplique el consumo de energía eléctrica, para esto se debe de encontrar una solución alternativa para la generación de energía eléctrica con el fin de no depender mucho de los combustibles no renovables y evitar su disminución y agotamiento. [3]

Es necesario que los países de mayor consumo encuentren y reconsideren encontrar una mejora al aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones secundarias tales como la energía eólica, fotovoltaica, hidráulica, mareomotriz, entre otras como la geotérmica y la biomasa; es decir, las denominadas energías renovables. Hoy en día, el mundo está realizando varios esfuerzos para disminuir el cambio climático, implementando compromisos para limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero renovando así su interés en aplicar políticas de promoción de las energías renovables.

En conclusión, el propósito de esta Tesis es demostrar que existen alternativas para la generación de energía eléctrica, que nos proporcione un tipo de generación de energía eléctrica renovable limpia para beneficio de la humanidad, incluyendo al planeta Tierra y dejar de utilizar la fuente convencional que nos proporciona la mayor parte de energía eléctrica proveniente de la quema de combustibles en las grandes centrales termoeléctricas. Así mismo tener un menor aprovechamiento de los combustibles fósiles en cuanto a la producción de materiales que deriven de estos.

1.4 Metodología

A lo largo de esta tesis, la metodología que se utilizará será mediante la obtención de información bibliográfica, artículos, etc. de las fuentes alternas renovables de generación de energía. Se definirán las centrales convencionales existentes. Así mismo, se denotará las fuentes de energía no renovable y las renovables y las diferencias entre estas mismas. Posteriormente, se enfocará en la energía de las olas (undimotriz), que es la fuente primaria para la obtención de energía útil y la generación de energía eléctrica. Así como los dispositivos existentes para el aprovechamiento de este tipo de energía. También se denotará las características y funcionamiento de cada uno de estos dispositivos convertidores de agua oscilante. En especial el funcionamiento y características de una central convertidor Columna de Agua Oscilante.

En el capítulo 3, se modelará la central de generación de energía eléctrica de Columna de Agua Oscilante. Se detallará la energía que contiene las olas así como sus características de propagación y duración, con la finalidad de obtener las variables matemáticas que en el capítulo

4 se utilizaran para la simulación de las tres etapas principales de este tipo de tecnología que utiliza la energía de las olas.

Finalmente, se realizarán las simulaciones necesarias del sistema convertidor Columna de Agua Oscilante. Para esto se utilizara el software 20-Sim (The Power of Modeling), prácticamente es una herramienta muy poderosa que puede simular sistemas ya sea físicos, eléctricos, mecánicos, etc.

1.5 Contenido de la Tesis

Esta Tesis consta de cinco capítulos y está estructurado de la siguiente forma:

En el capítulo 1 se presenta la introducción sobre la energía de las olas, el objetivo, así como la metodología utilizada y la justificación.

En el capítulo 2 se presentan las fuentes alternas de generación de energía eléctrica actuales, y un enfoque más a fondo de la energía undimotriz (energía de las olas) y los diferentes dispositivos de convertidores de agua oscilante existentes.

En el capítulo 3 se presenta el modelo de una planta de generación de energía undimotriz Columna Oscilante, su funcionamiento y características principales y la locación estratégica a instalar. Así como su representación matemática y modelo en diagrama de bloques.

En el capítulo 4 se presenta los resultados de la simulación del sistema Columna de Agua Oscilante (OWC) utilizando el software 20-sim (The Power of Modeling). Todo esto con las variables obtenidas en el capítulo 3.

En el capítulo 5 se presenta las conclusiones generales y las recomendaciones para trabajos futuros que se realicen a partir de esta tesis.

Capítulo 2 Fuentes Alternas Para la Generación de Energía Eléctrica

2.1 Introducción

En los últimos 200 años, la humanidad se ha hecho más y más dependiente de energías que excavan de los suelos. En los años 1700's, casi toda de nuestra energía provenía del viento, agua, fuego, o fuerza muscular. El viento movía nuestros molinos y barcos. El agua hacia girar nuestras norias. El fuego nos proveía la comida y calentaba nuestros hogares. La fuerza muscular, ya sea humano o animal, se encargaba del resto de las otras cosas. Todas estas fuentes de energía provenían del sol, siendo que la energía solar nos proporciona el viento, lluvia, y el crecimiento de los árboles, así como los cultivos que son esenciales para mantenernos vivos. Todas estas fuentes de energía eran renovables, ya que el viento siempre soplabo, los ríos se mantenían fluyendo, y los árboles y cultivos se mantenían creciendo.

Para el año 1800, empezamos a obtener la mayor parte de nuestra energía proveniente del carbón que era extraída de la minería. Por el año 1900, se comenzó a perforar el subsuelo para la obtención de petróleo y gas natural. En la década de los 50's estos "combustibles fósiles" ya habían reemplazado todas las fuentes de energía de décadas anteriores, a excepción de la energía que se obtenía del agua. Los combustibles fósiles son el resultado del deterioro de animales y plantas prehistóricas, así que prácticamente su energía, viene en si del Sol. En algunas partes del mundo, combustibles fósiles se están creando incluso hoy en día. Pero como sociedad estamos utilizando estos fósiles a un paso alarmante. Esta energía que tardo millones de años en almacenarse, se está consumiendo en apenas un par de cien años. Después del año 1950, se comenzó a usar energía atómica del uranio extraído del suelo.

El uranio no es un combustible fósil, y su energía no se origina del Sol. El uranio, como los combustibles fósiles, es no renovable: una vez que se ha usado, jamás se vuelve a generar. Durante los últimos 25 años, el uso de fuentes de energía renovables viejas ha incrementado y a su vez hemos empezado a utilizar nuevas fuentes de energía renovables. El mundo se ha dado

cuenta que nuestras reservas de combustibles fósiles y combustibles atómicos no durarán mucho tiempo y su uso contribuye a la contaminación del medio ambiente. El presente capítulo es una introducción teórica hacia las fuentes alternas para la generación de energía eléctrica, así como se denota las energías renovables y no renovables existentes. Así mismo, se darán a conocer los diferentes tipos de generación con fuentes de energía renovables en la actualidad. Que incluyen las centrales hidroeléctricas, solares, eólica, geotérmicas, biomasa y las que se aprovechan de la energía de los océanos. [4]

2.2 Generación de Energía Eléctrica

La generación de energía eléctrica es la forma más sofisticada de energía que existe en la actualidad y permite un transporte entre lugares lejanos de forma económica y eficaz. La generación de electricidad, en términos generales, consiste en transformar alguna clase de energía, “no eléctrica”, sea esta química, térmica, hidráulica, eólica, nuclear etc. en energía eléctrica. Prácticamente, la generación de energía eléctrica o electricidad a gran escala ocurre en las grandes plantas llamadas centrales eléctricas. La mayoría de estas centrales eléctricas, no importa si son nucleares, hidroeléctricas, de combustible fósil o eólicas, realizan el mismo trabajo esencial, transformar la energía cinética, energía del movimiento, en un flujo de electrones que se le denomina electricidad. [5]

La generación de electricidad se basa en el principio de la “inducción electromagnética” (descubierto por Faraday en 1831) que tiene lugar en los generadores. A partir de la rotación del rotor electromagnético impulsado por una turbina, se induce la tensión en los paquetes de bobinas del estator. Finalmente, de las terminales del estator es posible extraer la energía eléctrica. Desde el estator, la electricidad fluye hacia los transformadores. Aquí se eleva el nivel de voltaje desde niveles de generación (16,500 V) hasta la de transmisión (500,000 V). Luego se vuelve a transformar sucesivamente hasta llegar al nivel de transporte y distribución (132,000, 166,000, 33,000 y 13,200 V). [6]

Lo que llamamos generación, es en realidad, una transformación que genera energía eléctrica a partir de otra forma de energía, como la nuclear, hidráulica, térmica, solar, mareomotriz, entre

otras. Basándose en el principio de conversión de la energía que indica que la energía no se crea ni se destruye; solo se transforma de unas formas en otras. Esta ley es una de las leyes fundamentales de la física, también conocida como primer principio de la termodinámica. La mayoría de los países a nivel mundial, recurren principalmente a la generación de electricidad por medio de grandes centrales eléctricas térmicas, hidráulicas o nucleares y que también se les denomina formas convencionales. En la figura 2.1, se muestra el esquema de una central convencional de vapor.

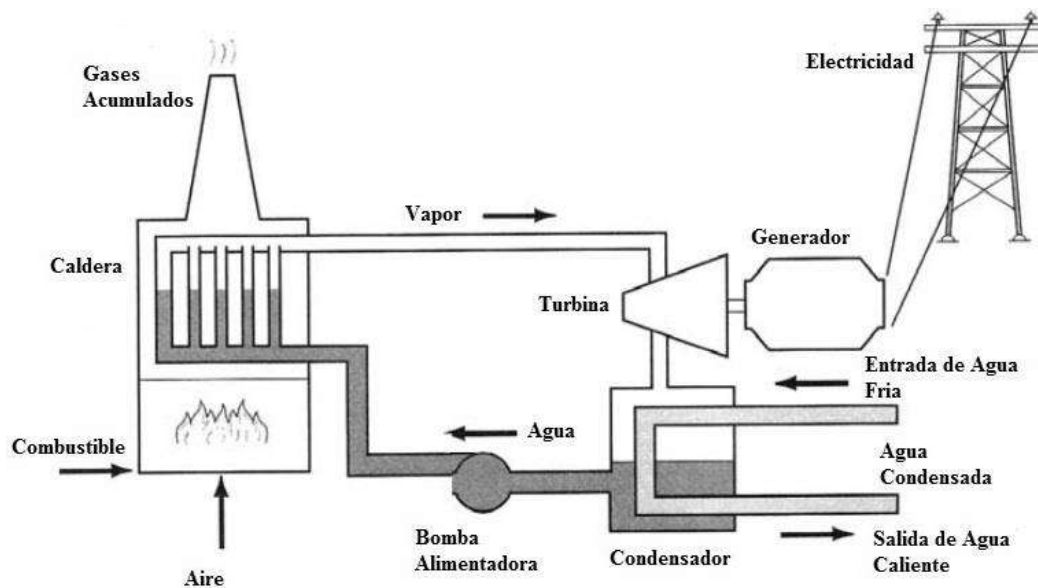


Figura 2. 1.- Central eléctrica convencional.

El generador más utilizado hoy en día para la generación de energía eléctrica es el generador síncrono accionado por una turbina giratoria. Los generadores síncronos trifásicos son la fuente principal de toda la energía eléctrica que consumimos. Estas máquinas son los convertidores de energía más grandes del mundo. Convierten energía mecánica en energía eléctrica, en potencias de hasta 1500 MW. Un generador síncrono de campo magnético giratorio tiene una armadura estacionaria llamada estator. El devanado trifásico del estator está conectado directamente a la carga, sin pasar por grandes y poco confiables anillos colectores y escobillas. El campo que se alimenta con CD para la excitación, va ubicado en el rotor. De aquí se genera una diferencia de trabajo que se le domina potencial o voltaje, generando así energía eléctrica. Dependiendo la velocidad que estos lleguen a girar, se construyen con rotor cilíndrico que son

las de altas velocidades y se utilizan en las centrales termoeléctricas o de gas. Las de bajas velocidades que también se les denomina de polos salientes, se utilizan en las grandes plantas hidroeléctricas. La mayoría de las grandes centrales generadoras de energía eléctrica utilizan grupos de turbina-generator. [7]

Las principales turbinas que se utilizan están construidas por un eje giratorio, así como unas aspas o álabes que son impulsadas por la fuerza de corrientes de agua o vapor dependiendo si es una planta hidroeléctrica o termoeléctrica. Ahora bien, esta energía generada en las centrales eléctricas usualmente se inyecta a un sistema eléctrico de potencia que se encarga de llevar grandes cantidades potencia, en forma de energía eléctrica hasta las ciudades donde se encuentran los usuarios que la utilizarán para el consumo diario. En la figura 2.2 se muestra los elementos que constituyen a un sistema eléctrico de potencia. Un sistema eléctrico de potencia (S.E.P.) puede definirse como un conjunto de máquinas convertidores, transformadores, líneas y otros muchos elementos eléctricos convenientemente conectados y coordinados, mediante los cuales se genera, transporta, distribuye y utiliza la energía eléctrica. [8]

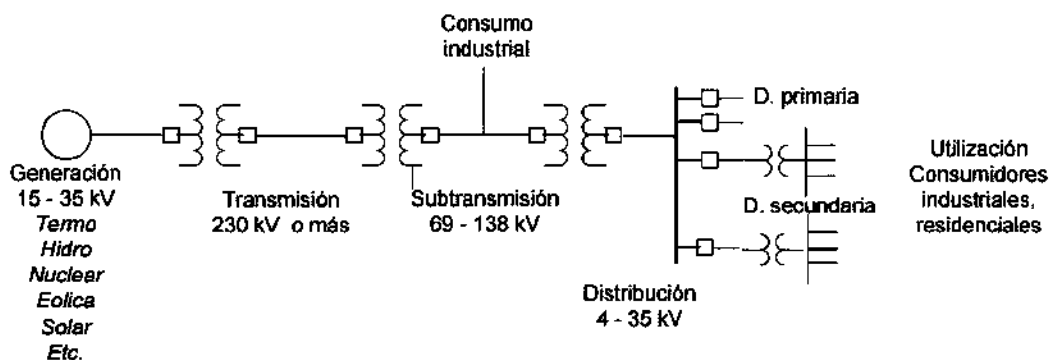


Figura 2. 2.- Diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia.

Tradicionalmente, una central eléctrica convencional se encuentra a cientos de kilómetros de distancia de los usuarios. Para esto se utilizan líneas de transmisión que se encargan de transportar la energía eléctrica desde estas plantas generadoras hasta los centros de consumo. En general se utilizan líneas trifásicas de corriente alterna, de varios kilómetros de longitud. La red de transporte se encarga de enlazar las centrales con las redes de distribución, uniendo las centrales con las subestaciones de transformación que a su vez llegan a los puntos de consumo

que son los usuarios. En la figura 2.3, se muestra las etapas para llevar la energía eléctrica a los usuarios que están a cientos de kilómetros en las ciudades.

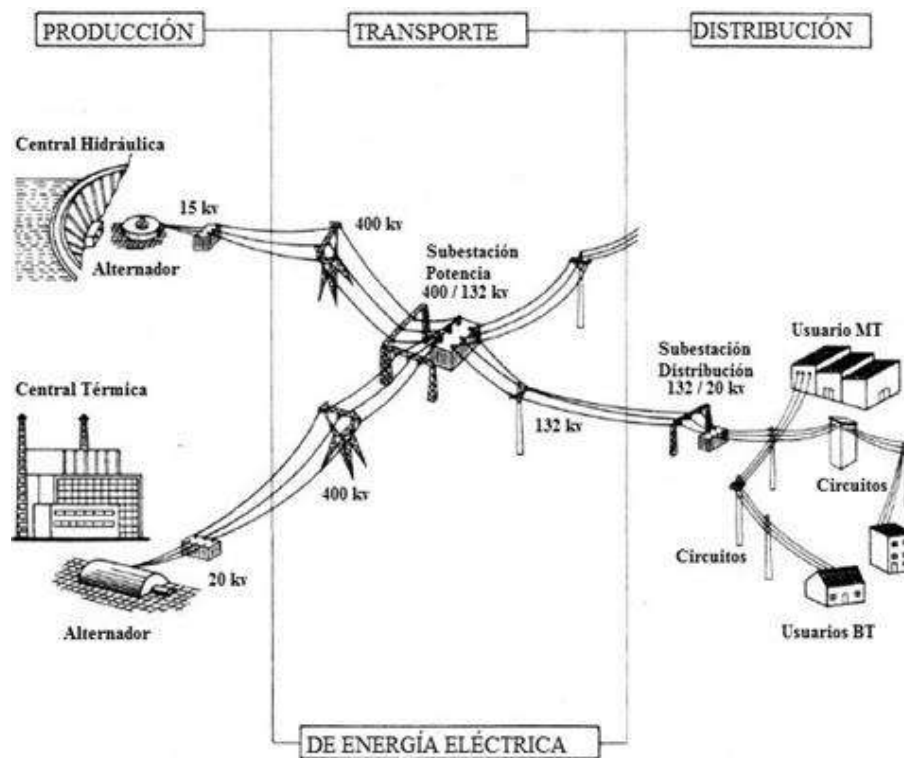


Figura 2. 3.- Esquema general de un sistema de energía eléctrica.

Hoy en día, existen dos categorías de centrales eléctricas para la generación de electricidad:

- **Centrales convencionales:** son las que se llevan utilizando desde hace tiempo (todo el siglo XX), producen la mayor parte de la energía eléctrica. Son las centrales térmicas, nucleares y las grandes plantas hidroeléctricas.
- **Centrales no convencionales:** son las últimas fuentes de generación de energía eléctrica que se han puesto en marcha. Se emplean menos que las convencionales pero su utilización va en aumento. Aprovechan recursos renovables, son más limpias que las convencionales, estas son las centrales eólicas, las solares, biomasa, mareomotriz y las geotérmicas. [9]

En los últimos años, a causa de la conocida crisis energética mundial, las investigaciones se han orientado a la explotación de fuentes alternas de energía que a las tradicionales, surgiendo las centrales generadoras no convencionales. A continuación se denotarán las energías renovables y las no renovables.

2.2.1 No Renovables

Las energías no renovables tienen en la actualidad una importancia enorme en todos los países desarrollados y en vías de desarrollo. Una fuente de energía suficiente y sustentable es una necesidad para estas naciones industrializadas. Como se ha abordado anteriormente, la energía se clasifica en renovables y no renovables. Más del 76 % de la energía utilizada en el mundo, ya sea para los procesos industriales, transporte, en los hogares etc. Proviene de los combustibles fósiles. Estas energías no renovables son las siguientes:

- Forma sólida (carbón).
- Forma gaseosa (gas natural).
- Energía nuclear.

Estos combustibles fósiles provienen de restos vegetales y otros organismos vivos (generalmente plancton marino) que hace millones de años fueron sepultados por efecto de grandes cataclismos o fenómenos naturales y se fueron transformando, por la acción de microorganismos, bajo unas condiciones de temperatura y presión adecuadas. Según el residuo orgánico de que se trate, así como las condiciones y tiempo de permanencia en el lugar, tenemos combustibles sólidos (carbón), combustibles líquidos (petróleo) y combustibles gaseosos (gas natural). [10]

El **carbón** es un recurso abundante en el planeta y está compuesto en su mayor parte por carbono. Mayormente, las plantas terrestres forman el carbón, siendo este el primer combustible que se usó. El carbón se formó lentamente durante millones de años. [11]

En la actualidad, a nivel mundial se está consumiendo el carbón a un ritmo alarmante, cinco mil millones de toneladas métricas por año. El principal uso del carbón es para la

generación de energía eléctrica, por el simple hecho de ser relativamente barato la producción de energía eléctrica por medio del carbón. La quema del carbón resulta en una contaminación seria hacia la atmosfera. El azufre contenido en el carbón forma dióxido de azufre debido a la quema de este. Así mismo, óxidos de nitrógeno dañinos, metales pesados, y dióxido de carbono también se liberan hacia el aire durante el proceso de la quema del carbón. También aumenta el efecto invernadero y la emanación de dióxido de carbono (CO_2) hacia la atmósfera. El efecto invernadero consiste en que los rayos que entran hacia la atmósfera proveniente del sol, atraviesan el CO_2 sin dificultad, pero cuando estos rayos reflejados en la tierra (infrarrojos) intentan salir, son absorbidos. Las consecuencias son un aumento progresivo de la temperatura media de la atmosfera. Si el consumo continúa a este ritmo, las reservas actuales de carbón duraran al menos 200 años en el futuro. Es por este problema que se debe de buscar nuevas fuentes alternas de energía para la sustentabilidad de la humanidad y el planeta en las próximas décadas.

El **Petróleo** crudo o licuado de petróleo, es otro combustible fósil que es refinado en diferentes formas de energía (gasolina, diésel, combustible para aviones, aceite de calefacción, plástico y alquitrán). El petróleo se forma bajo la tierra en rocas tipo esquisto, el esquisto es rico en materiales orgánicos. Después de que el petróleo se forma, migra hacia arriba y se concentra en reservas de rocas de arenisca o caliza, donde se deposita en una capa de roca impermeable. Posteriormente, se perfora hasta llegar a estas reservas de petróleo y se remueve. Más del 70 % de los campos con depósitos de petróleo se encuentran en las fronteras de las placas tectónicas, ya que son las condiciones propicias para la formación del petróleo.

Posteriormente, el petróleo extraído se manda al proceso de refinería que se requiere para convertir petróleo crudo en compuestos de hidrocarburos utilizables. Involucra hervir el petróleo crudo para así poder separar los gases en un proceso llamado destilación fraccionada. Para así proveer los materiales base como plásticos, asfalto y químicos para procesos industriales. [12]

La producción de **gas natural** es a menudo un derivado de la recuperación de petróleo, ya que los dos comúnmente comparten yacimientos bajo la superficie de la tierra. El gas natural es una mezcla de gases, el más común siendo el metano (CH_4). También contiene etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), y butano (C_4H_{10}). El gas natural usualmente no está contaminado con azufre y por lo tanto el combustible fósil más limpio. Después de su extracción, el propano y butano son

removidos del gas natural y convertidos en Licuado de petróleo (gas LP). El gas LP es enviado en tanques especiales presurizados como fuente de combustible para áreas que no cuentan con líneas de gasoductos (comunidades rurales). El gas restante entra a un proceso de refinado para retirar las impurezas y agua de vapor, para después ser transportado en oleoductos presurizados. También el gas natural tiende a ser realmente inflamable y no emite algún olor. Sin embargo, el olor característico del gas natural es prácticamente cantidades diminutas de un compuesto de sulfurado (metilmercaptano) que le agrega un olor peculiar durante su refinado para advertir a los usuarios de alguna fuga de gas. [13]

El uso del gas natural está en un crecimiento ascendiente. Además de ser una fuente de combustible fósil limpia, el gas natural es fácil y de muy bajo costo su transportación una vez que se tiene las tuberías instaladas. La mayoría de las reservas de gas natural a nivel mundial se encuentran al Este de Europa y el Medio Oriente. En los países desarrollados, el gas natural se utiliza principalmente para la calefacción, cocinar y la propulsión de vehículos. La estimación actual de reservas de gas natural es de 187.3 billones de metros cúbicos. [14]

La **energía nuclear** o **energía atómica** es la energía que se libera espontanea o artificialmente en las reacciones nucleares. Sin embargo, este término engloba otro significado, el aprovechamiento de dicha energía para otros fines, tales como la obtención de energía eléctrica, térmica y mecánica a partir de reacciones atómicas, y sus aplicaciones, bien sea con fines pacíficos o agresivos. La energía nuclear se libera cuando se dan reacciones en los núcleos de algunos isótopos de ciertos elementos químicos, siendo la más conocida la fisión del uranio-235 (U^{235}), con la que funcionan la mayoría de las plantas nucleares existentes en la actualidad. El uranio es un metal bastante común que se encuentra en rocas alrededor del mundo. El uranio natural está hecho de dos tipos de átomos, U-235 y U-238, pero solamente el uranio-235 es utilizado en un reactor nuclear. [15]

La fisión de grandes átomos, como el Uranio-235 y el Plutonio 239, produce una gran cantidad de energía. De hecho, la fisión de 1 gramo de Uranio-235 produce la misma cantidad de energía si se quemara 3 toneladas de carbón. La energía producida por la fisión del Uranio o Plutonio se puede aprovechar para producir electricidad, propulsar una nave espacial. Así como el carbón y petróleo, el Uranio también requiere de minas para su obtención y ser procesado antes de usarlo como fuente de energía. Esto al igual que el carbón o petróleo, las etapas de

minería, y la actual producción de energía, crean una gran cantidad de residuos peligrosos. Especialmente un elemento radiactivo que es inestable, y que continúa desintegrándose al liberar radiación. La radiación está compuesta de partículas con altos niveles de energía, que pueden penetrar y dañar la materia con la que entra en contacto. [16]

Por el agotamiento eminente de los combustibles fósiles, así como el elemento primordial de las plantas nucleares que es el uranio, diferentes ramas de la ciencia están buscando estrategias para encontrar una solución a este problema, así mismo se están desarrollando y probando nuevas fuentes alternativas de energía con el fin de proveer a las futuras generaciones un mundo limpio y sustentable de energía eléctrica.

2.2.2 Renovables

El termino “energía renovable” se refiere a la energía que fluye de forma natural a través del entorno de manera (a través de variables en el tiempo) continua. El origen de la mayoría de este flujo de energías proviene de la radiación solar que incide sobre la superficie de la Tierra. Aunque a su vez existen notables excepciones como lo son la energía de las mareas que es resultado de las fuerzas gravitatorias entre la Luna y la Tierra, y la energía geotérmica que se genera del calor que continuamente se descarga desde el núcleo de la Tierra. [17]

Las fuentes de energía renovables son distintas a las de combustibles fósiles o centrales nucleares debido a su diversidad y abundancia. Se considera que el sol abastecerá estas fuentes de energía (radiación solar, viento, lluvia, etc.) durante los próximos cuatro mil millones de años. La primera ventaja de una cierta cantidad de fuentes de energía renovables es que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones, contrariamente a lo que ocurre con los combustibles, sean fósiles o renovables. Algunas fuentes renovables no emiten dióxido de carbono adicional, salvo los necesarios para su construcción.

Un sistema energético que se basa principalmente en las fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles, es una economía que se encuentra sobreviviendo al estar agotando sus reservas de capital. Desde esta perspectiva, el desarrollo de fuentes de energía renovables tendría un efecto a largo plazo favorable económicamente a países no tan desarrollados. Siendo que se

estaría utilizando por así decir, la fuente del sol como presupuesto para la sustentabilidad y necesidades de su población. Pero el principal problema es aliviar o detener las grandes cantidades de emisiones de gases de invernadero hacia la atmosfera por la quema de combustibles fósiles. Principalmente por las etapas de su extracción y la minería. Es por esto que las energías renovables son libres de impactos ambientales. [18]

2.3 Fuentes Renovables de Generación de Energía Eléctrica

Las energías renovables se caracterizan porque, en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil, no se consumen ni se agotan en una escala humana de tiempo. Además, dependiendo de su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables aquellas provenientes de la biomasa y de fuentes geotérmicas

Las fuentes renovables de generación de energía eléctrica se clasifican de la siguiente manera:

- Hidroeléctrica
- Solar – Fotovoltaica Térmica y Alta concentración
- Eólica
- Geotérmica
- Biomasa
- Energía Oceánica – Mareomotriz y Undimotriz

El coste de la energía procedente de recursos renovables ha bajado rápidamente durante los últimos años. En ciertas zonas aisladas y no conectadas a la red, este tipo de energía puede incluso mostrarse como la solución más rentable. El coste de la energía renovable varía en función de la región y la tecnología aplicada y, en muchos casos, no resulta más cara que otros tipos de energía. Para determinar la rentabilidad de un proyecto habrá que llevar a cabo un análisis profundo del recurso disponible y de los gastos necesarios. Las políticas nacionales en el ámbito de la energía son, evidentemente, un factor decisivo, sobre todo en términos de apoyo estructural y financiero. [19]

2.3.1 Centrales Hidroeléctricas

La energía potencial del agua ha sido aprovechada por los seres humanos desde los inicios de la civilización y, actualmente, la generación de energía eléctrica por medio de las centrales hidroeléctricas constituye el mayor componente del aporte de energía renovable en el mundo para la producción de electricidad. [20] La energía hidroeléctrica representa una de las fuentes renovables de energía más antiguas y grandes disponibles. Se conoce también como una energía renovable convencional, a diferencia de las energías renovables no convencionales que hemos mencionado anteriormente. El aprovechamiento de la energía hidroeléctrica se remonta a 3,500 años en el pasado, con el surgimiento de las primeras ruedas hidráulicas. Los griegos y los romanos las empleaban para moler granos y para elevar el agua por encima del cauce de los ríos para el riego. [21]

La energía hidráulica se convirtió en un factor decisivo para la creciente industrialización. La primera central hidroeléctrica se construyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la energía hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. Actualmente, la energía hidráulica se destina fundamentalmente a la generación de electricidad. Para el año de 1920, las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad. [22] En la figura 2.4, se muestra la central hidroeléctrica El Cajón, que se encuentra en el cauce Río Grande de Santiago en Nayarit.



Figura 2. 4.- Central hidroeléctrica El Cajón.

La fuerza del agua en movimiento es uno de los recursos energéticos renovables más empleados. Más del 20 por ciento de la electricidad del mundo se origina en las centrales hidroeléctricas. La energía hidroeléctrica que se puede obtener en una zona depende de los caudales de agua y desniveles de la misma. El principio para la obtención de energía eléctrica es sencillo: la energía cinética del agua se convierte en eléctrica mediante sucesivas transformaciones de energía. Para lograrlo se aprovecha un desnivel para conducir el fluido hacia una instalación situada más abajo.

En ella se hace pasar el agua a gran presión por una turbina hidráulica, provocando un movimiento rotatorio. A partir de la rotación de un rotor electromagnético impulsado por la turbina, se induce la tensión en las bobinas del estator, que es una pieza que contiene un electroimán encargado de crear el campo magnético fijo y por ende se produce la electricidad. Finalmente, de las terminales del estator es posible extraer energía eléctrica. Realizando este proceso, el agua se devuelve al río y se normaliza su curso.

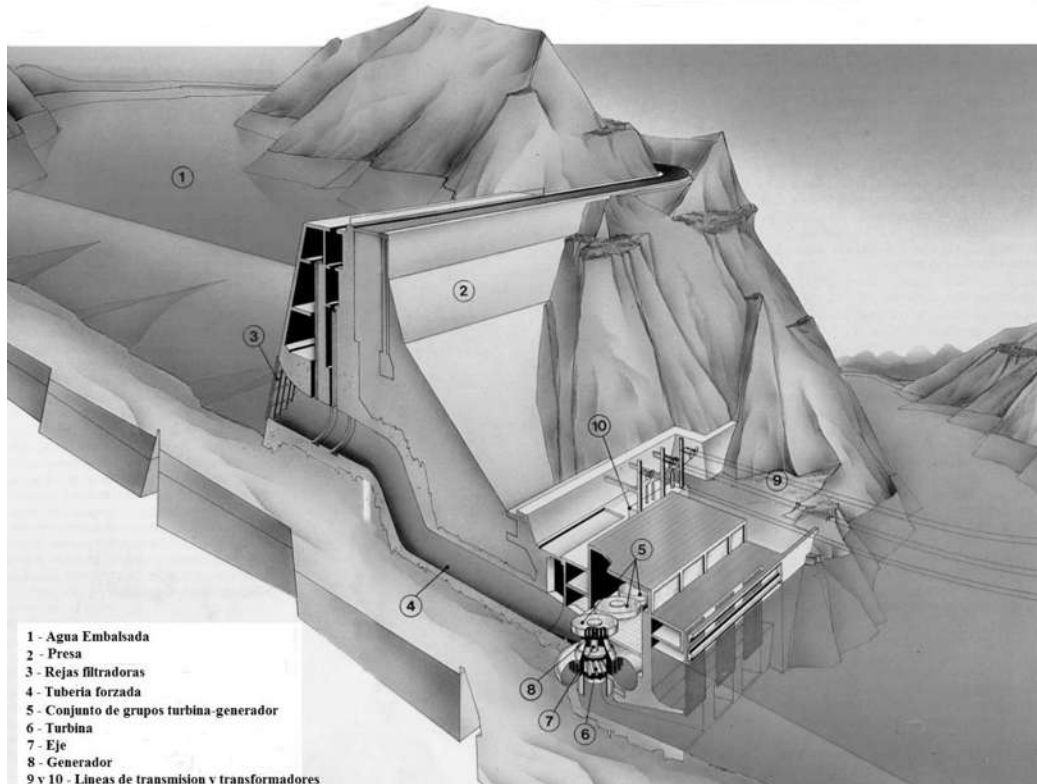


Figura 2. 5.- Diagrama de una central hidroeléctrica.

En el diagrama de la figura 2.5, las etapas son las siguientes: el agua previamente acumulada en el embalse superior (1) cerrado por una presa (2), el agua pasa por las rejillas filtradoras (3) y se dirige a gran velocidad y presión por la tubería forzada (4) hasta llegar al cuarto de máquinas de la central eléctrica donde se encuentran el conjunto de grupos turbina-generador (5), posteriormente acciona la turbina hidráulica acoplada al eje del generador para la generación de energía eléctrica (6),(7) y (8). Finalmente, la electricidad es elevada a niveles de voltaje de transmisión (400kv) por medio de transformadores elevadores (10) y transportada por las líneas de potencia de alta tensión para llegar a los puntos de consumos de los usuarios en las grandes ciudades (9). [23]

La energía hidroeléctrica viene dada por la siguiente relación:

$$P_E = 0.5 Q \rho g H \quad (2.1)$$

Donde:

0.5 = eficiencia aproximada de la central de generación, desde el embalse hasta la producción de energía eléctrica.

Q = caudal en $[m^3/s]$.

ρ = densidad del agua igual a $1 \times 10^3 [kg/m^3]$.

g = constante de gravedad igual a $9.8 [m/s^2]$.

H = altura en metros de la **cabeza de agua** igual a la diferencia de altura vertical entre la salida de agua del reservorio a la tubería de presión y el rotor de la turbina.

Las dos variables que determinan la potencia de salida son el **caudal** y la **cabeza de agua**. [24] Los componentes fundamentales de las centrales hidroeléctricas, se dividen en los siguientes grupos:

Conjunto 1:

- Embalse
- Presa y aliviaderos
- Tomas y Deposito de Carga
- Canales, túneles y galerías
- Tuberías forzadas

Conjunto 2:

- Turbinas hidráulicas
- Alternadores
- Transformadores
- Sistemas eléctricos de media, alta y muy alta tensión
- Sistema eléctrico de baja tensión
- Sistema eléctrico de corriente continua
- Equipos auxiliares
- Tableros de Control

El conjunto 1, consta de todo tipo de obras, equipos, etc., cuya labor se puede resumir diciendo que es la de almacenar y encauzar el agua en las debidas condiciones, para conseguir posteriormente una acción mecánica. El conjunto 2, engloba los edificios, equipos, sistemas, etc., mediante los cuales, y después de las sucesivas transformaciones de la energía llegamos a obtener esta en forma de energía eléctrica. [25]

Se entiende por **turbina**, al dispositivo que genera potencia mecánica en rotación a partir de la energía de una corriente de fluido. Esa energía, que originalmente es de carga o presión, se convierte en energía de velocidad al pasar por un sistema de aspas estacionario y móvil en la turbina. Realizando cambios en la magnitud y dirección de la velocidad del fluido para ocasionar fuerzas tangenciales sobre las aspas rotatorias y producir potencia mecánica con la rotación del motor. [26]

En cuanto al funcionamiento de las turbinas hidráulicas, estas se clasifican en dos grupos:

- Turbinas de acción.
- Turbinas de reacción.

En las **turbinas de acción** el agua sale del distribuidor a presión atmosférica, y llega al rodete con la misma presión; en estas turbinas, toda la energía potencial del salto se transmite al rodete en forma de energía cinética. En las **turbinas de reacción** el agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete, de forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa; en estas turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete, por lo tanto, la energía potencial del salto se transforma, una parte, en energía cinética, y la otra, en energía de presión. [27]

Dentro de la categoría de turbinas de reacción se encuentra la turbina **Francis y Kaplan**, siendo estas las más utilizadas en la actualidad en las grandes centrales hidroeléctricas. La turbina Francis es radial centrípeta, es fácilmente regulable y funciona a un elevado número de revoluciones; es el tipo más empleado, y se utiliza en saltos variables, desde 0.5 m hasta 180 m. Este tipo de turbinas hidráulicas pueden ser, lentas, normales, rápidas y extra rápidas. [28]

La Turbina Kaplan cuenta con palas del rodete en forma de hélice; se emplea en saltos de pequeña altura (alrededor de 50 m. y menores), con caudales medios y grandes (aproximadamente $15 \text{ m}^3/\text{s}$ en adelante), obteniéndose con ella elevados rendimientos. La importancia de las turbinas Kaplan en pequeños saltos con grandes caudales, las hacen idóneas tanto en posición horizontal como vertical. Este tipo de turbinas realizan un movimiento simultáneo de todas las palas, por lo cual poseen un complicado sistema de bielas. Este desplazamiento es accionado por un servomotor hidráulico, con la turbina en movimiento. Esta turbina se categoriza por ser de admisión total, al igual que las turbinas Francis. [29] En la figura 2.6, se muestra el esquema de una turbina Francis y una Kaplan.

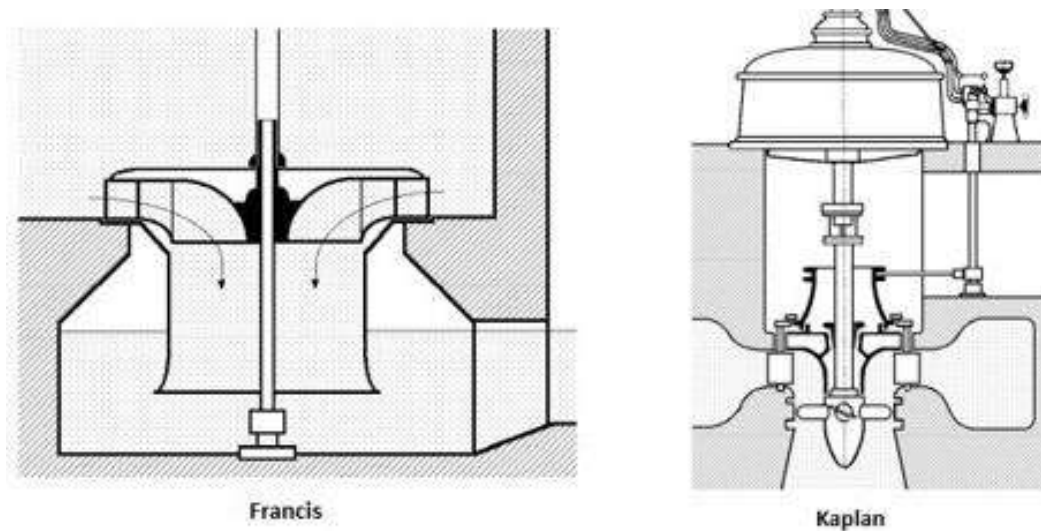


Figura 2. 6.- Esquema de una turbina Francis y Kaplan.

