

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**SISTEMA DE CONVERSIÓN MECÁNICA ELÉCTRICA  
PARA UN GENERADOR UNDIMOTRIZ**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**NICOLÁS ALBERTO BRAVO MOYA**

**PROFESOR GUÍA:  
RODRIGO PALMA BEHNKE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
LUIS VARGAS DÍAZ  
PATRICIO MENDOZA ARAYA**

**SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2008**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: NICOLÁS ALBERTO BRAVO MOYA  
FECHA: 6 DE OCTUBRE DEL 2008  
PROG. GUÍA: RODRIGO PALMA BEHNKE

## **SISTEMA DE CONVERSIÓN MECÁNICA ELÉCTRICA PARA UN GENERADOR UNIDIMOTRIZ**

El presente trabajo consiste en el diseño de un sistema de obtención de la energía de las olas para ser convertida en electricidad. El objetivo es que éste pueda ser utilizado en aplicaciones de pequeña y mediana escala ubicadas en el borde costero, las cuales se encuentren alejadas de la red eléctrica de potencia. Se busca obtener un producto económico y limpio que resulta ser una alternativa válida versus la generación de electricidad con combustibles fósiles.

Con el fin de contextualizar la generación de electricidad a partir de la energía de las olas, se hace una revisión de las formas de extracción de energía a partir del océano, sus manifestaciones y los principios de conversión. Además se hace una revisión de distintas tecnologías de generación que actualmente se encuentran en funcionamiento o en fase de investigación.

Tomando como punto de partida un prototipo existente de obtención de energía a partir de las olas, se especifican y dimensionan los dispositivos elementales para llevar a cabo la conversión mecánica, obteniendo como resultado una rotación a velocidad variable de un eje que puede ser acoplado a un generador eléctrico.

La utilización de un generador sincrónico de imanes permanentes resulta ser la mejor alternativa frente a un escenario alejado de la red eléctrica de potencia y un rotor que gira a velocidad variable. Representa un menor costo de inversión y mantención, además de mayor eficiencia frente a su símil, el generador sincrónico con control de excitación.

Con el fin de optimizar el suministro de energía eléctrica a los consumos, se incorpora un conversor DC-DC controlado por un microcontrolador, el cual principalmente se encarga de maximizar la eficiencia en la conversión en función de las variables eléctricas y la velocidad de giro del alternador.

Se realiza una simulación del comportamiento del sistema de conversión mecánica a eléctrica bajo un escenario supuesto, obteniendo una aproximación de la potencia generada.

Se propone una metodología para dimensionar un banco de baterías con el fin de aprovechar el excedente de energía. Se considera además la incorporación de un inversor de voltaje a fin de disponer de electricidad en corriente alterna.

Finalmente se proponen fabricantes para los dispositivos que deben ser adquiridos en el mercado y se evalúan sus costos. Se sugieren mejoras a dispositivos, principalmente mecánicos, que representan las mayores dificultades en cuanto a eficiencia energética.

# Agradecimientos

A mi familia, por estar siempre ahí, apoyando y comprendiendo a esta persona complicada y malhumorada que tiendo a ser muchas veces. Me siento el hombre más afortunado del mundo por pertenecer a ella y tener las mejores hermanas que podría imaginarme.

A mis amigos de carrera, los cuales tardé en encontrar, pero valió la pena esperar. Rodrigo, Manuel, Mai, Christian, Diego y Rafael, gracias por estar ahí en los momentos memorables y los desastrosos, su compañía y apoyo hicieron de este paso por la facultad una experiencia más que enriquecedora.

A mi profesor guía, Rodrigo Palma Behnke, por su paciencia, buena disponibilidad y generosidad al momento de compartir su conocimiento.

Finalmente agradezco a la Universidad y en especial al Departamento de Ingeniería Eléctrica y su equipo humano, por transmitirme los conocimientos que hoy me hacen sentir orgulloso de ser un Beaucheffiano.

# Índice

<i>Resumen</i> .....	1
<i>Agradecimientos</i> .....	2
<i>Índice</i> .....	3
<i>Índice de figuras</i> .....	7
<i>Índice de tablas</i> .....	10
<b>1. Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1. Motivación</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2. Alcance</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3. Objetivo</b> .....	<b>13</b>
<b>1.4. Estructura del trabajo</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Obtención de energía a partir del océano</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1. La energía</b> .....	<b>15</b>
2.1.1. La energía como un recurso .....	15
<b>2.2. El mar como fuente de energía</b> .....	<b>16</b>
2.2.1. El recurso marítimo .....	16
2.2.2. Energía y el océano .....	16
2.2.3. La energía renovable del mar .....	17
2.2.4. Recursos energéticos .....	18
2.2.4.1. Las olas.....	18
2.2.4.2. Las mareas .....	18
2.2.4.3. Las corrientes marinas .....	19
<b>2.3. Métodos de obtención de energía a partir del océano</b> .....	<b>20</b>
2.3.1. Obtención energía de las olas .....	20
2.3.2. Obtención de energía de las mareas .....	22
2.3.3. Obtención de energía de las corrientes .....	23
2.3.4. Obtención de energía termal del océano.....	24
2.3.5. Conversión de energía a través de gradientes de salinidad.....	26
2.3.5.1. Sistema por presión osmótica retardada .....	26
2.3.5.2. Sistema de electrodiálisis directa .....	27
2.3.5.3. Sistema por efecto osmótico por métodos mecánicos .....	27
2.3.6. Conversión de energía mediante biomasa .....	27
<b>2.4. Sistemas eléctricos de conversión de la energía</b> .....	<b>27</b>
2.4.1. Generadores eléctricos .....	27
2.4.1.1. Historia .....	27
2.4.1.2. El dínamo.....	28
2.4.1.3. Generadores eléctricos.....	28
2.4.1.3.1. Máquina sincrónica.....	29

2.4.1.3.2. Máquina asincrónica.....	32
2.4.1.3.3. Máquina de corriente continua.....	34
2.4.1.3.4. Generador lineal.....	36
2.4.2. Acumulación de energía.....	36
2.4.2.1. Acumulador eléctrico.....	37
2.4.3. Características de la carga de baterías.....	39
2.4.4. Conversión de energía eléctrica.....	40
<b>3. Sistema de conversión mecánica eléctrica.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1. Sistema mecánico de obtención de energía.....</b>	<b>43</b>
3.1.1. Movimiento de la boya.....	44
3.1.1.1. Modelo básico de ola.....	44
3.1.2. Potencia aprovechable.....	47
3.1.3. Conversión mecánica.....	47
3.1.3.1. Trinquete.....	48
3.1.3.2. Multiplicador de velocidad.....	48
3.1.3.3. Volante de inercia.....	49
3.1.3.4. Freno mecánico.....	51
<b>3.2. Elección del sistema de conversión mecánica eléctrica.....</b>	<b>52</b>
3.2.1. Generación en corriente continua.....	52
3.2.2. Generación en corriente alterna.....	52
3.2.2.1. Generador sincrónico.....	53
3.2.2.2. Generador trifásico de conmutador.....	53
3.2.2.3. Generador de inducción doblemente alimentado.....	54
3.2.2.4. Generador sincrónico de campo modulado.....	55
3.2.2.5. Generador de inducción con condensador sincrónico.....	55
3.2.3. Tecnologías recomendadas para la aplicación.....	56
3.2.3.1. Generador Lundell.....	57
3.2.3.2. Generador de imanes permanentes.....	58
3.2.3.3. Comparación de alternativas.....	58
<b>3.3. Sistemas de control.....</b>	<b>60</b>
3.3.1. Eficiencia en la transferencia de potencia.....	64
3.3.2. Conversor DC-DC.....	66
3.3.3. Electrónica del controlador.....	67
3.3.3.1. Circuito de polarización.....	68
3.3.3.2. Conversor análogo-digital para corriente.....	69
3.3.3.3. Conversor análogo-digital para voltaje.....	70
3.3.3.4. Sensor de velocidad.....	70
3.3.3.5. Push-Pull.....	71
3.3.3.6. Circuitos de protección.....	72
3.3.3.7. Circuito de sobrecarga.....	72
<b>3.4. Baterías.....</b>	<b>72</b>
<b>3.5. Sistema de inversión de corriente.....</b>	<b>73</b>
3.5.1. Inversores comerciales.....	76
<b>4. Diseño.....</b>	<b>77</b>

<b>4.1. Estrategia de diseño.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2. Estimación de la demanda .....</b>	<b>78</b>
4.2.1. Escenarios de funcionamiento.....	79
4.2.1.1. Iluminación de muelles.....	79
4.2.1.2. Poblados costeros .....	80
4.2.1.3. Zonas productivas.....	82
<b>4.3. Generador eléctrico .....</b>	<b>83</b>
<b>4.4. Dimensionamiento del sistema mecánico.....</b>	<b>85</b>
4.4.1. Potencia mecánica .....	85
4.4.2. Multiplicador de velocidad.....	87
4.4.2.1. Mecanismos de transformación del movimiento de entrada.....	87
4.4.2.2. Amplificación del multiplicador de velocidad.....	90
4.4.3. Volante de inercia.....	91
<b>4.5. Comportamiento esperado.....</b>	<b>92</b>
<b>4.6. Sistema de control.....</b>	<b>95</b>
4.6.1. Algoritmo del sistema de control .....	95
<b>4.7. Banco de baterías.....</b>	<b>97</b>
<b>4.8. Inversor .....</b>	<b>97</b>
<b>4.9. Costo de dispositivos.....</b>	<b>98</b>
<b>5. Conclusiones y comentarios.....</b>	<b>99</b>
<b>5.1. Conclusiones.....</b>	<b>99</b>
<b>5.2. Comentarios .....</b>	<b>100</b>
5.2.1. Respecto del sistema mecánico .....	100
5.2.2. Respecto del sistema eléctrico.....	101
5.2.3. Trabajo futuro.....	102
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>103</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>106</b>
<b>7.1. Sistemas de conversión de energía a partir del océano. ....</b>	<b>106</b>
7.1.1. Conversores a partir de las olas .....	106
7.1.1.1. Limpet: Oscilación de columna de agua.....	106
7.1.1.2. SDE: Energía de las olas.....	106
7.1.1.3. CETO: Agua de mar a presión por efecto de las olas .....	107
7.1.1.4. DEXA: Principio de movimiento angular de dos planos .....	107
7.1.1.5. AWS: Principio de movimiento de las olas de Arquímedes .....	108
7.1.1.6. Waveroller: Aprovechamiento de las olas superficiales .....	109
7.1.1.7. Wave Star: Absorbedor multipunto. ....	109
7.1.1.8. SSG WaveEnergy: Convertidor de la energía de las olas .....	110
7.1.1.9. ORECON: Oscilación de columna de agua con cámaras multiresonantes .....	110
7.1.1.10. Boya OceanEnergy: Oscilación de columna de agua .....	111
7.1.1.11. OWEL: Oscilación de columna de agua.....	112
7.1.1.12. Sistema Seabased AB .....	112

7.1.1.13. Aegir Dynamo .....	113
7.1.1.14. Syncwave Energy .....	113
7.1.2. Conversores a partir de las mareas .....	114
7.1.2.1. La Rance .....	114
7.1.3. Conversores a partir de las corrientes .....	115
7.1.3.1. Turbina Venturi .....	115
7.1.3.2. Verdant Power .....	116
7.1.3.3. Vortex Hydro Energy .....	116
7.1.3.4. Blue Energy .....	117
7.1.3.5. Hydro Green Energy .....	118
7.1.3.6. Tidal Generation Limited .....	119
7.1.3.7. Evapod Ocean Flow Energy .....	119
7.1.3.8. Tidal Sails .....	120
7.1.4. Conversores termales .....	120
7.1.4.1. Sistema CETO de ciclo cerrado .....	120
7.1.4.2. Sistema CETO de ciclo abierto .....	122
7.1.5. Conversores a través de gradientes de salinidad .....	123
7.1.5.1. Statkraft: Osmosis de presión retardada .....	123
<b>7.2. Bloques del modelo mecánico-eléctrico Matlab-Simulink .....</b>	<b>125</b>
<b>7.3. Características alternador de imanes permanentes .....</b>	<b>129</b>
<b>7.4. Características alternador Lundell .....</b>	<b>130</b>

# Índice de figuras

Figura 1. Prototipo mecánico propuesto .....	12
Figura 2. Ola de mar.....	18
Figura 3. Marea alta .....	19
Figura 4. Las corrientes marinas.....	19
Figura 5. Boya anclada al suelo marino.....	21
Figura 6. Generación a base de la marea.....	23
Figura 7. Generación a partir de corrientes marinas.....	23
Figura 8. CETO, ciclo cerrado. ....	24
Figura 9. CETO, ciclo abierto. ....	25
Figura 10. CETO, ciclo híbrido. ....	26
Figura 11. Disco de Faraday [8].....	28
Figura 12. Tipos de rotor.....	30
Figura 13. Rotor jaula ardilla.....	33
Figura 14. Rotor bobinado.....	33
Figura 15. Máquina elemental de C.C. con conmutador.....	35
Figura 16. Voltaje rectificado en las bobinas y voltaje entre las escobillas de la maquina C.C. ....	35
Figura 17. Generador lineal (motor Stirling).....	36
Figura 18. Estados de carga de la batería.....	40
Figura 19. Esquema simplificado de un convertidor rotatorio.....	41
Figura 20. Diagrama de bloques del sistema mecánico.....	42
Figura 21. Esquema conceptual del sistema de conversión eléctrica.....	43
Figura 22. Sistema de boya y polea.....	43
Figura 23. Eje de referencia para movimiento de la boya.....	44
Figura 24. Modelo paramétrico básico de una ola [12].....	45
Figura 25. Altura de la ola en función del tiempo.....	46
Figura 26. Velocidad de la ola en función del tiempo.....	46
Figura 27. Velocidad aprovechable.....	47
Figura 28. Potencia aprovechable.....	47
Figura 29. Trinquete.....	48
Figura 30. Multiplicador de velocidad.....	49
Figura 31. Esquema simplificado de un volante de inercia.....	50
Figura 32. Freno mecánico.....	51
Figura 33. Generador de corriente continua.....	52
Figura 34. Generador sincrónico.....	53
Figura 35. Generador trifásico de conmutador.....	54
Figura 36. Generador de inducción de doble salida.....	55
Figura 37. Generador sincrónico de campo modulado.....	55
Figura 38. Generador de inducción con condensador sincrónico.....	56
Figura 39. Generador tipo Lundell.....	57
Figura 40. Rotor de un alternador de imanes permanentes.....	58
Figura 41. Pérdidas de potencia del alternador IP versus Lundell. ....	59
Figura 42. Curva tensión inducida versus corriente de campo.....	62
Figura 43. Diagrama de bloques control generador Lundell.....	63
Figura 44. Diagrama de bloques control generador de imanes permanentes.....	63
Figura 45. Familia de curvas para corriente de campo versus voltaje inducido.....	64
Figura 46. Etapas de carga de una batería.....	65

Figura 47. Conversor Buck-Boost (polaridad invertida).....	66
Figura 48. Diagrama de bloques sistema de control.....	68
Figura 49. LM317 como regulador de voltaje para una fuente DC.....	68
Figura 50. LM317 como limitador de corriente.....	69
Figura 51. Sensor de efecto Hall.....	69
Figura 52. Divisor de voltaje mas aislación de etapa de potencia (seguidor de voltaje).....	70
Figura 53. Sensor de velocidad.....	71
Figura 54. Circuito Push-Pull.....	71
Figura 55. Optocoupla.....	72
Figura 56. Inversor de conmutación externa.....	74
Figura 57. Inversor de alimentación de voltaje trifásico.....	75
Figura 58. Ejemplo de conexión paralelo de 5 inversores de 3 [kVA].....	76
Figura 59. Diagrama de flujo de la estrategia de diseño.....	78
Figura 60. Demanda de un sistema de iluminación.....	79
Figura 61. Curva demanda residencial de la localidad de Camar (17).....	80
Figura 62. Potencia demandada y potencia promedio Camar.....	81
Figura 63. Energía producida y energía demandada.....	82
Figura 64. Diferencia energética durante el día.....	82
Figura 65. Característica voltaje-corriente alternador WindBlue.....	84
Figura 66. Característica de potencia alternador WindBlue.....	84
Figura 67. Torque mecánico estimado.....	84
Figura 68. Momentos de torque.....	85
Figura 69. Sistema de contrapeso N°1.....	88
Figura 70. Sistema de contrapeso N°2.....	89
Figura 71. Sistema de contrapeso N°3.....	90
Figura 72. Torques sobre el eje del alternador.....	91
Figura 73. Modelo dinámico Simulink.....	92
Figura 74. Modelo marino / rectificación / amplificación.....	93
Figura 75. Altura de la ola según el tiempo.....	93
Figura 76. Velocidad de movimiento de la ola según el tiempo.....	93
Figura 77. Velocidad angular aportada por la boya sobre el eje del alternador.....	93
Figura 78. Torque aportado por la boya sobre el eje del alternador.....	94
Figura 79. Potencia aportada por la boya sobre el eje del generador.....	94
Figura 80. Revoluciones por minuto sobre el eje del alternador.....	94
Figura 81. Torque motor y torque resistivo sobre el eje del alternador.....	94
Figura 82. Potencia generada por el alternador.....	95
Figura 83. Algoritmo de control PWM.....	96
Figura 84. Sistema Limpet [20].....	106
Figura 85. Sistema SDE [21].....	107
Figura 86. Sistema CETO Technology [22].....	107
Figura 87. Sistema DEXA [23].....	108
Figura 88. Sistema AWS [24].....	108
Figura 89. Sistema Waveroller [25].....	109
Figura 90. Sistema Wave Star [26].....	110
Figura 91. SSG de WaveEnergy [27].....	110
Figura 92. Sistema Orecon MRC [28].....	111
Figura 93. Boya OceanEnergy [29].....	111
Figura 94. Sistema OWEL [30].....	112
Figura 95. Sistema Seabased AB [31].....	113

<i>Figura 96. Sistema Aegir Dynamo [32]</i> .....	113
<i>Figura 97. Sistema Syncwave Energy [33]</i> .....	114
<i>Figura 98. Central La Rance</i> .....	115
<i>Figura 99. Turbina Venturi [34]</i> .....	115
<i>Figura 100. Verdant Power [35]</i> .....	116
<i>Figura 101. Principio de funcionamiento sistema Vortex [36]</i> .....	117
<i>Figura 102. Sistema Blue Energy [37]</i> .....	118
<i>Figura 103. Turbina Hydro Green Energy [38]</i> .....	118
<i>Figura 104. Sistema Tidal Generation Limited [34]</i> .....	119
<i>Figura 105. Sistema Evapod [39]</i> .....	119
<i>Figura 106. Sistema Tidal Sails [40]</i> .....	120
<i>Figura 107. Sagar-Shakthi en el puerto de Tuticorin</i> .....	121
<i>Figura 108. Ciclo CETO cerrado Kalina</i> .....	121
<i>Figura 109. Ciclo CETO cerrado Uehara</i> .....	122
<i>Figura 110. CETO de ciclo abierto, Keahole, Hawaii</i> .....	123
<i>Figura 111. Sistema Statkraft [41]</i> .....	124
<i>Figura 112. Modelos de plantas de generación por gradiente de Salinidad [41]</i> .....	124
<i>Figura 113. Modelo marino/rectificación/amplificación</i> .....	125
<i>Figura 114. Modelo marino</i> .....	125
<i>Figura 115. Modelo potencia adquirida por la boya</i> .....	126
<i>Figura 116. Rectificador</i> .....	126
<i>Figura 117. Engranajes (multiplicador de velocidad)</i> .....	127
<i>Figura 118. Enganche</i> .....	127
<i>Figura 119. Velocidad aportada por la boya y velocidad del eje alternador</i> .....	128
<i>Figura 120. Bloque alternador</i> .....	128
<i>Figura 121. Curva característica alternador tipo Lundell</i> .....	131

# Índice de tablas

<i>Tabla 1. Resumen de los sistemas de extracción de energía del océano [6].....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2. Características químicas de los tipos de acumuladores .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3. Tabla comparativa alternador Lundell versus imanes permanentes.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 4. Comparación de inversores de alimentación de corriente y voltaje .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 5. Datos demanda de la localidad de Camar.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 6. Variables algoritmo de control .....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 7. Características del acumulador CCB .....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 8. Características del inversor Phoenix Combi .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 9. Costo de dispositivos en el mercado .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 10. Datos teóricos y aproximados del alternador de imanes permanentes.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 11. Datos teóricos y aproximados para alternador tipo Lundell .....</i>	<i>130</i>

# Capítulo 1

## 1. Introducción

La generación de electricidad a partir de la energía del mar se encuentra en constante desarrollo, con múltiples proyectos y dispositivos funcionando alrededor del mundo. A pesar de esto, el uso de esta tecnología aún es escasa comparada con otras fuentes de energía renovable no convencional (ENRC), tales como la energía solar y la eólica.

El caso chileno no escapa a esta realidad. A pesar de contar con un enorme potencial de generación eléctrica a partir de la energía del mar no se han desarrollado dispositivos concretos que representen un aporte energético significativo al consumo nacional. El desarrollo de esta tecnología ha estado limitado a prototipos y proyectos que se encuentran aún en etapa de diseño.