Dentro de la categoría de las turbinas de acción se encuentra la turbina Pelton. La turbina de chorro libre fue inventada alrededor de 1880 por Lester Pelton, quien después le dio su nombre. Por lo tanto, la materialización más común de este tipo de máquinas es la turbina Pelton. [30] Son máquinas robustas y simples, capaces de un buen rendimiento. En la figura 2.7 se muestra el esquema de una de ellas.

Las turbinas Pelton son turbinas de chorro libre que se acomodan a la utilización de saltos de agua con mucho desnivel y caudales relativamente pequeños (márgenes de empleo entre 60 y 1500 metros), consiguiéndose rendimientos máximos del orden del 90%. [31] El chorro se crea

por medio de una tobera estacionaria convergente cónica, denominada inyector. Este inyector va dotado de una espiga central simétrica capaz de moverse axialmente, la cual controla el área de paso. El inyector hace incidir la corriente de agua tangencialmente al rotor, ocurriendo la deflexión del chorro sin concurrencia de una variación global de radio significativa y en media en un plano paralelo al eje del rotor y conteniendo al eje del inyector.

Para mantener constante la velocidad de la turbina, el caudal inyectado tiene que adaptarse en cada instante al valor de la carga, por lo que la posición del inyector se ajusta mediante un regulador que actúa según la velocidad de la turbina y en el caso más general, en forma automática. [32]

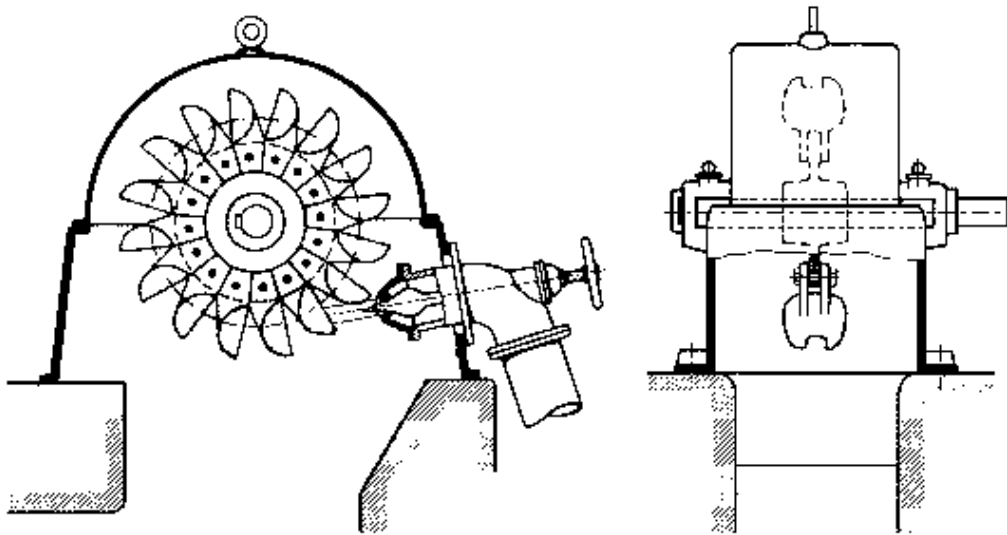


Figura 2. 7.- Diagrama de una turbina Pelton.

La turbina Schwamkrug pertenece al igual que la turbina Pelton en la categoría de las turbinas hidráulicas de acción. Es una turbina radial y centrífuga y raramente utilizada. [33] En la Figura 2.8, se tiene el esquema de una turbina Schwamkrug.

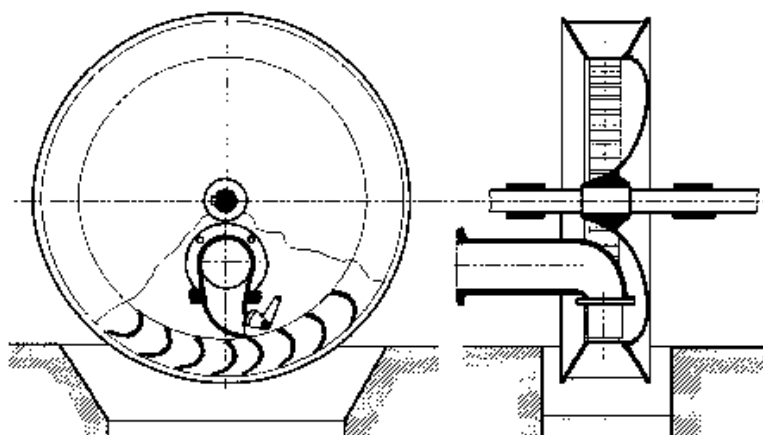


Figura 2. 8.- Diagrama de una turbina Schwamkrug.

Las centrales hidroeléctricas han hecho la mayor contribución a la obtención de energía eléctrica a partir de recursos renovables. En efecto, el agua usada para generar energía es constantemente la respuesta de la naturaleza y se obtiene de esta de manera gratuita. La energía hidroeléctrica posee buenos cocientes de entrada-salida de energía y niveles de eficiencia de más del 90 por ciento. Además, su generación no contamina el agua ni la atmósfera, siendo esta una gran ventaja en comparación con otros tipos de centrales eléctricas. En el mundo los mayores generadores de la energía hidroeléctrica son Canadá, Brasil y Noruega. Esto es debido a sus topografías, las cuales favorecen esta clase de producción de electricidad.

2.3.2 Centrales Solares

El Sol, es una fuente inagotable de energía. La energía solar, es tal vez, la primera fuente de energía que se nos viene a la mente cuando uno piensa en fuentes de energía renovables. La radiación de energía del Sol, es la causa de las corrientes de aire, evaporación de las aguas superficiales, formación de nubes, lluvias y, por consiguiente, el origen de otras formas de energía renovable, como el viento, la energía de las olas o la biomasa. Su calor y luz son la base

de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de las plantas, de los animales y, en definitiva, para que puede existir vida sobre la Tierra. [34]

El Sol es, por lo tanto, la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta. Localizado a una distancia media de 150 millones de kilómetros, tiene un radio de 109 veces el de la Tierra y está formado por gas a muy alta temperatura. En su núcleo se producen continuamente reacciones atómicas de fusión nuclear que convierten el hidrógeno en helio. Este proceso libera gran cantidad de energía que sale hasta la superficie visible del Sol (fotosfera), y escapa en forma de rayos solares al espacio exterior. [35]

El Sol emite al espacio energía en forma de radiación electromagnética, la cual puede desplazarse en el vacío, es decir, no requiere medio material para propagarse. Estos rayos solares se propagan a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas de energía. Este fenómeno físico, más conocido como radiación solar, es el responsable de que al planeta Tierra reciba un aporte energético continuo de aproximadamente 1.367 W/m^2 . Este valor recibe el nombre de constante solar y que, al cabo de un año, equivaldría a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles del mundo (petróleo, carbón, etc.). [36]

La energía solar ofrece dos formas para la generación de energía eléctrica: *Térmica* (concentración) y *Fotovoltaica*. Las centrales termo solares se basan en la concentración de la radiación solar, a fin de llevar un fluido a suficiente temperatura para accionar motores (turbinas) térmicas que van acoplados a generadores eléctricos. Esta tecnología se le denomina de alta temperatura, ya que es destinada especialmente para la generación de energía eléctrica.

La energía solar térmica convierte la energía radiactiva en calor, su principal componente es el captador, por el cual circula un fluido que absorbe la energía radiada del sol. De acuerdo a la temperatura de aprovechamiento se puede clasificar en las siguientes categorías: alta, media y baja, siendo sus límites:

- Hasta 100°C de baja temperatura.
- Desde 100°C y hasta 300°C de mediana temperatura.
- Mayores a 300°C de alta temperatura.

Los sistemas solares térmicos de alta temperatura hacen referencia a grandes instalaciones donde el principal elemento es una torre parabólica, o un campo de heliostatos que concentran la radiación solar en una torre central, que puede alcanzar temperaturas superiores a los 4000°C. Normalmente se tratan de sistemas con una caldera central de la que se obtiene vapor a alta temperatura para usos térmicos o producción de electricidad. [37]

Las centrales de energía solar térmica de concentración producen electricidad de manera similar a las centrales térmicas convencionales: utilizando vapor para accionar una turbina. La diferencia entre ellas estriba en el origen de la energía, que en lugar de combustibles fósiles utiliza directamente la radiación solar convertida en vapor o gas a alta temperatura. Se requieren cuatro elementos principales: un concentrador, un receptor, alguna forma de medio de transporte o almacenamiento, y conversión eléctrica.

A continuación se muestran los principales tipos de energía que se derivan de la energía solar térmica de concentración en términos de potencia instalada y electricidad producida.

a) Sistema de Concentradores Lineales de Fresnel (LFR)

Un conjunto de reflectores casi planos concentran la radiación solar en receptores lineales invertidos elevados. El agua que fluye por los receptores se convierte en vapor. Este sistema es de concentración lineal, similar a un canal parabólico, con la ventaja de su bajo costo en soporte estructural y reflectores, juntas fijas del fluido, un receptor separado del sistema de reflectores, y grandes longitudes focales que permiten utilizar espejos planos. Esta tecnología es contemplada como una alternativa potencial de menor costo a la tecnología de canales parabólicos para la producción de calor de proceso solar. En la figura 2.9 se muestra el Sistema de Concentradores Lineales de Fresnel.

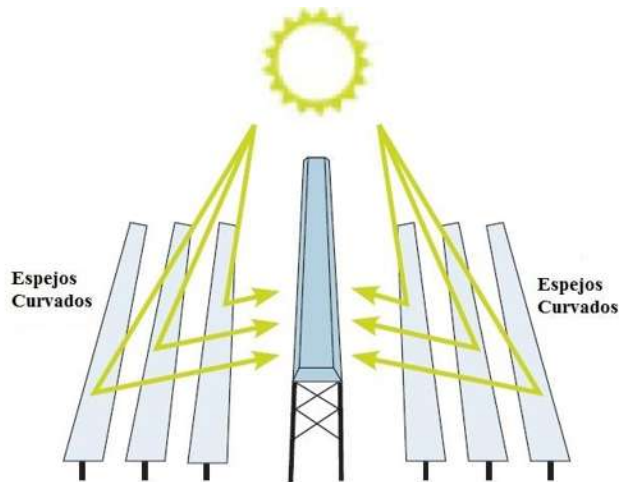


Figura 2. 9.- Sistemas de concentradores lineales de Fresnel (LFR).

b) Sistemas de Receptor Central o Torre Central

Es un conjunto circular de heliostatos (grandes espejos con sistemas de seguimiento solar) que concentra la luz solar en un receptor central montado sobre una torre. Un medio de transferencia térmica en este receptor central absorbe la radiación altamente concentrada reflejada por los heliostatos y la convierte en energía térmica que se utiliza para generar el vapor sobrecalentado para la turbina. Hasta la fecha, los fluidos de transferencia térmica que se han desarrollado incluyen agua/vapor, sales fundidas y aire. En la figura 2.10, se muestra el esquema de un Sistema de Receptor Central o Torre Solar.

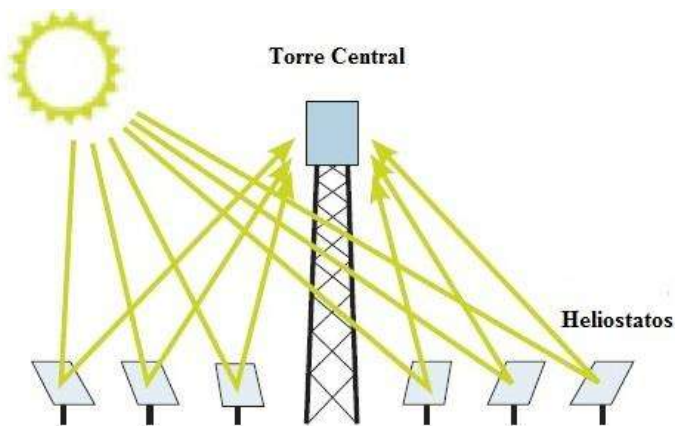


Figura 2. 10.- Diagrama de un sistema de receptor central o Torre Solar.

c) Sistemas de Disco Parabólico

Un reflector parabólico en forma de disco concentra los rayos solares en un receptor en el punto focal de un disco. La radiación de los rayos concentrados se absorbe en el receptor para calentar un fluido o gas (aire) a unos 750°C . Este fluido o gas se utiliza para generar electricidad en un pequeño pistón o motor Stirling, conectada al receptor.

Los colectores de concentración térmica Disco-Stirling, se componen de un concentrador parabólico que debido a su curvatura calienta el aire en un punto, directamente debajo de un motor térmico tipo Stirling, accionándolo. Dichos sistemas utilizan uno o varios concentradores de foco puntual, es decir concentran todos los rayos incidentes sobre su superficie en un solo punto, que es el receptor. El motor Stirling posee pistones que van moviéndose como cualquier otro motor térmico, como los que se utilizan en los automóviles que quema gasolina. En la figura 2.11, se tiene un concentrador Disco-Stirling.

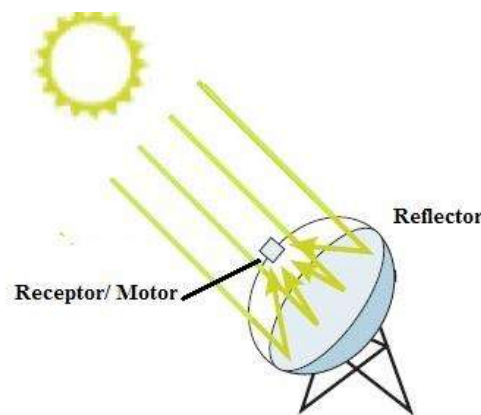


Figura 2. 11.- Esquema de un concentrador Disco-Stirling.

d) Canales Parabólicos

Se utilizan reflectores de espejo en forma cilindro-parabólicos para concentrar la luz solar en tubos receptores térmicamente eficientes ubicados en la línea focal de la parábola. Estos canales están diseñados para seguir el sol en un eje, usualmente de norte-sur. Se hace circular por esos tubos un fluido de transferencia térmica, como aceite térmico sintético. El fluido se calienta a 400°C mediante los rayos solares concentrados y se bombea por una serie de intercambiadores

térmicos para producir un vapor sobrecalentado, que se convierte en energía eléctrica en un generador de turbinas de vapor convencional que puede formar parte de un ciclo de vapor convencional o integrarse en un ciclo combinado de turbinas de vapor y gas. La figura 2.12, muestra el esquema de un sistema tipo Canales Parabólicos. [38]

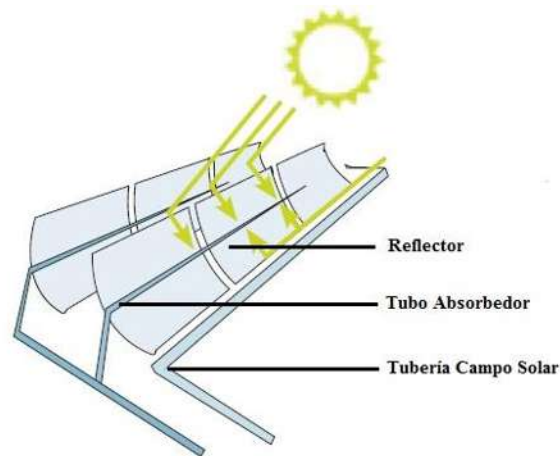


Figura 2. 12.- Sistema de tipo canales parabólicos.

e) Energía Solar Fotovoltaica

Las instalaciones solares fotovoltaicas funcionan de acuerdo con un sencillo principio: constan de paneles solares (módulos fotovoltaicos) individuales, que a su vez contienen celdas solares individuales hechas de materiales semiconductores como el silicio (cristalino y amorfo). Cuando brilla el sol, una celda solar se comporta casi como una batería, la luz solar recibida separa los electrones de modo que forman una capa de carga positiva y una de carga negativa en la celda solar; esta diferencia de potencial genera una corriente eléctrica. Cuanta más luz del sol reciba una celda, más será la potencia de corriente eléctrica generada; para aumentar dicha potencia, se combinan varias celdas y se conectan formando un panel solar. Estos paneles a su vez se pueden integrar para aumentar aún más la potencia formando una planta fotovoltaica. [39] En la figura 2.13, se tiene el esquema de una celda de material de silicio, donde se muestra el efecto fotovoltaico.

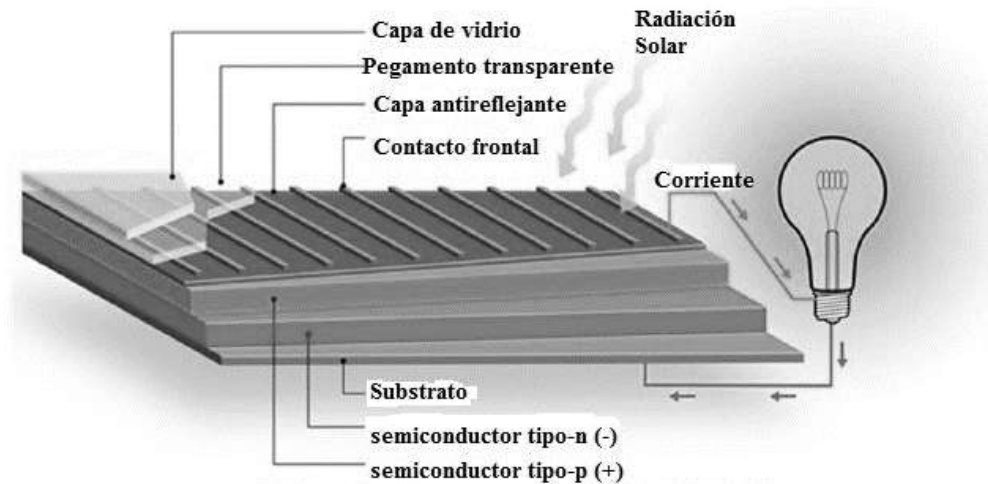


Figura 2. 13.- Efecto fotovoltaico en una celda de Silicio.

Las celdas solares para la generación de electricidad conectadas directamente a la red, se asocian o agrupan mediante conexiones en serie o en paralelo para aumentar la potencia de generación y formar los llamados módulos fotovoltaicos, estos conectados en serie o en paralelo para formar arreglos fotovoltaicos. Independientemente del tipo de agrupación eléctrica entre las celdas y/o módulos solares, a las tecnologías de transformación de luz a energía eléctrica se les llama comúnmente generadores fotovoltaicos. La corriente directa generada (CD) se convierte a corriente alterna (CA) por medio de convertidores electrónicos para así ser inyectada al sistema eléctrico de potencia. Este acoplamiento entre los generadores fotovoltaicos, los convertidores electrónicos y el sistema de almacenamiento de energía, y las cargas a energizar se le conoce con el nombre de un sistema fotovoltaico. [40]

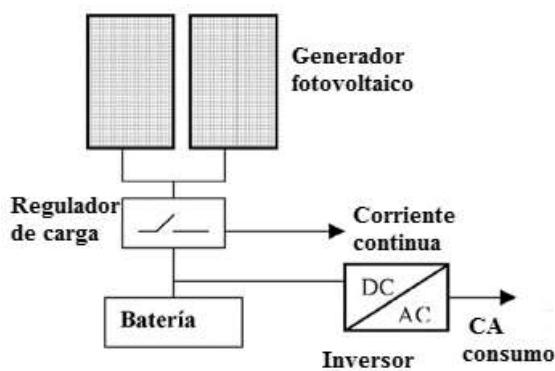


Figura 2. 14.- Esquema de una central solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica.

En la figura 2.14, se muestra el esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red son una alternativa prometedora en el futuro de las energías renovables. En estos sistemas, la energía obtenida no se almacena sino que se provee directamente a la red eléctrica comercial. Esto implica por una parte que el banco de baterías ya no es necesario y, por otra, que se necesita de un equipo especial (un inversor CD/CA) para adaptar la energía producida por los paneles a la energía de la red. Las aplicaciones inmediatas son la venta de energía eléctrica o la reducción de la facturación mensual. Esta es una posibilidad muy interesante para inversiones privadas en el sector de energía limpia. [41]

2.3.3 Centrales de Generación Eólica

La energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire. La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia las adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión. Los vientos son generados por el calentamiento no uniforme de la superficie terrestre proveniente de la radiación solar. En la figura 2.15 se muestra las principales corrientes de viento en la superficie de la Tierra.

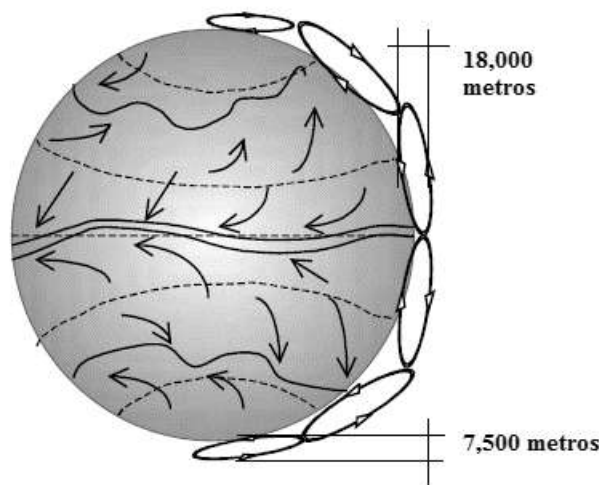


Figura 2. 15.- Principales corrientes de viento en la Tierra.

El aprovechamiento de la energía eólica se efectúa mediante el uso de aerogeneradores o mini-aerogeneradores que permiten transformar la energía cinética en energía mecánica. En estos sistemas la energía eólica mueve una hélice que mediante un sistema mecánico hace girar el rotor de un generador que genera energía eléctrica. [42] En la figura 2.16, se observa el flujo de corriente de aire atravesando una turbina eólica.

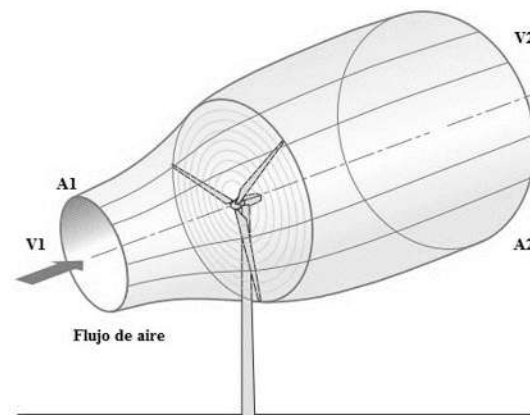


Figura 2. 16.- Flujo de corriente de aire atravesando la turbina eólica.

Los aerogeneradores se agrupan en zonas con una alta incidencia del viento, y a esta agrupación se le conoce como parques eólicos. En general, los aerogeneradores suelen estar sobre una torre de gran altura, ya que la velocidad del viento es mayor cuanto más alto nos encontramos. También existen aerogeneradores más pequeños, que pueden aportar la energía necesaria a zonas que están aisladas. [43] A continuación se desglosan los componentes principales que se encuentran en un aerogenerador:

- Rotor (juego de aspas, cubo y nariz).
- Tren de Potencia (flecha principal, caja de engranes, y acoplamientos).
- Sistema de Seguridad (frenos).
- Generador eléctrico
- Sistema de refrigeración.
- Sistema de control.
- Mecanismos de autoprotección y redundancia.
- Sistema de medición y orientación al viento.
- Sistema de lubricación.

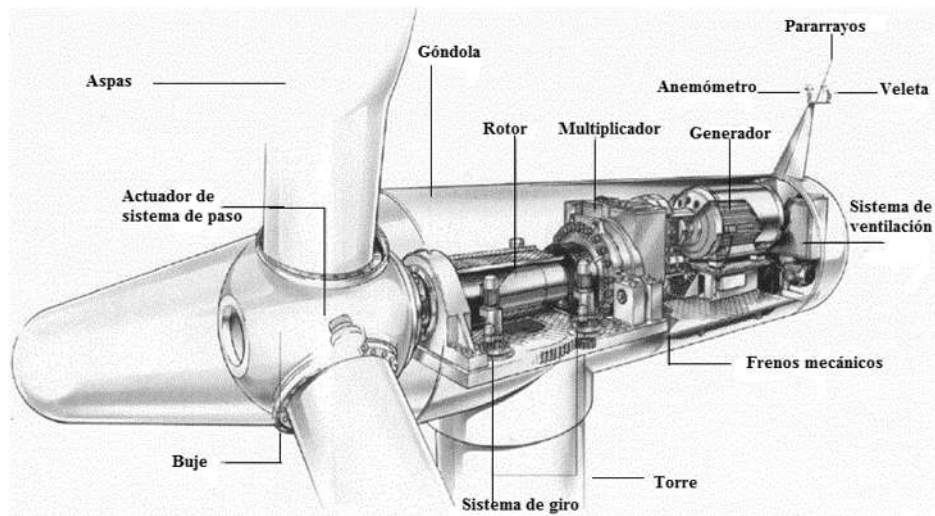


Figura 2. 17.- Componentes principales que encierra la góndola de un aerogenerador.

Un parque eólico conectado a la red se configura mediante la instalación integrada de un conjunto de aerogeneradores, interconectados eléctricamente mediante redes propias y compartiendo una misma infraestructura de acceso y control. La conexión a la red eléctrica de distribución se realiza mediante la correspondiente transformación de tensión dependiendo de la capacidad técnica de las redes existente y de la propia instalación. [44] En la figura 2.17, se muestran los componentes fundamentales de un aerogenerador eólico. De igual manera, en la figura 2.18, se muestra el esquema de un parque eólico instalado en tierra.

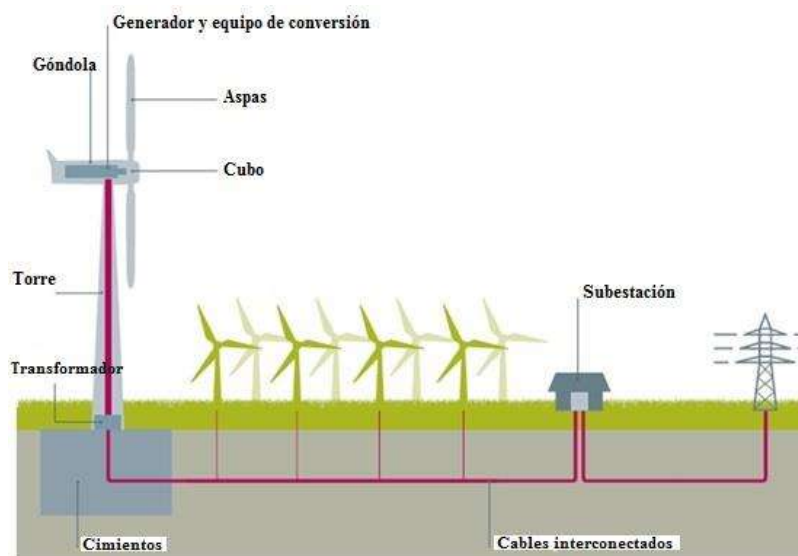


Figura 2. 18.- Esquema de un parque eólico en Tierra.

La energía eólica tiene un futuro prometedor aunque los mejores terrenos han sido ya ocupados o están en trámites de autorización y cada vez es más difícil encontrar zonas con altas velocidades de viento sin explotar; como solución a este problema aparecen una nueva posibilidad, la energía eólica offshore (marítimos). [45]

El mar abre nuevas oportunidades para la energía eólica, sobretudo el aprovechamiento del viento, este circula a velocidades muy elevadas, abriendo las posibilidades de instalar aerogeneradores de mayor tamaño. La tecnología de las turbinas eólicas de estos parques eólicos marítimos se basa en los mismos principios que la de un parque eólico terrestre. Se construyen bases de hormigón para sostener la estructura de las turbinas, que puede ser de diversos diseños. Se construye una plataforma de acceso para facilitar el mantenimiento de los equipos, se instalan cables submarinos que llevan la energía a un transformador, convirtiéndola en alto voltaje (33kv a 132kv) para así poder suministrarla a la red eléctrica de distribución local. [46] En la figura 2.19, se muestra el esquema de un parque eólico marítimo que se encuentra dentro del océano y anclado al fondo marino.

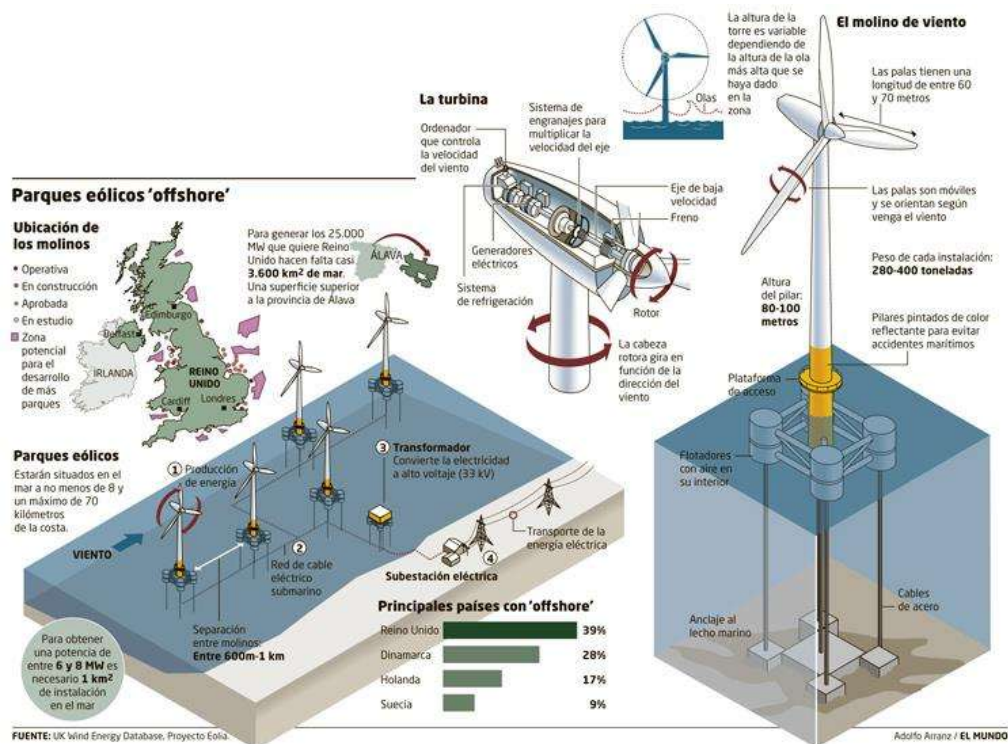


Figura 2. 19.- Esquema de un parque eólico marítimo en aguas profundas.

2.3.4 Centrales Geotérmicas

Primero, hay que considerar que la palabra “geotermia” tiene su origen en el griego *geo*, que significa Tierra, y *thermos*, cuyo significado es “calor”. Por lo tanto, “geotermia” significa “calor de la Tierra”. En su definición práctica, la energía geotérmica es aquella que se genera y almacena en forma de calor en el núcleo de la Tierra y determina la temperatura de la materia. Para comprender esto, hay que saber que el planeta está constituido por tres capas diferentes: el núcleo, conformado por una capa interna de hierro sólido y otra capa externa llamada magma compuesta por roca fundida; el manto, capa que circunda al núcleo; y la corteza, que es la que forma los continentes y el fondo de los océanos. La energía térmica es producida por la pérdida continua de calor y la desintegración de partículas radioactivas. Debajo de la corteza terrestre, las rocas y los fluidos contienen la energía, varios kilómetros bajo la superficie hasta el magma. [47]

La generación de energía eléctrica mediante el uso de la energía geotérmica consiste en instalaciones similares a las centrales térmicas convencionales. La diferencia radica en el origen del vapor que mueve las turbinas que alimentan el generador eléctrico. En una central térmica convencional el vapor “se fabrica” quemando derivados de petróleo, gas o carbón, mientras que en las centrales geotérmicas no es necesario gastar combustible, pues es proveído directamente por la naturaleza. [48]

Las centrales eléctricas geotérmicas, sin embargo, utilizan el vapor producido a partir de reservorios de agua caliente hallados a un par de kilómetros o más por debajo de la superficie de la Tierra. Hay tres tipos de plantas geotérmicas para la generación de energía eléctrica que se utilizan en la actualidad: vapor seco, vapor tipo flash y de ciclo binario.

Las **centrales eléctricas de vapor seco** extraen los recursos subterráneos para el vapor. El vapor de aguas se canaliza directamente de pozos subterráneos a la planta de energía, donde se dirige hacia una unidad de turbina/generador. Allí aprovechando el salto entálpico entre las condiciones de entrada y salida, la energía termodinámica del vapor se transforma en energía eléctrica. A la salida de la turbina, el vapor se condensa en las torres de enfriamiento para ser reinyectado en profundidad y así mantener la sustentabilidad del sistema. En la figura 2.20, se muestra el esquema de una central geotérmica de vapor seco (vapor directo). [49]

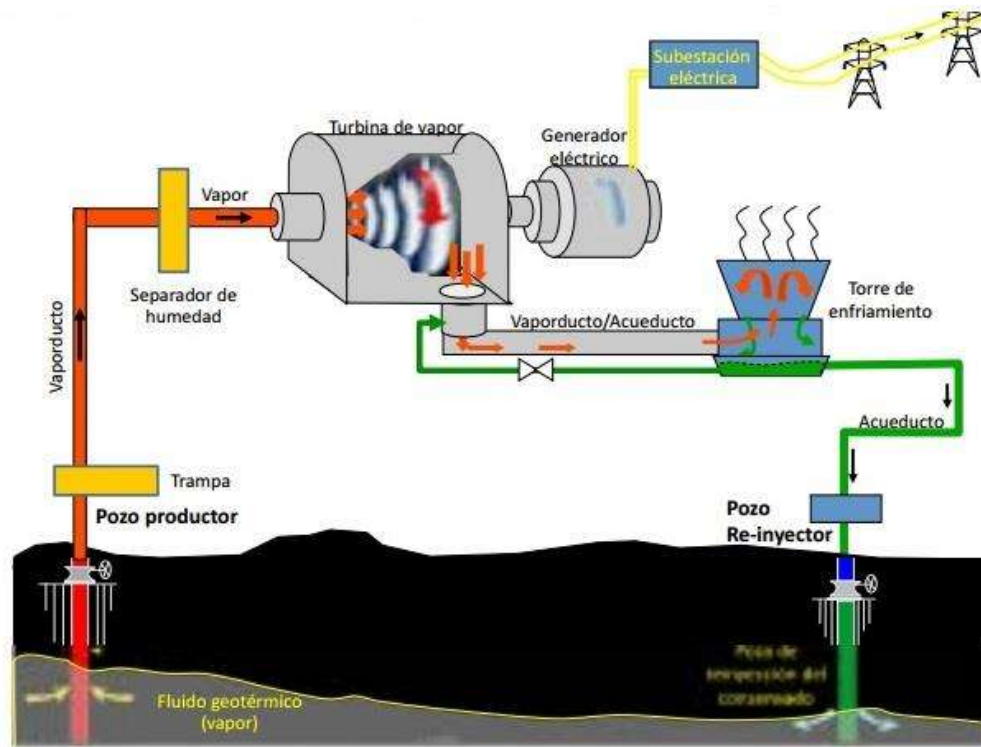


Figura 2. 20.- Esquema de una central geotérmica de vapor seco (vapor directo).

Las **plantas de ciclo binario** permiten el aprovechamiento de yacimientos a temperaturas menores (menos de 180°C). El fluido geotérmico en este tipo de plantas no atraviesa la turbina, sino que cede su energía térmica a un fluido orgánico de bajo punto de ebullición en un intercambiador de calor. El fluido orgánico, que se vaporiza en este intercambiador de calor, realiza un proceso cíclico (ciclo Rankine) en el que se produce energía eléctrica al atravesar el fluido una turbina acoplada a un generador eléctrico. [50]

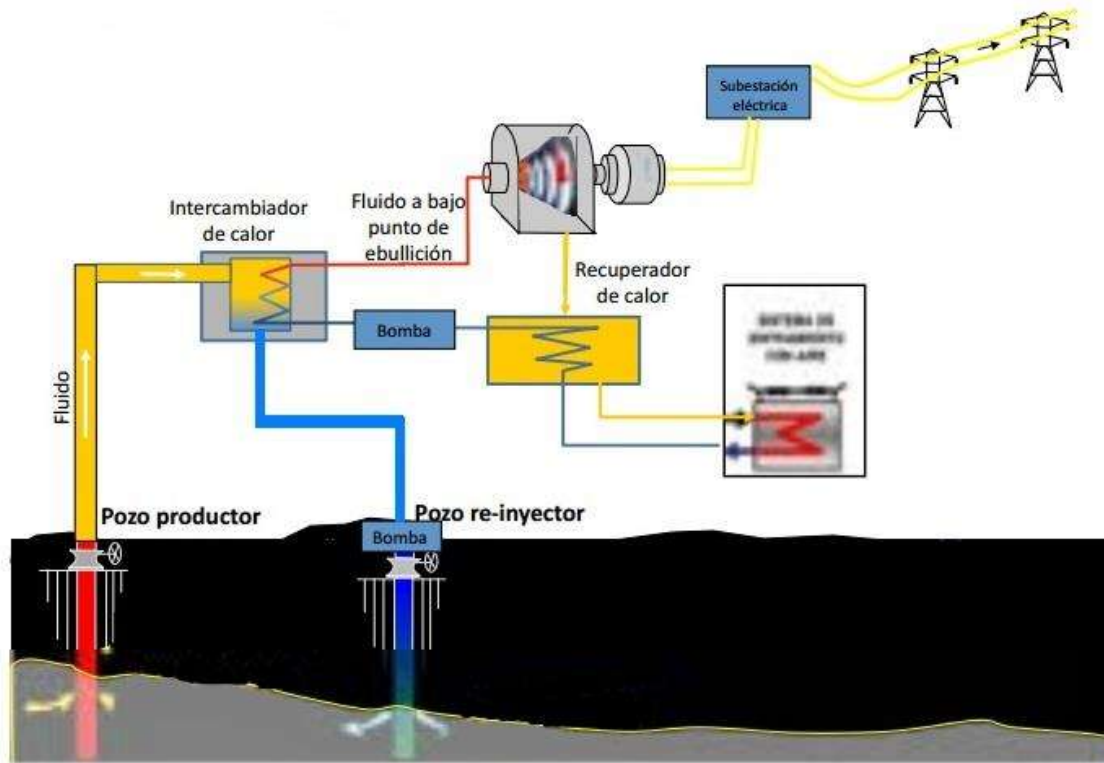


Figura 2. 21.- Esquema de una central geotérmica de ciclo binario.