### 1.1. Motivación

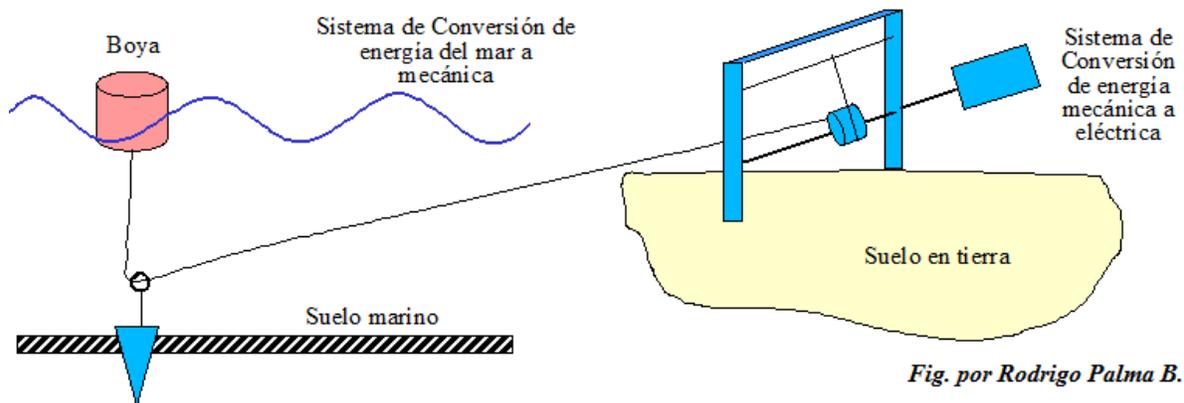
Mucho se habla del avance tecnológico y de estar en un mundo globalizado, donde un individuo perteneciente a una comunidad cuenta con los medios para interactuar activamente con otras entidades, sin importar distancia, idioma, razas, etc. Un pilar fundamental para este avance es el disponer de energía eléctrica y fuentes a partir de las cuales ésta pueda ser obtenida.

Es por esto que la energía eléctrica se ha convertido en una necesidad básica del ser humano. Particularmente en Chile, a pesar de los programas de electrificación rural impulsados por la Comisión Nacional de Energía, aún hay localidades que no cuentan con este servicio o cuentan con generación propia a base de combustible fósil el cual sostenidamente ve incrementado su valor en el mercado internacional.

Nace entonces la necesidad de contar con electricidad a partir de fuentes renovables que aseguren un suministro confiable y económico, permitiendo la integración de estas comunidades aisladas y también la inserción de centros de producción en zonas que se encuentran alejadas de la red eléctrica de potencia, particularmente en lugares que cuentan con recurso marino susceptible de ser aprovechado como fuente de energía.

Bajo este escenario y gracias a la continua cooperación por parte del cuerpo docente de la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en la exploración de nuevas alternativas en torno al desarrollo de sistemas de aprovechamiento de energías renovables disponibles en abundancia en el país, es que se ha planteado una propuesta concreta de colaboración en el desarrollo de un prototipo de generador undimotriz.

El desarrollo de un generador de electricidad a partir de la energía de las olas parte de la idea propuesta por el emprendedor Pedro Riquelme, el cual ha desarrollado un prototipo mecánico consistente en una boya anclada al suelo marino, la cual transmite su movimiento a un dispositivo mecánico ubicado en tierra firme por medio de un cable tensor (ver Figura 1).



*Fig. por Rodrigo Palma B.*

**Figura 1.** Prototipo mecánico propuesto

## 1.2. Alcance

El presente trabajo involucra el diseño del sistema eléctrico y de control para un prototipo de generador de electricidad aislado de la red eléctrica de distribución, que obtiene su energía primaria partir de las olas.

Se propone una solución puntual al problema de abastecer pequeños y medianos consumos que cuentan con disponibilidad potencial de extraer energía a partir de las olas de mar y no pretende competir con otras tecnologías existentes que puedan ser aplicables al problema.

Se calculan las características que debe cumplir el sistema mecánico, proponiendo la utilización de algunos elementos y configuraciones. No se hace un diseño detallado de cada uno de ellos.

Se definen los dispositivos que forman parte del sistema eléctrico, recomendando dispositivos comerciales y especificando las características de aquellos que necesitarán construcción.

No se incluyen aspectos tales como la mejora en los rendimientos de los mecanismos ni de los dispositivos electrónicos, tampoco una reducción de costos de construcción. No se contempla la validación de un prototipo.

### **1.3. Objetivo**

A partir del prototipo de obtención de energía mecánica extraída de las olas de mar propuesto por Pedro Riquelme, es necesario especificar y dimensionar los dispositivos mecánicos básicos que formarán parte del sistema mecánico de conversión de energía, así como también los dispositivos eléctricos y electrónicos que formarán parte del sistema de control y generación de electricidad aislada de la red eléctrica de potencia.

Para realizar esta tarea se contemplan los siguientes objetivos específicos:

- Dar una visión de la situación actual de la obtención de energía eléctrica a partir de la energía del océano y su relación con el modelo propuesto.
- Proponer y evaluar el comportamiento de un sistema mecánico de captación de energía.
- Diseñar el sistema eléctrico y de control a voltaje constante de un generador eléctrico, para que pueda cumplir con una demanda y almacenar el excedente de energía en acumuladores eléctricos.
- Modelar el prototipo con la intención de estimar la potencia eléctrica que se podría generar.
- Sugerir dispositivos presentes en el mercado que cumplan con las características del diseño propuesto.

### **1.4. Estructura del trabajo**

El trabajo que se presenta a continuación se divide en cinco capítulos principales, además de una bibliografía y un capítulo de anexos con información complementaria.

Luego de la introducción, en el Capítulo 2 se realiza un estudio de la energía presente en el océano, sus manifestaciones y formas de obtención. Luego se estudia su aplicación en el caso de generación de electricidad y los distintos métodos existentes para llevar a cabo esta tarea.

En el Capítulo 3 se hace una revisión de los dispositivos básicos necesarios para llevar a cabo la conversión mecánica a eléctrica. Se detallan sus características de funcionamiento y se plantea una metodología de simulación del sistema mediante software. Se escoge además el tipo de generador más adecuado para un funcionamiento a velocidad variable.

El diseño del sistema de conversión mecánica a eléctrica es realizado en el Capítulo 4 donde son dimensionados los elementos mecánicos y son especificadas las características que deben tener los dispositivos eléctricos y el sistema de control. Se realiza una simulación del comportamiento esperado del sistema. Finalmente en el Capítulo 5 son desarrolladas las conclusiones respecto al trabajo.

# Capítulo 2

## 2. Obtención de energía a partir del océano

### 2.1. La energía

La energía es una propiedad de la materia que representa la capacidad para realizar un trabajo o producir transformaciones. Todo cuerpo material que pasa de un estado a otro produce fenómenos físicos que no son otra cosa que manifestaciones de esta propiedad, por lo tanto, puede presentarse en diversas formas y transformarse desde un estado energético a otro [1].

#### 2.1.1. La energía como un recurso

Las fuentes de energía son los recursos existentes en la naturaleza a partir de las cuales la humanidad puede obtener energía utilizable en sus actividades. El origen de casi todos los tipos de energía es el sol.

Son denominadas fuentes de energías renovables o alternativas aquellas que se regeneran naturalmente y en su concepción traen implícita la idea de ser “no contaminantes”. Estas fuentes de energía se pueden volver fuentes no renovables si la velocidad de explotación supera su capacidad de regeneración. Algunas fuentes de este tipo son:

- Bioenergética,
- Solar ,
- Eólica,
- Hidráulica,
- Geotérmica,
- Marítima.

Por el contrario, se entiende por fuentes de energía no renovables a aquellas que implican el consumo de recursos agotables y contaminantes. Algunos ejemplos son:

- Petróleo,
- Carbón,
- Generación nuclear de fisión.

La disponibilidad energética de fuentes de energía renovable es mayor que las convencionales, sin embargo su utilización es escasa. El desarrollo de la tecnología, el incremento de la exigencia social, costos más bajos de instalación y rápida amortización están impulsando un mayor uso de las fuentes de energía de origen renovable en los últimos años [2].

## **2.2. El mar como fuente de energía**

### **2.2.1. El recurso marítimo**

A través del tiempo, el ser humano ha interactuado intensamente con el océano, ya sea para el aprovechamiento de sus recursos biológicos y minerales, o bien para su utilización con fines recreativos. El agua cubre más del 70 por ciento de la superficie total del planeta, destacando los océanos Pacífico, Atlántico, Índico y Ártico. El océano Pacífico es el más grande y profundo, seguido del océano Atlántico, el cual presenta mares adyacentes, entre los cuales se encuentran los mares Mediterráneo, Báltico, Ártico, del Caribe y del golfo de México [3].

### **2.2.2. Energía y el océano**

La energía cinética del océano ha intrigado a la humanidad durante milenios. El movimiento de las olas y las mareas siguen siendo hoy en día un alucinante problema de investigación. En cuanto a la energía térmica, sólo los vientos generados por los océanos han sido aprovechados y todo el potencial térmico presente en el recurso marino es aún difícil de alcanzar al igual que el potencial de las olas y las mareas.

Por el contrario, la extracción de los recursos de gas y petróleo de la plataforma continental<sup>1</sup> se han de desarrollado de forma tal que representan el 90 por ciento del desarrollo de la minería oceánica<sup>2</sup>. En la actualidad, la demanda de energía es en gran medida cubierta por combustibles fósiles y las consecuencias de esta abrumadora dependencia está siendo cada vez más evidente con su inminente escasez y deterioro al medio ambiente [4].

Dado lo anterior, las fuentes de energía renovable están recibiendo un interés cada vez mayor como una alternativa a los combustibles fósiles, siendo las energías eólica y solar las que se han llevado la mayor atención. Su utilización directa está limitada por su disponibilidad intermitente y su intensidad variable. Grandes medios de almacenamiento son necesarios para un uso ininterrumpido y constante de la energía del sol, siendo el océano el sistema recolector y almacenador más grande del mundo.

En un día promedio, 60 millones de kilómetros cuadrados de mares tropicales absorben un monto de radiación solar equivalente en contenido calórico a 245 billones de barriles de petróleo. Si un 0.1% de esta energía almacenada fuera convertida en energía eléctrica, ésta podría abastecer el equivalente a 20 veces el consumo de energía de Estados Unidos [5].

---

<sup>1</sup> Es el perímetro extendido de cada continente, que queda cubierto durante los periodos interglaciares como la época actual por mares relativamente poco profundos y golfos.

<sup>2</sup> Actividad minera realizada en las plataformas continentales, en aguas relativamente poco profundas. Entre otras de sus actividades está la extracción de áridos, de diamantes y de oro.

### 2.2.3. La energía renovable del mar

La energía del sol es almacenada directa o indirectamente en varias formas dentro del sistema marino. Directamente lo hace en la forma térmica de calor, e indirectamente como viento, olas y corrientes creadas por las diferencias de temperatura entre las aguas polares y tropicales.

La forma más visible de la energía del océano está contenida en las olas superficiales las que son en realidad transiciones de energía acarreadas desde un lugar a otro. La energía a partir de las olas aprovecha la energía cinética contenida y son de alguna forma predecibles, contienen una energía relativa alta y están presentes en muchas áreas del planeta. Las mareas son altamente predecibles, sin embargo, el desarrollo de tecnologías que aprovechan esta característica está limitado a los sitios donde las variaciones de altura alcanzan los 3 metros [5].

La disponibilidad de mucha de esta energía es geográficamente específica y las eficiencias de las conversiones de los sistemas son relativamente bajas. Mientras muchos de estos sistemas han sido experimentados en pequeña escala, existe un enorme potencial para una contribución a la economía energética mundial y se manifiesta en un continuo interés en el desarrollo de nuevas tecnologías. Los más desarrollados son los sistemas de conversión de energía a partir de las olas y las corrientes marinas..

Otras manifestaciones de energía del océano que es posible aprovechar son la energía de las mareas y los gradientes de salinidad. La Tabla 1 muestra un resumen de tecnologías y sus principios de funcionamiento.

<i>Fuente de energía</i>	<i>Principio de conversión</i>	<i>Tecnologías disponibles</i>
Gradiente de salinidad	Presión osmótica y una hidroturbina	Saltkraft, PRO
Gradiente de temperatura	Ciclo de vapor a baja temperatura	OTEC
Energía potencial del nivel de las mareas	Hidroeléctrica convencional	"Tidal power plant"
Energía cinética a partir de las olas	Cuerpo flotante Generación de aire comprimido Péndulo	OSPNEY, Limpet, Exim, Pelamis, OWEC, Mighty Wale, Tapchan, SSG, Wavedragon, Waverotor,..
Energía cinética a partir de las corrientes	Aspas hidrodinámicas	TideEl, Brian, UEK, Kobold, Stingray, Blue Concep, SEAFLOW

**Tabla 1.** Resumen de los sistemas de extracción de energía del océano [6]

## 2.2.4. Recursos energéticos

### 2.2.4.1. Las olas

Las olas son ondas que se desplazan por la superficie de los mares y océanos, son puestas en marcha por el viento, y representan el principal agente modelador de las costas (ver Figura 2). Su altura y período son funciones de la velocidad del viento, la duración y la lejanía de las aguas sobre las cuales este sopla.



Figura 2. Ola de mar

Hay ciertos tipos de olas llamadas catastróficas, las cuales son resultado de condiciones no usuales, tales como tormentas intensas sobre o cerca del océano, las que generan las denominadas marejadas. También están las olas producidas por terremotos y/o derrumbes submarinos denominados tsunamis. Estas olas generalmente producen daños y pérdidas de vidas [3].

### 2.2.4.2. Las mareas

Deben su origen a la atracción que ejerce la Luna y el Sol. El agua en el lado de la Tierra más cercano a la Luna es atraída por la fuerza gravitatoria más intensamente que el cuerpo de la Tierra, mientras que el agua del lado de la Tierra más alejado lo hace menos intensamente (ver Figura 3). El efecto de esto es que se produce una diferencia en el nivel de las aguas de un lado respecto del otro. La atracción del Sol es similar, y las mareas que observamos son el efecto resultante de las dos atracciones.

Cuando la atracción del Sol se suma a la de la Luna las mareas son grandes y son llamadas mareas vivas, mientras que cuando las atracciones son perpendiculares las mareas son pequeñas y llamadas mareas muertas. Las alturas de las mareas vivas están gobernadas por la distancia de la Luna a la Tierra, siendo más grandes en el Perigeo (cuando la Luna está más cerca de la Tierra) y más pequeñas en el Apogeo (cuando la Luna está más lejos).



Generalmente se originan por la diferencia de densidad del agua, que es mayor cuanto más fría y/o salada sea, tendiendo a hundirse para dar lugar a una circulación termohalina<sup>3</sup> condicionada por la diferencia de temperatura y/o salinidad en el eje vertical. Este movimiento tiende a descender, provocando el afloramiento del agua más profunda y cálida para ocupar su lugar. Este descenso puede verse dificultado por el aporte de agua dulce, como podría ser la desembocadura de un río [8].

### **2.3. Métodos de obtención de energía a partir del océano**

A pesar de ser una de las energías menos exploradas, los océanos pueden proveernos de ésta mediante manifestaciones tales como el movimiento de las olas, las mareas y la diferencia de temperatura entre las capas del océano.

La idea propuesta por Pedro Riquelme se sitúa dentro del aprovechamiento de la energía de las olas, la cual en conjunto con el aprovechamiento de las corrientes marinas son las tecnologías que presentan mayor desarrollo e instalaciones a alrededor del mundo. En el Anexo 7.1 se hace una revisión de algunas tecnologías de aprovechamiento de la energía del océano en la actualidad, particularmente de lo que se está haciendo respecto del aprovechamiento de la energía de las olas con el fin de exhibir el aporte que representa el desarrollo de este generador undimotriz.

En las páginas siguientes se explican los métodos de extracción de la energía del océano en sus principales manifestaciones.

#### **2.3.1. Obtención energía de las olas**

Esta energía es un recurso ambientalmente beneficioso y renovable. Los criterios generales para convertir la energía de las olas en electricidad pueden ser categorizados por su ubicación, formas de extracción y conversión. Los tipos de ubicación incluyen las tecnologías de flotadores en aguas profundas, superficiales y anclados al lecho marino. Formas de extracción y conversión de la energía incluyen las levas mecánicas, engranajes y palancas, bombas hidráulicas, turbinas neumáticas, columnas de agua oscilante y dispositivos de conexión.

Los dos componentes de energía presentes en las olas son la energía potencial y la cinética. La energía potencial es asociada con la forma o elevación de la ola y la cinética está asociada al movimiento o velocidad de las partículas de agua que la constituye. Para olas regulares se tiene que,

$$E = \frac{(\rho g H^2)}{8} \quad (1)$$

---

<sup>3</sup> En oceanografía física se llama circulación termohalina a la circulación convectiva que afecta de modo global al conjunto de las masas de agua oceánicas.

Donde E es la energía total por unidad superficial de agua,  $\rho$  es la densidad del agua de mar, g es la aceleración de gravedad y H es la altura de la ola. La relación entre el período de la ola (T) y el largo de la ola (L) está dada por,

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

La transferencia de energía de las olas es conocida como flujo de energía. Las olas de pequeña amplitud en aguas profundas, tienen una energía por unidad de onda de,

$$P = E \left( \frac{c}{2} \right) = E \left( \frac{L}{2T} \right) = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \approx H^2 T \quad (3)$$

Donde c es la velocidad de la ola o velocidad de fase. Para H = 2 metros y T = 10 segundos en el agua profunda, la energía de la ola es aproximadamente 40kW por metro desde la base a la cresta de la ola.

La relación correspondiente a olas irregulares está dada por,

$$P \approx 0.5 H_s^2 T_z \left[ \frac{kW}{m} \right] \quad (4)$$

Donde  $H_s$  es el ancho significativo de la ola y  $T_z$  es el intervalo de tiempo promedio entre alturas máximas sucesivas. Esta ecuación es utilizada para no sobrestimar la energía potencial de la ola, ya que las olas son generalmente irregulares en el océano.



**Figura 5.** Boya anclada al suelo marino

Los sistemas utilizados para aprovechar la energía de las olas pueden clasificarse en dos, aquellos fijos a la plataforma continental y los flotantes. Básicamente los mecanismos funcionan haciendo que la variación de altura del agua mueva un pistón que a su vez mueve un generador eléctrico. O bien, que el movimiento de las olas produzca el desplazamiento del aire hacia el interior de un cilindro donde se ubica una turbina provocando su

movimiento y al retirarse generar un efecto de vacío, logrando así que el aire entre moviendo nuevamente la turbina. La Figura 5 muestra el sistema PowerBuoy® diseñado por la empresa Ocean Power Technologies consistente en una boya anclada al suelo marino.

### 2.3.2. Obtención de energía de las mareas

La profundidad y la geografía costera son factores importantes para la extracción de energía a partir de las mareas. La marea involucra el ascenso y descenso del océano gracias a la combinación de las atracciones gravitacionales del sol, la luna y la rotación de la tierra. La influencia que éstas tienen en el océano puede ser amplificada por disposiciones naturales de la línea costera y el fondo del mar, para entregar así una diferencia en las alturas de marea baja y alta superiores a los 16 metros. Bajo tales condiciones, la conversión de energía a partir de las mareas puede ser llevada a cabo por turbinas hidroeléctricas convencionales.

Los principales factores que influyen en la elevación y duración de las mareas incluyen la rotación de la tierra, la órbita de la luna alrededor de la tierra<sup>4</sup>, la órbita de la tierra alrededor del sol<sup>5</sup>, la posición de la luna respecto del Ecuador y la distancia de la luna a la Tierra<sup>6</sup>. Como la generación es generalmente por hidroelectricidad convencional, el rendimiento de la conversión depende de las diferencias de elevación de la instalación.

La técnica de explotación consiste en cerrar una bahía o un estuario con un dique, generando así una diferencia de nivel de las aguas a ambos lados, acumulando así Energía Potencial. En el dique se instalan turbinas con sus respectivos generadores y demás equipamiento, las cuales funcionan al pasar el agua hacia el embalse y luego al pasar desde éste hacia el mar (ver Figura 6). Pero esta técnica no es tan sencilla de llevar a la práctica en un proyecto que resulte eficiente, implicando una inversión acorde al rendimiento que se quiere alcanzar. Los dos grandes aspectos que condicionan el avance de esta tecnología son el económico, se requieren grandes inversiones en obras, y por otro lado es considerable el impacto que provoca sobre la fauna y flora del lugar de instalación.