Las **Centrales eléctricas de vapor flash** son las centrales geotérmicas más comunes y representan alrededor del 60% del total de la capacidad instalada. En términos simples, allí la rápida extracción de los fluidos del reservorio genera una descompresión adiabática del sistema que conduce a la formación del vapor (flash). Por esto, los fluidos geotérmicos producidos por los pozos se compondrán de una parte de vapor (20-30% en masa) y de una parte líquida (70-80% en masa). Estas se separan mediante un separador ciclónico a presión y se transferirán a la planta (vapor) para que produzcan energía, y a la zona de reinyección (fase líquida) para mantener la sustentabilidad del sistema. Luego de ser enviado a la turbina donde su energía se transforma en energía eléctrica, el vapor se condensa en las torres de enfriamiento e igualmente se reinyecta en el reservorio geotérmico. En la figura 2.21, se muestra el esquema de una central geotérmica que utiliza la tecnología de tipo ciclo binario.

La eficiencia energética de un sistema geotérmico explotado con una planta de tipo flash es más baja que la de una planta a vapor seco (directo), ya que el primero utiliza exclusivamente el poder energético de la fase de vapor (20-30% en volumen del fluido extraído), mientras que la

energía/calor contenida en la fase líquida (70-80% en volumen) se devuelve al sistema a través de la reinyección. Para aumentar la eficiencia y la producción de energía eléctrica de un sistema geotérmico líquido-dominante con temperaturas superiores a 160/180° C, es posible acoplar una planta a flash con un sistema binario. Con esta solución, es posible utilizar ambas fases (líquida y vapor) para producir energía eléctrica. [51]

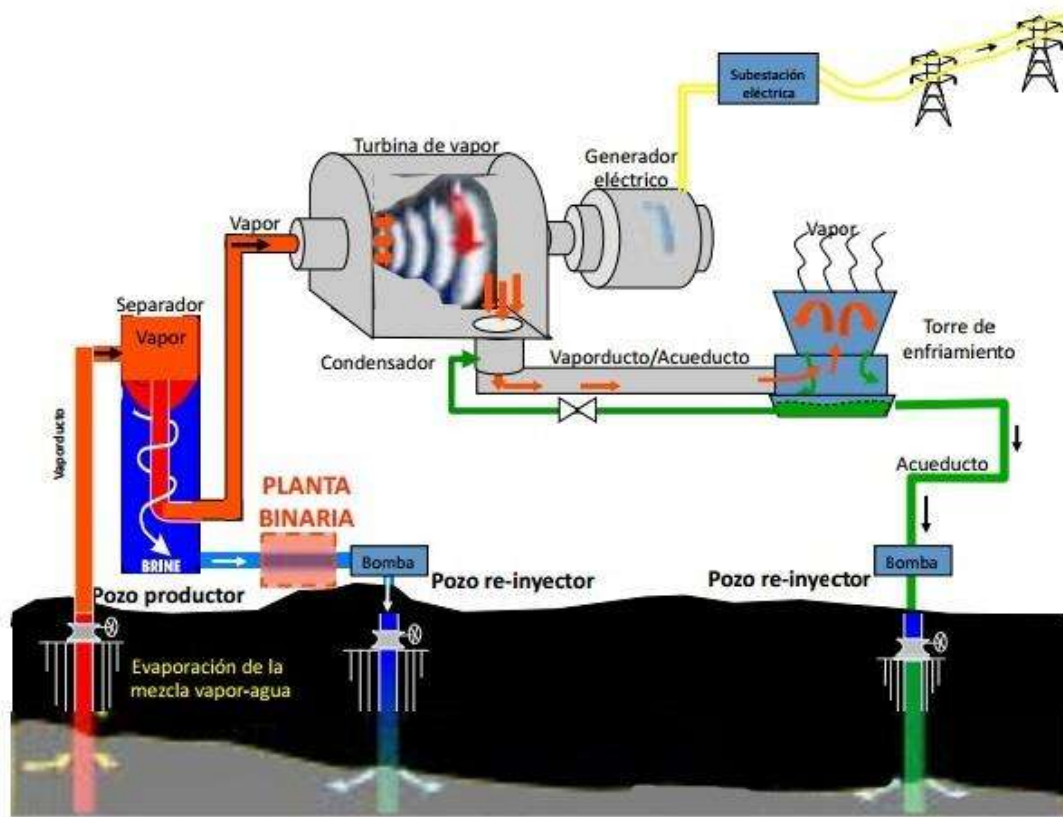


Figura 2. 22.- Esquema de una central geotérmica tipo Flash.

México cuenta con este tipo de tecnología geotérmica en Cerro Prieto, Los Azufres y Los Hornos, todas ellas cuentan con este tipo de sistema flash acoplados por un sistema binario. En la figura 2.22, se muestra el esquema de una central geotérmica tipo flash con un sistema binario.

2.3.5 Centrales de Biomasa

La biomasa es la energía que abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta. La biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos, dando como productos finales dióxido de carbono y agua. Por este motivo, los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan biocombustibles, pudiendo ser, según su estado físico, biocombustibles sólidos, en referencia a los que son utilizados básicamente para fines térmicos y eléctricos, y líquidos como sinónimo de los biocarburantes para los automóviles. [52]

La forma de transformar la biomasa en energía útil depende, fundamentalmente, del tipo de biomasa que se esté tratando y del destino que se quiera dar a esta energía denominada **bioenergía**. El sector bioenergético está basado en tres modos de utilizar la energía: para calefacción, generación eléctrica y para producción de biocombustibles. Los sistemas comerciales para utilizar la biomasa residual seca se pueden clasificar en función de que estén basados en la combustión del recurso (calderas para biomasa) o en su gasificación. Los sistemas comerciales para aprovechar la biomasa residual húmeda están basados en la pirólisis. Para ambos tipos de recursos, existen varias tecnologías que posibilitan la obtención de biocarburantes. [53]

En la figura 2.23, se muestra las posibles transformaciones de la biomasa, desde los materiales crudos hasta su uso final.

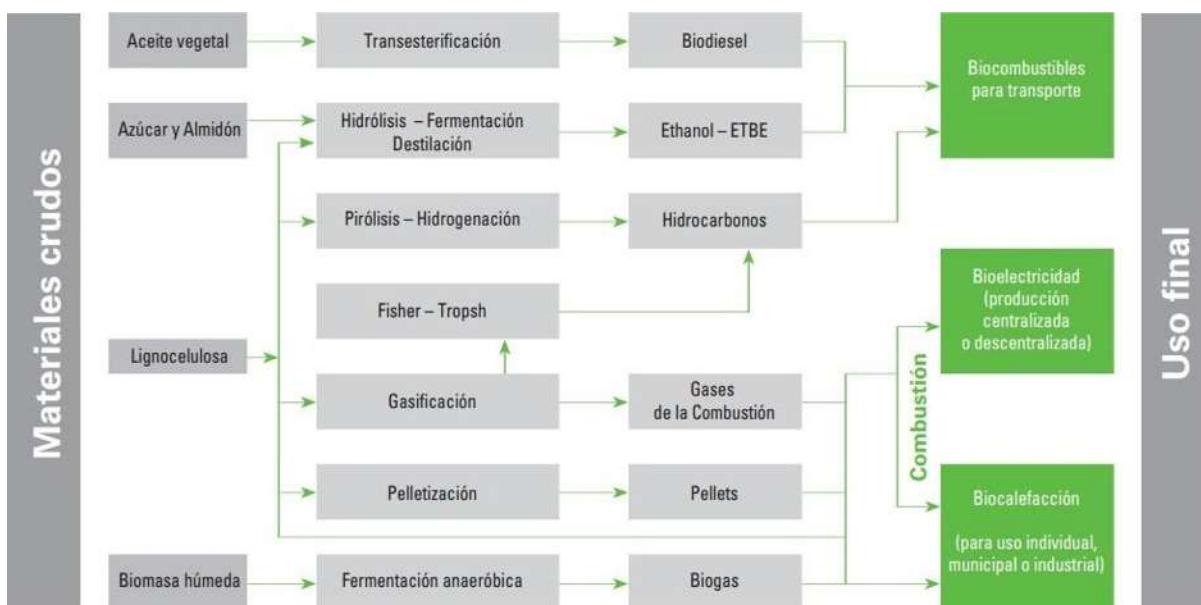


Figura 2. 23.- Esquema de las posibles transformaciones de la Biomasa.

Para la producción de energía eléctrica, la electricidad se puede producir ya sea por combustión o gasificación y se pueden obtener potencias de hasta 50MW. Prácticamente 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. El proceso de funcionamiento de una central eléctrica de biomasa es el siguiente:

- En primer lugar, el combustible principal de la instalación y los residuos forestales se almacenan en la central. Allí se tratan para reducir su tamaño, si fuera necesario.
- A continuación, pasa a un edificio de preparación del combustible, donde se clasifica 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 la propia caldera.

- 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 través de las líneas de potencia correspondientes.
- El vapor de agua se convierte en líquido en el condensador, y desde aquí es nuevamente enviado al tanque de alimentación cerrándose así el circuito principal agua-vapor de la central. [54]

En la figura 2.24 se tiene el esquema de una central de biomasa de generación de energía eléctrica por medio de la tecnología de combustión.

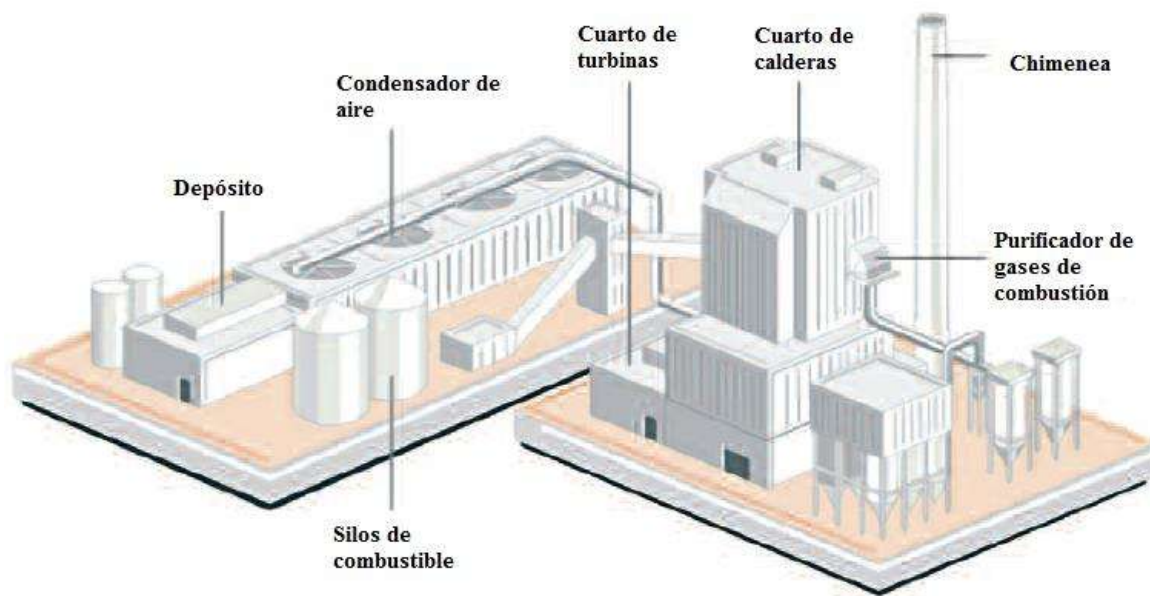


Figura 2. 24.- Esquema de una central eléctrica de Biomasa con tecnología de combustión.

El proceso de gasificación consiste en el uso de un agente oxidante, bien sea O_2 , CO_2 , H_2O o Aire a temperaturas entre 750 y 1100 K. Para la generación de un gas conocido como gas de síntesis, compuesto principalmente por H_2 y CO. Este gas debido a su composición posee un alto poder calorífico para su uso directo en sistemas de generación de energía eléctrica o como agente de reactivo en procesos de síntesis de productos químicos. Este proceso es en la actualidad muy empleado en la industria debido al valor agregado que posee este gas, a la eficiencia energética del proceso y al hecho de no generar mayores niveles de emisiones que los

procesos tradicionales. La gasificación de los pellets es uno de los temas más estudiados y en los cuales existe un mayor interés debido a las múltiples variables que afectan el proceso y la calidad del producto final obtenido. Entre estas variables se encuentra el diseño del reactor, la temperatura del proceso, la presión del sistema, el agente oxidante utilizado y las propiedades fisicoquímicas de los pellets así como su composición. [55]

En la figura 2.25, se muestra el esquema de una central que utiliza el método de gasificación para la generación de energía eléctrica.

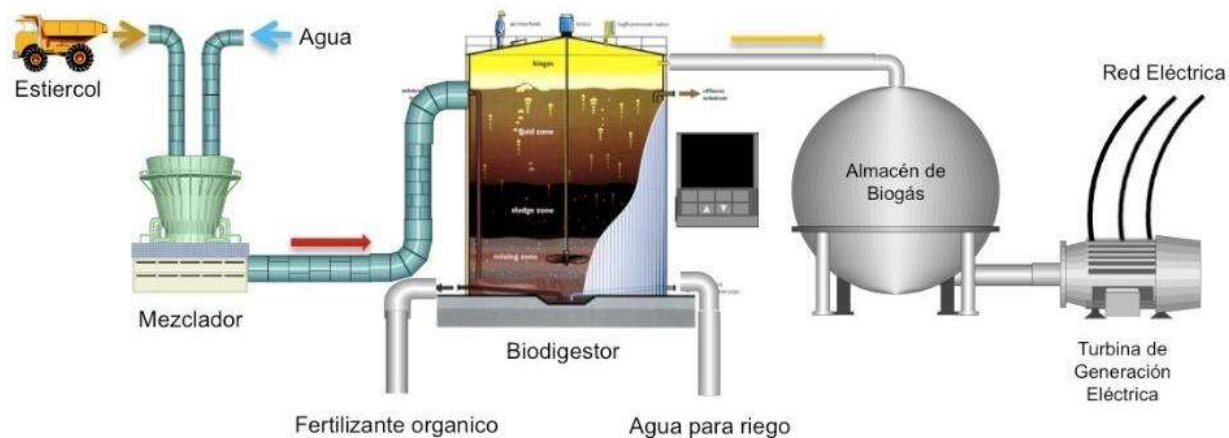


Figura 2. 25.- Esquema de una central eléctrica de Biomasa con tecnología de gasificación.

2.3.6 Energía Oceánica

Los océanos cubren 360 millones de kilómetros cuadrados de agua y ocupan más del 70% de la superficie de la Tierra. Desde hace mucho tiempo, el hombre ha extraído del océano cuantos recursos le ha permitido su ingenio: alimentos, tesoros, sal, medicamentos etc. Los océanos reciben el 80% de la energía solar en forma de calentamiento del agua, provocando el viento y generando grandes corrientes marinas y olas. La energía oceánica es un tipo de energía renovable transportada por las olas del mar, las mareas, la salinidad y las diferencias de temperatura del océano. El movimiento del agua en los océanos del mundo crea un vasto almacén de energía cinética o energía en movimiento. Esta energía se puede aprovechar para generar electricidad que alimente casas, transporte e industria. [56]

En la actualidad la energía oceánica comprende de cinco tecnologías diferentes. A continuación se abordará de manera resumida estas tecnologías que la energía oceánica nos proporciona.

La tecnología del nivel de las mareas (mareomotriz) usa la diferencia del nivel del mar entre la marea baja y alta para generar electricidad. Utiliza la misma tecnología que la energía hidroeléctrica convencional y necesita de una barrera para que retenga una gran cantidad de agua para mover las turbinas que generan electricidad. La energía se genera por la corriente de agua entrando y saliendo de compuertas y turbinas instaladas a lo largo de una presa o barrera construida en un estuario. Esta tecnología es la más establecida con varios proyectos generando electricidad en el mundo. Se espera que en 2021 esté operativo el proyecto “Swansea bay Tidal Lagoon” de 320MW. El gobierno del Reino Unido está actualmente revisando este proyecto. [57]

En la figura 2.26, se muestra una central de energía eléctrica utilizando este tipo de tecnología mareomotriz que se localiza en La Rance, Francia.

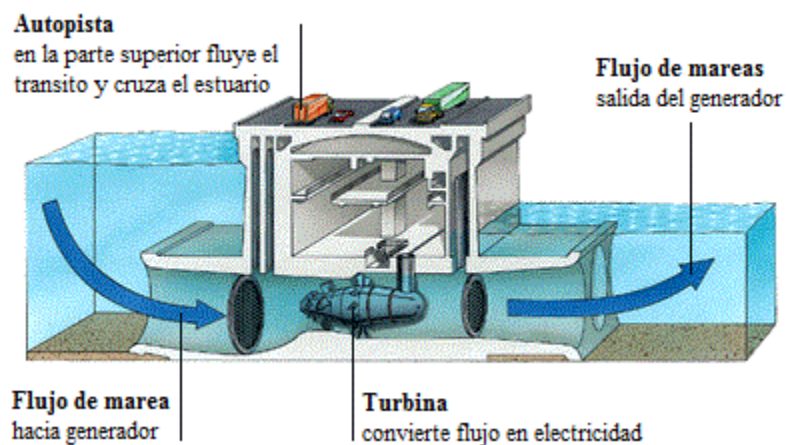


Figura 2. 26.- Esquema de la central mareomotriz La Rance, Francia.

La energía cinética de las mareas (corrientes marinas) se genera por el flujo del caudal en el caso de las mareas, se puede aprovechar eficientemente ése flujo de energía transformando el movimiento de desplazamiento en un movimiento de rotación por medio de las turbinas. La turbina convenientemente acoplada a un generador eléctrico produce la energía eléctrica. Las turbinas pueden ser ubicadas en el fondo del mar o ser amarradas y flotar en la superficie o a

media altura. [58] En la figura 2.27, se muestra el tipo de turbinas utilizadas para el aprovechamiento de las corrientes marinas.



Figura 2. 27.- Esquema de una turbina de flujo cinético de las corrientes marinas.

La Conversión de Energía Térmica-Oceánica (gradiente térmico) es un tipo de energía renovable que tiene su principio de funcionamiento en la diferencia de temperaturas entre las aguas profundas, más frías, y las cercanas a la superficie, más cálidas, para mover una máquina térmica y producir trabajo útil, generalmente en forma de electricidad. Esta tecnología es viable en zonas tropicales, donde encontramos un gradiente térmico mínimo de 20°C y un fondo cercano a las instalaciones terrestres. [59]

Existen tres tipos de sistemas de Conversión de Energía Térmica-Oceánica que se utilizan en la actualidad: eléctricos de ciclo abierto y ciclo cerrado, y sistemas híbridos. Los sistemas de ciclo abierto explotan el hecho de que el agua hierve a temperaturas por debajo de su punto de ebullición cuando están más bajo a la presión normal. Este sistema puede convertir las aguas cálidas superficiales en vapor en un vacío parcial, y luego utilizar este vapor para mover una turbina conectada a un generador eléctrico. El sistema de ciclo cerrado usa aguas superficiales calientes que pasan a través de un intercambiador de calor para hervir un fluido de trabajo, tales como amoníaco o un clorofluorocarbono, que tiene un punto de ebullición bajo. El agua fría del

océano profundo se utiliza a continuación para condensar el fluido de trabajo y se devuelve al intercambiador de calor para repetir el ciclo. Finalmente, los sistemas híbridos utilizan ambos mecanismos. [60]

En la figura 2.28, se muestra el esquema de un sistema que utiliza la tecnología de Conversión de Energía Térmica-Oceánica.

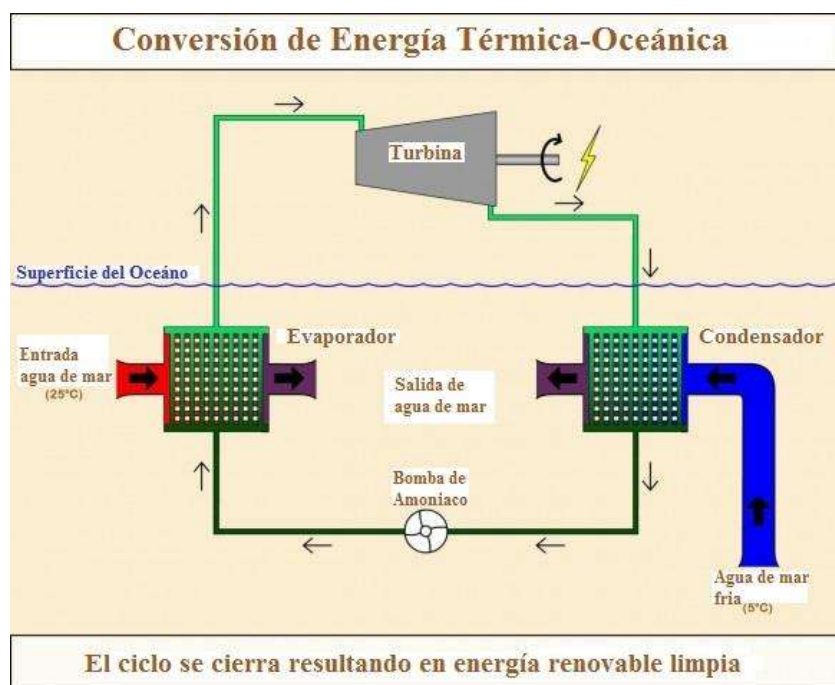


Figura 2. 28.- Esquema de un sistema de conversión de energía Térmica-Oceánica.

Se define a la energía undimotriz (energía de las olas) a aquella que es obtenida a través de la captación de la energía cinética contenida en el movimiento de las aguas de los océanos y mares. Las olas son el resultado del efecto del viento sobre la superficie del agua. Este viento se origina a partir de la principal entrada de energía del planeta: la energía del sol. Es la energía oceánica más estudiada, por lo tanto la que posee mayor diversidad de mecanismos para su extracción. La intensidad del oleaje, y por lo tanto la cantidad de la energía extraída, dependerá de la intensidad del viento, duración y longitud sobre la cual éste transmite energía a la ola. La tecnología disponible hasta el momento define tres diferentes sistemas para convertir la energía de las olas en energía eléctrica: dispositivos flotantes amarrados, sistemas de columnas de agua oscilante, sistemas de superficies articuladas. [61]

Los dispositivos flotantes amarrados en la superficie del océano, se encuentran anclados al lecho marino por cuerdas o cables que pueden estar tensos o sueltos, el captador mecánico debe resistir el movimiento de las olas para generar energía: parte de la máquina necesita moverse mientras que otra parte debe quedar inmóvil. La energía eléctrica se genera entonces a partir del movimiento oscilatorio de la parte móvil que generan las olas. En la figura 2.29, se muestra el esquema de este tipo de tecnología flotadores amarrados a la superficie del océano. [62]

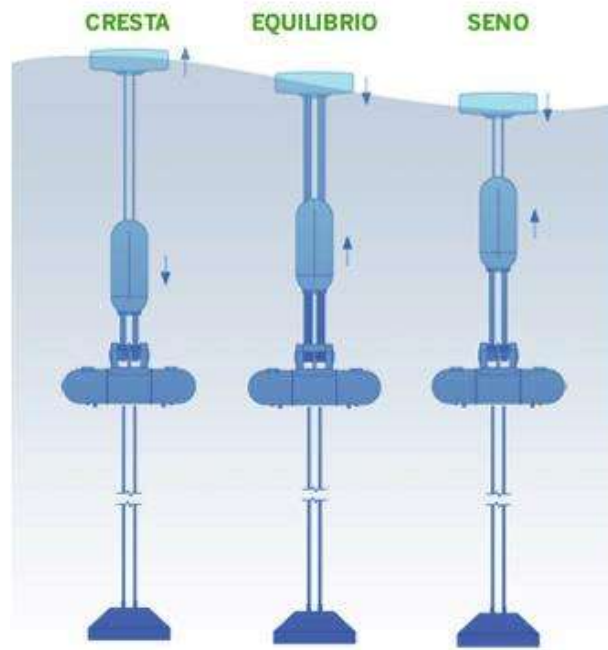


Figura 2. 29.- Esquema de un sistema de flotadores anclados al lecho marino.

El Pelamis Wave Energy Converter es una estructura articulada, semi-sumergida, compuesta de secciones cilíndricas unidas por bisagras. La ola produce un movimiento inducido de estas articulaciones que es resistido por cilindros hidráulicos que la bomba de fluido de alta presión a través de los motores hidráulicos de los acumuladores suaviza. Los motores hidráulicos de disco son generadores eléctricos. La potencia de todas las articulaciones es alimentada por un cable en el lecho marino. Varios dispositivos pueden conectarse entre sí y vinculados a la costa a través de un cable único subterráneo. Los sistemas actuales Pelamis son de 180 m de largo y 4 m de diámetro, con módulos de conversión de energía que generan 750 kW. La energía producida

por el sistema Pelamis depende de las condiciones del lugar de instalación. Dependiendo de los recurso de la onda, las maquinas producen en promedio el 25-40% de la potencia nominal total sobre el curso de un año. Cada máquina puede proporcionar energía suficiente para satisfacer la demanda anual de electricidad de aproximadamente 500 hogares. [63] En la figura 2.30, se muestra el dispositivo Pelamis Wave Energy Converter.

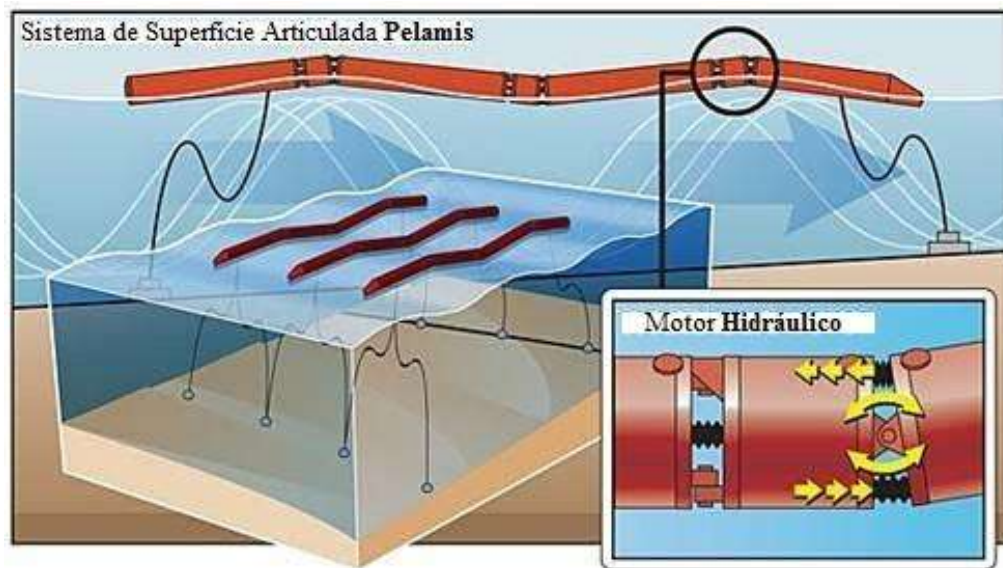


Figura 2. 30.- Dispositivo Pelamis Wave Energy Converter.

En la tecnología OWC (columna de agua oscilante) no son las olas las que mueven las turbinas directamente, sino una masa de aire comprimido que estas empujan. Se trata de una estructura generalmente ubicada en un rompeolas, cuya parte superior forma una cámara de aire (de ahí la masa comprimida), y cuya parte inferior está sumergida en el agua. De esta manera, la turbina aprovecha el movimiento provocado por la ola cuando esta presiona el aire de la cámara y este asciende pasando por la turbina y haciéndola girar. Cuando la ola se retira, el aire es succionado y también pasa por la turbina. En ambos casos produce un movimiento giratorio de la turbina, siempre en el mismo sentido, que se aprovecha para mover un generador y así producir energía eléctrica. [64]

Para este tipo de tecnología se ha propuesto el empleo tanto de turbinas de aire convencionales (unidireccionales) como de turbinas de aire reversibles o auto rectificadoras (bidireccionales). La turbina que más se utiliza para este tipo de tecnología es de tipo Wells de paso fijo, lo que les otorga simplicidad y robustez. El grupo turbo-generator, en este tipo de instalación, dispone en su parte inferior de una válvula tipo mariposa para aislar la cámara en el caso que fuera necesario. [65]

En la figura 2.31, se muestra el esquema del dispositivo columna de agua oscilante donde este tipo de tecnología se suele instalar a la orilla del mar.

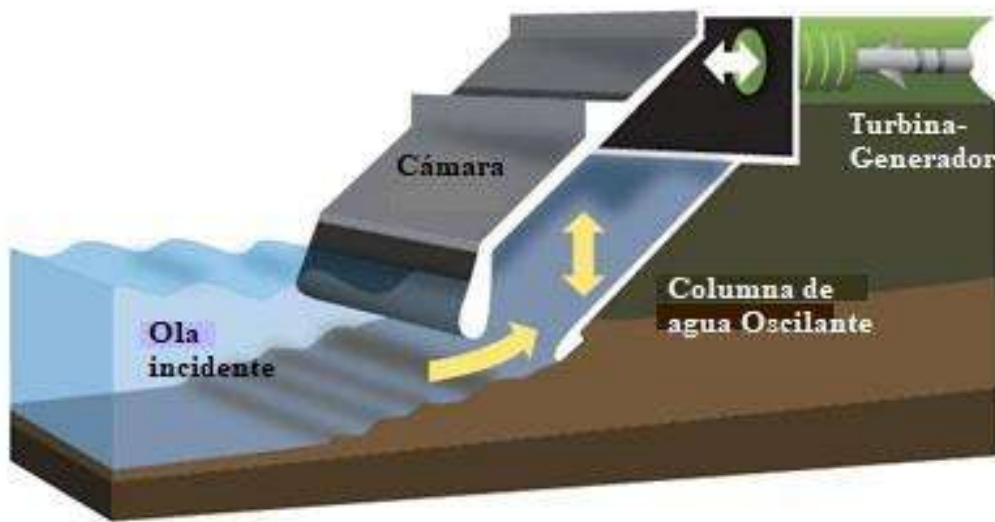


Figura 2. 31.- Esquema de una central Columna de Agua Oscilante (OWC).

Capítulo 3 Desarrollo del Modelo de una Central con Energía Undimotriz

3.1 Introducción

En este capítulo 3, se modelará el sistema que incluye el modelado de la Columna de Agua Oscilante, el modelado de la turbina y el modelado del generador síncrono. Así como su lugar óptimo de construcción, componentes principales y conexión a la red eléctrica. El lugar de locación de este tipo de planta es a la orilla de la costa (shoreline). Prácticamente una central de Columna de Agua Oscilante es una estructura parcialmente sumergida hueca por la parte inferior, dentro de la cual hay una cámara de captación de aire por debajo del nivel del mar. El movimiento del oleaje se traduce en presión sobre el aire situado en el interior de esta cámara. Este aire se expande y comprime accionando una turbina bidireccional tipo Wells que a su vez acciona el generador.

El modelo desarrollado costará desde el estudio de la zona para su mejor aprovechamiento, así como su funcionamiento principal. Así como las partes principales que constituyen a este tipo de central con energía undimotriz.

El modelo a desarrollar depende principalmente de la zona física donde se proponga instalar. Siendo que este dependerá el aprovechamiento de la energía de las olas para su transformación a energía eléctrica. Al final de este capítulo 3, se contará con un modelo completo de esta central con energía undimotriz columna oscilante, desde su instalación preliminar como es la construcción en la orilla de la costa, así como el conjunto de partes principales que consiste el sistema de turbina-generador, la transformación energía de las olas en neumática y neumática a mecánica. Por último su representación en diagrama de bloques con su respectiva ecuaciones matemáticas del sistema.

3.2 Fuente Primaria (Olas)

Se define como ola a todo tipo de oscilación en la superficie de agua que sea periódica. Entre las causas que generan esta oscilación se pueden encontrar el viento, fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol y movimientos tectónicos. Sin embargo, de todas ellas, probablemente es el viento el factor principal de generación de oleaje. Cuando la superficie de un cuerpo de agua es perturbada en dirección vertical, la fuerza de gravedad entrará en efecto para regresar a la superficie a su posición original de equilibrio. El agua que regresa tiene inercia que causa que este pase de su estado en equilibrio y establezca una oscilación sobre la superficie. Esta oscilación distorsiona el agua adyacente de la superficie, creando una propagación hacia adelante de una ola. Estas fuerzas imparten energía hacia la ola que, en sí, transmite esta energía a lo largo de la superficie oceánica hasta que llega hacia algún obstáculo que puede ser una estructura o las costas que causa que esta energía se refleje o disipe. [66]

En la figura 3.1, se muestra un mapa global de la distribución de la potencia del oleaje.

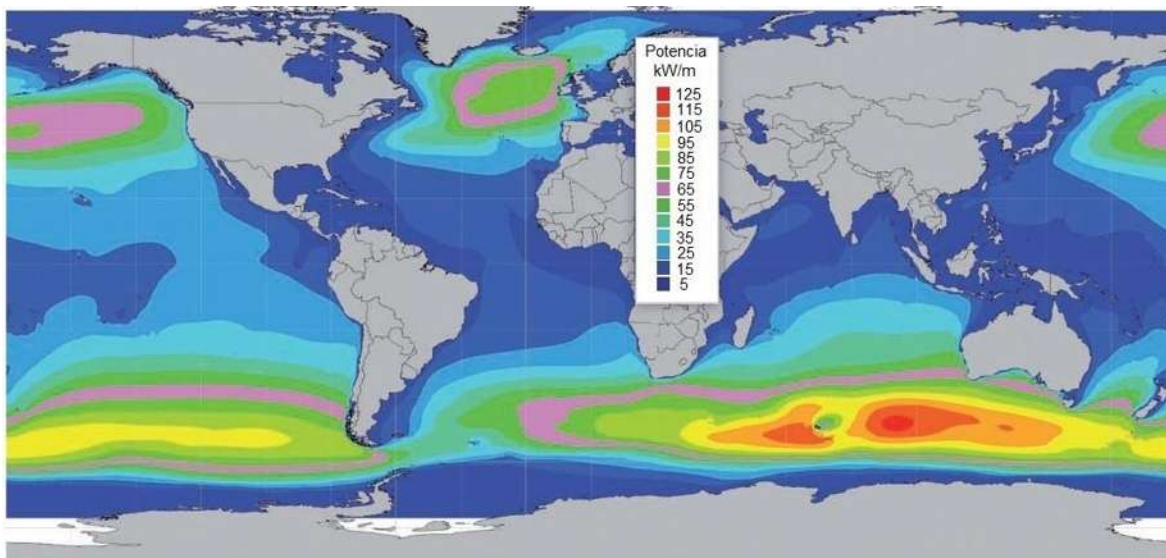


Figura 3. 1.- Esquema anual de distribución de potencia del oleaje a nivel mundial.

Las olas se definen como la oscilación periódica de la superficie del agua, de mares y océanos, por causa de distintos agentes como el viento, las fuerzas de atracción gravitacional de

la luna y el sol, maremotos, tormentas etc. En la figura 3.2, se muestra la energía de las olas en función de la frecuencia.

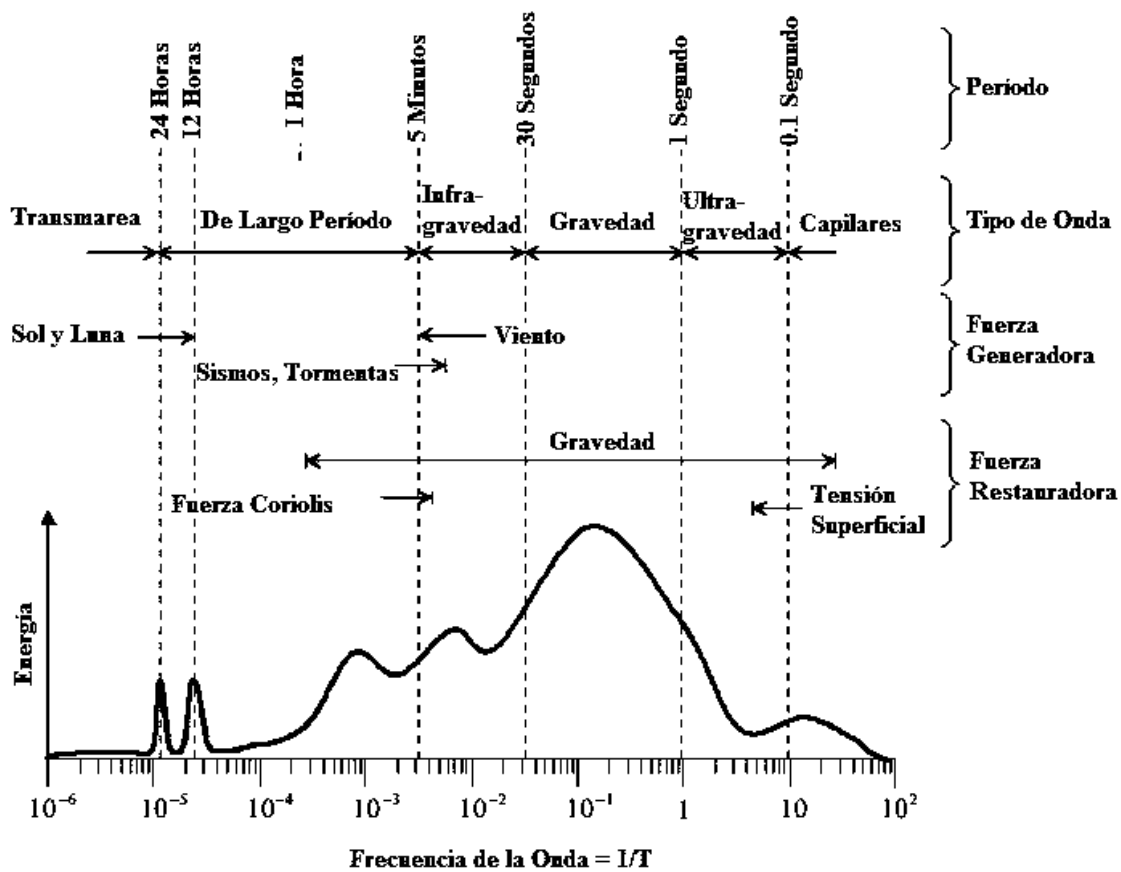


Figura 3. 2.- Clasificación de las olas con respecto a la Frecuencia-Energía.