Para un ciclo de marea de 6.2 horas, la energía potencial puede ser estimada por:

$$E = 226A(H^2) \quad (5)$$

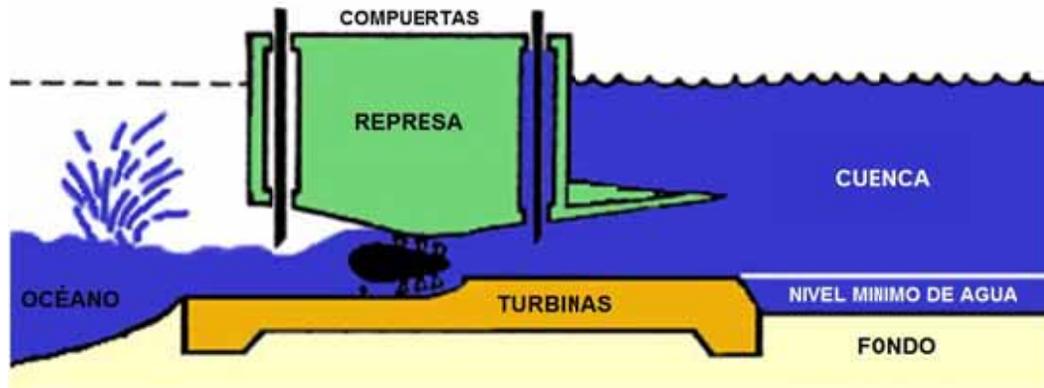
Donde A representa la superficie del volumen en kilómetros cuadrados y H es la altura alcanzada por la marea respecto de su nivel mínimo.

---

<sup>4</sup> 29.53 días

<sup>5</sup> 365.24 días

<sup>6</sup> Apogeo/perigeo

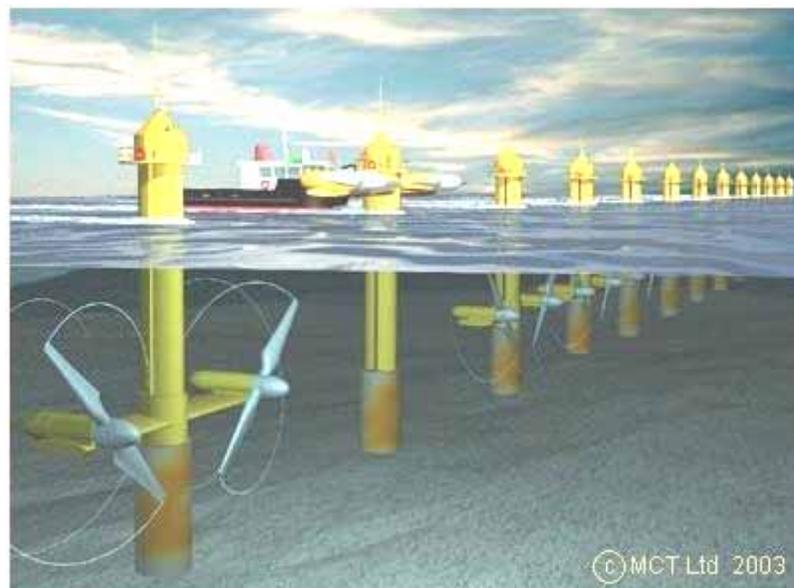


**Figura 6.** Generación a base de la marea

Las condiciones necesarias para una conversión económica y eficiente incluyen una distancia entre el fondo y la superficie de tres metros, una cuenca cerrada, un lecho submarino sólido y distancias de transmisión relativamente cortas.

### 2.3.3. Obtención de energía de las corrientes

La energía cinética de las corrientes de los ríos ha sido usada desde tiempos medievales para producir energía usando simples turbinas de agua. El desempeño de una turbina para corrientes oceánicas es similar al de una turbina de viento. Éstas transforman una proporción de la energía cinética del flujo de agua a energía mecánica que puede accionar directamente un generador eléctrico. La Figura 7 muestra una granja de generadores de electricidad a partir de las corrientes marinas diseñada por la empresa Marine Current Turbines Limited.

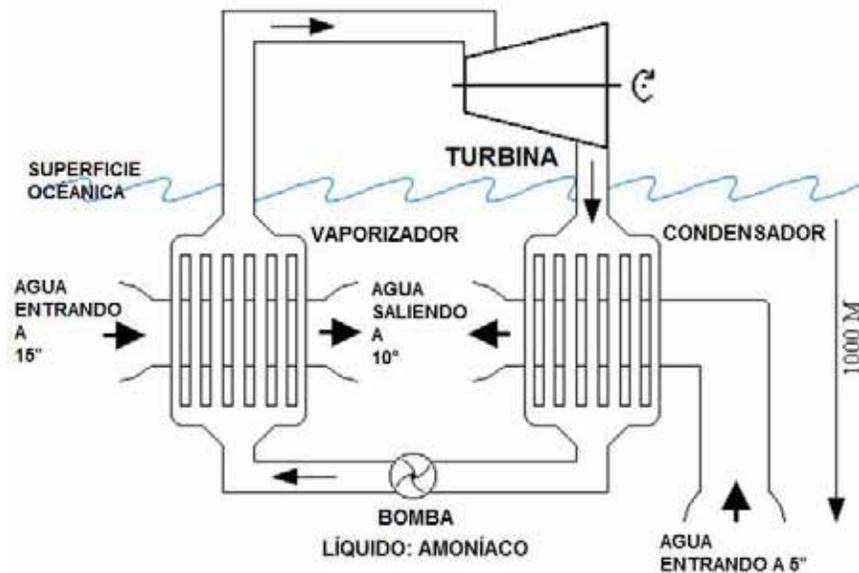


**Figura 7.** Generación a partir de corrientes marinas

### 2.3.4. Obtención de energía termal del océano

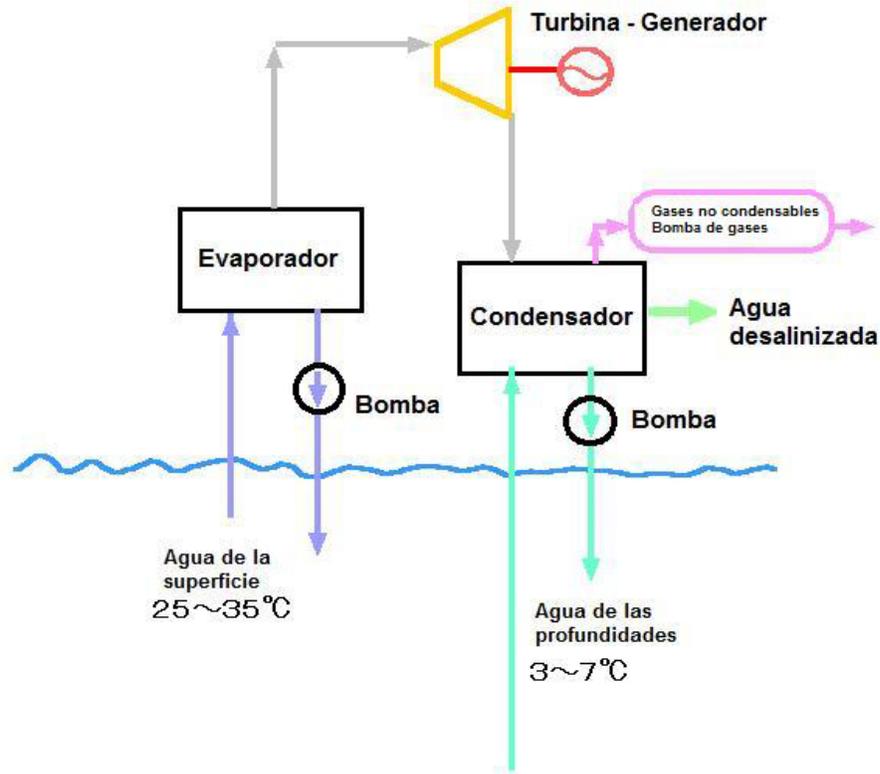
La energía proveniente del sol es absorbida y almacenada como calor en las capas superficiales del océano. La conversión de la energía termal del océano (CETO) utiliza la diferencia de temperatura entre las superficies cálidas y aquellas de temperaturas menores que se encuentran a profundidades de alrededor de los 1000 metros, para producir energía mecánica y posteriormente eléctrica. Cuando el agua cálida y la helada difieren en una temperatura de al menos 20°C, el sistema CETO puede producir energía.

Existen tres ciclos básicos CETO. El sistema de ciclo cerrado utiliza la superficie cálida del agua de mar para evaporar un fluido como amoníaco o freón los cuales accionan una turbina. Luego de pasar por la turbina, el vapor es condensado en un intercambiador de calor enfriado por agua de las profundidades del océano. El fluido es nuevamente bombeado al intercambiador de calor que se encuentra en las aguas cálidas repitiendo el ciclo continuamente (ver Figura 8).



**Figura 8.** CETO, ciclo cerrado.

Los sistemas de ciclo abierto utilizan las aguas cálidas de la superficie del mar como el fluido de trabajo. El agua es bombeada hacia un evaporador en el cual la presión ha sido disminuida por una bomba de vacío hasta el punto en que el agua bombeada se evapora a temperatura ambiente. El vapor producido es trasladado a una turbina a baja presión para producir electricidad. El vapor es luego condensado por un intercambiador de calor que es enfriado por agua de océano que se encuentra a mayores profundidades, produciendo además agua desalinizada (ver Figura 9).



**Figura 9.** CETO, ciclo abierto.

Los ciclos híbridos combinan los principios de los ciclos anteriores, maximizando el uso del recurso termal para producir electricidad y agua desalinizada. Primero, la electricidad es generada en una etapa de ciclo cerrado. La diferencia de temperatura del fluido de agua del ciclo cerrado es suficiente para producir agua desalinizada usando un evaporador y un condensador superficial en la segunda etapa (ver Figura 10). Otra posibilidad es el uso de una segunda etapa con un sistema de ciclo abierto, el cual podría doblar la generación de agua desalinizada [5].

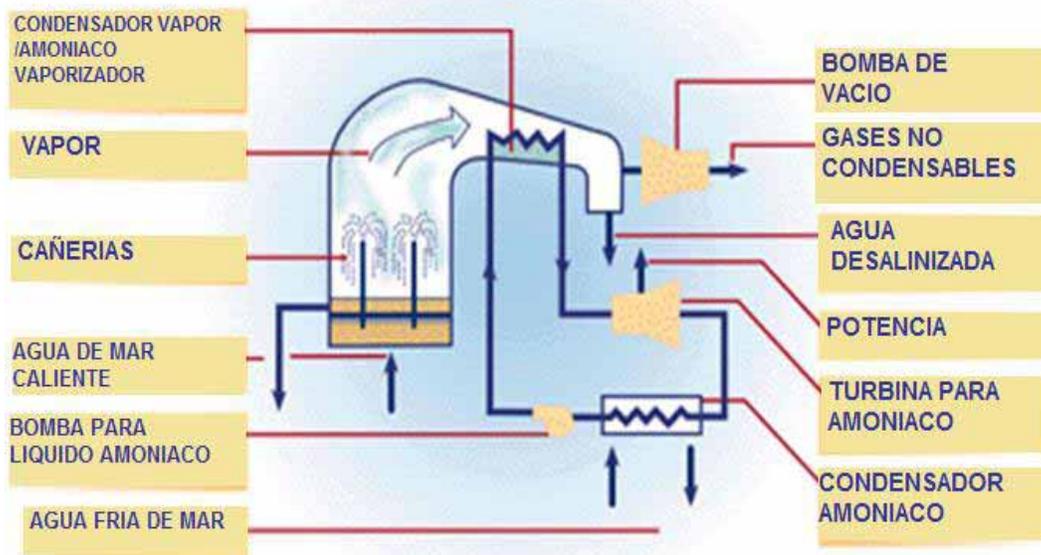


Figura 10. CETO, ciclo híbrido.