El viento, es el agente que genera las olas más comunes y de mayor intensidad energética, por lo que el aprovechamiento de la energía de las olas se basa en aprovechar la energía de las olas generadas por el viento. El viento es un fenómeno que se puede definir como el movimiento horizontal de la masa de aire, que se genera por los cambios de presión atmosférica, producidos a raíz de las variaciones térmicas en zonas del planeta por causa de la radiación solar desigual. De esta manera se puede determinar que las olas preceden de forma terciaria, de la energía del sol. [67]

Inicialmente, los vientos leves generan ondas pequeñas llamadas olas capilares sobre la superficie del agua. Si el viento aumenta, la agitación adicionada creada por las olas capilares aumenta el rango de transferencia de energía y las olas comienzan a formarse en la superficie del océano. Una zona donde el viento sopla a través de la superficie del océano, y donde las olas se generan, la superficie se caracteriza por olas con diferentes largos que se mueven en forma aleatoria en la dirección del viento. Se conoce a este tipo de situación como “mar de viento”. El tamaño que las olas pueden alcanzar depende de 3 factores:

1. La intensidad del viento.
2. El período de tiempo durante el que el viento sopla sobre la superficie del agua.
3. La distancia (fetch) sobre la que el viento sopla en una línea recta sobre el océano.

[68]

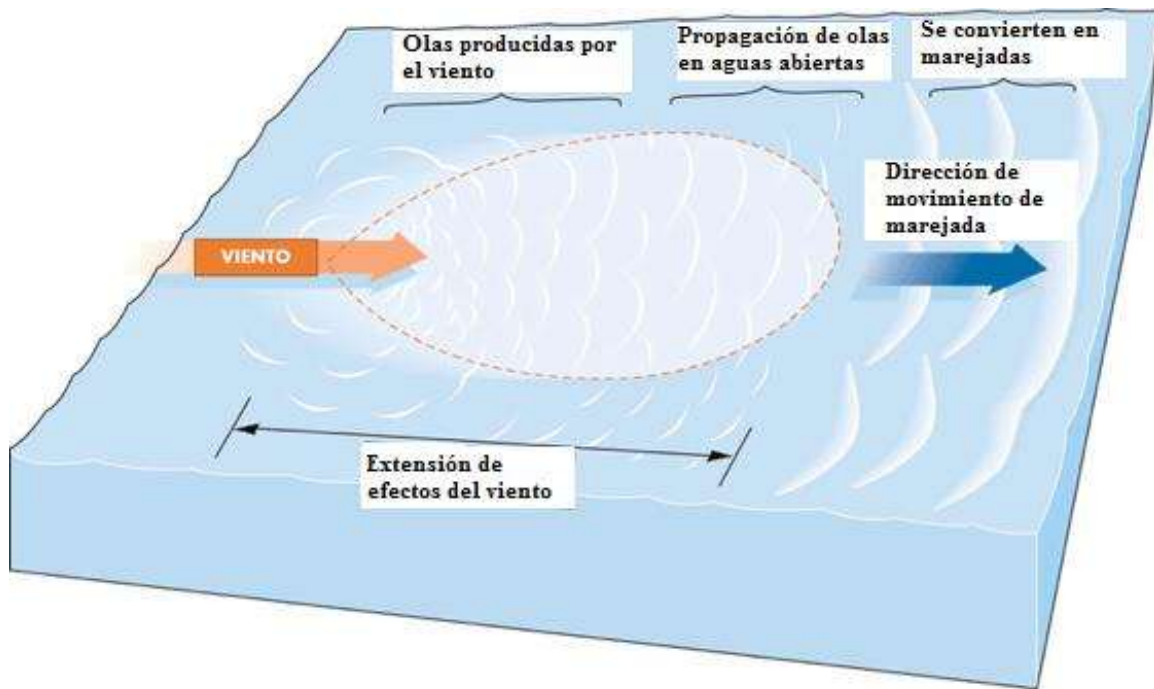


Figura 3. 3.-Acción de un viento constante sobre una zona determinada del océano.

3.2.1 Características de las Olas

La manera más simple de visualizar las olas es mediante el concepto de oscilación armónica. En la figura 3.4 se muestra el diagrama esquemático de una onda ideal o armónica (senoidal).

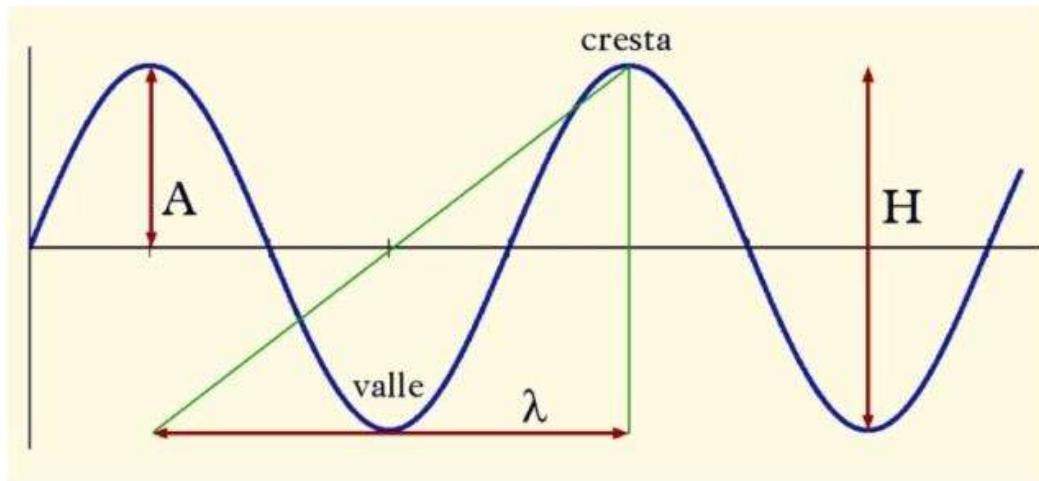


Figura 3. 4.- Esquema de una onda ideal senoidal.

La parte más alta de una ola es su **cresta** y la parte más profunda de la depresión entre dos olas consecutivas se llama **seno** o **valle**. A la distancia entre dos crestas se le denomina **longitud de onda** (λ) y a la diferencia de altura entre una cresta y un seno se le llama **altura** (**H**) de la ola. La **amplitud** es la distancia que la partícula se aparta de sus posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. La amplitud vale la mitad de la altura. La **pendiente** (**P**) es el cociente de la altura y la longitud de onda: $P = H/L$. Se llama **periodo** (**T**) al tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas por el mismo punto. La **velocidad de onda**, es decir la velocidad de propagación o celeridad, se calcula dividiendo la longitud de onda por el periodo $C = \lambda / T$. [69]

3.2.2 Teoría de Ondas Lineales

La teoría lineal es la teoría de oleaje más simple, también denominada teoría de Airy. Esta teoría fue desarrollada por Airy en 1845, es fácil de aplicar, y da una aproximación razonable de las características de las olas para un amplio rango de parámetros de las mismas. Aunque hay limitaciones en su aplicación, esta teoría aún puede ser útil siempre y cuando no se infrinjan las hipótesis de partida. Las hipótesis de partida son:

- El agua es homogénea e incomprensible; lo que implica que la densidad, ρ , es constante.
- La tensión superficial puede ser despreciada.
- El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser asimismo despreciado.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- El agua del mar carece de viscosidad.
- El flujo es irrotacional, no existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino.
- El fondo marino constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y en el espacio.
- Las ondas son planas (de dos dimensiones).

De la primera hipótesis se extrae la conclusión de que las líneas de corriente de un fluido incomprensible son paralelas. Esto se puede justificar a partir de la ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad y $\vec{u}$ el vector de velocidad.

Ahora, si el fluido es incomprensible, la densidad es constante y por lo tanto su derivada es cero, entonces la ecuación anterior se puede escribir:

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.2)$$

Esto quiere decir que la diferencia de la velocidad es nula, que es lo mismo a que las líneas de flujo son paralelas, pero no significa que tengan que ser rectas. La hipótesis de que el

flujo es irrotacional implica que el campo correspondiente deriva de un potencial, es decir, que puede escribirse, para la velocidad horizontal (u) y vertical (w) las siguientes ecuaciones:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3.3)$$

Las ecuaciones anteriores implican que si se conoce el potencial $\phi(x, y, t)$ en todo el ámbito de estudio, se pueden conocer también las velocidades de las partículas. La formulación de la teoría lineal se desarrolla normalmente en términos de función potencial ϕ . Según Airy, se corresponde con una perturbación de primer orden, $\phi = \varepsilon \phi_1$, en la que las condiciones de contorno tienen que cumplirse en $z = 0$, obteniéndose así:

- a) El fondo es impermeable, no hay movimiento de agua a través del mismo por lo tanto:

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = -d \quad (3.4)$$

Siendo d la profundidad máxima.

- b) El agua siempre está contenida dentro de su superficie, de tal forma que las partículas se mueven a la misma velocidad con que cambia de forma la superficie del mar

$$\frac{\delta y}{\delta t} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = v \quad \text{en } z = y \quad (3.5)$$

- c) En la superficie, la presión (p) se obtiene a través de la ecuación de Bernoulli como

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{p}{\rho} + (u^2 + w^2) + gz \quad (3.6)$$

- d) Por último se supone que la pendiente de la ola es pequeña ($H/L < 1$) y la profundidad del agua es mucho mayor que la altura de la ola ($d/H \gg 1$).

Las soluciones para este problema se asume que son armónicas en el tiempo y se obtiene por separación de variables. Las soluciones tienen la siguiente forma (p. ej. [Wehausen & Laitone, 1960]):

$$\phi(t, x, z) = \frac{Hg}{2 \cdot \omega} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (z+d))}{\cosh(k \cdot d)} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (3.7)$$

La correspondiente elevación de la superficie es:

$$y(t, x) = H_0 \cos(kx - \omega t) \quad (3.8)$$

Donde la frecuencia $\omega(k)$ está determinada por la relación de dispersión:

$$\omega^2(k) = kg \tanh(kd); \quad \text{donde } k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.9)$$

Como se observa, la solución de la superficie del agua puede representarse por sus variables x (espacial) y t (temporal) o por su combinación (fase), definida como $(kx - \omega t)$. En la figura 3.5, se muestra una onda de forma constante propagándose sobre un fondo horizontal que se desplaza en dirección x .

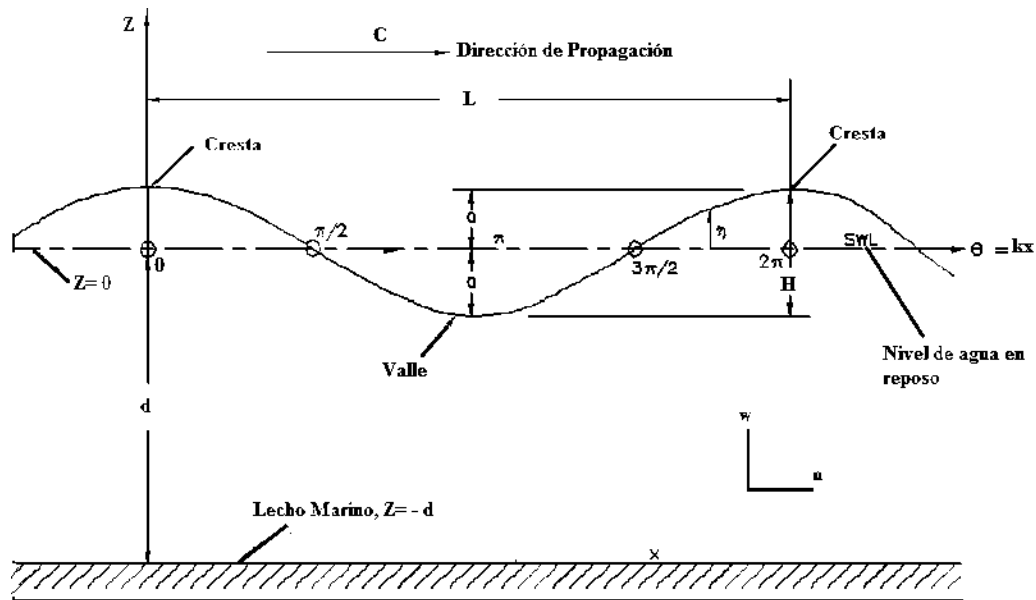


Figura 3. 5.- Diagrama donde se muestra una onda lineal simple.

En la figura 3.5, la altura H se define como la distancia vertical entre la cresta y el valle o seno sucesivo de una ola determinada; por otra parte, la longitud de onda L es la distancia horizontal medida entre dos crestas o valles consecutivos. La letra d es la profundidad del agua, y η es el perfil de la superficie de la ola. Otra característica importante de la ola está dada por su periodo T , el cual se define como el tiempo que tarda en pasar dos crestas o dos valles consecutivamente por un punto fijo. La velocidad con que se propaga la ola se denomina celeridad, C . Posteriormente se definirá la ecuación de celeridad en las siguientes teorías que se muestran a continuación

La velocidad con que se propaga una ola se denomina *celeridad*, C . También se le denomina velocidad de fase. Como la distancia recorrida por la onda durante un periodo es igual a la longitud, la celeridad se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{L}{T} \quad (3.10)$$

La ecuación de dispersión relaciona la celeridad con la profundidad y la longitud de onda. El concepto de dispersión es importante para comprender fenómenos como el agrupamiento del oleaje y los efectos que éste pueda causar, principalmente la resonancia en dársenas portuarias. La relación entre la celeridad, la longitud y la profundidad, se escribe como:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi}{L}\right)} \quad (3.11)$$

Combinando las ecuaciones (3.10) y (3.11), se puede escribir la celeridad como:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \cdot \left(\frac{2\pi}{L}\right) \quad (3.12)$$

De la ecuación anterior (3.12), se observa que cuanto mayor es el período de una ola, más rápido viaja. El concepto de dispersión implica que las olas se separan en su propagación hacia la costa, ordenándose por periodos. Comúnmente, dentro de un mismo tren de ondas, las olas de mayor periodo suelen tener también mayor altura, por lo cual al salir del área de generación (fetch) el oleaje tiende a ordenarse en grupos de olas como se muestra en la figura 3.6.

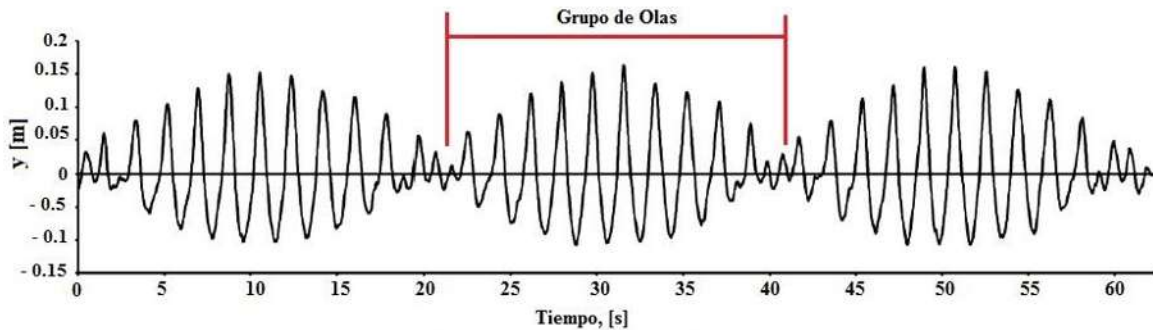


Figura 3. 6.- Esquema de la representación de un grupo de olas.

En función del número de onda, k , la frecuencia angular, ω y la ecuación de dispersión, la ecuación de onda se puede escribir de la siguiente manera:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}\right) = \frac{gT}{\omega} \tanh(kd) \quad (3.13)$$

La ecuación (3.13), indica que la longitud de onda decrece con la profundidad, debido al comportamiento de la función $\tanh(kd)$, que se incrementa linealmente con valores pequeños de (kd) , pero tiende asintóticamente a la unidad en profundidades indefinidas. En profundidades indefinidas, se puede considerar que la tangente hiperbólica tiende a la unidad, y por tanto, la longitud de onda es:

$$L_0 \approx \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2 \quad (3.14)$$

Por lo general, la teoría de Airy es adecuada para las olas de peralte $H_0k < 0.05\pi$. [70]

3.2.3 El Desplazamiento de las Partículas del Agua

Un aspecto importante de la teoría lineal está relacionado con el movimiento individual de las partículas dentro del agua. Las olas de los océanos están constituidas por moléculas de agua que se mueven formando círculos. En la superficie del agua, en aguas profundas, los movimientos son del mismo tamaño que la altura de la ola, pero estos movimientos disminuyen exponencialmente en tamaño al descender debajo de la superficie. El comportamiento de las olas depende en gran medida de la relación que existe entre el tamaño de las olas y la profundidad del agua donde ésta se está moviendo. El movimiento de las moléculas de agua cambia de forma circular a elipsoidal cuando una ola llega a la costa y la profundidad del agua disminuye, siendo el movimiento más horizontal. [71] En la figura 3.7, se muestra el esquema de desplazamiento de partículas de agua de zonas profundas a poco profundas.

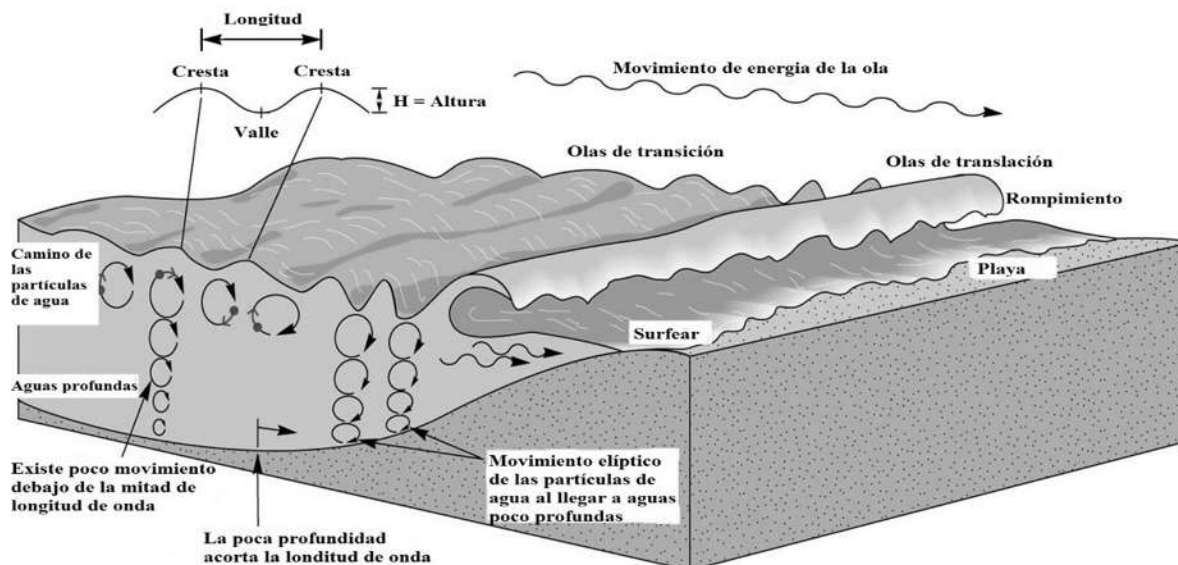


Figura 3. 7.- Desplazamiento partículas de agua profundas hasta aguas poco profundas.

Dentro de las olas, las moléculas de agua forman una órbita circular o elíptica y no viajan con la ola, solamente la energía se transmite hacia las moléculas de agua justo delante de la ola, las cuales a su vez se ordenan en órbita circular o elíptica. Así, podemos decir que una ola rompiendo en la playa no trae agua desde el Atlántico Norte. Solo la energía ha sido transmitida desde puntos lejanos. Estas orbitas se mantienen circulares en el océano, pero cambian hacia elípticas cuando las olas entran en lugares poco profundos como las costas. [72] En la figura 3.8, se observa el comportamiento y elevación de las olas interiores y se nota como decrecen conforme estas llegan a superficies poco profundas.

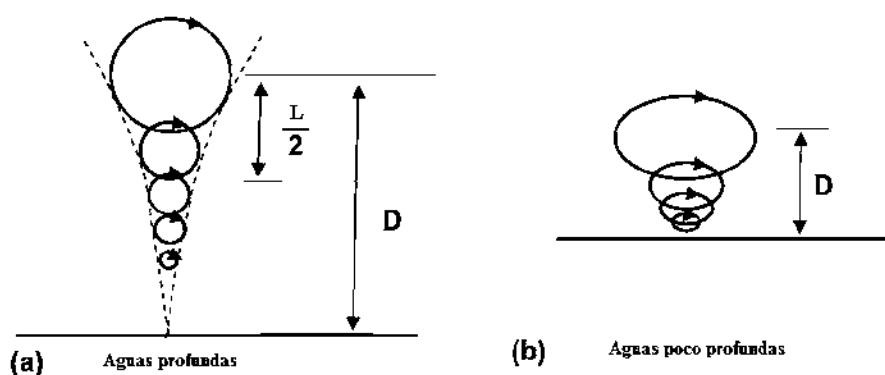


Figura 3. 8.- Partículas de agua en una ola profunda inciso (a), y poco profunda (b).

En el inciso (a) se observa las partículas para una ola profunda, que mantienen un movimiento circular de agua tanto en la superficie como en aguas más profundas, y aproximadamente se desvanecen a una distancia de $L/2$. También, en este tipo de olas, hay una menor disipación de energía. Por otra parte, en el inciso (b), las olas poco profundas cuentan con un movimiento de partículas elíptico, y posteriormente cuentan con una mayor disipación por unidad de profundidad en comparación con las olas profundas.

Para concluir con la teoría lineal de Airy, en la siguiente tabla 3.1, se tiene los resultados de esta teoría. El subíndice 0 se refiere a aguas profundas, y se asumen las siguientes simplificaciones:

- Aguas profundas ($d/L \geq 0.5$):

$$\cos(k(z+d)) \approx \sinh(k(z+d)) \approx \frac{1}{2}e^{kz}e^{kz} \quad (3.15)$$

$$\cosh(kd) \approx \sinh(kd) \approx \frac{1}{2}e^{kz} \quad (3.16)$$

- Aguas poco profundas ($d/L \leq 0.04$):

$$\cosh(k(z+d)) \approx \cosh(kd) \approx 1 \quad (3.17)$$

$$\sinh(k(z+d)) \approx k(z+d) \quad (3.18)$$

$$\sinh(kd) \approx kd \quad (3.19)$$

Los límites indicados para la profundidad no deben tomarse como límites exactos, sino como valores a partir de los cuales la desviación entre las expresiones indicadas y sus límites asintóticos es despreciable. [73]

Tabla 3. 1.- Resultados de la teoría lineal (Airy).

Fase	$\theta = kx - \omega t$	Aguas profundas $d/L \geq 0,5$	Aguas intermedias $0,04 < d/L < 0,5$	Aguas someras $d/L \leq 0,04$
Profundidad relativa	d/L			
Potencial de velocidad ϕ		$\frac{H_o g}{2\omega} e^{kz} \text{sen}\theta$	$\frac{H_o g \cosh(k(z+d))}{2\omega \cosh(kd)} \text{sen}\theta$	$\frac{H_o g}{2\omega} \text{sen}\theta$
Elevación de la superficie y		$\frac{H_o}{2} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \cos\theta$
Presión dinámica $p_d = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$		$\frac{\rho g H_o}{2} e^{kz} \cos\theta$	$\frac{\rho g H_o \cosh(k(z+d))}{2 \cosh(kd)} \cos\theta$	$\frac{\rho g H_o}{2} \cos\theta$
Velocidad de la partícula				
- Horizontal $u = \frac{\partial \phi}{\partial x}$		$\frac{H_o}{2} \omega e^{kz} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega \frac{1}{kd} \cos\theta$
- Vertical $v = \frac{\partial \phi}{\partial z}$		$\frac{H_o}{2} \omega e^{kz} \text{sen}\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \text{sen}\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$
Aceleración de las partículas				
- Horizontal $\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}$		$\frac{H_o}{2} \omega^2 e^{kz} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \omega^2 \frac{1}{kd} \cos\theta$
- Vertical $\dot{v} = \frac{\partial v}{\partial t}$		$-\frac{H_o}{2} \omega^2 e^{kz} \text{sen}\theta$	$-\frac{H_o}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \text{sen}\theta$	$-\frac{H_o}{2} \omega^2 \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$
Celeridad de onda $C = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T}$		$C_o = \sqrt{g/k_o} = g/\omega$	$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$	$C = \sqrt{gd}$
Velocidad de grupo $C_{gr} = d\omega/dk$		$C_{gr} = \frac{C}{2} = g/2\omega$	$C_{gr} = \frac{C}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right]$	$C_{gr} = C = \sqrt{gd}$
Frecuencia angular $\omega = 2\pi/T$		$\omega = \sqrt{k_o g}$	$\omega = \sqrt{k g \cdot \tanh(kd)}$	$\omega = k\sqrt{gd}$
Longitud de onda $L = 2\pi/k$		$L_o = \frac{g}{2 \cdot \pi} T^2$	$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{L}\right)$	$L = T\sqrt{gd}$
Número de onda $k = 2\pi/L$		$k_o = \omega^2/g$	$k \cdot \tanh(kd) = \omega^2/g$	$k = \omega/\sqrt{gd}$
Desplazamiento de las partículas				
- Horizontal ξ		$-\frac{H_o}{2} e^{kz} \text{sen}\theta$	$-\frac{H_o \cosh(k(z+d))}{2 \sinh(kd)} \text{sen}\theta$	$-\frac{H_o}{2} \frac{1}{kd} \text{sen}\theta$
- Vertical η		$\frac{H_o}{2} e^{kz} \cos\theta$	$\frac{H_o \sinh(k(z+d))}{2 \sinh(kd)} \cos\theta$	$\frac{H_o}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos\theta$
Trayectoria de las partículas		Orbitas circulares	Orbitas elípticas	Orbitas elípticas

3.3 Centrales con Energía Undimotriz

En la actualidad existen diferentes tipos de tecnologías de dispositivos que aprovechan la energía de las olas. Resultando en diferentes maneras en la cual esta energía se puede obtener del oleaje, que también depende en la profundidad y el lugar (shoreline, near-shore, offshore). Estas tecnologías son relativamente nuevas y actualmente varios proyectos están remplazando a las tecnologías de primera generación. A continuación en este apartado se denotarán las centrales con energía undimotriz que se encuentran instaladas alrededor del mundo, especialmente en el Reino Unido, Australia, Dinamarca, Finlandia, Portugal, España, Japón, Estados Unidos, etc. A

Continuación, se muestra los diferentes proyectos instalados a escala real en diferentes partes del mundo.

- Carnegie Energy CETO 5 y 6
- OPT's Power Buoy Vertical Oscillator
- Eco Wave Power Israel
- Lewis Wave Power Limited Oyster
- Oscilador Archimedes Wave Swing
- Planta Mutriku OWC

3.3.1 Carnegie Energy CETO 5 y 6

Frente a la costa occidental de Australia se encuentra El proyecto Perth Energy Wave, prácticamente son tres boyas sujetas al fondo del mar. Estos equipos contruidos de acero tienen 11 metros de diámetro y son movidas por las olas del Océano Indico; con este movimiento se genera el 5% de la necesidad eléctrica de la base naval militar situada en la isla Garden.

Estos equipos son el proyecto piloto de la firma Carnegie Wave Energy, esta es una empresa con sede en Perth. En el año 2015, estos equipos comenzaron a suministrar 240 kW cada una a la red eléctrica a la base HMAS Sterling, la base naval más importante de Australia. [74].

En la figura 3.9, se muestra el dispositivo CETO 5 durante una jornada de mantenimiento.



Figura 3. 9.- Dispositivo CETO 5 durante maniobra de mantenimiento.

Tabla 3. 2.- Características dispositivo CETO 5 de Carnegie Wave Energy.

País de Origen	Australia
Potencia de salida	CETO 5– 240 kW, CETO 6 – 1MW
Profundidad	20 metros
Locación	Cerca la costa y (nearshore)
Sistema Captación	Absorbedor puntual con un sistema de bombas hidráulicas
Proyectos en la Actualidad	CETO 6 en el Océano indico en las costa de Australia

Las boyas quedan flotando debajo de la superficie marina, esto evita que se vean afectadas por la acción destructiva del embate de las olas; el funcionamiento se basa en el constante balanceo producido por las olas que accionan un sistema de bombas hidráulicas que trasladan mediante una cañería agua de mar a presión hacia la central eléctrica en la isla de

Garden; a una distancia de 3 kilómetros. En dicha central, el caudal de agua de alta presión proveniente de las boyas acciona un generador eléctrico; además parte de esta agua a presión se destina a la planta de desalinización donde mediante el proceso de osmosis inversa se transforma en agua dulce. Carnegie Wave Energy planea a partir del año 2017 construir boyas de mayor tamaño, calcula que se podría obtener hasta 1 MW de potencia; estos equipos llamados CETO 6 utilizarían boyas de 20 metros de diámetro instaladas en aguas más profundas donde las olas son más grandes y por ende con mayor energía. [75] En la figura 3.10, se observa el concepto CETO 6.

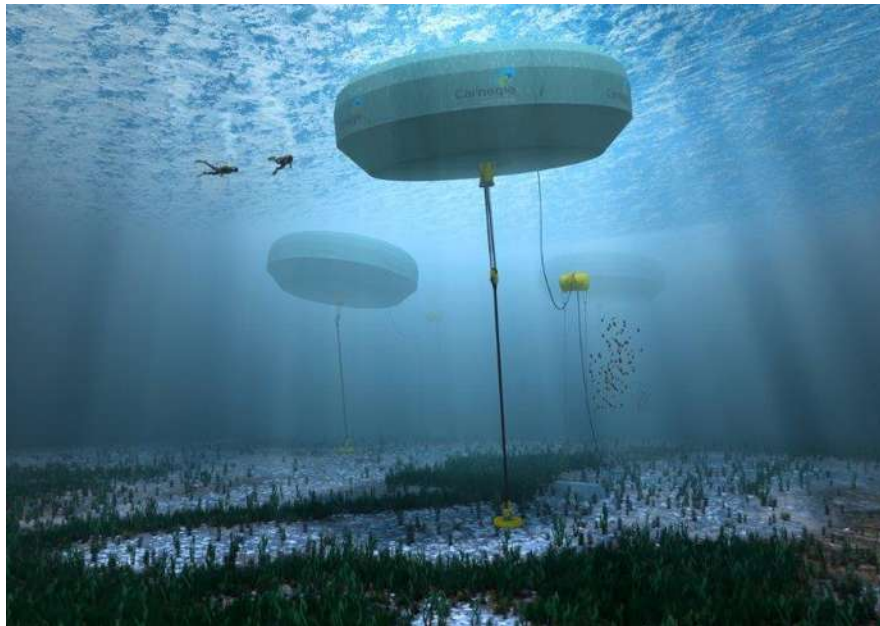


Figura 3. 10.- Dispositivo CETO 6 de la compañía Carnegie Wave Energy.

3.3.2 OPT's PowerBuoy

La compañía Ocean Power Technologies es una empresa pionera en la transformación de olas proveniente de los océanos. El PowerBuoy es un sistema con una estructura similar a un pistón que se mueve a medida que la boya sube y baja con las olas del océano. El movimiento ascendente y descendente de las ondas de orilla hace que la boya se mueva libremente hacia arriba y hacia abajo. El rozamiento mecánico resultante que se produce en el interior de la boya activa el generador eléctrico. El movimiento hace que un generador produzca energía eléctrica.

La mayor parte de la boya está sumergida en el agua, está diseñada para funcionar en profundidades de 20 a 50 metros. [76]. El sistema de conversión y control proveen potencia continua para sus aplicaciones incluso en condiciones marinas adversas. El dispositivo OPT's PowerBuoy se realiza con sus diferentes sensores que supervisan continuamente el funcionamiento de los varios subsistemas y del ambiente circundante del océano. Cuando se acercan olas demasiado grandes, el sistema se desconecta automáticamente. Cuando las alturas de las olas vuelven a lo normal, el sistema se reconecta y comienza la conversión y transmisión de energía. [77] En la figura 3.11, se muestra el dispositivo OPT's PowerBuoy.



Figura 3. 11.- OPT's PowerBuoy.

Tabla 3. 3.- Características de una OPT's PowerBuoy.

País de Origen	Estados Unidos de América
Potencia de salida	3 kW a 150 kW
Profundidad	20 a 50 metros
Locación	Costas a dentro (off-shore)
Sistema Captación	Absorbedor Puntual
Proyectos en la Actualidad	New Jersey, USA

3.3.3 Eco Wave Power Israel

Los convertidores de la empresa Eco Wave Power extraen energía proveniente de las olas del océano por medio de un sistema único de flotadores. Estos flotadores se unen a la infraestructura costera para así poder extraer la energía de las olas y convertir esta forma de energía en energía eléctrica. En mayo de 2016, la compañía lanzó una planta comercial conectada a la red: ocho unidades conectadas a un embarcadero en Gibraltar. Los flotadores Eco Wave power se conectan a los muelles mediante brazos flexibles. A medida que las olas del océano se mueven, el movimiento ascendente y descendente de los flotadores crea una presión intensa, que es aprovechada por los cilindros hidráulicos y transmitida a través de cables submarinos a tierra, donde giran un generador para crear energía eléctrica.



Figura 3. 12.- Los dispositivos Eco Wave Power en la central eléctrica en Gibraltar.

En condiciones de tormenta, los sensores hacen que los flotadores suban y se sumerjan por seguridad de los convertidores. La mayoría de las infraestructuras generadoras, motores hidráulicos y acumuladores se encuentran en tierra protegidos de los elementos. [78]

Tabla 3. 4.- Características de los convertidores Eco Wave Power.

País de Origen	Gibraltar
Potencia Total	5 MW
Profundidad Min/Max	5 m / 10 m
Locación	En la Costa (Shoreline)
Número de dispositivos Instalados	8
Proyectos en la Actualidad	Jaffa Port (Israel) , Gibraltar

3.3.4 WaveRoller

El proyecto llamado “Simple Generación de Energía Renovable Submarina” o SURGE por sus siglas en inglés, es financiado por el 7UP, un plan de financiamiento de la UE. El objetivo del proyecto es crear un convertidor de energía undimotriz conectado a la red y desplegarlo en Peniche, Portugal. El parque con este tipo de convertidores de olas se compone por tres unidades WaveRoller de 100 kW cada una (capacidad nominal total del parque es de 300 kW) y se implementó en el año 2012. En la figura 3.13, se tiene el convertidor de olas WaveRoller. [79]



Figura 3. 13.- El sistema Pelamis Wave Power.

Los dispositivos operan en áreas cerca de la costa (aprox. 0.3-2 Km de la costa) a profundidades entre los 8 a 23 metros. Se encuentra completamente sumergido y anclado al fondo marino. Esto asegura que el panel no sobresalga en el paisaje marino y evita la creación de materiales innecesarios que pondrían una carga adicional en la estructura. Las bombas de pistones hidráulicos conectados al panel bombean fluidos hidráulicos al interior del circuito hidráulico cerrado. Todos los elementos del circuito hidráulico se encuentran dentro de una estructura hermética en el interior del dispositivo y no están expuesta al medio ambiente marino. Los fluidos de alta presión son introducidos en un motor hidráulico que acciona el generador eléctrico. La potencia eléctrica generada en esta planta de energía undimotriz es después conectada a la red eléctrica a través de cables submarinos. [80]

Tabla 3. 5.- Características del dispositivo Pelamis Wave Power.

País de Origen	Portugal
Potencia Total	300 kW
Profundidad Min/Max	8 m / 23 m
Locación	Dispositivo cerca de la costa (nearshore)
Número de Dispositivos Instalados	3
Sistema de Captación	Sistema Hidráulico
Proyectos en la Actualidad	Peniche, Portugal

3.3.5 Convertidor Columna de Agua Oscilante (OWC)

La planta de Mutriku fue inaugurada en 2011 tras finalizar los trabajos de construcción del dique de protección del puerto de esta localidad costera, al que se añadió la central de aprovechamiento energético renovable. La central eléctrica cuenta con tecnología denominada OWC (Columna de Agua Oscilante) con una potencia total instalada de 296 kW y con turbinas

fabricadas ad-hoc en Tolosa, España. Se trata de la primera instalación marina comercial conectada a la red en funcionamiento en Europa. [81]



Figura 3. 14.- Central eléctrica convertidor Columna de Agua Oscilante Mutriku.

Tabla 3. 6.- Características de la central Eléctrica Mutriku.

País de Origen	España
Potencia Total	296 kW
Profundidad Min/Max	25 m / desconoce
Locación	Dispositivo sobre la costa (Shoreline)
Número de Dispositivos Instalados	16 Turbinas
Sistema de Captación	Presión Neumática
Proyectos en la Actualidad	Mutriku, España

Cuando las olas llegan, el agua entra en la cámara de captación y comprime el aire del interior, que sale a presión por el orificio superior. A su paso impulsa la turbina que, a su vez, hace girar el generador eléctrico y así obtener energía eléctrica. Cuando la ola se retira succiona

aire a través del mismo orificio y vuelve a impulsar la turbina generando nuevamente energía eléctrica. La energía producida en esta instalación se inyecta en su totalidad en la red de distribución eléctrica para su consumo por parte de todos los usuarios. Se calcula que la planta, ya en producción automática, es capaz de abastecer las necesidades eléctricas domésticas de aproximadamente 100 viviendas. [82]

3.4 Modelado de Una Central de Columna Oscilante

El modelo de la central de Columna de Agua Oscilante contará con los siguientes elementos fundamentales:

- La cámara de captación de la Columna de Agua Oscilante instalado en la orilla de la costa.
- Una unidad de turbina tipo Wells
- Un generador síncrono

3.4.1 Lugar de Construcción

Para la construcción de una central undimotriz de columna oscilante, previamente se realiza un estudio de factibilidad en la zona a construir. Todo esto con la finalidad de obtener sitios con mayor nivel energético de oleaje y obtener el mayor aprovechamiento de energía proveniente de las olas. Durante este periodo se logró obtener información prometedora en relación con la construcción de un dispositivo en zona remota a la orilla de la costa. La investigación fue llevada a cabo por la Queens University of Belfast (QUB) con el apoyo del departamento de industria y comercio (DTI). Por los prometedores resultados del prototipo, se considera que la locación donde se llegue a instalar una central de columna oscilante deberá contar con lo siguiente:

- Una intensidad anual de oleaje promedio en el lugar seleccionado de $20 \text{ kW}/\text{m}$ a una profundidad de 10 metros.

- Una conexión cercana a la red eléctrica del país.
- Un acceso razonable al sitio donde se coloque la planta.
- Apoyo local por los lugareños de la comunidad donde se instale.
- Un bajo rango de marea. [83]

Posteriormente, el siguiente paso para la construcción de una central de columna oscilante en la orilla de la costa, se debe diseñar el colector (cámara de captación). Para esto el trabajo preliminar es construirlo lo más cercano a la orilla del acantilado de la costa. En la figura 3.15, se muestra la construcción preliminar para la instalación de la cámara de captación de una central de columna de agua oscilante.

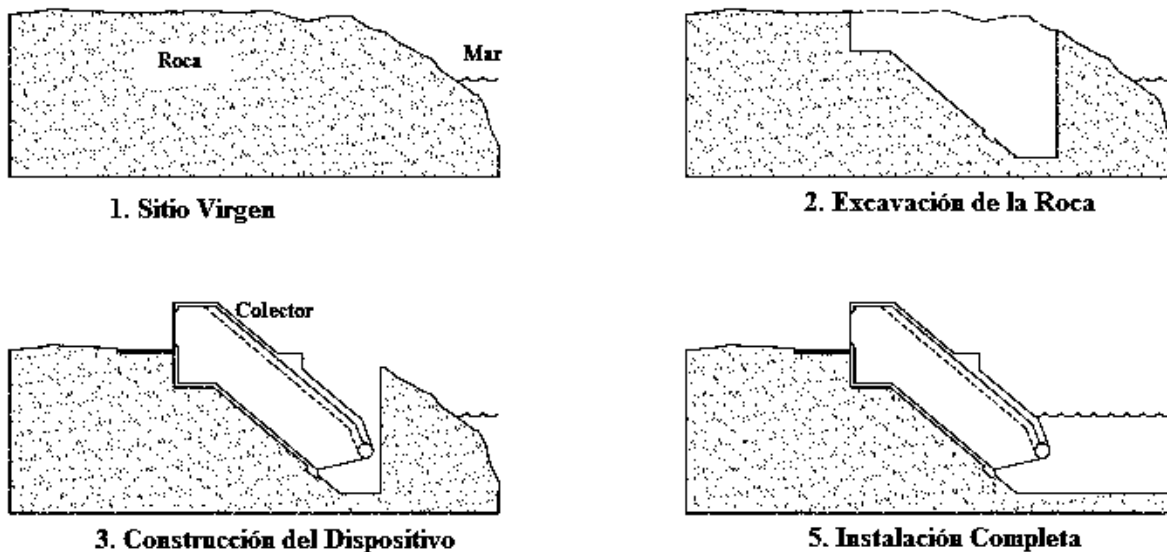


Figura 3. 15.- Construcción conceptual cámara de captación Columna de Agua Oscilante.

Prácticamente para la excavación, primero se construyó un poquito atrás de la orilla del acantilado (roca) como se muestra en el paso 3, entre el mar y la zona excavada. Todo esto con la finalidad de tener un obstáculo de protección mientras se termina la construcción. Posteriormente ya teniendo la excavación del paso 3, por medio de una explosión controlada se debe retirar la roca restante. [84]

3.4.2 La Cámara de Captación

La cámara es la parte de la instalación encargada de transformar la energía de las olas en energía neumática, posteriormente esta energía neumática se transforma en energía mecánica y por último a energía eléctrica. El modo de funcionamiento de la cámara de captación es el siguiente, la ola incide sobre la parte exterior de la cámara, la columna de agua de la cámara asciende, y se genera un flujo de aire que es expulsado por la abertura superior, donde se encuentra alojada una turbina neumática. Tras esto, con el paso de la ola, la propia columna interior de agua desciende, creando una depresión interior que genera de nuevo un flujo de aire, en este caso, entrante en la cámara a través de la abertura superior. [85]

Para nuestra central de columna oscilante, se propone usar una cámara de tipo rectangular de concreto. Al utilizar concreto, proporciona ventajas económicas para su construcción ya que no se estaría utilizando metal reforzado resultando económicamente más elevado la inversión.

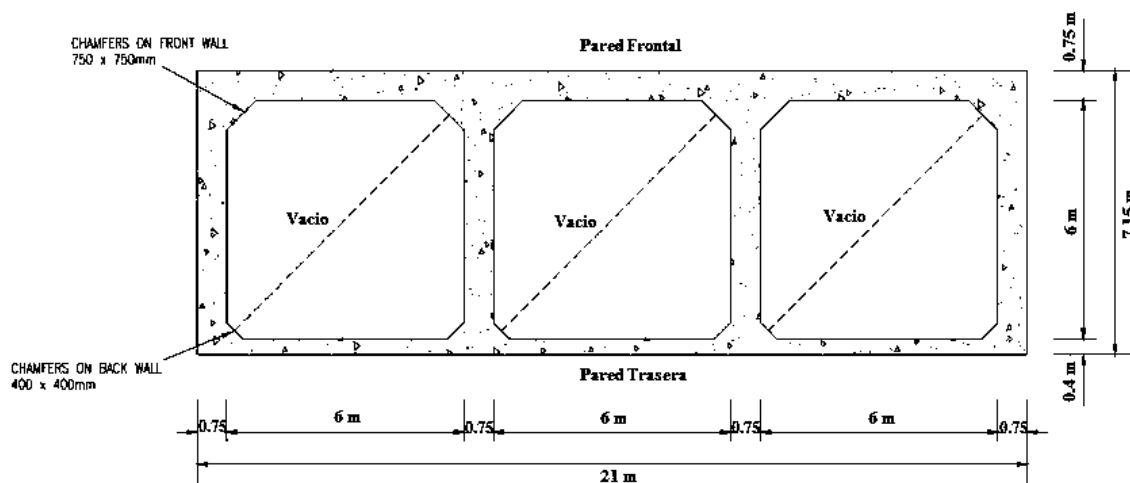


Figura 3. 16.- Sección transversal cámara de captación de un convertidor OWC.

La cámara se divide en tres columnas por separado, esto es debido a que al aumentar el ancho de la columna, existe el riesgo de excitación de olas transversal dentro de la columna de agua. Esto reduce considerablemente el desempeño de captación de energía dentro de la cámara. El método para la construcción de las paredes que van en la base de la roca y que sostendrán la

cámara es de la siguiente manera. Se construye una pared en la pendiente de la excavación para que sirva como estructura base y así ya teniendo esta pared, posteriormente se construya la pared frontal. [86] En la figura 3.16, se puede observar una de las tres secciones que se divide la cámara de captura.

Habiendo establecido las dimensiones de la cámara de captura, se prosigue a establecer el método de mantener las cuatro paredes de la cámara en la base de la roca. El método utilizado es construir una pared trasera en la ladera excavada que sirva como armadura para que la estructura forme un circuito cerrado en términos de contención de la carga.

Las paredes del colector tanto la parte frontal y trasera son paralelas y hacen un ángulo de 40° con la línea de superficie de agua. Cerca del labio de entrada de la superficie exterior, la pared frontal aumenta su inclinación a un ángulo de 60° . Esto tiene el efecto de reducir la separación de 6 metros de las paredes laterales y traseras a 4.5 metros sobre el área de entrada de agua. La restricción de la zona de entrada es de suma importancia tanto para el ajuste correcto del dispositivo, sino también tiene una influencia secundaria y esto es suavizar la potencia neumática del flujo del aire. El labio de entrada tiene un diámetro de 1.5 metros, con la finalidad de reducir las pérdidas debidas a las turbulencias en la entrada. [87] En la figura 3.17, se tiene la sección transversal de la cámara de captura vista de lado.

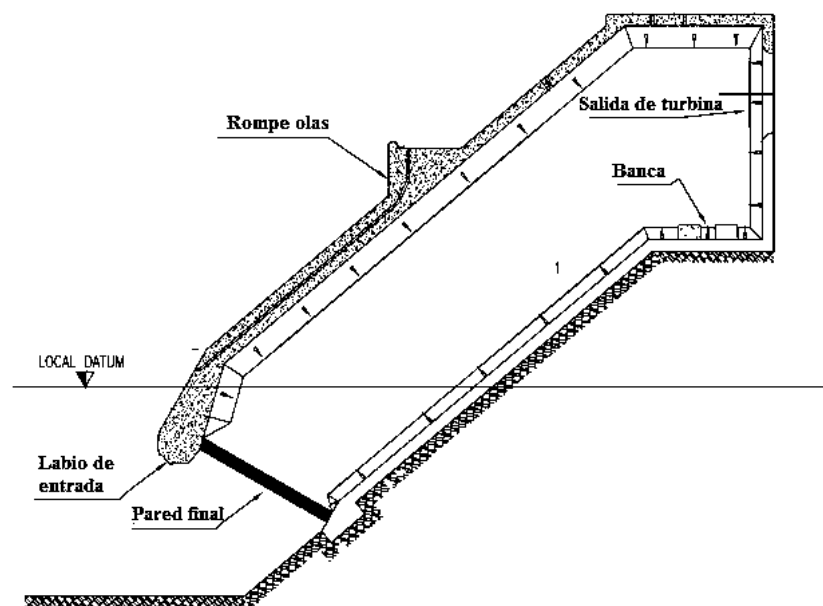


Figura 3. 17.- Esquema Cámara de captación de vista de lado.

En condiciones severas del clima y del oleaje, la cámara de captura será sujeta al denominado azote de carga interna (internal water slam). Esto sucede cuando la corriente de aire entrante a la cámara es suficiente para sincronizar el aire dentro de la cámara de captura. En condiciones normales de oleaje, el agua fluye libremente para arriba y hacia abajo dentro de la cámara, desplazando aire hacia la turbina bidireccional tipo Wells. Sin embargo, si la cámara de captura se llenara de agua, entonces el agua en la columna se desacelerará rápidamente con respecto a la resistencia añadida al flujo de agua a través de la red de conductores en comparación con el aire. La pérdida de impulso del agua repentinamente detenida puede dar lugar a presiones extremadamente altas dentro de las áreas de la cámara de captura. No obstante el peligro de carga interna excesiva, existe un gran riesgo de daños en el equipo turbogenerador cuando el agua fluya y llegue a estos dispositivos.

Por estas razones, se diseña la cámara de captura suficientemente larga para que el agua dentro de la cámara no suba más allá de la banca. Como medida de precaución, se colocan un número de bloques chute se incorporan en la base de la banca, para que en el caso improbable el agua no llegue tan alto y dañe los equipos principales de la central de columna oscilante. También existen consideraciones similares en relación con los flujos de agua por afuera de la cámara de captura durante condiciones severas de tormentas. La pared frontal está inclinada, proporcionando una excelente rampa para las olas a subir por la pared de esta y caer al otro lado del equipo turbo generador montado en la parte trasera de la cámara. Se coloca un rompe olas en la pared frontal, diseñado para interrumpir dicho flujo de agua.

En la parte trasera de la cámara de captura, se encuentran una abertura circular de 2.6 metros de diámetro que conecta a el equipo turbo-generador. Así mismo, para permitir que el aire de las tres cámaras de la columna de agua se introduzca en el sistema de generación, se perforan aberturas de 3 metros por 2.4 metros en cada pared del diafragma al nivel de la banca. En el techo de la cámara de captura se dejan aberturas de un metro cuadrado, con el fin de proveer un tipo de válvula de alivio de presión. [88] En la tabla 3.7, se tiene las características principales de la cámara de captura para nuestro modelo.

Tabla 3. 7.- Alturas de referencia Cámara de Captura.

Techo máximo de la cámara de captación	12.50 m
Eje de turbina	9.84 m
Altura tope de turbina	8.30 m
Altura de banca dentro de la cámara	4.94 m
Altura del rompeolas en la pared frontal	8.30 m
Altura donde comienza la pendiente en la pared frontal	2.40 m
Nivel de agua en reposo	0.00 m
Parte inferior del labio de entrada	-2.63 m
Parte debajo de las paredes del diafragma	-4.52 m
Fondo Marino por debajo de la apertura inferior	-7.00 m

3.4.3 Equipo Turbo-Generador

La turbina Wells es el dispositivo aerodinámico utilizado para extraer la energía cinética generada por un flujo oscilante de aire; como el que se presenta al desplazar una columna de aire por acción de las olas. Para aprovechar esta forma de energía el rotor de la turbina Wells consiste en un determinado número de aspas con perfiles simétricos, distribuidos alrededor de un cubo central. Esta característica de construcción induce un solo sentido de giro en la turbina independiente de la dirección de flujo de aire que incida sobre ella. La turbina Wells debe extraer la energía cinética disponible del aire sin cambios bruscos en su velocidad de rotación; esto refleja en una transmisión de un movimiento rotacional uniforme representado en potencia mecánica al eje del generador eléctrico acoplado a la turbina Wells. [89]

Los parámetros básicos de operación de este tipo de turbina se muestran a continuación en la siguiente tabla 3.8.

Tabla 3. 8.- Parámetros básicos de una turbina tipo Wells.

Diámetro de Turbina	2.6 m
Velocidad de operación nominal	1050 rpm
Arreglo	En línea Contra-rotación
Forma de alabe	NACA0012
Número de alabes	7
Blade Chord	320 mm

En la figura 3.18, se muestra una turbina Wells siendo desmontada para realizarle procedimientos de mantenimiento y ajustes para un mejor rendimiento a la hora de convertir energía neumática en energía eléctrica.



Figura 3. 18.- Turbina Wells bidireccional durante mantenimiento.

A continuación se muestra el esquema del equipo turbina-generator para una central de columna de agua oscilante.

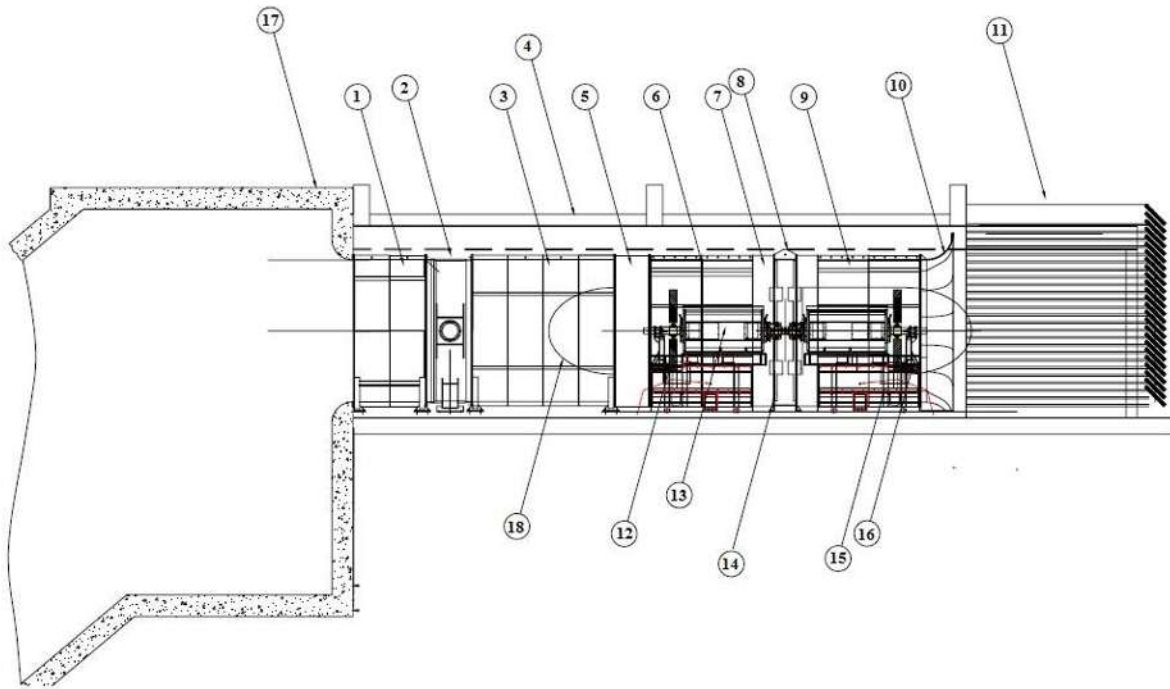


Figura 3. 19.- Esquema de arreglo equipo Turbina-Generador.

En la figura 3.19, se puede observar el arreglo de los componentes mecánicos que son esenciales para el acoplamiento del equipo turbina-generator.

3.5 Representación matemática de la Central de Columna Oscilante

Las etapas de conversión de energía de una central de Columna de Agua Oscilante son descritas a continuación:

- | | |
|--|--------------------------|
| 1. Energía de las olas a energía neumática | (agua a aire) |
| 2. Energía neumática a energía mecánica | (aire a turbina) |
| 3. Energía mecánica a energía eléctrica | (turbina a electricidad) |

Los dispositivos convertidores Columna de Agua Oscilante son, básicamente, estructuras huecas que están parcialmente sumergidas, con una apertura por debajo del nivel de la superficie del agua. El proceso de generación de energía eléctrica tiene dos etapas: cuando las olas llegan a la estructura, el aire que se encuentra dentro de la cámara hueca de la columna se ve forzado hacia arriba y pasa por la turbina, consecuentemente por el aumento de la presión dentro de la cámara. Cuando las olas regresan al océano, el aire dentro de la cámara pasa otra vez por la turbina, pero ahora siendo succionado por la presión atmosférica externa, debido a la disminución de presión dentro de la cámara. Como consecuencia, para el aprovechamiento de estos movimientos opuestos de aire, se utiliza una turbina de tipo Wells, ya que tiene la ventaja de mantener la dirección de rotación independientemente de la dirección del flujo del aire. Finalmente, el acoplamiento turbina-generator es responsable para la producción de energía eléctrica. [90] A continuación en la figura 3.20, se muestra el esquema de diagrama de bloques para un sistema Convertidor Columna de agua Oscilante.

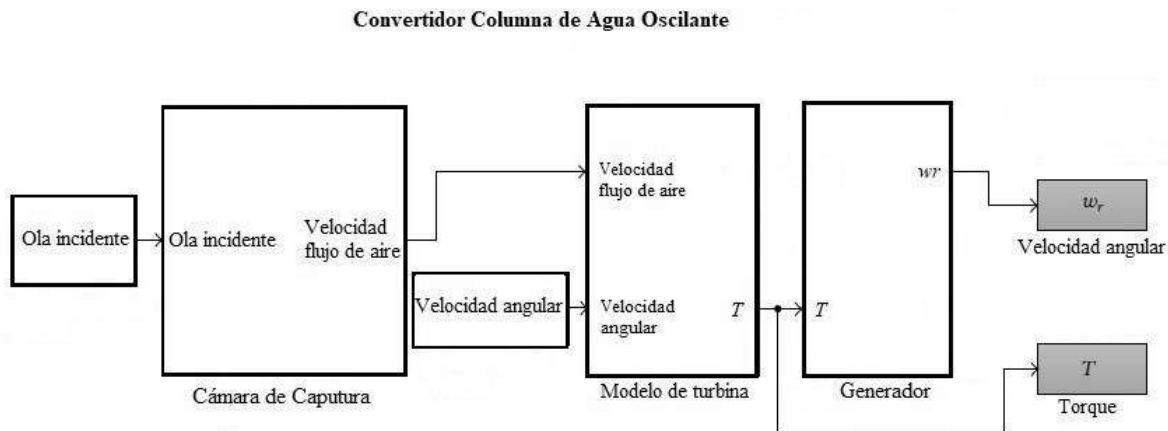


Figura 3. 20.- Diagrama de bloques de un sistema de Columna de Agua Oscilante.

En esta sección se obtiene un modelo matemático del dispositivo Columna de Agua Oscilante, la interacción de las olas con el dispositivo convertidor OWC, la estructura de la cámara y las características de la turbina. Para analizar el rendimiento dinámico del flujo de aire en la cámara de captura, primero es necesario describir el comportamiento de propagación de las olas.

3.5.1 Dinámica de la Superficie de las Olas

De acuerdo con la teoría lineal de Airy se tiene la ecuación (3.20), donde $c = \lambda f$, resultando una nueva ecuación (3.21).

$$y(t) = a \cdot \sin(\omega \cdot t) = a \cdot \sin(2\pi \cdot t) \quad (3.20)$$

Esta expresión representa la variación temporal de una onda de amplitud a , longitud de onda representada como λ y velocidad de propagación c , como representación del comportamiento oscilante de partículas de agua en un punto específico.

$$y(t) = a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot ct\right) \quad (3.21)$$

Ahora es necesario considerar una nueva ecuación que corresponde a la dimensión espacial en la dirección frontal de la onda para transferir el movimiento de oscilación a cualquier punto de la superficie. Obteniendo así, la ecuación (3.22).

$$y(x, t) = a \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(ct - x)\right] \quad (3.22)$$

Así de esta manera, el número de onda, k , se define en la siguiente ecuación (3.23) como.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.23)$$

De modo que la ecuación (3.22) se puede escribir como se muestra en la ecuación (3.24).

$$y(x, t) = \frac{H}{2} \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (3.24)$$

Donde H denota la altura de la ola. Esta expresión representa la dinámica de la superficie de una onda lineal monocromática en función de los parámetros de onda.

3.5.2 Modelo Cámara de Captura

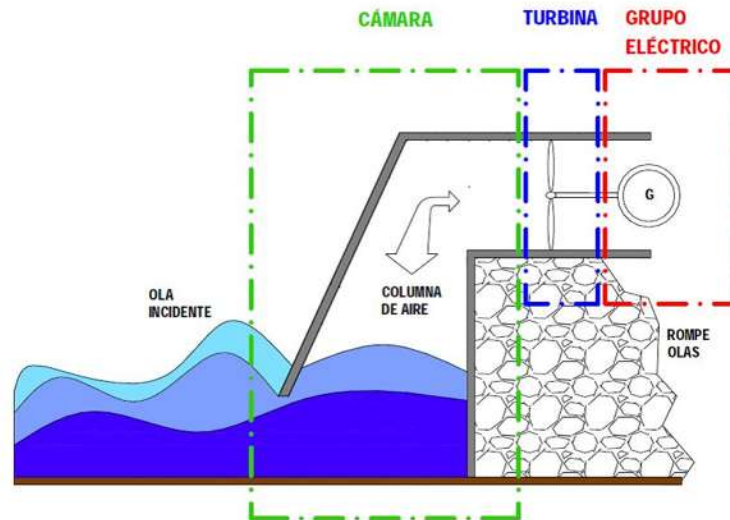


Figura 3. 21.- Cámara de captura en un dispositivo OWC.

En un convertidor OWC, hay una estructura hueca fija abierta al mar por debajo de la superficie del agua que atrapa aire dentro de la cámara. La acción de la ola se comprime alternativamente y descomprime el aire atrapado que se ve obligado a fluir a través de una turbina acoplada a un generador. En la figura 3.21, se muestra la cámara de captura en un dispositivo OWC.

A menos que se utilicen válvulas dentro de la cámara de captura para la rectificación del flujo de aire, lo cual es ampliamente considerado como poco práctico excepto posiblemente en dispositivos pequeños de navegación, las turbinas son auto rectificantes, es decir, su dirección de rotación permanece sin cambios independientemente de la dirección del flujo de aire.

La turbina aerodinámica tipo Wells está sometida a una presión de cabeza $p(t)$, alternativamente positiva y negativa, dada por la oscilación de la presión dentro de la cámara de captura con respecto a la presión atmosférica del exterior. El torque $L(t)$ inducido por el flujo de aire en el rotor de la turbina depende de la presión de cabeza $p(t)$ y de la velocidad de rotación $w(t)$ rad-seg.

El convertidor OWC absorbe la energía de las olas a través del movimiento del aire que está presurizado debido al amortiguamiento proporcionado por el respiradero (válvula vents) y el dispositivo turbina Wells de toma fuerza (power-takeoff). Esta amortiguación externa en la cámara del dispositivo está representada por una boquilla o ventilación en el techo de la cámara para estudios experimentales.

El objetivo en la cámara de captura es obtener el par y velocidad angular de la turbina que sirvan como entradas al equipo turbo-generador. Estas variables están indirectamente relacionadas a la velocidad axial de flujo de aire a través de los alabes de la turbina.

El volumen de agua se puede usar para calcular el volumen de aire en la cámara de captura del convertidor OWC. En la ecuación (3.25), se muestra relación anteriormente mencionada.

$$V(t) = V_c - V_w(t) \quad (3.25)$$

Donde V_c representa el volumen en la cámara de captura y V_w representa el volumen del agua respectivamente. Posteriormente, al integrar la variación ortogonal de la superficie del agua a lo largo del área de la cámara se obtiene la siguiente ecuación (3.26).

$$V(t) = V_c - \iint y(x, t) dA \quad (3.26)$$

Debido a la geometría de la cámara de captura del dispositivo OWC, se tiene la siguiente relación en la ecuación (3.27).

$$dA = w \cdot dx \quad (3.27)$$

Donde w representa el ancho de la cámara de captura. Por lo tanto, se tiene la ecuación (3.28).

$$V(t) = V_c + \frac{wH}{k} \sin \frac{kl}{2} \sin \omega t \quad (3.28)$$

Donde l denota la longitud de la cámara de captura. Ahora bien, es posible obtener en la ecuación (3.29) el flujo de aire instantáneo.

$$Q_a(t) = wHc \cdot \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t \quad (3.29)$$

A partir de esta expresión y teniendo en cuenta la topología de la cámara de captura de un dispositivo OWC donde el flujo de aire es conducido a través de dos ductos asimétricos que llevan al equipo turbo-generador, es posible obtener la velocidad de flujo de aire axial ($v = Q/A$) denotada en la siguiente ecuación (3.30). Donde D es el diámetro del ducto.

$$v_t(t) = \frac{8awc}{\pi D^2} \cdot \sin \frac{\pi l}{cT} \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (3.30)$$

3.5.3 Modelo de Turbina Wells

La turbina tipo Wells es una turbina bidireccional cuyo rodete está formado por perfiles aerodinámicos simétricos colocados perpendiculares a la dirección del flujo como se aprecia en la figura 3.22. Este tipo de turbina es el más utilizado por las actuales centrales ya que es de fácil construcción y fácil diseño. Esta turbina es perfecta para flujo bidireccional, ya que al tener alabes simétricos los triángulos de velocidades son iguales tanto en exhalación como en inhalación.

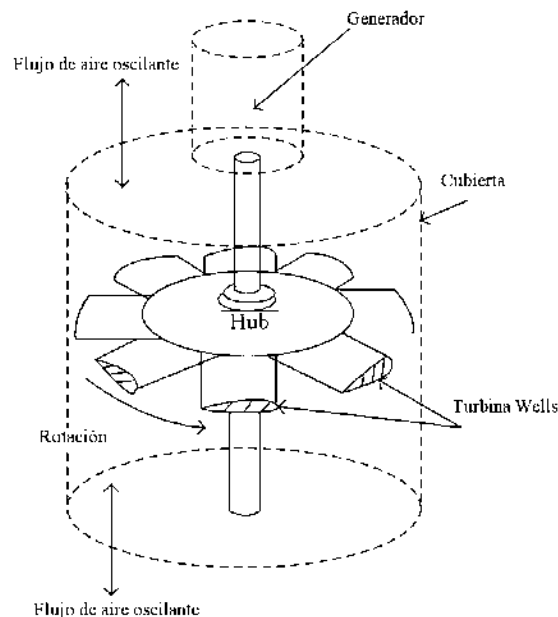


Figura 3. 22.- Esquema de una turbina tipo Wells.

Esto genera unas fuerzas de sustentación y arrastre que generan un par en la misma dirección, aunque también se genera una fuerza axial fluctuante. En la figura 3.23, se muestra los triángulos de velocidad en una turbina Wells.

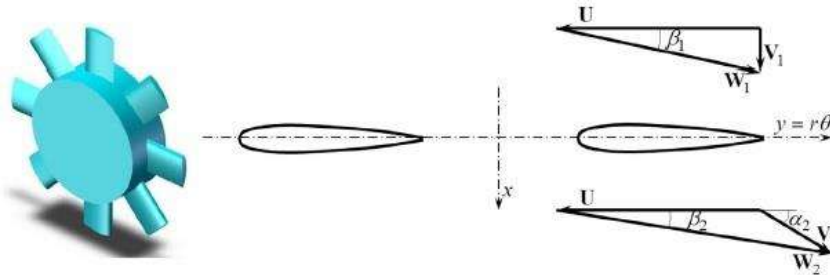


Figura 3. 23.- Triángulos de velocidad en una turbina Wells.

Como la turbina Wells es sometida a bruscos cambios de presión dentro de la cámara de captura, esto debido a los flujos ascendientes y descendientes de aire. Genera varias desventajas de la turbina si no se cuenta con un sistema complejo de control de flujo de aire (guía en los álabes, ductos de flujo, control de pitch en los álabes, etc). Tales como, su alto rendimiento es muy estrecho debido a que al aumentar la velocidad de flujo, el ángulo de ataque aumenta, condicionando que llegado a un punto el álabe entra en perdía y el momento generado en el rotor decrezca abruptamente. También, se corre el riesgo de que la turbina llegue a un punto donde se pare y deje de girar completamente o incluso hasta llegue a girar en sentido contrario.

Como se mencionó anteriormente, para poder modelar el comportamiento de una turbina Wells en 20-sim y obtener las ecuaciones y así generar el par mecánico que va accionar a nuestro generador síncrono. Se desarrollará utilizando 20-sim un sistema de pistones hidráulicos para obtener una señal rectificada que nos genere solo la parte positiva de la onda incidente, obteniendo de esta manera una onda semi-senoidal de ciclo positivo completa. En la figura 3.24, se muestra la onda incidente de flujo de aire rectificado.

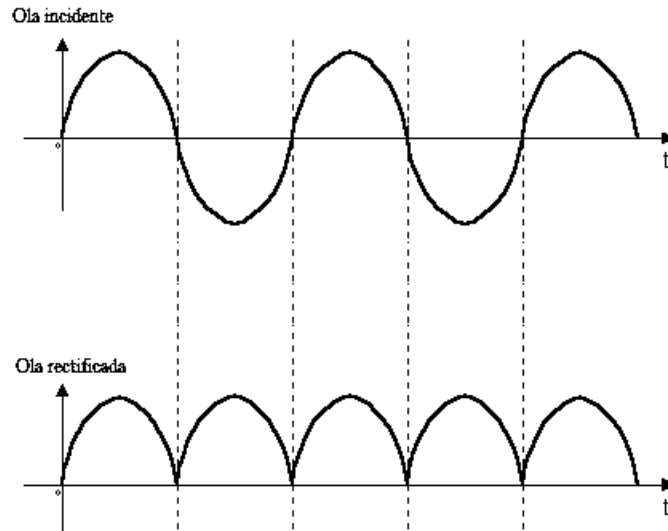


Figura 3. 24.- Onda incidente de flujo de aire rectificado.

Al tener solo la parte positiva de la onda incidente, se evitaría toda la complejidad de los cambios bruscos de presión dentro de la cámara al ascender y descender la columna de agua y nuestro modelo de turbina Wells en 20-sim funcionaría con solo la parte positiva de la ola y así se mantendría una velocidad angular constante en la turbina.

El modelo de la turbina Wells contiene el momento de inercia de la turbina formada por el eje y alabes, J , y por el coeficiente de fricción $R1$. Además, el par centrífugo de la turbina está representado por $C1$. En la figura 3.25 se tiene el modelo en 20-Sim diagrama de bloques de la turbina Wells.

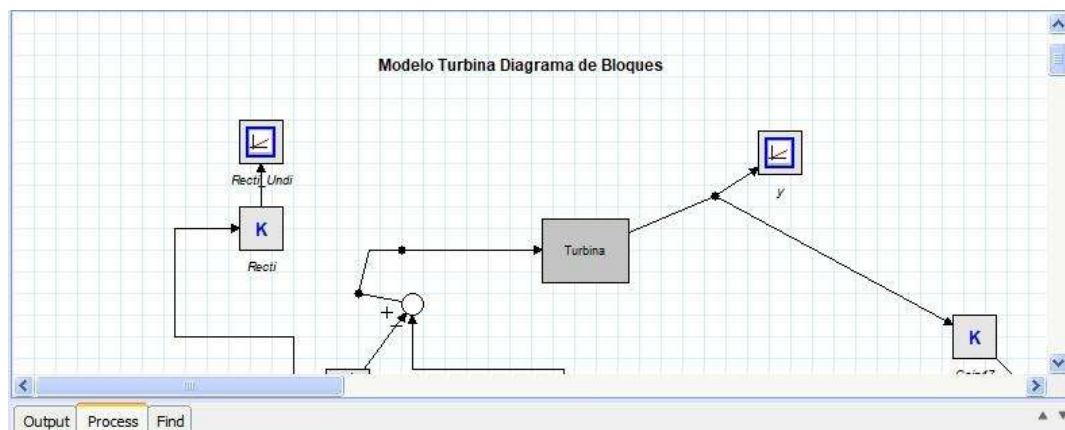


Figura 3. 25.- Modelo turbina Wells en diagrama de bloques.

A continuación se desglosan los parámetros utilizados para el modelo de la turbina Wells en 20-Sim:

parameters

real R1 = 6.0, C1 = 10, L1 = 2.5;

variables

real x1, x2, y, dx1, dx2;

real a11, a12, a21, a22, B1, B2;

equations

a11 = 0;

a12 = 1/L₁;

a21 = - 1/C₁;

a22 = - R₁/L₁;

B1 = 1;

B2 = 0;

*dx1 = a11*x1+a12*x2+B1*V1;*

*dx2 = a21*x1+a22*x2+B2*V1;*

x1 = int(dx1,0);

x2 = int(dx2,0);

y = x2/L₁

Obteniendo así, la siguiente ecuación matricial de la turbina aerodinámica tipo Wells se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_2 \\ e_5 \\ \dot{f}_4 \\ \dot{f}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ \dot{f}_5 \\ e_4 \\ \dot{f}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} R, [0 \quad 1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -R_1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{c_1} & -\frac{R_1}{L_1} \end{bmatrix} = A; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_1} \end{bmatrix}$$

De manera ordenada se tiene la ecuación (3.31) denotada a continuación:

$$\begin{bmatrix} q_2 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2 \\ e_5 \end{bmatrix} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{c_1} & -\frac{R_1}{L_1} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f_1; y = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_1} \end{bmatrix}$$

Donde $C = y$ que a su vez viene siendo f_5 la velocidad angular de la turbina Wells.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{c_1} & -\frac{R_1}{L_1} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_1} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

3.6 La Máquina Síncrona

La máquina síncrona es uno de los dispositivos más importantes de los sistemas eléctricos, por lo que ha sido objeto de un sinnúmero de investigaciones. La gran mayoría de ellas dedicadas a obtener modelos matemáticos que describen su comportamiento, tanto en estado estable como en estado transitorio. El modelo de la máquina en coordenadas **abc**, utiliza las inductancias de los devanados. Las inductancias propias y mutuas de los devanados del estator así como las mutuas entre los devanados del estator y rotor son función de la posición del rotor, la cuál a su vez cambia con el tiempo.

De ahí que para obtener el comportamiento de la máquina síncrona se requiere calcular las inductancias de la máquina en cada instante de tiempo. Esto en los años 20's no fue posible realizarlo por falta de herramientas de cálculo, razón por la cual las investigaciones en estos años fueron dirigidas a encontrar una transformación de similaridad con la cual se consiguiera convertir el sistema variantes en el tiempo a no invariante. Esta idea la empezó a desarrollar en Francia André Blondel, mientras que en los Estados Unidos lo hacían sus contemporáneos R. E.

Doherty, C. A. Nickle y R. H. Park. Este último generalizó la transformación de similaridad que a partir de entonces se conoce como *Transformación dq0* o *Transformación de Park*. [91]

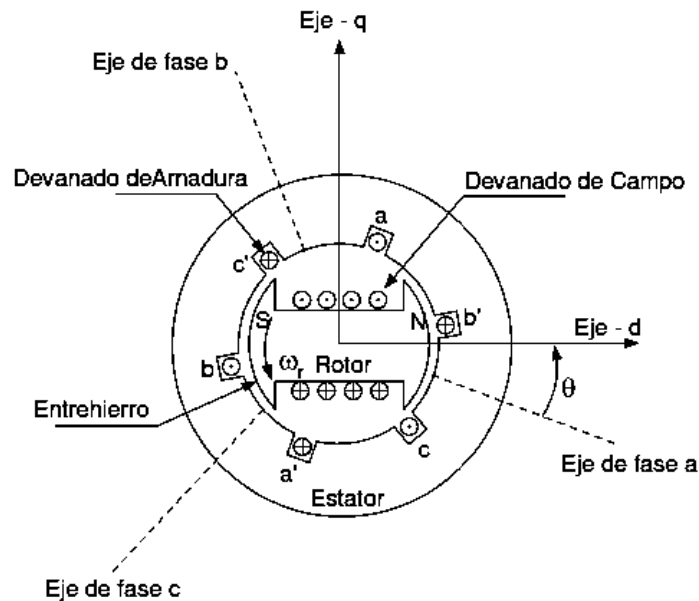


Figura 3. 26.- Esquema de la máquina síncrona.