### 2.3.5. Conversión de energía a través de gradientes de salinidad

Los gradientes de salinidad generalmente se encuentran en las desembocaduras de los ríos, provocando una diferencia de salinidad entre el agua de mar y la del río. Se distinguen tres métodos.

#### 2.3.5.1. Sistema por presión osmótica retardada

Utiliza el aumento de presión en el interior de un estanque por efecto de la diferencia de presión osmótica entre dos aguas de diferente salinidad. Consiste en un estanque donde se bombea agua de mar a presión inferior a la diferencia de presión osmótica entre las aguas. El agua de río pasa al interior del estanque a través de una membrana semipermeable, aumentando la presión interna. Este aumento de presión se utiliza para obtener energía eléctrica mediante el accionamiento de una turbina acoplada a un generador. La membrana tiene la característica de ser permeable al agua e impermeable a las moléculas de sal contenidas en el agua, por esta razón el agua dulce atraviesa la membrana hacia el interior del estanque, pero el agua salina del estanque no podrá salir a través de la membrana.

La potencia que es posible extraer por este mecanismo dependerá de la diferencia de presión osmótica entre el agua dulce y el agua salada, así como también del caudal de agua que atraviese la membrana.

### **2.3.5.2. Sistema de electrodiálisis directa**

Se refiere a la conversión electroquímica directa, mediante celdas de electrodiálisis, basándose en el principio de concentración. Consiste en dos electrodos ubicados en dos recipientes con agua de diferente concentración de sal, separados por una membrana ión-permeable. Se produce una diferencia de potencial entre los electrodos correspondiente al óxido de la solución, que dependerá de la diferencia de las concentraciones.

### **2.3.5.3. Sistema por efecto osmótico por métodos mecánicos**

Consiste en provocar artificialmente una altura  $H$  de caída que pueda ser utilizada mediante una turbina hidráulica convencional. La diferencia de altura, entre el nivel del mar y un estanque encerrado entre dos muros comunicados con el océano mediante una membrana semipermeable, es producida por la diferencia de presión osmótica entre las aguas y corresponden a la altura de caída [9].

### **2.3.6. Conversión de energía mediante biomasa**

Consiste en utilizar las plantas y algas marinas, a partir de las cuales se pueda generar gases o líquidos combustibles mediante procesos adecuados.

La biomasa es una fuente de energía procedente de manera indirecta del sol y puede ser considerada una energía renovable siempre que se sigan unos parámetros medioambientales adecuados en su uso y explotación.

## **2.4. Sistemas eléctricos de conversión de la energía**

### **2.4.1. Generadores eléctricos**

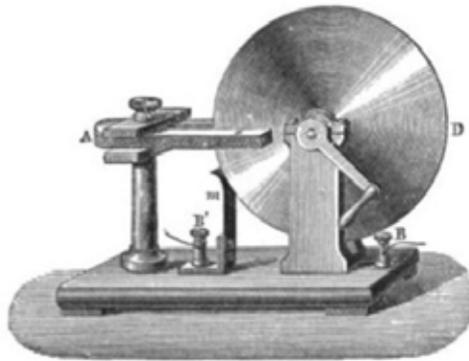
Un generador eléctrico es un dispositivo que convierte energía mecánica a energía eléctrica, usando generalmente inducción electromagnética. Pertenecen al grupo denominado “máquinas eléctricas” al que también pertenecen los motores, que son muy similares a los generadores pero realizan el proceso inverso de conversión [10].

La fuente de energía mecánica puede ser un motor eléctrico o de combustión, una turbina impulsada por vapor o por una caída de agua, una turbina eólica, presión de aire, etc.

#### **2.4.1.1. Historia**

En la década de 1830 Michael Faraday descubrió el principio de operación de los generadores electromagnéticos. Este principio, que después fue llamado “Ley de Faraday” dice que una diferencia de potencial es generada entre los extremos de un conductor que se mueve perpendicular a un campo magnético. También construyó el primer generador electromagnético, el llamado “Disco de Faraday”, que se puede ver en la Figura 11, utiliza

un disco de cobre que rota entre los polos de un imán con forma de herradura produciendo una pequeña cantidad de tensión continua [8].



**Figura 11.** Disco de Faraday [8]

#### **2.4.1.2. El dínamo**

Fue el primer generador eléctrico capaz de entregar energía a la industria. Utilizó el principio electromagnético para convertir la rotación mecánica de un eje a pulsos de corriente continua a través de un conmutador. El primer dínamo fue construido por Hippolyte Pixii en 1832.

A través de una serie de descubrimientos accidentales, el dínamo se convirtió en la fuente de muchas otras invenciones, incluyendo el motor de corriente continua, el alternador, el motor sincrónico y el convertidor de rotación. Este último es una máquina eléctrica que convierte energía eléctrica de un tipo a otra, por ejemplo alterna a continua.

El dínamo consistía en una estructura estacionaria que proveía un campo magnético constante y un conjunto de enrollados rotatorios que giraban junto al campo. En máquinas pequeñas, el campo magnético era entregado por uno o más imanes permanentes; en máquinas más grandes era suministrado por electroimanes [8].

#### **2.4.1.3. Generadores eléctricos**

Las máquinas eléctricas son dispositivos que esencialmente transfieren energía de un estado a otro. Estas energías, mecánica y eléctrica, se pueden transformar desde un estado a otro indistintamente, dependiendo del tipo de máquina que se utilice.

Muchos dispositivos pueden convertir energía eléctrica a mecánica y viceversa, siendo la estructura de cada elemento diferente dependiendo de la aplicación que este realice. Es así como los dispositivos de conversión continua de energía se conocen principalmente como motores y generadores.

Desde una visión mecánica, las máquinas eléctricas se pueden clasificar en rotativas y estáticas. Las máquinas rotativas están provistas de partes giratorias, y por el contrario, las máquinas estáticas no disponen de partes móviles, como los transformadores.

En las máquinas rotativas hay una parte fija llamada estator y una parte móvil llamada rotor. Normalmente el rotor gira en el interior del estator debido, entre otras cosas, al espacio de aire existente entre ambos y que se denomina entrehierro.

En el área de la generación eléctrica, las máquinas que son más utilizadas son las del tipo rotatorio a partir de las cuales se puede generar electricidad en corriente alterna o continua. La elección de un tipo de generación depende de los requerimientos de consumo.

El dínamo, con su conmutador, representa un generador clásico de corriente continua. Sin el conmutador es un tipo de alternador o generador sincrónico de alimentación simple. A continuación se da una descripción de los distintos tipos de generadores.

#### **2.4.1.3.1. Máquina sincrónica**

Este tipo de máquinas se caracterizan por tener un estator que funciona con corriente alterna y un rotor que utiliza corriente continua para generar un campo magnético, el que también puede ser reemplazado por un imán permanente.

En la práctica, tiene su mayor aplicación en altas potencias, particularmente como generadores. Por ejemplo a bajas revoluciones en centrales hidroeléctricas y altas revoluciones en centrales de generación con turbinas a vapor.

Se denominan sincrónicas porque operan a velocidad y frecuencia constantes bajo régimen estacionario y como la mayoría de las máquinas rotatorias puede operar tanto como generador o motor eléctrico, siendo el último caso el de motores de alta potencia y bajas revoluciones, como por ejemplo en la industria minera con molinos semiautógenos (molinos SAG). La relación de velocidades está dada por la siguiente ecuación.

$$n = \frac{120 \times f}{p} \quad (6)$$

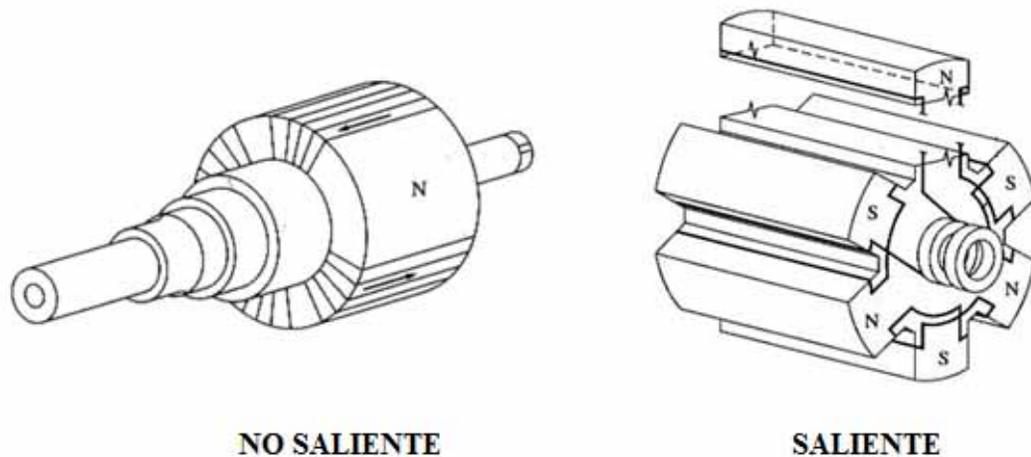
Donde  $f$  es la frecuencia en [Hz],  $n$  es la velocidad de giro del rotor en [RPM] y  $p$  es el número de polos de la máquina.

- **El rotor y formas de excitación**

En este tipo de generadores se aplica una corriente continua al enrollado del rotor, la cual produce un campo magnético. Entonces el rotor del generador se hace girar produciendo un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo

magnético rotacional induce un grupo trifásico de voltajes en los enrollados del estator del generador.

En esencia, el rotor de un generador sincrónico es un gran electroimán. Los polos magnéticos del rotor pueden ser construidos salientes o no salientes. El polo saliente es un polo magnético que se proyecta hacia fuera de la superficie del rotor, por otro lado, el polo no saliente es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor. En la Figura 12 se muestra un rotor de polos no salientes (o redondo) y uno de polos salientes respectivamente.