3.6.1 Modelo Matemático de la Máquina Síncrona

En esta sección se denotará un modelo matemático aceptable entre la precisión y la simplicidad matemática, que cuente con los parámetros eléctricos que describen los fenómenos electromagnéticos (resistencias e inductancias) de la máquina. Para el modelado se consideran varias hipótesis:

- El entrehierro entre las superficies de rotor y estator es despreciable en relación al diámetro de la máquina.
- Se desprecian igualmente la saturación de los circuitos magnéticos; la histéresis, las corrientes de pérdidas de Foucault y la dispersión del campo magnético en los extremos de la máquina.
- La permeabilidad magnética del aire es despreciable frente a la del hierro, y se puede considerar que esta última tiende a infinito.

- Se supondrá asimismo que la sección de los conductores es despreciable en relación a las dimensiones de la máquina, haciendo que se desprecia el ranurado de esta.

Todas estas condiciones definen lo que se denomina la “máquina eléctrica ideal”. Para obtener el modelo dinámico de la máquina síncrona siempre se parte de las ecuaciones de las tensiones de fase de cada devanado de la máquina síncrona.

En este subtema, desarrollamos un modelo matemático de una máquina síncrona con el simple propósito de formular sus ecuaciones y de ahí tener un punto de partida y poder aplicar el método de la Transformación Park todo esto con la finalidad de poder tener un mejor estudio de estabilidad y control de dicha máquina.

La máquina síncrona a considerar, cuenta con tres devanados en el estator, un devanado de campo, y dos devanados de amortiguamiento. Estos seis devanados están magnéticamente acoplados. Este acoplamiento magnético está en función de la posición del rotor. Así pues, el flujo magnético de cada devanado de la máquina, también está en función de la posición del rotor. El voltaje instantáneo en las terminales v de cualquiera de los devanados mencionados está en la forma de la siguiente ecuación (3.32).

$$v = \pm \sum r i \pm \sum \lambda \quad (3.32)$$

Donde λ representa el enlace de flujo magnético, r es el devanado de resistencia, e i es la corriente en el estator con signo positivo saliendo de las terminales del generador. La notación $\pm \sum$ indica la sumatoria de todos los términos apropiados con la debida atención a los signos. La expresión para los devanados de voltajes son complicados por la variación de los flujos magnéticos λ con respecto a la posición del rotor.

3.6.2 La Transformación Park

Una gran simplificación descriptiva del modelo matemático de la máquina síncrona se obtiene si se realiza cierta transformación de variables. Esta dicha transformación se denomina Transformación de Park. La Transformación Park define un nuevo set de variables en el estator tales como voltajes, corrientes y acoplamientos de flujo en términos de las variables actuales de

los devanados. Las nuevas cantidades se obtienen de la proyección de las variables actuales de los tres ejes; uno a lo largo del eje directo del devanado de campo del rotor, llamado *eje directo*; un segundo a lo largo eje neutral del devanado de campo, llamado *eje de cuadratura*; y un tercero a lo largo de un *eje estacionario*. A continuación se desarrollará matemáticamente la Transformada de Park.

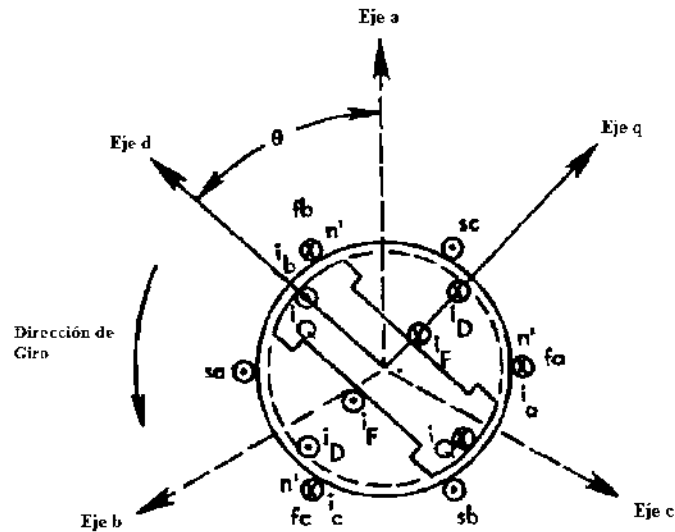


Figura 3. 27.- Esquema fasorial máquina síncrona mostrando ejes *a-b-c* y *d-q*.

Nosotros definiremos el eje *d* del rotor a un determinado instante de tiempo con ángulo θ rad/s con respecto a una posición fija, como se muestra en la figura 3.27. Así, dejando que las corrientes de fase en el estator i_a, i_b, i_c sean las corrientes saliendo de las terminales del generador. Si se proyectan estas corrientes a lo largo de los ejes *d* y *q* del rotor, se obtiene la siguiente relación de ecuaciones (3.33).

$$i_{qaxis} = (2/3)[i_a \sin\theta + i_b \sin(\theta - 2\pi/3) + i_c \sin(\theta + 2\pi/3)]$$

$$i_{daxis} = (2/3)[i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - 2\pi/3) + i_c \cos(\theta + 2\pi/3)] \quad (3.33)$$

Se considera conveniente utilizar el eje de la fase *a* como nuestro punto de referencia, al no hacer esto, se obtendrá algunas discrepancias de desplazamiento de ángulo en la fases *a* y una referencia arbitraria aparecerá en los términos mencionados anteriormente.

El efecto de la Transformación de Park que tiene en la máquina síncrona (generador), es simplemente transformar todas nuestras cantidades del estator de las fases a , b , y c a un nuevo set de variables que se mueven con referencia al rotor de la máquina en movimiento. Sin embargo, hay que recordar que si tenemos tres variables i_a, i_b, i_c variantes en el dominio del tiempo, necesitamos tres nuevas variables. La Transformada de Park utiliza dos de las nuevas variables como d y q como nuevos componentes de eje. La tercera variable es una corriente estacionaria, que es proporcional a la corriente de secuencia-cero. Un multiplicador es utilizado con el propósito de simplificar los cálculos numéricos. Así, por definición se tiene en la ecuación (3.34):

$$i_{0dq} = \mathbf{P} i_{abc} \quad (3.34)$$

Donde en la siguiente ecuación (3.35) se definen los vectores de corrientes.

$$i_{0dq} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}; i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

En la siguiente ecuación (3.36), se define La matriz de Transformada de Park denominada $\mathbf{P}$.

$$\mathbf{P} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

El flujo del devanado de campo se encuentra a lo largo de la dirección del eje d con referencia al rotor. Produce una FEM (fuerza electromotriz o campo inducido) y tiene un ángulo de arrastre de 90° . Por lo tanto, la fuerza electromotriz E de la máquina se encuentra principalmente a lo largo del eje q del rotor.

Considerando que la máquina tiene en sus terminales un voltaje constante V , si la máquina entra en modo de generador, el fasor $\vec{E}$ debería adelantar al fasor $\vec{V}$. El ángulo entre $\vec{E}$ y $\vec{V}$ es el par (torque) de la máquina δ si el fasor $\vec{V}$ está en la dirección de la fase de referencia (fase a). Cuando $t = 0$ el fasor $\vec{V}$ se localiza a lo largo del eje de la fase a como se muestra en la figura 3.27. El eje q se encuentra a un ángulo δ , y el eje d se encuentra a $\theta = \delta + \pi/2$. Cuando $t > 0$,

el eje de referencia se localiza a un ángulo $\omega_R t$ con respecto al eje de la fase a. Por lo tanto, el eje d del rotor se encuentra en la siguiente relación con la ecuación (3.37).

$$\theta = \omega_R t + \delta + \pi/2 \quad Rad \quad (3.37)$$

Donde ω_R es la frecuencia angular nominal (síncrona) en Rad/s y δ es el ángulo par (torque) de sincronismo en radianes eléctricos.

Así, se puede denotar expresiones similares a la ecuación (3.34) para los voltajes y acoplamientos de flujo que se muestran en la siguiente ecuación (3.38).

$$V_{0dq} = \mathbf{P} V_{abc} \quad \lambda_{0dq} = \mathbf{P} \lambda_{abc} \quad (3.38)$$

Si la transformación de Park ecuación (3.38) es única, una transformación inversa también existe y se puede escribir de la siguiente manera denotada en la ecuación (3.39).

$$i_{abc} = \mathbf{P}^{-1} i_{0dq} \quad (3.39)$$

La inversa de la Transformación de Park (3.36) puede ser denotada de la siguiente manera en la ecuación (3.40).

$$\mathbf{P}^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos \theta & \sin \theta \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Notamos que la matriz $\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P}^t$, esto significa que la transformación $\mathbf{P}$ es ortogonal. Teniendo la matriz $\mathbf{P}$ ortogonal también significa que la transformación $\mathbf{P}$ es invariante en la potencia, y esperaríamos usar esta misma expresión de potencia ya sea en el marco de referencia abc o $dq0$. Teniendo esto en cuenta, se tiene la siguiente ecuación (3.41).

$$\begin{aligned} p &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = \mathbf{v}_{abc}^t \mathbf{i}_{abc} = (\mathbf{P}^{-1} \mathbf{v}_{0dq})^t (\mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{0dq}) \\ &= \mathbf{v}_{0dq}^t (\mathbf{P}^{-1})^t \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{0dq} = \mathbf{v}_{0dq}^t \mathbf{P} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{0dq} \\ &= \mathbf{v}_{0dq}^t \mathbf{i}_{0dq} = v_0 i_0 + v_d i_d + v_q i_q \end{aligned} \quad (3.41)$$

3.6.3 Ecuaciones Enlace de Flujos

La figura 3.27, muestra una red que consta de seis bobinas que están mutuamente acopladas, que corresponden a los tres bobinados de fase $sa-fa$, $sb-fb$ y $sc-fc$; el devanado de campo $F-F'$; y dos devanados de amortiguamiento denotados como $D-D'$ y $Q-Q'$. Los devanados de amortiguamiento a menudo son designados con los símbolos kd y kq . (Las designaciones s y f se refieren al inicio y el final de cada bobinado).

A continuación se tiene la relación entre las inductancias de las bobinas y las corrientes que en ellas circulan con sus respectivos acoplamientos de flujo magnético, y se expresan de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Donde $\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix}$ son los enlaces de flujo magnético del estator, mientras que $\begin{bmatrix} \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix}$ son los

enlaces de flujo magnético del rotor. De igual manera, el subíndice L_{jk} es la inductancia propia cuando $j = k$, de igual forma L_{jk} es la inductancia mutua cuando $j \neq k$. Hay que notar que en la ecuación (3.42) se utiliza letras minúsculas para denotar los enlaces de flujo para el estator y con mayúsculas para los enlaces de flujo del rotor. Todas las inductancias que se muestran en la ecuación (3.42) están en función de la posición del ángulo θ del rotor. Estas inductancias se desglosan de la siguiente manera:

I. Inductancias propias en el Estator

Las inductancias propias en el devanado del estator están dadas por la siguiente ecuación (3.43).

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta$$

$$\begin{aligned}
L_{bb} &= L_s + L_m \cos 2(\theta - 2\pi/3) \\
L_{cc} &= L_s + L_m \cos 2(\theta + 2\pi/3)
\end{aligned} \tag{3.43}$$

Donde $L_s > L_m$ y ambas inductancias L_s y L_m son constantes.

II. Inductancias propias en el Rotor

Ignorando la saturación y el efecto de ranura, todas las inductancias del rotor son constantes, resultando en la siguiente ecuación (3.44) de acuerdo con nuestra convención de subíndices, utilizaremos una sola notación de estos como se muestra a continuación.

$$L_{FF} = L_F \quad H \quad L_{DD} = L_D \quad H \quad L_{QQ} = L_Q \quad H \tag{3.44}$$

III. Inductancias mutuas en el Estator

Las inductancias mutuas en el estator de fase a fase están en función de θ pero son simétricas, donde $|M_s| > L_m$. Hay que tener en cuenta que los signos de los términos de las inductancias mutuas dependen de la dirección de las corrientes y la orientación de la bobina.

$$\begin{aligned}
L_{ab} &= L_{ba} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \pi/6) \quad H \\
L_{bc} &= L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2(\theta - \pi/2) \quad H \\
L_{ca} &= L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + 5\pi/6) \quad H
\end{aligned} \tag{3.45}$$

IV. Inductancias mutuas del Rotor

La inductancia mutua entre los devanados F y D son constantes y no varían con respecto al ángulo θ . El coeficiente de acoplamiento entre los ejes d y q es cero, y todos los pares de los devanados con desplazamiento de 90° tienen cero inductancias mutuas. Así, consecuentemente se llega a la siguiente ecuación (3.46).

$$L_{FD} = L_{DF} = M_R \quad H \quad L_{FQ} = L_{QF} = 0 \quad H \quad L_{DQ} = L_{QD} = 0 \quad H \tag{3.46}$$

V. Inductancias mutuas de Estator a Rotor

Finalmente, se tienen las inductancias mutuas entre los devanados del estator y rotor, todos estos están en función del ángulo θ del rotor. Desde los devanados de fase, hasta el devanado de campo, se tiene la siguiente ecuación (3.47).

$$\begin{aligned} L_{aF} &= L_{Fa} = M_F \cos \theta & H \\ L_{bF} &= L_{Fb} = M_F \cos(\theta - 2\pi/3) & H \\ L_{cF} &= L_{Fc} = M_F \cos(\theta + 2\pi/3) & H \end{aligned} \quad (3.47)$$

Del mismo modo, desde los devanados de fase hasta los de amortiguamiento D se tiene la siguiente ecuación (3.48).

$$\begin{aligned} L_{aD} &= L_{Da} = M_D \cos \theta & H \\ L_{bD} &= L_{Db} = M_D \cos(\theta - 2\pi/3) & H \\ L_{cD} &= L_{Dc} = M_D \cos(\theta + 2\pi/3) & H \end{aligned} \quad (3.48)$$

Por último, de los devanados de fase al devanado Q se tiene la siguiente ecuación (3.49). Los signos en términos mutuos dependen de las direcciones de las corrientes y de la orientación de la bobina.

$$\begin{aligned} L_{aQ} &= L_{Qa} = M_Q \sin \theta & H \\ L_{bQ} &= L_{Qb} = M_Q \sin(\theta - 2\pi/3) & H \\ L_{cQ} &= L_{Qc} = M_Q \sin(\theta + 2\pi/3) & H \end{aligned} \quad (3.49)$$

Conociendo todas las inductancias de la ecuación (3.42), observamos que casi todos los términos de la matriz varían en el tiempo, ya que θ está en función del tiempo. Sólo cuatro de los términos que están fuera de la diagonal se desprecian como se denotó en la ecuación (3.46).

Ahora bien, la ecuación (3.42) con sus inductancias variantes en el tiempo se puede simplificar al referir todas las variables a un nuevo marco de referencia del rotor a través de la

Transformación de Park aplicado al eje trifásico de la máquina a - b - c . Al realizar esto se llega a la siguiente ecuación (3.50).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{aR} \\ L_{Ra} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Donde L_{aR} , L_{aa} = inductancias estator-estator

L_{Ra} = inductancias estator-rotor

L_{RR} = inductancias rotor-rotor

La ecuación (3.50) se obtiene al pre-multiplicar la ecuación (3.42) por la siguiente matriz denotada a continuación:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}$$

Donde $\mathbf{P}$ es la matriz de Transformación Park y $\mathbf{I}_3$ es una matriz de identidad de orden 3. Al realizar la operación indicada en la ecuación (3.50), se llega a la siguiente matriz de la ecuación (3.51).

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Finalmente, obtenemos un nuevo set de variables constantes que se muestran en la ecuación (3.52):

$$L_d = L_s + M_s + (3/2)L_m \quad H$$

$$L_q = L_s + M_s - (3/2)L_m \quad H$$

$$L_0 = L_s - 2M_s \quad H$$

$$k = \sqrt{3/2} \quad (3.52)$$

De la ecuación (3.51) el enlace de flujo λ_d se está moviendo con referencia del rotor y centrado a lo largo del eje d . Así mismo, el enlace de flujo λ_q está a lo largo del eje q , mientras que el enlace de flujo λ_0 está completamente desacoplado de los otros circuitos, ya que la primera fila y la columna tienen solo un término diagonal.

También, es importante observar que la matriz de la ecuación (3.51) es una matriz de variables constantes y a su vez simétrica. Esto se debe a que la Transformación Park elimina los coeficientes variables en el tiempo del estator y los proyecta a un nuevo marco de referencia (0dq) que gira a la misma velocidad del rotor.

3.6.4 Ecuaciones de Voltaje-Corrientes

Para las ecuaciones de voltaje, se desglosarán de acuerdo a la ecuación (3.32). En la figura (3.28) se muestra el diagrama voltaje-corrientes de la máquina síncrona. Donde los devanados se denotan como se muestra en la figura (3.27) con sus respectivas denominaciones. Las inductancias mutuas se omiten, con el simple hecho de simplificar el diseño, pero son consideradas para el desarrollo de las expresiones matemáticas.

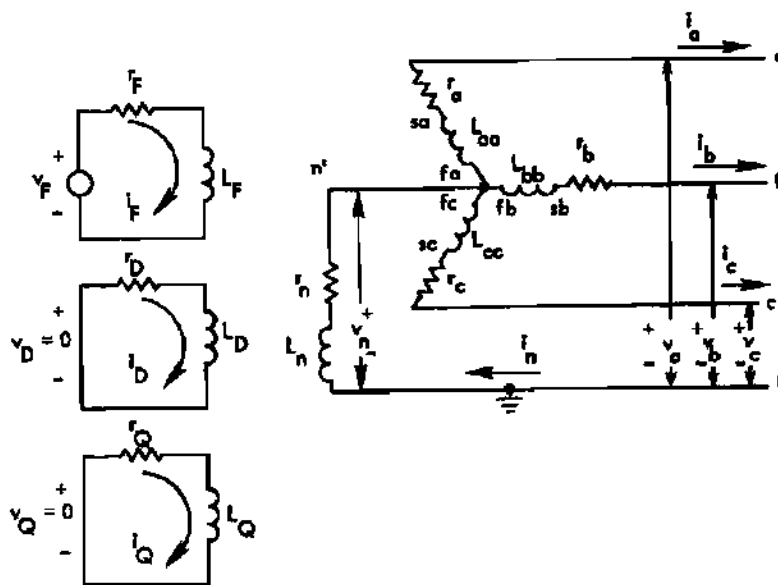


Figura 3. 28.- Diagrama voltaje-corrientes máquina síncrona.

Teniendo en cuenta y asumiendo que las corrientes del estator tienen una dirección positiva saliendo de las terminales de la máquina, ya que esta está en modo generador. Para las condiciones mencionadas podemos escribir la siguiente ecuación (3.53). De forma matricial se expresa de la siguiente manera en la ecuación (3.54).

$$v = -ri - \dot{\lambda} \quad (3.53)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_a \\ \dot{\lambda}_b \\ \dot{\lambda}_c \\ \dot{\lambda}_F \\ \dot{\lambda}_D \\ \dot{\lambda}_Q \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Si $r_a = r_b = r_c = r$, como suele ser el caso, también se puede definir como la siguiente ecuación (3.55).

$$R_{abc} = rI_3 \quad \Omega \quad (3.55)$$

Donde I_3 es la matriz de identidad 3 x 3, y podemos reescribir la ecuación (3.54) en forma particionada como se muestra en la siguiente ecuación matricial (3.56).

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ V_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Donde V_{FDQ} , i_{FDQ} y $\dot{\lambda}_{FDQ}$ se definen de la siguiente manera en la ecuación (3.57).

$$V_{FDQ} = \begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad i_{FDQ} = \begin{bmatrix} i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad \dot{\lambda}_{FDQ} = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_F \\ \dot{\lambda}_D \\ \dot{\lambda}_Q \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Por lo tanto, la ecuación (3.56) se complica por la presencia de coeficientes variantes en el tiempo $\dot{\lambda}$, pero gracias a la Transformación de Park, estos términos se pueden eliminar al aplicar la matriz de Park a la partición del estator. Para simplificar la ecuación (3.56) se multiplica la siguiente matriz.

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix}$$

Por definición se obtiene la ecuación (3.58) al pre-multiplicar por el lado izquierdo de la ecuación (3.56).

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abc} \\ V_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{0dq} \\ V_{FDQ} \end{bmatrix} \quad V \quad (3.58)$$

Para el término de caída de voltaje en la resistencia, se desarrolla de la siguiente manera obteniendo la ecuación (3.59).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} PR_{abc}P^{-1} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad V \end{aligned} \quad (3.59)$$

El segundo término en el lado derecho de la ecuación (3.56) se transforma en una nueva ecuación matricial (3.60).

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P\dot{\lambda}_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \quad V \quad (3.60)$$

Evalúamos $P\dot{\lambda}_{abc}$ utilizando la forma de la ecuación (3.38), $\lambda_{0dq} = P\lambda_{abc}$ de la cual calculamos $\dot{\lambda}_{0dq} = \dot{P}\lambda_{abc} + P\dot{\lambda}_{abc}$. Resultando la siguiente ecuación (3.61).

$$P\dot{\lambda}_{abc} = \dot{\lambda}_{0dq} - \dot{P}\lambda_{abc} = \dot{\lambda}_{0dq} - \dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} \quad V \quad (3.61)$$

Así, podemos mostrar que la siguiente ecuación matricial (3.62) corresponde al término de voltaje de velocidad.

$$\dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega\lambda_q \\ \omega\lambda_d \end{bmatrix} \quad V \quad (3.62)$$

Finalmente, el tercer término en el lado derecho de la ecuación (3.56) se transforma de la siguiente manera denotado en la ecuación (3.63).

$$\begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P v_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{0dq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad V \quad (3.63)$$

Por definición, $\mathbf{n}_{0dq}$ es la caída de voltaje de neutro a tierra en el sistema de coordenadas $0dq$. Utilizando la ecuación (3.55), obtenemos una nueva ecuación matricial (3.64).

$$\begin{aligned}\mathbf{n}_{0dq} = \mathbf{P}\mathbf{v}_n &= -\mathbf{P}\mathbf{R}_n\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}\mathbf{i}_{abc} - \mathbf{P}\mathbf{L}_n\mathbf{P}^{-1}\mathbf{P}\dot{\mathbf{i}}_{abc} = -\mathbf{P}\mathbf{R}_n\mathbf{P}^{-1}\mathbf{i}_{0dq} - \mathbf{P}\mathbf{L}_n\mathbf{P}^{-1}\dot{\mathbf{i}}_{0dq} \\ &= -\begin{bmatrix} 3r_n i_0 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 3L_n \dot{i}_0 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{V}\end{aligned}\quad (3.64)$$

Observamos que esta caída de voltaje ocurre solamente en la secuencia cero, como debería ser. Resumiendo, sustituimos la ecuación (3.58)-(3.61) y (3.62) en la ecuación (3.56) obteniendo la siguiente ecuación (3.65).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{0dq} \\ \mathbf{V}_{FDQ} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{abc} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{0dq} \\ \mathbf{i}_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{0dq} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}\mathbf{P}^{-1}\lambda_{0dq} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{0dq} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Cabe destacar que todos los términos de la ecuación anterior se conocen. La matriz de la resistencia es diagonal. Para condiciones balanceadas, el voltaje de secuencia-cero es cero.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_R = \begin{bmatrix} r_F & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\omega\lambda_q \\ \omega\lambda_d \end{bmatrix}$$

En condiciones de un sistema balanceado la ecuación (3.64) se escribe de la siguiente manera como se muestra en la ecuación (3.66).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{dq} \\ \mathbf{V}_{FDQ} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq} \\ \mathbf{i}_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{dq} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} \quad \mathbf{V} \quad (3.66)$$

Por último, se muestra la expresión matemática completa la ecuación voltaje-corriente de la máquina síncrona en función de las corrientes i , y variaciones de corriente $\dot{I}$, aplicando la Transformada de Park. Para obtener esto, se sustituyen los términos de acoplamiento de flujo magnético en la ecuación (3.64) λ y $\dot{\lambda}$, por las expresiones de corriente. Para la formulación de esta nueva ecuación (3.67), se recurre a la expresión matemática (3.51).

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ v_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_d & 0 & \omega L_q \\ 0 & r_F & 0 \\ -\omega L_d & -\omega k M_F & r_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_F \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & k M_F & 0 \\ k M_F & L_F & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_F \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Donde $k = \sqrt{2/3}$. En la ecuación (3.67), observamos que los términos son dependientes de la frecuencia angular ω , a su vez, la ecuación del eje d son con respecto a las corrientes del eje q (i_q). Así mismo, los de términos que dependen de la frecuencia angular ω en el eje q se deben a las corrientes del eje d (i_d , i_F e i_D). [92]

3.6.5 Ecuaciones de Par Mecánico

El par mecánico de la máquina síncrona está determinado por la interacción entre las fuerzas magnetomotrizes no alineadas. La fuerza magnetomotriz del devanado de campo produce un par al interactuar con los enlaces de flujo del devanado que representa al eje q . De igual manera, la fuerza magnetomotriz del eje d produce un par debido a la interacción con la fuerza magnetomotriz del eje en cuadratura q .

El mismo fenómeno ocurre pero ahora con un sentido contrario cuando la fuerza electromotriz del eje q produce un par con la fuerza magnetomotriz del eje d . Cuando las reluctancias de los campos magnéticos d y q son iguales, estos dos pares se anulan. Así, cuando la reluctancia del eje d es menor que la reluctancia del eje q , el par que se produce por la fuerza magnetomotriz del eje d sobre el eje q es mayor que un una dirección contraria, resultando en un par neto debido a la variación de reluctancia entre los dos ejes.

La ecuación de par mecánico es aquella oscilación que representa la aceleración o desaceleración del rotor cuando se presenta un desequilibrio en el par y la inercia combinada del generador y el primo motor es acelerada por el desbalance de pares aplicados, resultando en la siguiente ecuación (3.68) denotada a continuación. [93]

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_a \quad (3.68)$$

Donde

T_J = Constante rotor o momento de inercia generador-turbina en $kg \cdot m^2$

ω = Velocidad angular del rotor en $Rad-meca/seg$

T_m = Par mecánico de entrada en $N \cdot m$

T_e = Par electromecánico en $N \cdot m$

T_d = Par de amortiguamiento

T_a = Par acelerante en $N \cdot m$

Consecuentemente, el par eléctrico se define en la siguiente ecuación (3.69). Donde p = número de pares de polos.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right)(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.69)$$

El par de amortiguamiento se define en la ecuación (3.70). Donde D = a una constante de amortiguación.

$$T_d = D\omega \quad (3.70)$$

Para los acoplamientos de enlaces de flujos, se denotaran en términos de las corrientes, que nos lleva a la siguiente ecuación (3.71).

$$\lambda_d = L_d i_d + k M_F I_F \quad \lambda_q = L_q i_q \quad (3.71)$$

Multiplicando la constante del rotor T_J con la velocidad del campo giratorio $\dot{\omega}$, al igual que la ecuación (3.68), obtenemos la siguiente expresión denotada en la ecuación (3.72).

$$T_J \dot{\omega} = T_m - \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right)(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) - D\omega \quad (3.72)$$

Al sustituir los términos de inductancias en la ecuación (3.71) se obtiene la siguiente ecuación (3.73).

$$T_J \dot{\omega} = T_m - \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right)[L_d i_d i_q + k M_F I_F i_q - L_q i_q i_d] - D\omega \quad (3.73)$$

Finalmente, obtenemos la ecuación de oscilación electromecánica que se muestra en la ecuación (3.74).

$$\dot{\omega} = \frac{T_m}{T_J} + \left[\frac{-3p}{4T_J} L_d i_q - \frac{-3p}{4T_J} k M_F i_q \frac{3p}{4T_J} i_d - \frac{D}{T_J} \right] \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

Ahora bien, sustituyendo la ecuación (3.74) en la ecuación (3.67), se obtiene la matriz voltaje-corriente y ecuaciones electromecánicas mostradas en la ecuación matricial (3.75).

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ v_q \\ T_m \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_d & 0 & \omega L_q & 0 \\ 0 & r_F & 0 & 0 \\ -\omega L_d & -\omega k M_F & r_q & 0 \\ \frac{3p L_d i_q}{4} & \frac{3p k M_F i_q}{4} & \frac{3p i_d}{4} & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & k M_F & 0 & 0 \\ k M_F & L_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_F \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

De la ecuación matricial (3.73), se necesita realizar otra formulación para así obtener las corrientes de la máquina en variables de estado, con el fin de eliminar el vector de acoplamientos de flujo de las ecuaciones del generador. Obteniendo la siguiente ecuación matricial (3.76).

$$\begin{bmatrix} L_d & M & 0 & 0 \\ M & L_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{f}_3 \\ \dot{f}_5 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{f}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d & 0 & 0 & -\lambda_q \\ 0 & -r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_q & \lambda_d \\ \lambda_q & 0 & -\lambda_d & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_6 \\ e_{12} \\ e_{16} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

Notamos que la ecuación (3.76) presenta un cambio de variables en el vector columna que multiplica la matriz de inductancias, donde $\dot{f}_3, \dot{f}_5, \dot{f}_{11}$ y $\dot{f}_{18}$ representan la derivada a lo largo del eje d , la derivada en el devanado de campo F , la derivada en el eje q y la derivada de la velocidad angular ω .

También, el vector columna de la ecuación anterior (3.76) contiene las variables e_1, e_6, e_{12} y e_{16} representan los voltajes a lo largo del eje directo, el voltaje en el devanado de campo, el voltaje a lo largo del eje de cuadratura y por último el par mecánico. Resultando en un nuevo set de ecuaciones matriciales que se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_3 \\ \dot{f}_5 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{f}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M & 0 & 0 \\ M & L_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_J \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} -r_d & 0 & 0 & -\lambda_q \\ 0 & -r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_q & \lambda_d \\ G\lambda_q & 0 & -G\lambda_d & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_6 \\ e_{12} \\ e_{16} \end{bmatrix} \right\} \quad (3.77)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_3 \\ \dot{f}_5 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{f}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_d \cdot L_1 & -r_f \cdot L_2 & 0 & -\lambda_q \cdot L_1 \\ -r_d \cdot L_3 & -r_f \cdot L_4 & 0 & -\lambda_q \cdot L_3 \\ 0 & 0 & \frac{-r_q}{L_q} & \frac{\lambda_d}{L_q} \\ \frac{G\lambda_q}{T_J} & 0 & \frac{-G\lambda_d}{T_J} & \frac{-D}{T_J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 \cdot e_1 + L_2 \cdot e_6 \\ L_3 \cdot e_1 + L_4 \cdot e_6 \\ \frac{1}{L_q} e_{12} \\ \frac{1}{T_J} e_{16} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_3 \\ \dot{f}_5 \\ \dot{f}_{11} \\ \dot{f}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \cdot e_1 + b_{12} \cdot e_6 \\ b_{21} \cdot e_1 + b_{22} \cdot e_6 \\ b_{31} \cdot e_{12} \\ b_{41} \cdot e_{16} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

Capítulo 4 Simulación de un Convertidor Columna de Agua Oscilante

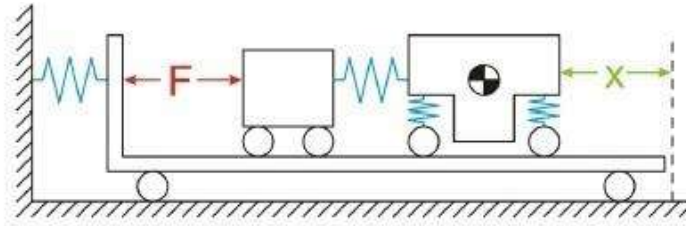
4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la simulación del sistema convertidor columna de agua oscilante utilizando el software 20-Sim (The power of modeling). Todo esto partiendo del diagrama de bloques de la figura 3.20 y los modelos matemáticos obtenidos en el capítulo 3 para cada una de las etapas del sistema con energía undimotriz.

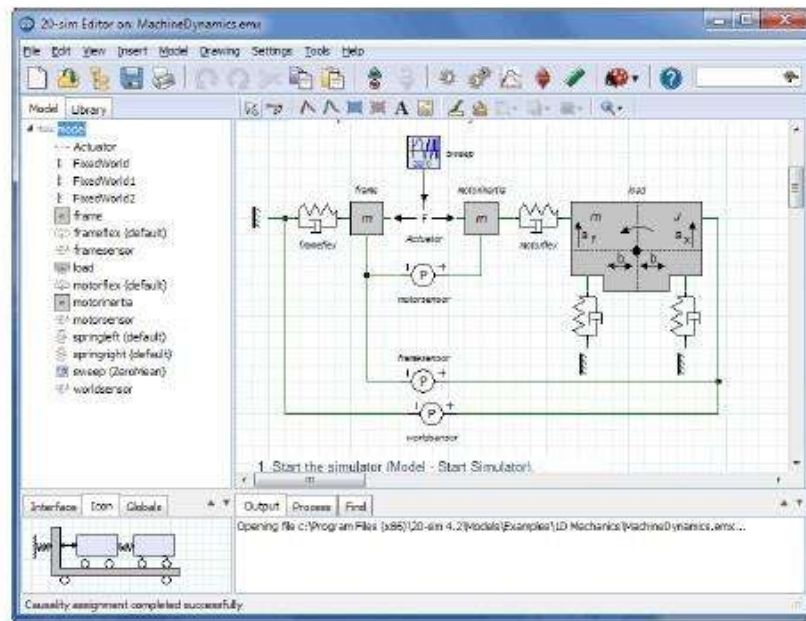
4.2 Qué es 20-sim

20-Sim es un programa de simulación y modelado para sistemas mecatrónicos. Con el software 20-Sim, te permite ingresar el modelo gráficamente, de forma similar al dibujo de un esquema de ingeniería. Con estos modelos, se puede simular y analizar el comportamiento de sistemas dinámicos, tales como eléctricos, mecánico y sistemas hidráulicos o cualquier combinación de estos

20-Sim proporciona herramientas que te permiten crear modelos de manera rápida e intuitivamente. Permitiendo crear modelos usando ecuaciones, diagrama de bloques, componentes físicos y Bond Graph. Contienen una gran variedad de herramientas (toolbox) en forma de librerías que te permiten construir modelos, simularlos y analizar su rendimiento. En la figura 4.1, se tiene un bosquejo de ingeniería reconstruido sin alguna línea de código matemático directamente transformado por el software 20-Sim a un modelo de diagrama de bloques.



a) bosquejo de ingeniería



b) directamente a un modelo, uno a uno

Figura 4. 1.- Esquema de ingeniería reconstruido con el software 20-Sim.

4.2.1 Componentes Básicos en 20-Sim

El programa 20-Sim consta de dos ventanas principales (Editor y Simulador), también cuenta con muchas herramientas que permiten realizar cualquier tipo de modelado ya sea un sistema eléctrico, mecánico o hidráulico. La ventana de Editor automáticamente se abre cuando se inicia el programa 20-Sim y es aquí donde se crean los modelos. En la figura 4.2, se muestra la ventana de Editor.

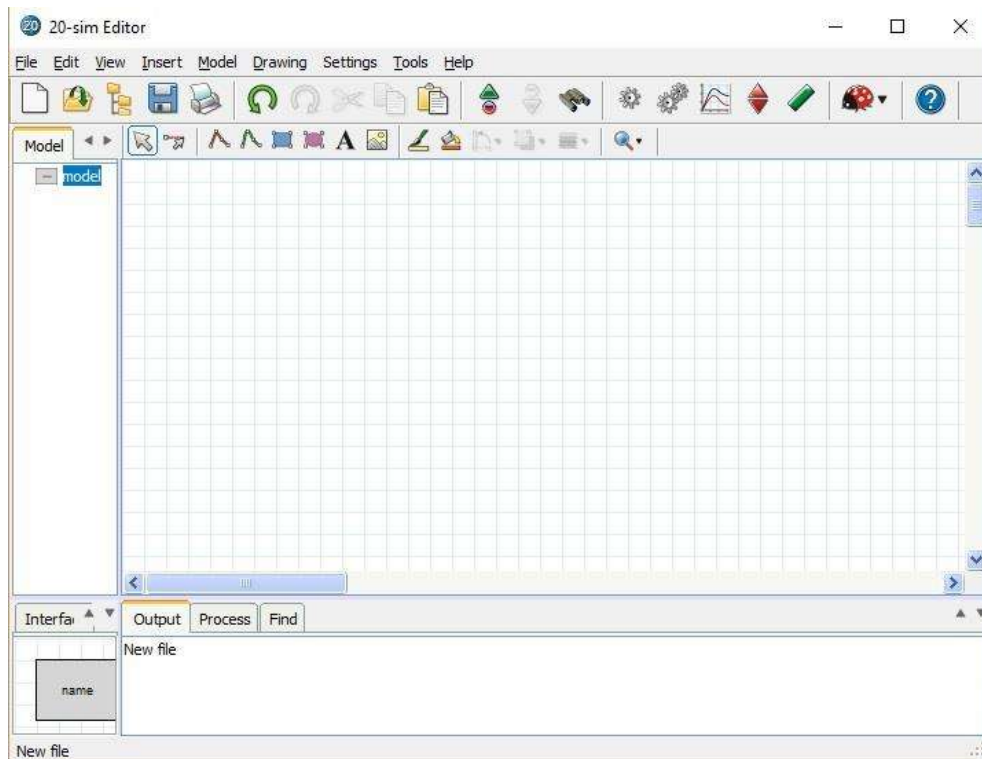


Figura 4. 2.- Pantalla principal Editor en 20-Sim.

El Editor consiste en cuatro partes que se desglosan a continuación:

- **Model tab / Library tab:** La pestaña de modelo muestra la composición jerárquica del modelo (todos los elementos) que son creados en el Editor. La biblioteca consta de todas las librerías de 20-sim.
- **Graphical Editor / Equation Editor:** Este es el gran espacio en blanco en el medio derecho. En este editor puedes crear modelos gráficos e ingresar ecuaciones.
- **Output tab / Process tab / Find tab:** Es la parte de abajo a la derecha. La pestaña de salida muestra los archivos que se abren y almacenan. La pestaña de proceso muestra los mensajes del compilador. La pestaña de búsqueda muestra los resultados de búsqueda.
- **Interface tab / Icon tab:** Esta es la parte inferior izquierda. La pestaña de interfaz muestra la interfaz de un modelo seleccionado. Al hacer doble clic se abrirá el editor de interfaz. La pestaña icono muestra el icono de un modelo seleccionado. Al hacer doble clic se abrirá el editor de iconos.

En el simulador se puede ejecutar una simulación y mostrar los resultados en plots y animaciones. El simulador contiene varias herramientas para analizar los resultados de dicha simulación. A continuación en la figura 4.3, se muestra el simulador.

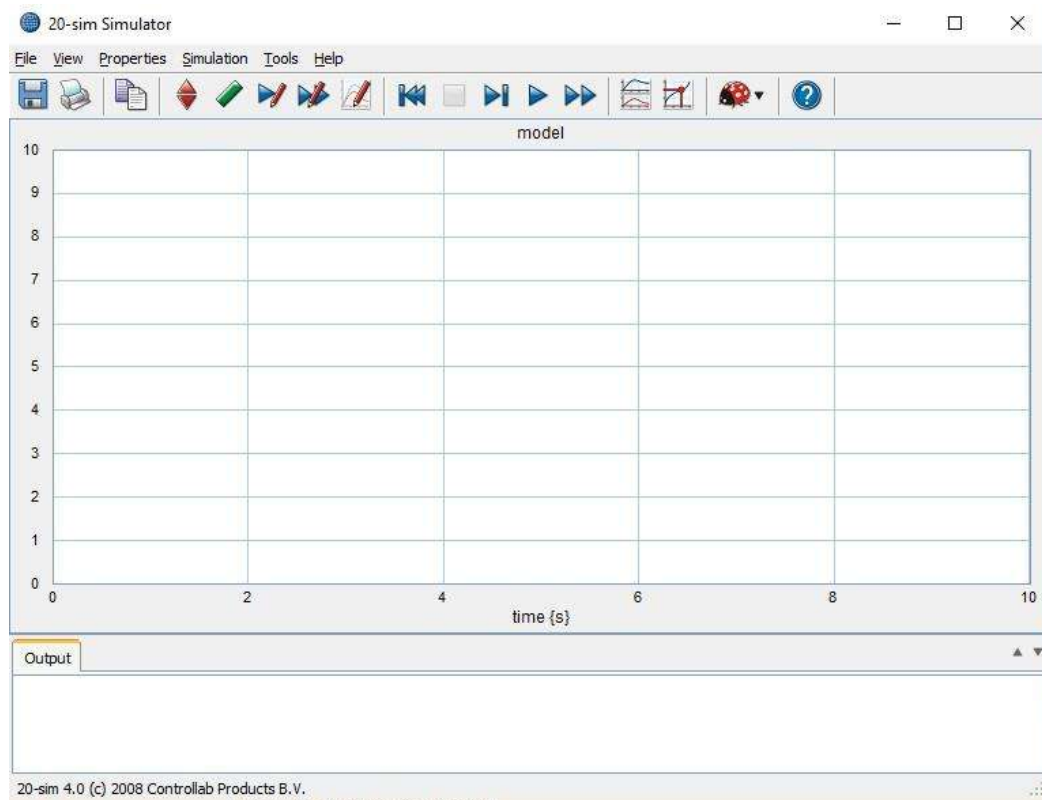


Figura 4. 3.- Ventana Simulador en 20-Sim.

Para abrir la ventana de simulador, se tiene que ir a la barra de la parte de arriba del Editor, y dar clic en el botón start simulation (iniciar simulación). Como se había denota, los resultados se muestran en trazos (plots) y animaciones. Estos plots son totalmente configurables con diferentes estilos de líneas, fuentes de todo tipo, estilos de marcadores y estilos de fondos. En la figura. 4.4 y 4.5 se muestra un modelo tutorial de la librería 20-Sim y su grafica resultante. Esto para demostrar gráficamente los trazos (plots) que nos arroja el simulador al ejecutar en la ventana de simulador dando en el botón de iniciar simulación (start simulation).

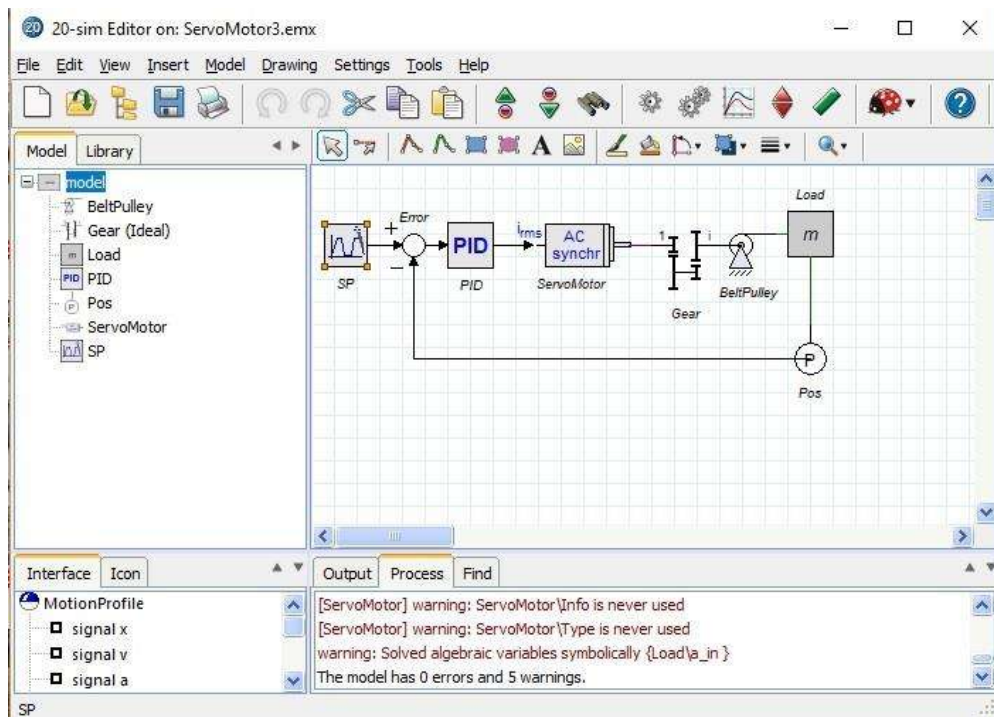


Figura 4. 4.- Modelo tutorial de un ServoMotor.

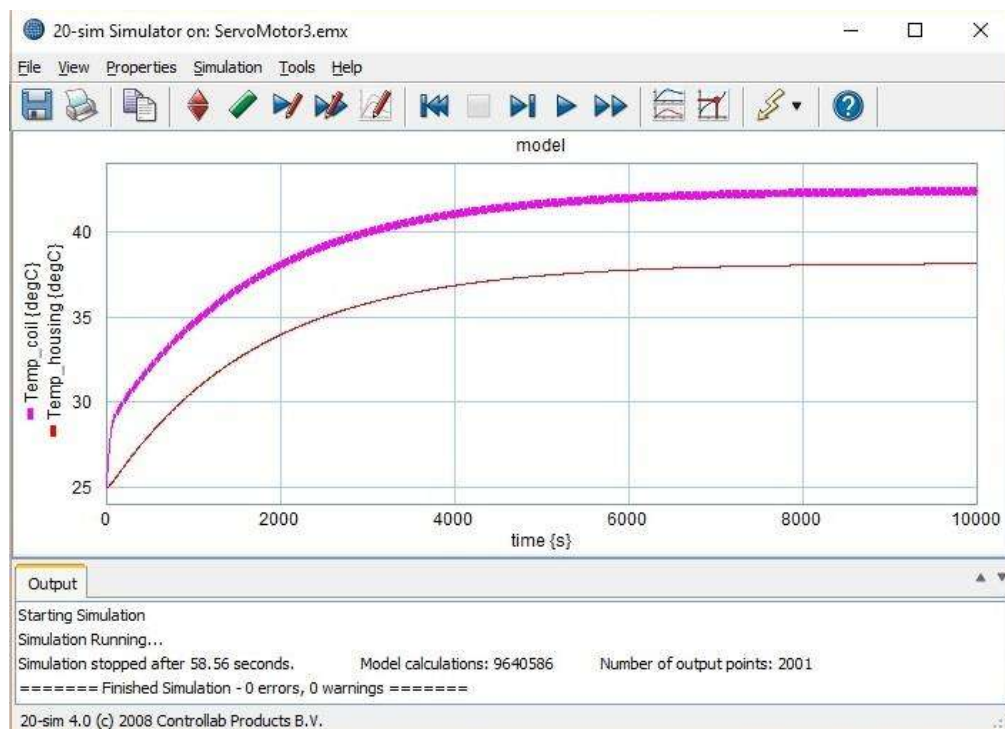


Figura 4. 5.- Plots que se obtiene al simular el modelo tutorial ServoMotor.

4.2.2 The Library (Biblioteca)

En 20-Sim, crear modelos sólo requiere de unos pocos clics y de arrastrar elementos desde la biblioteca y soltarlos en el Editor gráfico. El modelo se construye de la misma manera que se dibujaría un esquema de ingeniería. 20-Sim te permite representar modelos ya sea en diagrama de bloques o diagramas icónicos. En la figura 4.6, se muestra donde se localiza el apartado de la biblioteca (Library) en 20-Sim.

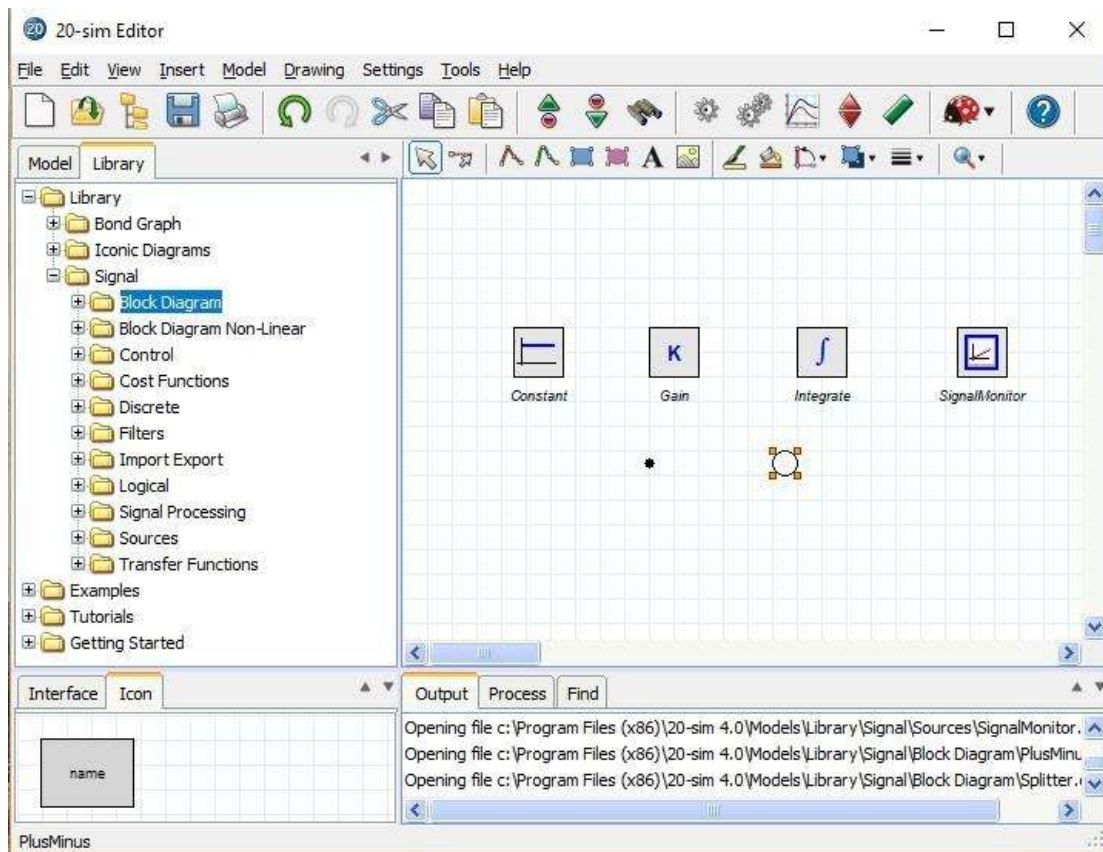


Figura 4. 6.- Pestaña donde se localiza la biblioteca (Library) 20-Sim.

Todos los modelos en 20-Sim se almacenan en archivos con la extensión .emx. La biblioteca (Library) contiene 4 secciones:

- *Bond Graph*: Elementos bond graph.
- *Iconic Diagrams*: Componentes físicos.
- *Signal*: Diagrama de bloques y elementos de fuentes.

- *Tutorial:* Ejemplo de modelos que te muestran como ejecutar varias tareas en 20-Sim.

4.2.3 Diagrama de Bloques

Los diagramas de bloques permiten representar gráficamente las relaciones matemáticas entre las señales en un sistema. Son especialmente adecuados para modelar sistemas de control. 20-Sim proporciona una gran biblioteca de elementos de diagrama de bloques, estos se muestran en la ventana de Editor por medio de iconos. Para crear un modelo utilizando diagrama de bloques, simplemente se arrastran los elementos al Editor gráfico y se establecen las conexiones adecuadas entre ellos. En la figura 4.7, se muestra un modelo básico utilizando diagrama de bloques.

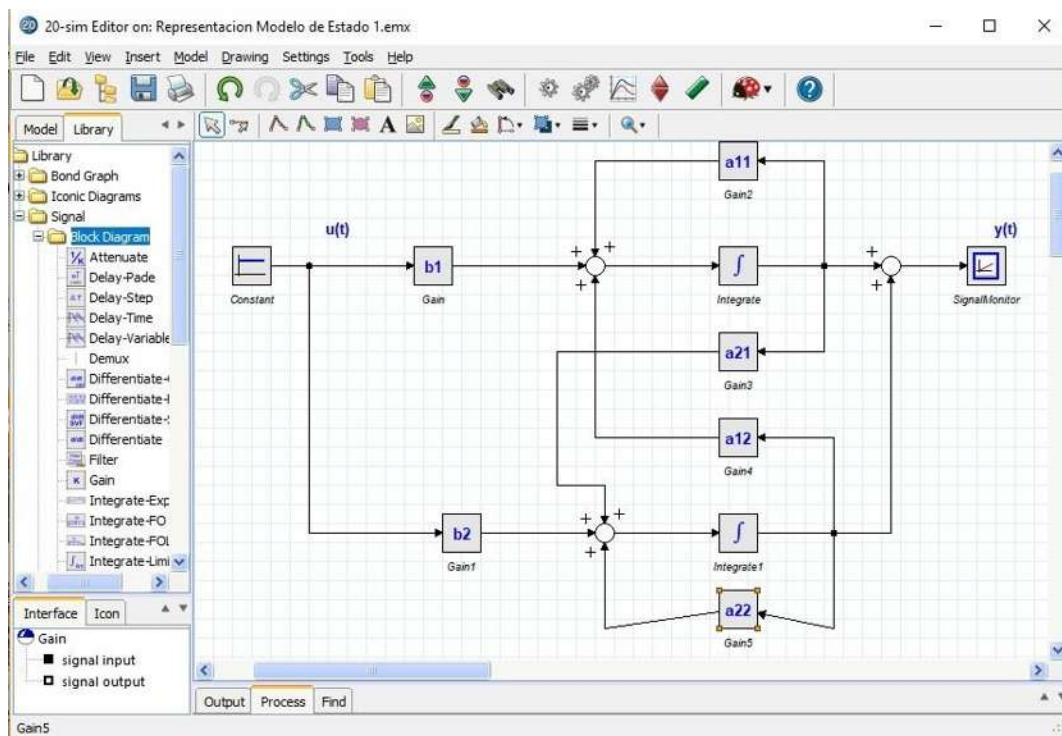


Figura 4. 7.- Esquema 20-Sim diagrama de bloques.

20-Sim cuenta con una extensa biblioteca de elementos de diagrama de bloques, tales como elementos lineales, no lineales, discretos y fuentes de alimentación. La base de los

elementos de diagrama de bloques es el uso de señales de entrada (input) y salida (output), permitiendo crear elementos definidos por el usuario con un número arbitrario de señales de entrada y salida.

4.3 Modelo Completo a Simular en 20-Sim

A continuación se muestra en la figura 4.8, el modelo general de una central de columna de agua oscilante representado en diagrama de bloques de cada una de sus etapas como son ola incidente, cámara de captura, turbina Wells y generador síncrono.

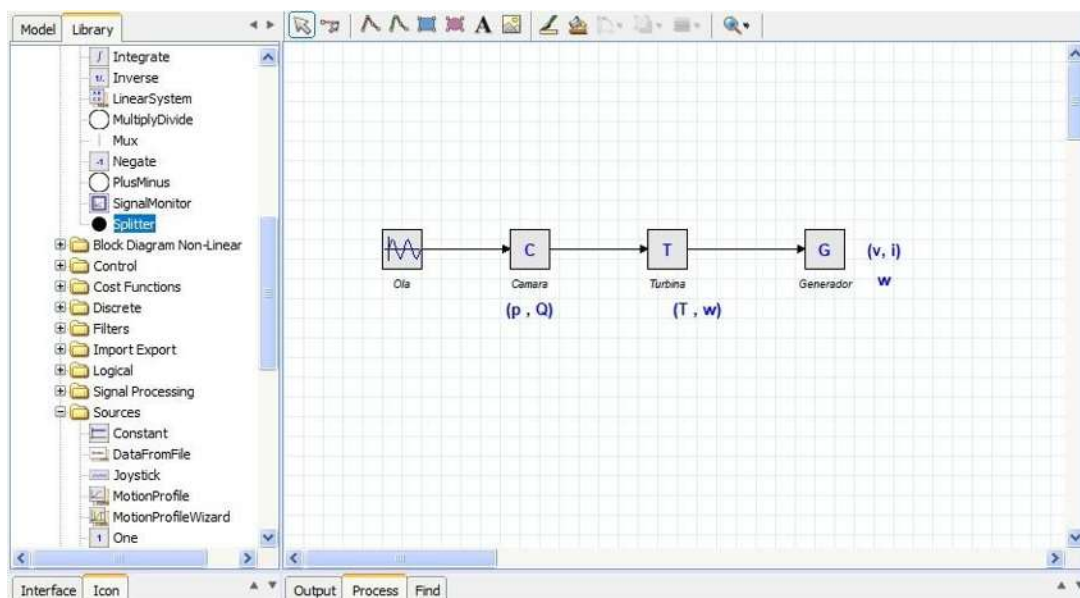


Figura 4. 8.- Modelo completo de un OWC en 20-Sim.

Donde obtendremos las gráficas correspondientes de cada una de las etapas a simular. En la etapa de la turbina Wells, se obtendrá el par mecánico requerido para accionar nuestra máquina síncrona y la velocidad angular. En la parte del generador síncrono, se obtendrá los resultados mostrando los voltajes trifásicos así como sus corrientes de cada fase y al aplicar el método de simplificación denominado Transformación Park, para así obtener las nuevas variables de voltajes y corrientes y la velocidad angular de la máquina.

4.4 Ola incidente de una central OWC

Para la etapa de la ola incidente, se utilizó la teoría lineal de Airy, representando así una ola incidente como una señal fundamental seinoideal como se muestra en la figura 4.9.

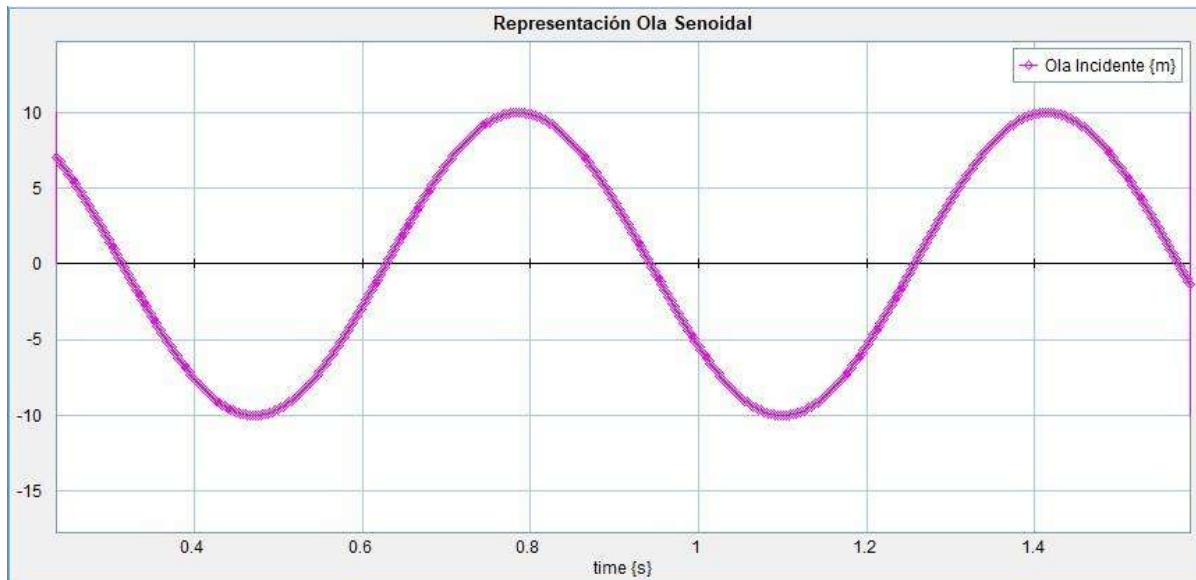


Figura 4. 9.- Representación ola incidente en 20-Sim.

Para el modelado de la cámara de captura, se rectificó la ola incidente sinusoidal obteniendo una semi-onda completa con ciclo positivo. Esto con el fin de obtener el par mecánico y la inercia para accionar la turbina Wells.

Eliminando la parte negativa de la ola incidente en el software 20-Sim, se evitó que la turbina con el valle de la ola pierda impulso e incluso hasta deje de girar.

Obteniendo el sistema realizado para dicha rectificación en diagrama de bloques mostrado en la figura 4.10.

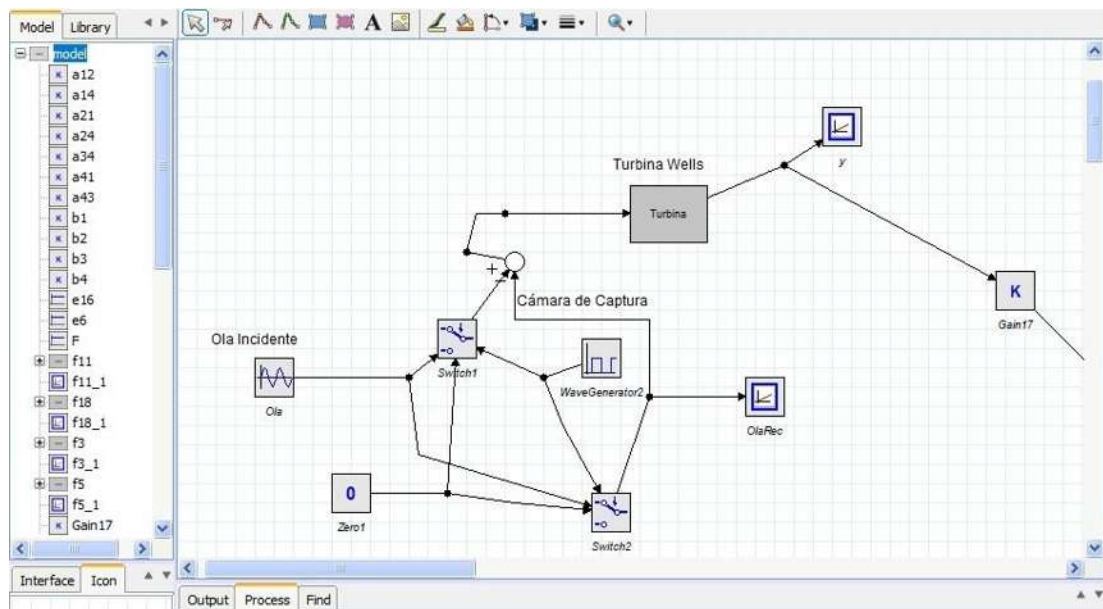


Figura 4. 10.- Diagrama de bloques etapa rectificación de Ola Cámara de Captura.

Obteniendo así, las gráficas de la figura 4.11 con la ola incidente completa a la entrada y la ola rectificada completa con el semi-ciclo positivo a la salida.

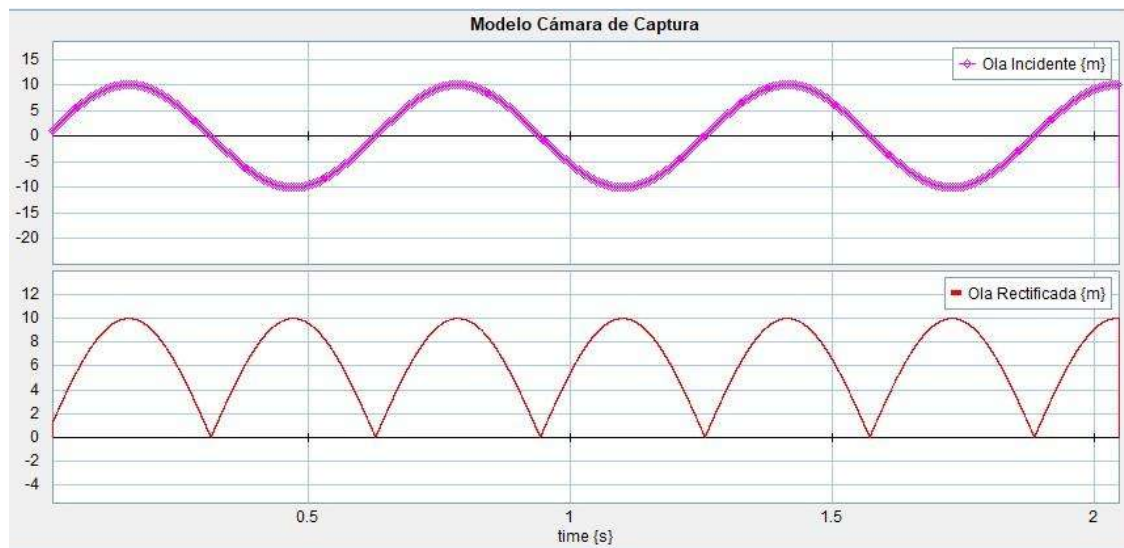


Figura 4. 11.- Resultados Ola incidente y Ola de salida rectificada en 20-Sim.

4.5 Simulaciones Turbina Wells

Al contar con la parte positiva de la ola incidente y solucionando el efecto de la parte negativa ya que se corría el riesgo de que la turbina pierda velocidad o incluso deje de girar, se obtiene la inercia necesaria y fuerza de empuje para accionar nuestra turbina Wells. En la figura 4.12, se muestra el par mecánico (T) de la turbina Wells obtenido del software 20-Sim.

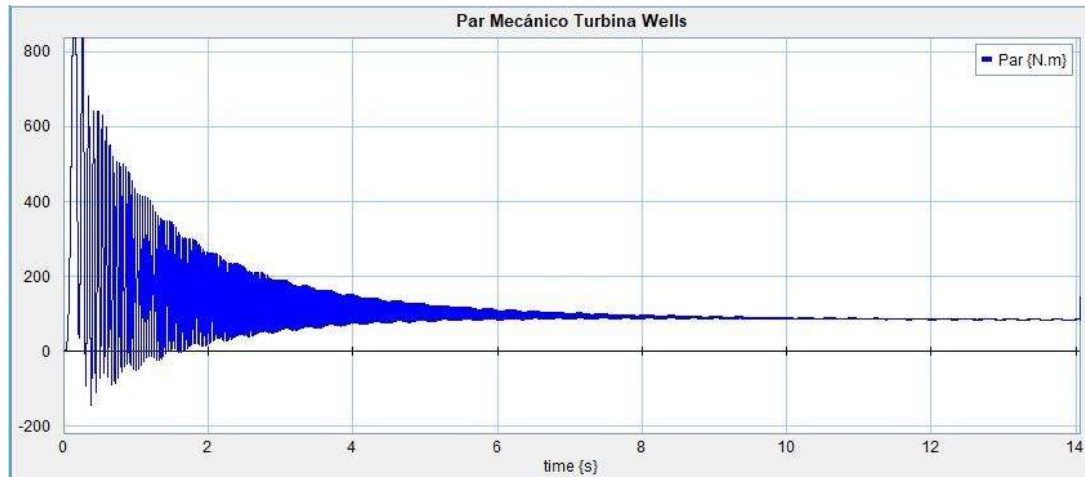


Figura 4. 12.- Resultados Par mecánico T (N.m) de la turbina Wells.

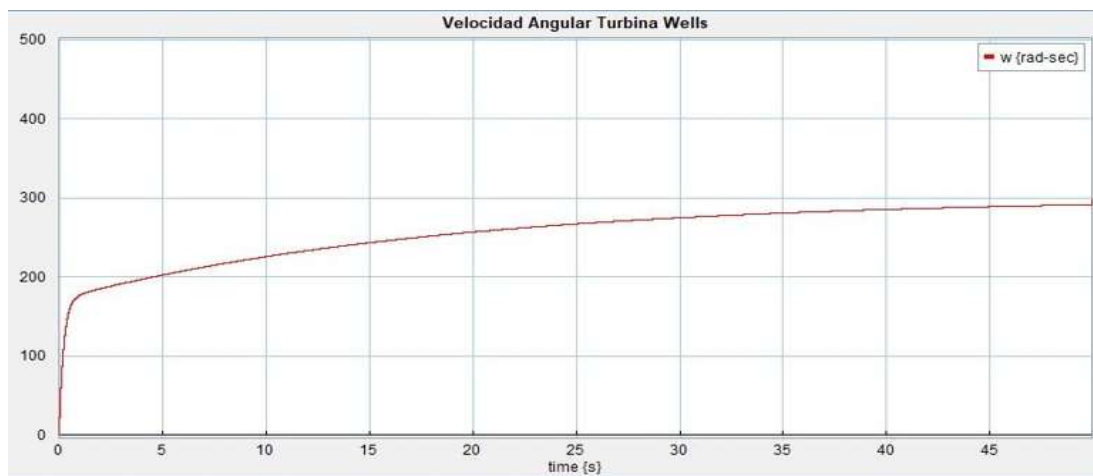


Figura 4. 13.- Resultados Velocidad angular de la turbina Wells en (rad-sec).

En la figura 4.13, se tiene la velocidad angular de la turbina tipo Wells que acciona al generador síncrono, se puede observar que al momento que la velocidad se estabiliza, las oscilaciones del par mecánico de arranque también logran llegar a un estado estable.

4.6 Modelo Diagrama de Bloques Generador Síncrono

En este apartado, se modeló la máquina síncrona utilizando 20-Sim con el método de diagrama de bloques, partiendo del modelo matemático obtenido de la sección 3.6.1.

En esta investigación, se asume que los voltajes que se obtienen a la salida del generador síncrono son de un sistema totalmente balanceado. En la figura 4.14, se tiene los voltajes trifásicos de la máquina síncrona obtenidos del modelo diagrama de bloques de 20-Sim.

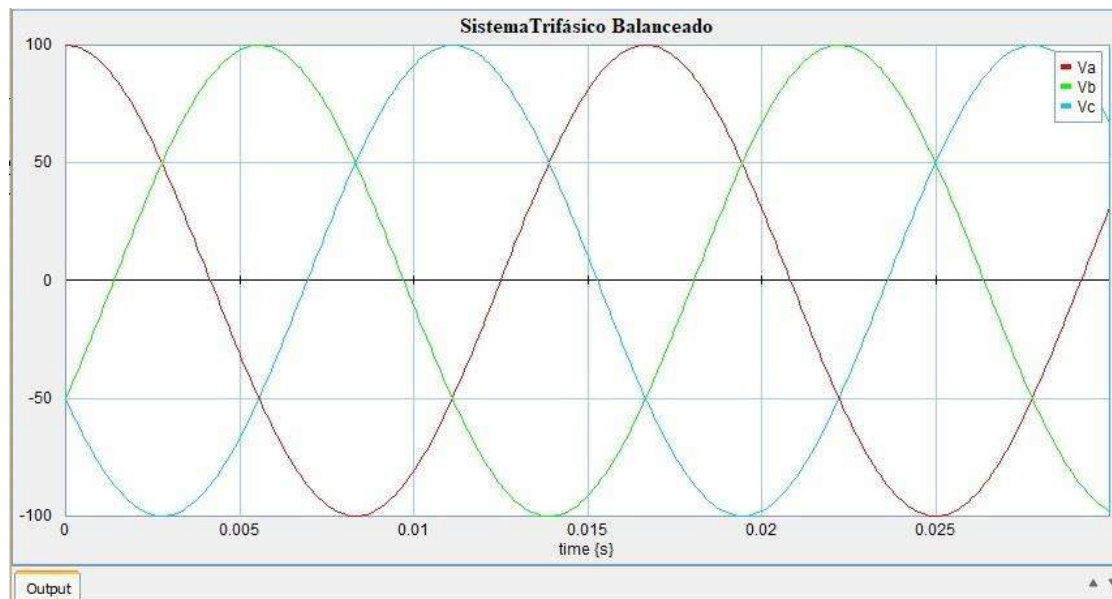


Figura 4. 14.- Sistema trifásico balanceado máquina síncrona en 20-Sim.

Para simplificar el análisis de la máquina síncrona, se utiliza el método mencionado en la sección 3.6.2 denominada Transformación Park. La Transformación de Park permite proyectar las variables variantes en el tiempo trifásicas del estator tales como voltajes, corrientes, acoplamiento de flujos magnéticos y así, proyectarlas a un nuevo marco de referencia $dq0$.

Estas nuevas variables tienen como referencia al eje del rotor de la máquina y están en movimiento, pero ahora se convierten en valores constantes. A continuación en la figura 4.15 se muestra el diagrama de bloques basado en la ecuación (3.36) y (3.40) utilizada en 20-Sim para realizar dicha transformación de variables de $a-b-c$ a $d-q-0$.

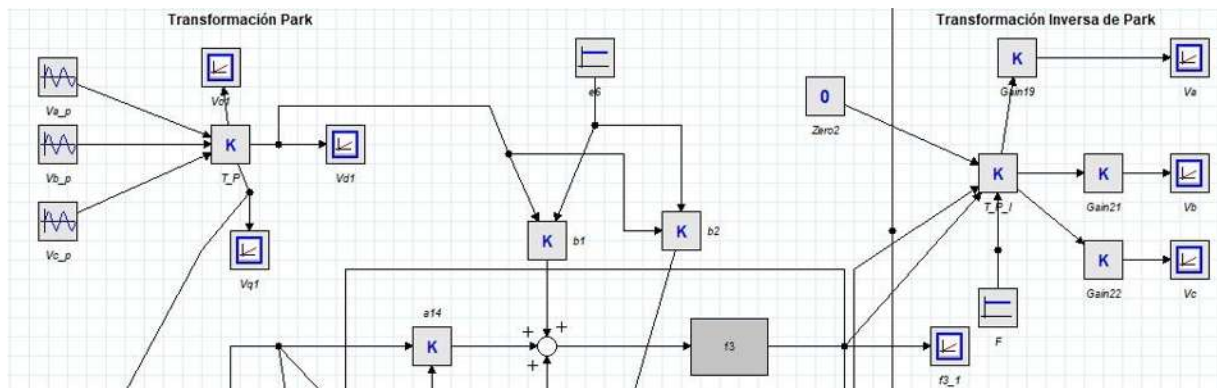


Figura 4. 15.- Diagrama de bloques Transformada de Park y Transformada Inversa de Park.

Los bloques V_a , V_b y V_c son los que se obtienen a la salida del generador síncrono y generan una onda sinusoidal balanceada, tienen la misma amplitud y frecuencia pero con un desfase de 120° grados entre sí. Estos tres voltajes van conectados al bloque de ganancia k o T_P donde se tiene la ecuación (3.36) de la Transformación de Park que se va encargar de obtener las nuevas variables proyectadas con respecto al eje del rotor y son valores constantes.

A su vez, en la figura 4.15 se puede observar que a la salida del bloque de la Transformación de Park T_P se conectan a tres bloques con el nombre $Vd1$, $Vq1$ y $V01$. En estos tres bloques de señal de monitor se obtienen los nuevos voltajes al pasarlos del eje de referencia $a-b-c$ a $d-q-0$.

Por último, para pasar de nuevo al marco de referencia trifásico balanceado $a-b-c$, se aplica la Transformada de Park inversa ecuación (3.40) de la sección 3.6.2 donde a la salida de T_{P_I} , se conectan a la entrada de las señales de monitor y volviendo así al marco de referencia de entrada balanceado trifásico $a-b-c$.

En la figura 4.16, se muestra la gráfica con las señales de voltaje del generador síncrono al transferirlas del eje trifásico $a-b-c$ a $d-q-0$.