**Figura 12.** Tipos de rotor

Los rotores de polos no salientes se utilizan en máquinas de dos y cuatro polos, mientras que los de polos salientes se utilizan en rotores de cuatro o más polos. Dado que el rotor está sometido a campos magnéticos variables, se construye con láminas delgadas agrupadas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

Como se debe suministrar una corriente al enrollado del rotor y dado que este se encuentra girando, se requiere de un arreglo especial para entregar la potencia con forma de corriente continua necesaria. Existen dos formas comunes de suministrar esta potencia.

- Suministrar la potencia desde una fuente externa al rotor por medio de anillos rozantes y escobillas.
- Suministrar la potencia desde una fuente especial montada directamente en el eje del generador sincrónico.

Los anillos rozantes son anillos metálicos que circundan el eje de la máquina pero se encuentran aislados de él. Un extremo del devanado del rotor está unido a cada

uno de los dos anillos rozantes colocados sobre el eje de la máquina sincrónica, y una escobilla estacionaria se desliza sobre cada anillo rozante. Una escobilla es un bloque de un compuesto de carbón grafitado que conduce la electricidad libremente y tiene muy baja fricción para no desgastarse con el anillo rozante. Si se conecta el extremo positivo de una fuente del voltaje continuo a una escobilla y el extremo negativo a la otra, se aplicará igual voltaje al enrollado de campo en todo momento, sin tener en cuenta la posición angular o la velocidad del rotor.

En generadores y motores grandes se utilizan excitadores (o excitatrices) sin escobillas para suministrar la corriente de campo a la máquina. Un excitador sin escobillas es un generador pequeño de corriente alterna, cuyo circuito de campo está montado en el estator y su circuito de armadura está montado sobre el eje del rotor. La salida trifásica del generador excitador es rectificadora a corriente continua por un circuito rectificador trifásico montado también en el eje del generador y se incluye en el circuito principal del campo de continua. Controlando la pequeña corriente de campo del generador excitador es posible ajustar la corriente de campo de la máquina principal sin el problema de los anillos rozantes ni escobillas, lo que requiere de mucho menos mantenimiento en comparación al primer caso. Muchos generadores sincrónicos que incluyen excitadores sin escobillas tienen también anillos rozantes y escobillas, de manera que disponen de una fuente auxiliar de corriente continua de campo en caso de emergencia

Otro aspecto en la construcción de la máquina es el montaje del rotor. Por ejemplo una máquina impulsada por una turbina con rotor redondo o por un motor diesel con rotor saliente, tiene un rotor montado horizontalmente, por el contrario, una máquina impulsada con rodete de agua tiene un rotor de polo saliente montado en forma vertical.

- **Estator**

El estator del alternador sincrónico, igual que el de otras máquinas de corriente alterna, consta de un núcleo armado de chapas de acero electrotécnico, en cuyas ranuras está alojado un enrollado para corriente alterna, y de una carcasa de hierro fundido o soldado de chapas de acero.

En las ranuras estampadas en la superficie interior del núcleo se coloca el enrollado del estator. El aislamiento se hace con particular minuciosidad, ya que la máquina suele funcionar a tensiones altas. En calidad de aislamiento se usa una micanita<sup>7</sup> o cinta de micanita.

---

<sup>7</sup> Material electrotécnico aislante que se obtiene con láminas delgadas de mica unidas entre sí mediante resinas aislantes para altas temperaturas.

### 2.4.1.3.2. Máquina asincrónica

La máquina asincrónica o de inducción, es una máquina de corriente alterna, en la cual la velocidad de rotación del rotor es menor que la del campo magnético del estator y depende de la carga. La máquina asincrónica, igual que otras máquinas eléctricas, tiene la propiedad de ser reversible, es decir, puede funcionar como motor y generador.

La utilización de estas máquinas como motor, específicamente el de rotor de jaula ardilla, es en la actualidad la de mayor aplicación industrial. Su amplio uso radica principalmente en que estas máquinas son de un bajo costo de fabricación y mantención, además son de un diseño compacto el cual otorga una muy atractiva relación de potencia versus unidad de volumen.

El generador asincrónico opera sin una fuente de corriente para el campo del rotor pero ésta aparece por inducción desde el campo de la armadura. El campo del rotor interactúa con el campo del estator transmitiendo torque mecánico tal como en el caso del generador sincrónico. Así entonces, una corriente de armadura debe ser suministrada externamente y por lo tanto el generador no puede funcionar como tal si no está conectado a una red de corriente alterna. Su uso se da particularmente dentro de la industria eólica, donde el control sobre la velocidad de giro del campo magnético rotórico permite que la potencia eléctrica generada siga una referencia constante ante cambios razonables de viento.

En términos operativos, la característica más importante de este generador es que la relación entre la frecuencia de las variables eléctricas y la velocidad de giro del rotor no es constante y varía dependiendo del torque o la potencia aplicada. De esta forma se define el concepto de deslizamiento ( $S$ ) que es el cociente de las velocidades de los campos magnéticos rotatorios del rotor y estator.

$$S = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_s} \quad (7)$$

Donde  $\omega_s$  es la velocidad del campo magnético rotatorio del estator,  $\omega_r$  la velocidad del campo magnético rotatorio del rotor y  $\omega_m$  la velocidad mecánica del rotor.

El deslizamiento permite caracterizar la operación de la máquina de inducción, ya que si este fuera positivo y menor a la unidad, la máquina estaría operando como motor, si el deslizamiento fuese mayor a la unidad se estaría operando como generador y finalmente si el deslizamiento fuese negativo la máquina estaría operando como freno.

- **Estator**

El estator de la máquina de inducción está compuesto por un núcleo laminado que cuenta con ranuras axiales donde se alojan los enrollados. Típicamente la configuración usada para disponer de los enrollados en el estator es la del enrollado

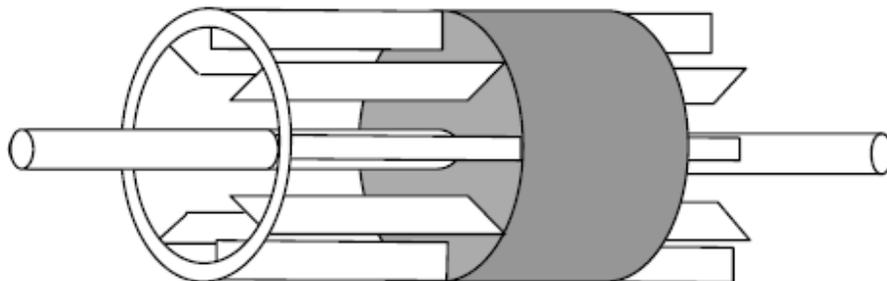
imbricado y los extremos de la bobina son conectados a la placa de terminales ubicada en la carcasa de la máquina.

- **Rotor**

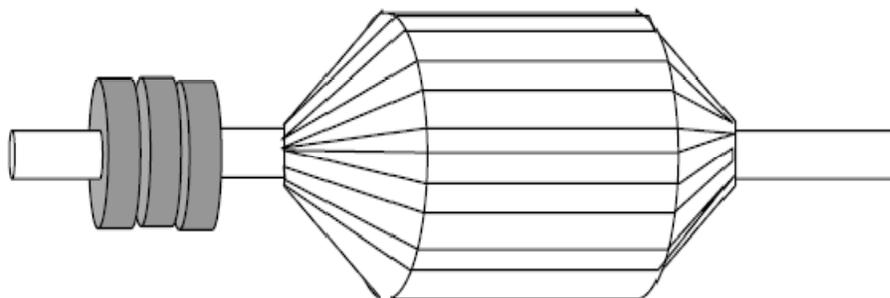
Dentro de las máquinas de inducción, se puede encontrar dos tipos de rotor: el rotor jaula de ardilla y el rotor bobinado. El primero consiste en una serie de barras axiales cortocircuitadas en sus extremos por dos anillos conductores. La jaula es de aluminio o cobre y en general, la gran simplicidad de su diseño, es la que otorga a la máquina de inducción las ventajas de diseño compacto, costo y mantención (ver Figura 13).

Por otro lado, el rotor bobinado es más complejo, los enrollados son similares a los del estator y conservan el mismo número de polos. Internamente las fases se encuentran conectadas en configuración estrella y los terminales libres de las bobinas están conectados a anillos rozantes montados sobre el eje de la máquina. La placa de terminales se conecta con los anillos mediante carbones (ver Figura 14).

En general, los aspectos constructivos de este rotor hacen que la máquina pierda los atributos de simplicidad y mantención respecto de la máquina con rotor tipo jaula de ardilla, sin embargo, el hecho de tener acceso a los anillos rozantes permite agregar resistencias a los enrollados para mejorar las condiciones de partida del motor o bien controlar la potencia generada en ante un cambio en la velocidad de giro del eje en el caso de la operación como generador.



**Figura 13.** Rotor jaula ardilla



**Figura 14.** Rotor bobinado

### 2.4.1.3.3. Máquina de corriente continua

La máquina de corriente continua es constructivamente más compleja que las máquinas de corriente alterna, el empleo de escobillas, colector, etc., la hace comparativamente menos robusta, requiere mayor mantenimiento y tiene un mayor volumen y peso por unidad de potencia. No obstante lo anterior, tiene múltiples aplicaciones, especialmente como motor, debido principalmente a:

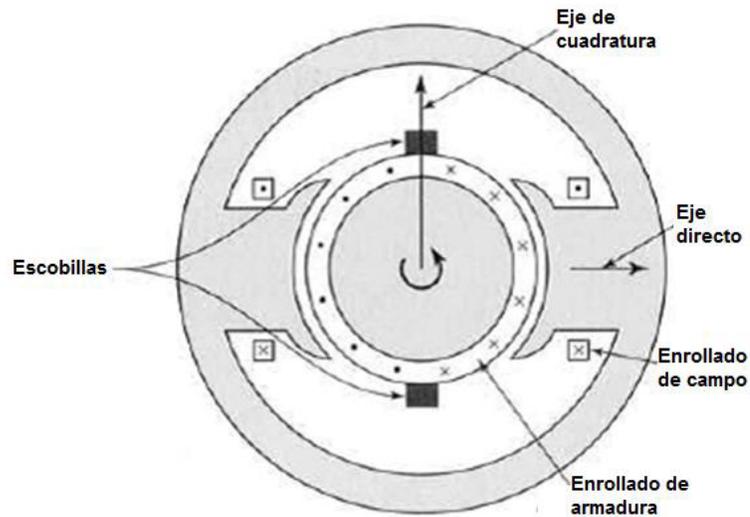
- Amplio rango de velocidades que pueden ser controladas de modo continuo con alta precisión
- Característica de torque-velocidad variable.
- Rápida aceleración, desaceleración y cambio de sentido de giro.
- Posibilidad de frenado regenerativo.