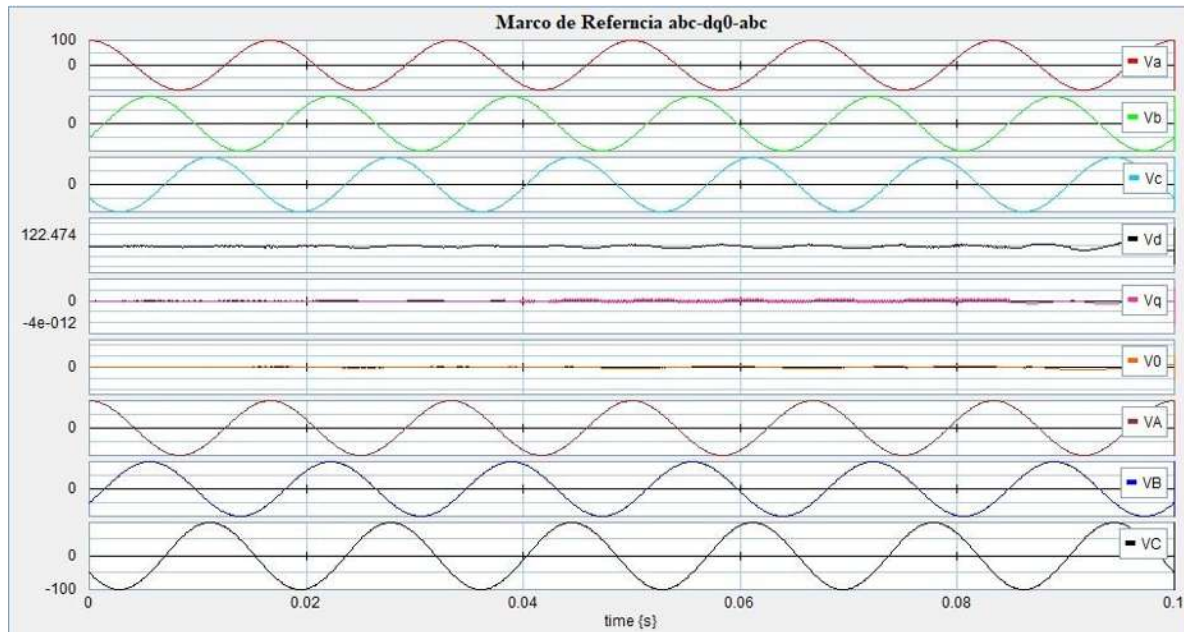


Figura 4. 16.- Resultados proyección marco de referencia abc a $dq0$ y $dq0$ a abc .

Como se observa en la figura 4.16, al referenciar las variables variantes en el tiempo de entra del estator abc , al marco de referencia $dq0$ con respecto al rotor se obtienen valores de voltajes constantes de corriente continua. El voltaje en $V0$ se puede omitir ya que no existen componentes en el eje 0 . También, se muestra la transformación del eje $dq0$ al eje trifásico balanceado abc , esto al aplicar la Transformación Inversa de Park anteriormente mencionado. A continuación en la figura 4.17 se muestra el diagrama de bloques completo del generador síncrono modelado en 20-Sim utilizando las ecuaciones (3.75)-(3.79) presentadas en el capítulo 3.

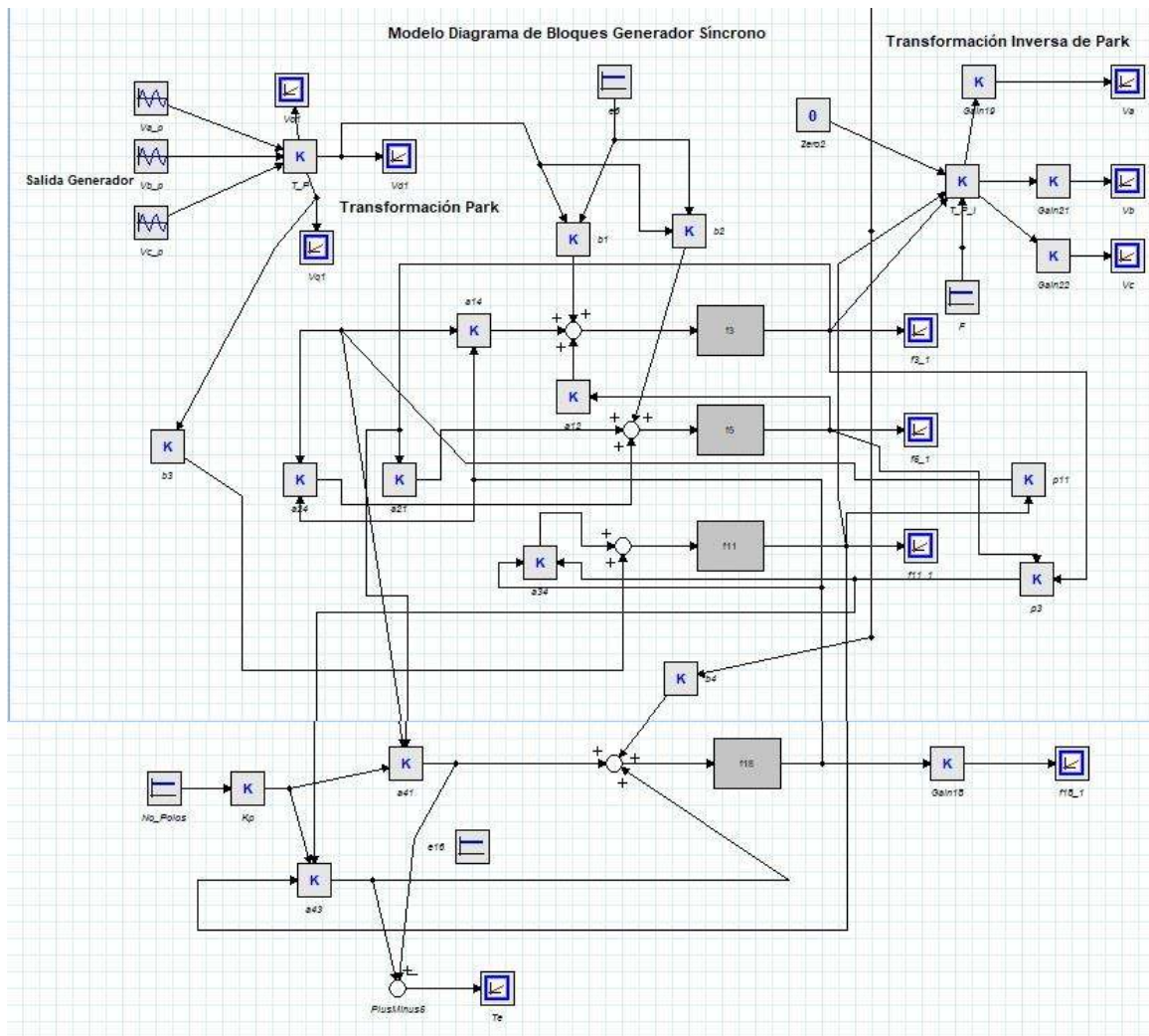


Figura 4. 17.- Diagrama de bloques generador síncrono 20-Sim.

Como se observa en la figura 4.17, se incluye el diagrama de bloques de la Transformación de Park, donde la salida de ganancia $K(T_P)$ se conecta a la entrada del bloque $K(b1)$, el bloque con nombre de (e6) se utiliza para ingresar un valor constante, representando así el voltaje en el devanado de campo V_F .

En la figura 4.18 se muestra como el bloque (e6) se conecta a la entrada de ganancia $K(b2)$ y este es multiplicado.

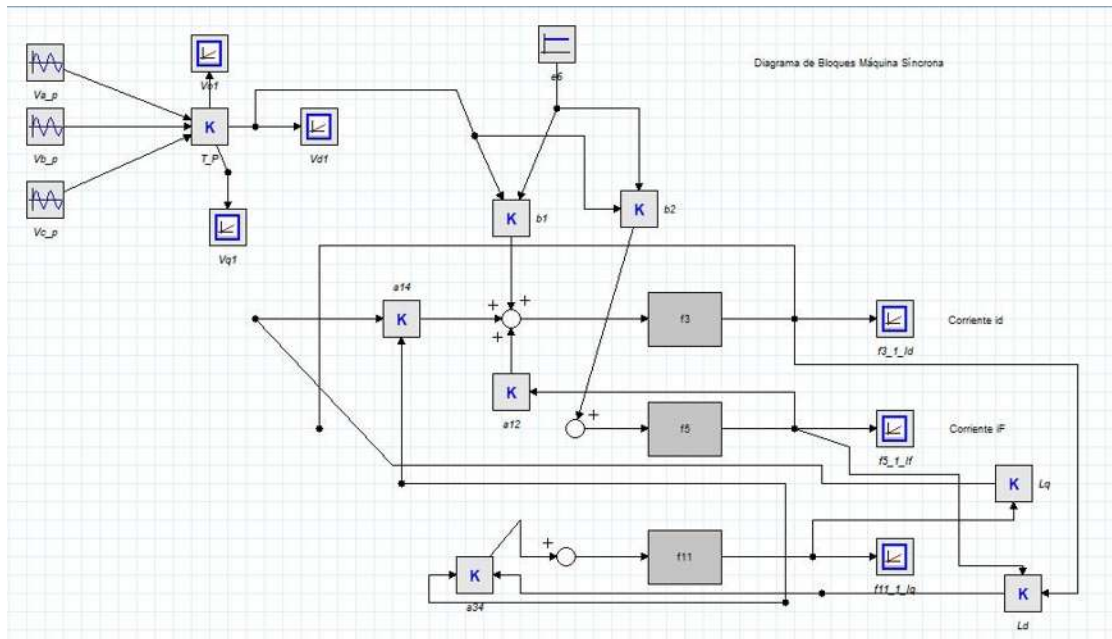


Figura 4. 18.- Diagrama de bloques para obtener la corriente i_F en 20-Sim.

Donde $(b1)$ es el producto de los voltajes V_d y V_F por la matriz de inductancias que se estableció en la ecuación (3.77). Como se observa en la figura 4.18, de acuerdo a la ecuación (3.78), los bloques de salida $K(b1)$, $K(a14)$ y $K(a12)$ se conectan a un (sumador-restador). Las tres señales agregadas al sumador se conectan a un bloque que tiene las características de un sistema de control de lazo cerrado denominado $(f3)$, donde la salida de este sistema dependerá de las condiciones y correcciones realizadas por la retroalimentación que viene siendo el bloque de $K(a11)$, en la figura 4.19 se muestra el subsistema $(f3)$.

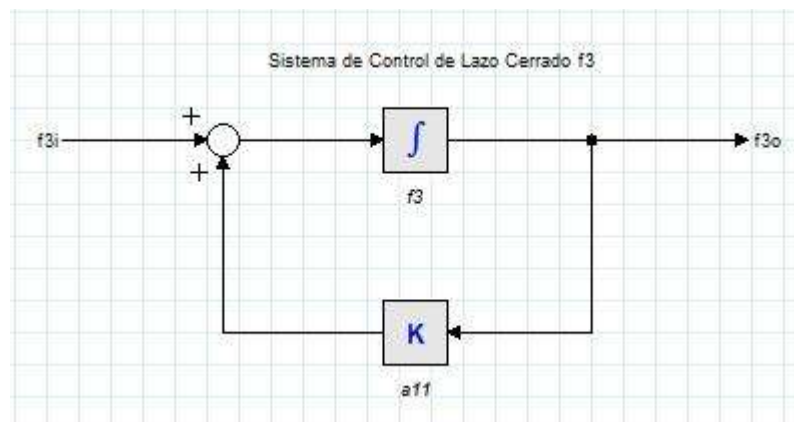


Figura 4. 19.- Sistema de control de lazo cerrado $f3$.

Los bloques con las variables $(f5)$, $(f11)$ y $(f18)$ se toman directamente de la ecuación (3.76) donde observamos que son dos matrices diferentes, una representa las inductancias y la otra las resistencias. El bloque $(f5)$ representa la corriente de campo i_F , f_{11} representa la corriente i_q , por último el sistema $(f18)$ representa la velocidad angular ω en rad/seg del generador síncrono. En la figura 4.20, se observan las corrientes de cada fase i_a , i_b e i_c de la máquina síncrona cuando está en operación.

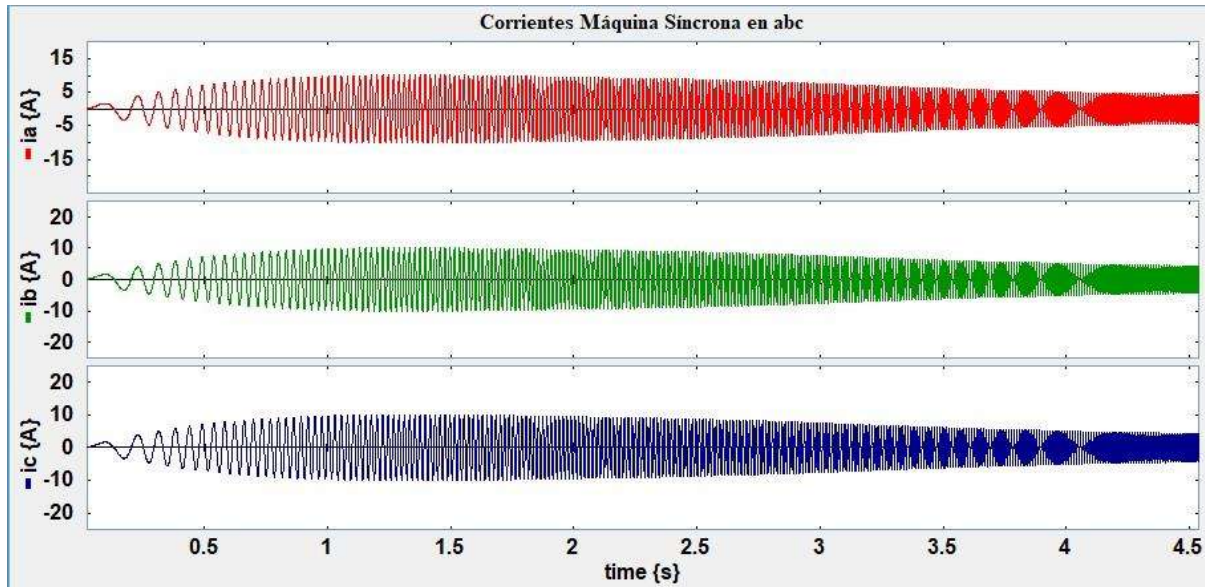


Figura 4. 20.- Resultados de corrientes trifásicas de la máquina síncrona 20-Sim.

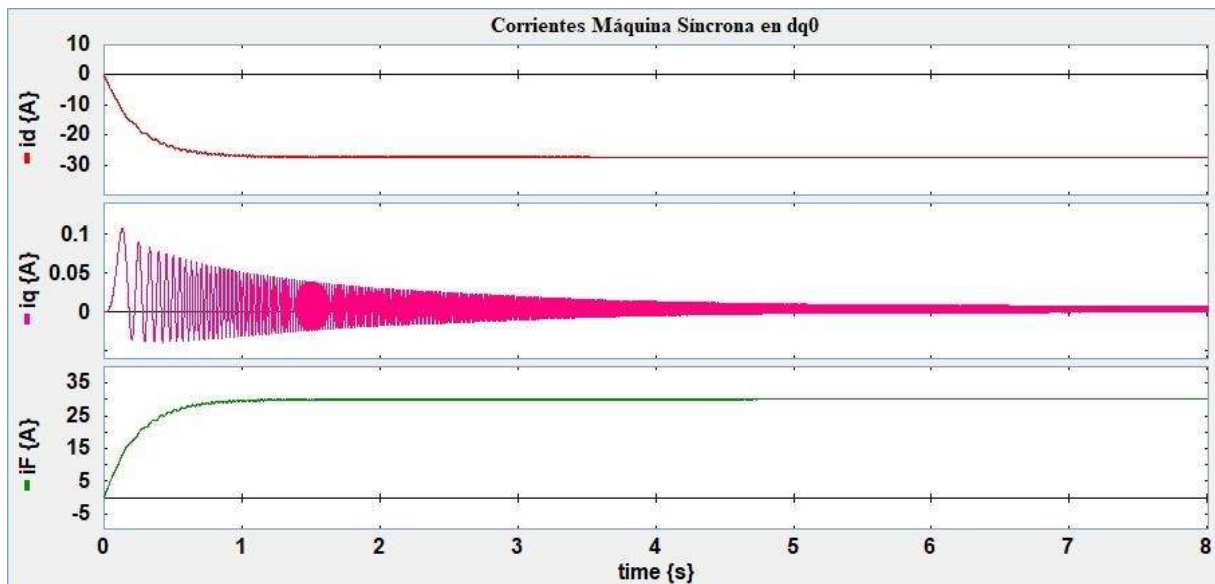


Figura 4. 21.- Resultados de corrientes en el eje dq0 al aplicar Transformada de Park.

El objetivo de la Transformación de Park es de obtener un nuevo marco de referencia $dq0$ con un nuevo set de variables constantes, como se muestra en la figura 4.21 al aplicar a las corrientes trifásicas del sistema $a-b-c$ variantes en el tiempo. A un determinado tiempo, las corrientes i_d , i_q e i_F se hacen constantes.

Por último, se procede a obtener la velocidad angular y el par eléctrico de la máquina síncrona con su respectiva señal de salida que se muestra en la figura 4.22.

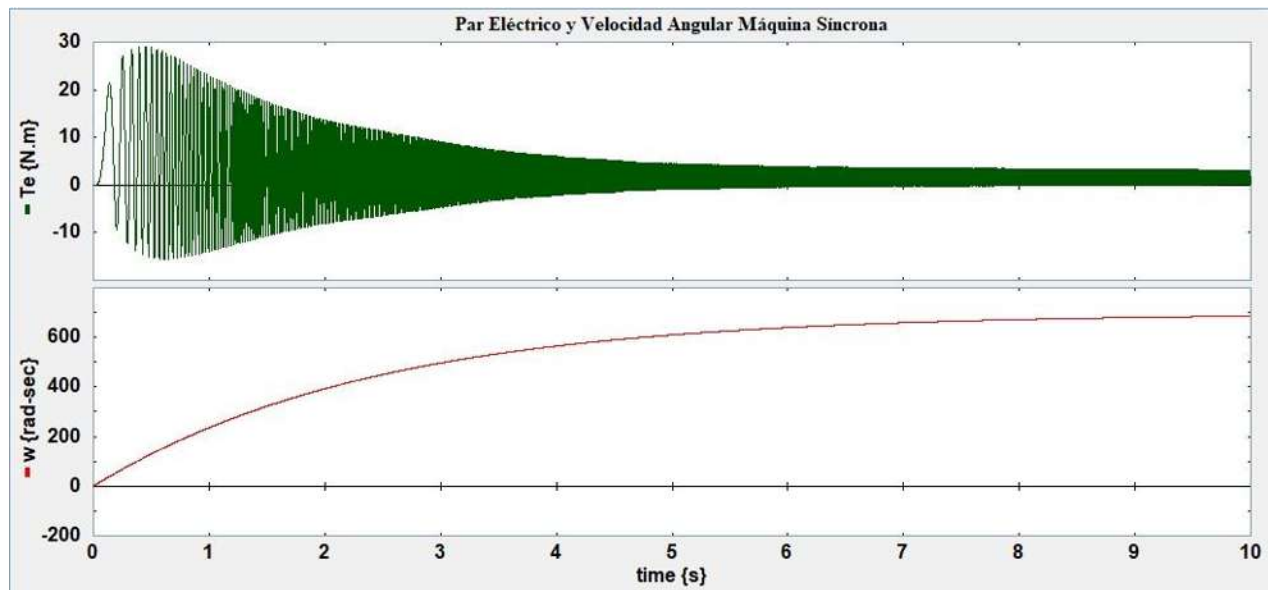


Figura 4. 22.- Resultados Par T_e y velocidad angular w del generador 20-Sim.

La relación entre el par y la velocidad se puede notar en la figura 4.22, cuando la máquina síncrona empieza operar se presenta las oscilaciones resultantes debido al par eléctrico y a medida que la máquina alcanza a estabilizarse, el par eléctrico disminuye considerablemente alcanzando su estado constante.

Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

De los estudios y análisis desarrollados en la presente investigación de esta tesis, permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- Se modeló con éxito en diagrama de bloques el convertidor Columna de Agua Oscilante (OWC) utilizando 20-Sim de forma satisfactoria y se demostró que este tipo de sistema cuenta con un sencillo arreglo de equipo turbina-generador para la conversión de energía de las olas a energía eléctrica.
- También cabe mencionar que 20-Sim es un software fácil de utilizar y navegar, ya que la interfaz gráfica de las pantallas principales y las librerías de los elementos son de fácil acceso. Comparado con MATLAB que en sí, ya es una herramienta de modelado y simulación muy poderosa pero la interacción usuario-software es más complicado.
- Se modeló y simuló cada una de las etapas que forman parte de este tipo de convertidor columna de agua oscilante: ola incidente a energía neumática y de neumática a energía mecánica, obteniendo con éxito los gráficos de cada una de las etapas mencionadas tales como: par mecánico de turbina, par eléctrico del generador, velocidad angular de la turbina y generador.
- Se detalla la obtención de los parámetros matemáticos del generador síncrono en su estado simétrico balanceado, donde al aplicar la Transformación de Park se obtienen un nuevo marco de referencia giratorio con respecto al rotor llamado $dq0$, donde se logró demostrar la efectividad de la Transformación de Park.

- Obteniendo así, el marco de referencia $dq0$ permitiendo observar fácilmente el comportamiento de todas las variables que intervienen, además de eliminar la dependencia de las variables a la posición del rotor.
- Además, se demostró que tan viable es este tipo de generación de energía alterna en zonas con un poder de ola adecuado. Siendo los que menos contaminan el medio marino ya que estas están en la orilla del océano, en comparación con otro tipo de tecnologías undimotriz o dispositivos de corrientes marinas, que suelen estar dentro del océano o anclados al lecho marino y así, contaminan el medio ambiente al estar en contacto con el océano.
- Se demostró que este tipo de central con energía undimotriz pueda que aún no tenga un mayor impacto de generación en comparación con otras fuentes alternas de energía eléctrica como eólica, solar o hidroeléctrica, pero puede ser de mucha ayuda en zonas rurales o islas aisladas a la red eléctrica nacional. Pueden entrar en apoyo incluso cuando se tenga algún inconveniente con las centrales de energía convencionales.

5.2 Recomendaciones

Para trabajos futuros, se recomienda desarrollar un prototipo de laboratorio con la finalidad de poder hacer un análisis más a fondo tanto en la etapa de conversión de energía de las olas a energía neumática, con la finalidad de observar las variaciones de presión dentro de la cámara de captura.

Así, mejorar el rendimiento y eficiencia ya que suelen ser menores en comparación con las otras fuentes de energía alterna.

Realizar un estudio del tipo de turbina aerodinámica y cual mejoraría la eficiencia en la etapa de transformación mecánica-eléctrica.

A su vez, se podría eliminar las pérdidas mecánicas en el devanado del rotor de la maquina síncrona ya que al existir anillos deslizantes y rodamientos, se crean las pérdidas por

efecto joule (perdidas mecánicas). Se podría ver si es posible eliminar estas pérdidas con otro tipo de generador síncrono de imanes permanentes. Se recomendaría realizar un análisis completo tanto en el modelo matemático como la simulación de esta.

Bibliografía

- [1] J. A. C. G. J. M. P. H. Roque Calero Pérez, «Libro Educación Ambiental. Capítulo 22. Energía del Oleaje.,» 5 Abril 2015. [En línea]. Available: <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo17.pdf>.
- [2] A. S. S. J. H. W. M. T. P. J. T. M. Lewis, Ocean Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2011.
- [3] D. A. S. B. Contreras, «Aprovechamiento de Energía Renovable,» 15 Abril 2015. [En línea]. Available: www.Ingenieriarenovableuabcs.blogspot.mx/P/página-de-.
- [4] V. E. Collaborations, «Renewable Energy and Other Alternative Energy Sources,» Science and Technology Departmente at JMU, Virginia, Georgia, 2012.
- [5] G. P. I. C. H. R. P. U. F. R. G. D. Julieta C. Schallenberg Rodríguez, «Electricidad,» de *Energías Renovables y Eficiencias Energéticas*, Canarias, Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008, pp. 28-29.
- [6] EEPEC, «La obtención de la electricidad,» *La Tecnología Hidroeléctrica*, pp. 6-7, 2012.
- [7] T. Wildi, «Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia,» de *Capítulo 16: Generadores Síncronos*, Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2006, pp. 343-347.
- [8] A. M. M. y. J. B. García, «Centrales Eléctricas I,» Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos, C. y P., Cantabria, España, 2010.
- [9] A. R., «La Producción De La Energía Eléctrica,» Mexico, 2008.
- [10] «Unidad 5: Energías No Renovables,» USA, Mc Graw Hill, pp. 86-97.
- [11] BioEnciclopedia, «Combustibles Fósiles,» 17 Enero 2014. [En línea]. Available: <http://www.bioenciclopedia.com/combustibles-fosiles/>.
- [12] MathPro Inc., «An Introduction to Petroleum Refining and The Production of Ultra Low Sulfur Gasoline,» *Energy Economics*, p. 38, 2011.
- [13] J. C. Ayer, «Non-Renewable Energy Sources,» *Sustainability*, p. 11, 2010.
- [14] D. Page, «Los Países Con Más Reservas Y Los Que Más Producen,» 27 Junio 2013. [En línea]. Available: <http://expansion.com/2013/06/25/empresas/energia/1372172739.html>.

- [15] PediaPress, «Energía Nuclear: Fundamentos, Reactores y Residuos,» pp. 1-2, 2011.
- [16] U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy, Science and Technology, «The History of Nuclear Energy,» pp. 3-4, 2014.
- [17] D. T. Jackson, «Renewable Energy Sources,» Centre for Environmental Strategy, University of Surrey UK, Guilford, 2007.
- [18] T. Jackson y R. Lofstedt, «Renewable Energy Sources,» Centre for Environmental Strategy, Guildford, United Kingdom, 2000.
- [19] O. E. L. A.E.I.D.I., «Fuentes de Energía Renovables, Fuentes de Desarrollo Sostenible,» Baywind Energy Co-operative Limited, Cumbria, UK, 1999.
- [20] S. S. Miño, «Hidroelectricidad,» de *Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones*, Quito, 2003, pp. 117-118.
- [21] Canada Electricity Association, «Energy is All Around Us,» *Renewable Resources Basics*, pp. 2-3, 2010.
- [22] Fundación Caja Roja, «Energía Hidráulica,» *Energías Renovables*, pp. 64-65, 2005.
- [23] UNESA, «Centrales Hidráulicas de Bombeo,» *Estudio Hidrológico*, pp. 36-37, 2006.
- [24] S. S. Miño, «Potencial Eléctrico,» de *Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones*, Quito, 2003, pp. 118-119.
- [25] D. Fernández y R. Arsenio, «Elementos de Las Centrales Hidroeléctricas,» de *Centrales Hidráulicas*, Cantabria, Universidad de Cantabria España, pp. 32-35.
- [26] Ambientum, «Turbinas y Otros Convertidores de Flujo,» 2009. [En línea]. Available: http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/Turbinas_y_otros_convertidores.asp.
- [27] Fernández, Pedro, «Departamento de Ingeniería Eléctrica,» 13 Enero 2014. [En línea]. Available: http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf.
- [28] P. Fernández, de *Turbinas Hdráulicas*, Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, 2014, pp. 4-5.
- [29] P. Fernández, «Turbinas Kaplan y Bulbo,» de *Capítulo 5: Turbinas Hidráulicas*, Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, 2014, pp. 89-90.
- [30] A. Marchegiani, de *Turbinas Pelton*, Comahue, Departamento de Mecánica Aplicada Laboratorio de Máquinas Hidráulicas, 2004, pp. 2-3.
- [31] P. Fernández, «Capítulo 3: Turbina Pelton,» de *Máquinas Hidráulicas*, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, 2014, pp. 35-36.

- [32] A. Marchegiani, de *Turbinas Pelton*, Comahue, Departamento de Mecánica Aplicada Laboratorio de Máquinas Hidráulicas, 2004, pp. 5-6.
- [33] P. Fernández, de *Capítulo 1: Turbina Hidráulica*, Catanbria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, 2004, pp. 7-8.
- [34] D. M. Ballesteros, «Guía Específica de Trabajo Sobre "Energía Solar de Concentración",» *Investiga I+D+i 2013/2014*, pp. 1-2, 2013.
- [35] Tecun, «Energía Térmica,» 2011. [En línea]. Available: www.tecun.com/emdt/110725/RinconTecnico.pdf.
- [36] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, «Energía Solar,» de *Libro Energía*, Las Palmas de Gran Canaria, Fondo Europeo de Desarrollo Regional, 2003, pp. 453-454.
- [37] Secretaria de Energía Gobierno de Argentina, Energías Renovables 2008 - Energía Solar, Capital Federal: Dirección General de Cooperación y Asistencia Financiera, 2008.
- [38] G. España, «Energía Solar Térmica de Concentración,» *Perspectiva Mundial*, pp. 16-21, 2009.
- [39] Green Energy Latin America, «Energía Solar Fotovoltaica,» 25 Noviembre 2016. [En línea]. Available: www.greenenergy-latinamerica.com/es/energia-solar-solar-fotovoltaica-197.
- [40] J. A. González, Y. Matsumoto y M. A. Acevedo, «Energía Solar Fotovoltaica,» *Energías Alternas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México*, pp. 17-18, 2010.
- [41] Biomass Users Network (BUN-CA), «Manuales Sobre Energía Renovable: Solar Fotovoltaica,» Medio Ambiente Mundial (GEF), San Jose, Costa Rica, 2002.
- [42] Brial, 18 Enero 2017. [En línea]. Available: <http://www.brial.es/eolica>.
- [43] Marimar, 04 Marzo 2017. [En línea]. Available: www.erenovable.com/aerogeneradores-eolicos/energia-eolica.
- [44] Departamento de Industria, Gobierno Vasco, «Capítulo 3- La Energía Eólica: Ventajas e Inconvenientes,» *La Energía Eólica, Aplicaciones y Parques Eólicos*, pp. 8-9, 2007.
- [45] «Energía Eólica Offshore,» 3 Abril 2012. [En línea]. Available: www.eolicaoffshore.com.
- [46] La Asociación Eólica de Catalunya, 3 Abril 2017. [En línea]. Available: www.eoliccat.net/la-tecnologia/principios-de-la-energia-eolica/los-grandes-parques-eolicos-marinos/?lang=eng.
- [47] BioEnciclopedia, «Energía Geotérmica,» 14 Enero 2014. [En línea]. Available: www.bioenciclopedia.com/energia-geotermica/.

- [48] Secretaria de Energía Argentina, «Energía Geotérmica,» *Energías Renovables*, pp. 10-11, 2010.
- [49] «Arkiplus,» 28 Agosto 2014. [En línea]. Available: www.arkiplus.com/electricidad-geotermica.
- [50] C. C. César, «Energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos,» *Tecnología Energética*, pp. 45-46, 2009.
- [51] B. Sandro, «La Energía Geotérmica,» *Geotermia: Una fuente sustentable de energía*, pp. 6-7, 2016.
- [52] J. Fernández, «Energía de la Biomasa,» *Energías renovables para todos: Biomasa*, pp. 2-3, 2010.
- [53] EPEC, «Energía Renovable: Biomasa,» *División Gestión Ambiental*, pp. 5-6, 2009.
- [54] Grupo ENEL, «ENDESA EDUCA,» 26 Abril 2017. [En línea]. Available: www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa.
- [55] F. C. Nuñez y G. A. Fajardo, «Producción y uso de pellets de Biomasa para la generación de energía térmica,» pp. 25-26, 2014.
- [56] Agua Simple, 1 Mayo 2017. [En línea]. Available: <http://www.aguasimple.org.mx/revistav6/index.php/tambien-es-agua/44-energia-oceanica>.
- [57] M. Belén Pérez, «Energía Oceánica,» *Asociación/Colegio Nacional de Ingenieros del ICAI*, pp. 3-4, 2017.
- [58] Á. Álvarez Fernández, «Energías Maremotriz y de Corrientes Marinas,» *Asociación de Ingenieros Navales del Estado*, pp. 3-4, 2012.
- [59] Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales, 1 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/07/01/131927>.
- [60] Bentos Servicios y Equipos Marinos LTDA, «Energía Oceánica,» 10 Abril 2014. [En línea]. Available: http://www.bentos.cl/esp/archivos/Energia_Oceanica.pdf.
- [61] V. Amilcar, «Energías Como Bienes Comunes,» 12 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/12/que-es-la-energia-undimotriz/>.
- [62] Fundación UNAM, 1 Abril 2013. [En línea]. Available: <http://www.fundacionunam.org.mx/ciencia/la-energia-de-las-olas/>.
- [63] Moris Arroes Instalaciones y Proyectos, 14 Octubre 2011. [En línea]. Available: <http://www.morisarroes.es/pelamis-la-serpiente-energetica/>.
- [64] R. Ramos, «Eco Medio Ambiente: Energía Undimotriz,» 24 Octubre 2011. [En línea]. Available:

<http://www.ecomedioambiente.com/energias-renovables/energia-undimotriz/>.

- [65] Instituto Universitario de Estudios Marítimos, de *Los Otros Usos del Mar*, La Coruña, España, Netbiblo, 2010, pp. 38-39.
- [66] T. Cuevas y U. Andrés, «Energía Undimotriz,» *Seminario: Mercado de Energía Convencional y Renovable*, pp. 2-3, 2015.
- [67] M. Canela, J. Arbó y L. Francesc, «Origen de la energía de las olas,» de *Diseño y Optimización de una Planta de Energía Undimotriz*, Barcelona, 2011, pp. 2-3.
- [68] «Textos Científicos,» 24 Enero 2009. [En línea]. Available: <http://www.textoscientificos.com/energia/generacion-energia-olas>.
- [69] D. C. L. Lealtad, «Olas, Formación y Características,» *Metereología Lealtad* , pp. 1-2, 2015.
- [70] L. I. Úbeda y T. H. López, de *Ondas Superficiales en el Mar*, 2014, pp. 5-8.
- [71] T. H. López y L. I. Úbeda, de *Ondas Superficiales en el Mar*, 2014, pp. 9-10.
- [72] R. M. Vidal, 12 Enero 2011. [En línea]. Available: <https://adnnativo.wordpress.com/2011/01/12/las-olas-ritmo-y-movimiento/>.
- [73] I. López y H. Tinoco, de *Ondas Superficiales en el Mar*, 2014, pp. 10-11.
- [74] Carnegie Wave Energy, 30 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.carnegiece.com/project/ceto-5-perth-wave-energy-project/>.
- [75] Grupo Undimotriz I+D+i, 9 Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz/?p=515>.
- [76] OPT Ocean Power Technologies, 2 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.oceanpowertechnologies.com/powerbuoy-technology/>.
- [77] Moris Arroes Instalaciones Y Proyectos, 22 Enero 2012. [En línea]. Available: <http://www.morisarroes.es/powerbuoy-el-piston-marino/>.
- [78] Eco Wave Power, 3 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.ecowavepower.com/gibraltar-project/>.
- [79] WaveRoller Plug Into Wave Energy, 25 Agosto 2016. [En línea]. Available: <http://aw-energy.com/projects/project-surge>.
- [80] WaveRoller Plug Into Wave Energy, 3 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <http://aw-energy.com/es/acerca-de>

waveroller/el-concepto-de-waveroller.

- [81] Euskadi Gobierno Vasco, 18 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://www.euskadi.eus/gobierno-vasco/-/noticia/2016/la-planta-de-las-olas-de-mutriku-alcanza-un-hito-de-produccion-mediante-la-energia-renovable-de-las-olas-al-generar-mas-de-1gwh/>.
- [82] Ente Vasco de la Energía, 15 Agosto 2014. [En línea]. Available: <http://www.eve.eus/Proyectos-energeticos-/Proyectos/Energia-Marina.aspx?lang=eng-GB>.
- [83] T. J. Whittaker, N. Fletcher y A. F. d. O. Falcao, de *Islay LIMPET Wave Power Plant*, Belfast, The European Commission, 2002, pp. 9-10.
- [84] T. J. Whittaker, N. Fletcher y A. F. d. O. Falcao, de *Islay LIMPET Wave Power Plant*, Belfast, The European Commission, 2002, pp. 11-12.
- [85] INABENSA, de *Línea de Negocio Energías del Mar*, Sevilla, Universidad de Sevilla, 2008, pp. 29-30.
- [86] N. Fletcher, T. J. Whittaker y A. F. d. O. Falcao, de *Islay LIMPET Wave Power Plant*, Belfast, The European Commission, 2002, pp. 14-15.
- [87] N. Fletcher, T. J. Whittaker y A. F. d. O. Falcao, de *Islay LIMPET Wave Power Plant*, Belfast, The European Commission, 2002, pp. 16-17.
- [88] A. F. d. O. Falcao, T. J. Whittaker y N. Fletcher, «Islay LIMPET Wave Power Plant,» Belfast, The European Commission, 2002, pp. 17-18.
- [89] A. E. Pinilla y A. Santa, «Generación de Energía Eléctrica a través de una Turbina Wells para dispositivos portátiles,» *Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Los Andes, Bogotá-Colombia*, pp. 1-2, 2002.
- [90] d. N. M. Gomes, L. A. Oliveira y d. S. E. Domingues, «Numerical Analysis Including Pressure Drop in Oscillating Water Column Device,» Creative Commons Attributions-NonComercial-NoDerivs, Porto Alegre, 2015.
- [91] C. Pérez Rojas, *Formulación Trifásica de Sistemas Eléctricos En Coordenadas de Fase ABC*, Monterrey, N.L.: FIME-UANL, 1993.
- [92] P. M. Anderson y A. A. Fouad, «Power System Control and Stability,» Hoboken, NJ, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2003, pp. 83-88.
- [93] P. M. Anderson y A. A. Fouad, «Power System Control and Stability,» Hoboken, NJ, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2003, pp. 16-20.
- [94] B. Cavia del Olmo, «Explotación del Potencial de Energía del Oleaje en Función del Rango de Trabajo de Prototipos Captadores,» 2009.

- [95] EMEC, «European Marine Energy Centre,» 19 Mayo 2015. [En línea]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>.
- [96] U. DoE, 17 Mayo 2015. [En línea]. Available: <http://www1.eere.energy.gov/water/hydrokinetic/default.aspx>.
- [97] Energy Management Agency Europe, «Energía Hidráulica,» de *Energías Renovables Para Todos*, Madrid, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, pp. 3-4.
- [98] Greenpeace España, «Energía Térmica de Concentración,» *Perspectiva Mundial 2009*, pp. 19-20, 2009.
- [99] Universidad Nacional Autónoma de México, «Sistemas Eólicos de Energía Eléctrica,» *Los Aerogeneradores*, pp. 53-54, 2012.