Desde el punto de vista constructivo está constituida por dos núcleos de fierro, generalmente laminado llamados carcasa e inducido (o armadura). En ambos núcleos van ubicadas bobinas de diferentes configuraciones que crean campos electromagnéticos que interactúan de modo de obtener la tensión generada o el torque motriz del eje, dependiendo si la máquina está trabajando como motor o generador. En la máquina de corriente continua normal, los bobinados de inducido se localizan en el rotor y los bobinados inductores en el estator.

El circuito eléctrico del estator, que también se conoce como circuito eléctrico fijo de excitación, está compuesto por el enrollado de campo principal, devanados de los interpolos y los devanados de compensación.

El circuito eléctrico rotatorio está constituido por el enrollado del inducido o armadura y el conmutador o colector. Este último es simplemente un rectificador mecánico formado en términos elementales por dos anillos cuyo fin es rectificar la onda de tensión interna que es generada, transformándola a una de corriente continua en el caso de operar como generador, o de convertir la corriente continua que se aplica externamente por medio de escobillas en una corriente alterna que generará un campo magnético en la armadura de la máquina cuando opera como motor. La necesidad de contar con este conmutador es la razón por la cual los devanados de armadura de las máquinas C.C. se colocan sobre el rotor.

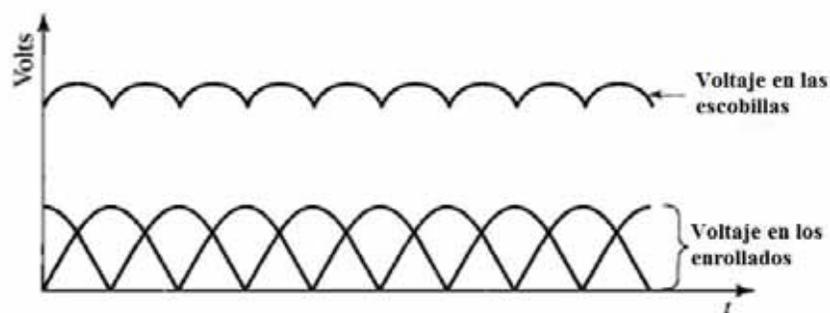
Las escobillas de carbón fijas que hacen contacto con la superficie del conmutador, presionadas por un resorte, conectan al devanado con los terminales externos de la armadura. En la Figura 15 es posible apreciar el modelo de una máquina fundamental de corriente continua con conmutador.



**Figura 15.** Máquina elemental de C.C. con conmutador

El efecto de la corriente continua en el devanado de campo de esta máquina es crear una distribución de flujo magnético estacionario respecto al estator. De igual modo, el efecto del conmutador es tal que cuando pasa corriente a través de las escobillas, la armadura crea una distribución de flujo magnético que también está fija en el espacio y cuyo eje, determinado por el diseño de la máquina y la posición de las escobillas, típicamente es perpendicular al eje del flujo de campo. La interacción de estas dos distribuciones de flujo es lo que crea el torque de la máquina. Si la máquina trabaja como generador, el torque se opone al giro, de lo contrario, si la máquina está trabajando como motor, el torque electromagnético actúa en la dirección del giro.

La Figura 16 muestra la variación de la amplitud de los voltajes presentes entre las escobillas y entre los enrollados de la máquina de corriente continua para en un régimen permanente.



**Figura 16.** Voltaje rectificado en las bobinas y voltaje entre las escobillas de la máquina C.C.

#### 2.4.1.3.4. Generador lineal

En este tipo de máquinas el movimiento se realiza unidireccionalmente en torno a unos pocos centímetros. Son utilizados principalmente como impulsores, motores Stirling libre de pistones y motores lineales de combustión interna de un pistón. Hasta el momento, el motor Stirling (ver Figura 17) ha sido usado en naves espaciales y para la generación residencial de energía eléctrica.

Mientras que los generadores de movimiento rotatorio son máquinas de varias fases, en general, el alternador de movimiento lineal tiende a ser una máquina de una sola fase debido a que el movimiento oscilatorio lineal impone un cambio de fase en función del cambio de dirección del movimiento. Por lo tanto, un alternador lineal trifásico debe ser construido con tres alternadores lineales monofásicos.

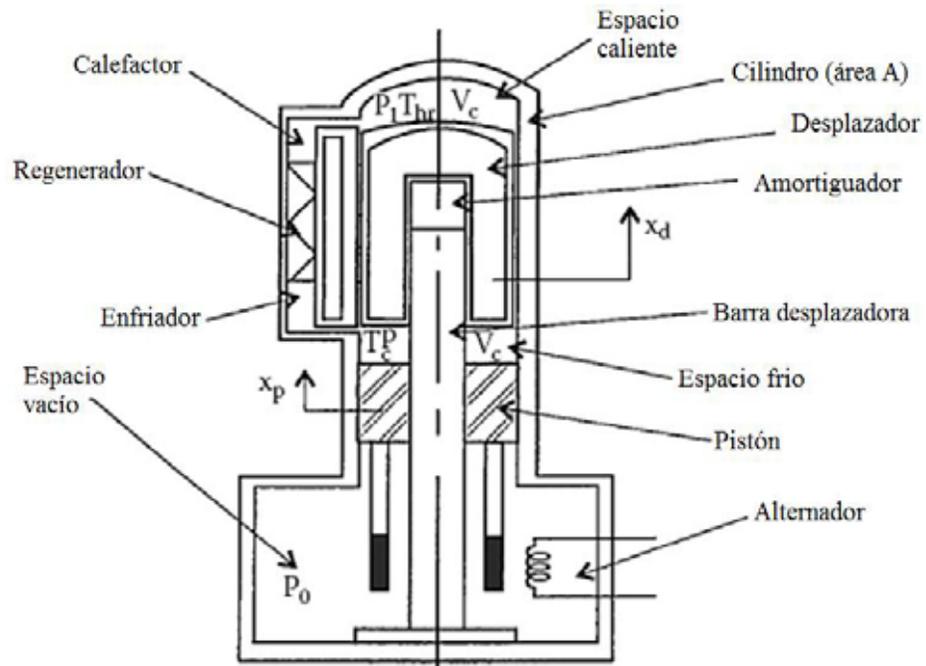


Figura 17. Generador lineal (motor Stirling)

Aunque los primeros alternadores de movimiento lineal fueron propuestos como generadores sincrónicos monofásicos con excitación electromagnética, hace un tiempo excitación por imanes permanentes se hizo presente logrando que los actuales generadores lineales se hicieran más competitivos.

#### 2.4.2. Acumulación de energía

El almacenamiento de energía es un proceso natural que se ha realizado desde millones de años, la energía producida en la creación del universo ha sido almacenada en estrellas tales como el sol y es ahora utilizada directa e indirectamente por la humanidad.

Por ejemplo, tempranamente se controlaron los cursos de agua para abastecer molinos que eran utilizados para la molienda de granos o el acoplamiento de maquinaria. Muy a menudo también se construyeron complejos sistemas de embalses y presas para almacenar y liberar agua.

Esta actividad cobra una mayor importancia con el desarrollo de la electricidad y a diferencia de otras fuentes de energía actuales, como el gas, la electricidad debe ser utilizada a medida que ésta es generada. Esto acarrea una dificultad para atender los cambios en la demanda sin tener que cortar algunas veces el suministro o contar con un exceso de capacidad costoso. Por otro lado resulta poco económico ajustar la potencia entregada por los equipos, alejándolos de su punto de funcionamiento óptimo, disminuyendo así el rendimiento del sistema lo que como consecuencia incrementa los costos de producción.

Una solución temprana al problema fue la invención de la batería, pero su uso es limitado debido a las capacidades de carga y su alto costo. Una solución similar, con el mismo tipo de problemas, fue el condensador.

Algunas áreas del mundo han utilizado las características geográficas para almacenar grandes cantidades de agua en embalses en lo alto de las colinas utilizando el exceso de electricidad en momentos de baja demanda mediante bombas eléctricas, para luego dejar caer esa agua a través de grupos electrógenos de forma de recuperar la energía en el horario de la máxima demanda.

Otros tipos de almacenamiento de energía, que persiguen la misma idea de aprovechamiento del recurso, son los siguientes:

- Bombeo y almacenamiento de agua.
- Almacenamiento de aire comprimido.
- Almacenamiento de energía térmica.
- Almacenamiento en baterías.
- Celdas de combustible de hidrogeno.
- Almacenamiento de energía magnética en superconductores.
- Volante de almacenamiento de energía cinética.

#### **2.4.2.1. Acumulador eléctrico**

Se le llama batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, al dispositivo que almacena energía eléctrica usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga [11].

Las ventajas y desventajas del uso de este tipo de acumulación se muestran a continuación:

- Ventajas:
  - Gran disponibilidad.
  - Bajo costo.
  - Rendimiento moderado.
  - Alto número de ciclos de vida.
  - Bajo nivel de auto descarga.
- Desventajas:
  - Baja densidad de energía.
  - Deterioro ante descargas profundas.
  - Deterioro ante sobrecargas.
  - Se requiere mantenimiento.

Se pueden distinguir cuatro tipos de clasificaciones en las baterías: por su funcionabilidad, por el diseño de las placas, por las aleaciones utilizadas en la fabricación y por electrolito utilizado.

- Clasificación atendiendo a la funcionabilidad
  - **Baterías de arranque:** Utilizadas para el arranque del motor de autos y camiones. Preparadas para ceder mucha intensidad en poco tiempo. Bajo costo. Poca resistencia al ciclado. Solo descargas superficiales.
  - **Baterías de tracción:** Utilizadas para alimentar vehículos eléctricos. Preparadas para cargas y descargas profundas y rápidas. Alta resistencia al ciclado. Alto mantenimiento.
  - **Baterías estacionaria:.** Permanecen largos periodos de tiempo en flotación totalmente cargadas y resisten descargas profundas y esporádicas. Se utilizan en alumbrado de emergencia. Bajo consumo de agua. Moderada resistencia al ciclado.
- Clasificación atendiendo al diseño de las placas.
  - **Placa Planté:** Consistente en una placa de plomo plana cuyo material activo (Pb) se forma por medio de continuas cargas y descargas. La batería solo alcanza su capacidad nominal tras varios ciclados. Diseño ampliamente extendido en baterías de arranque.
  - **Placa Fouré o empastada:** Pueden ser planas o tubulares. Las planas se caracterizan por utilizar rejillas para retener el material activo y mejorar la distribución de la intensidad en la placa. Recomendada para operación en flotación. Las placas tubulares se caracterizan por poseer varillas de plomo aleado con antimonio recubiertas con de fibras sintéticas tubulares. Recomendada para operación en ciclado.

- Clasificación atendiendo al electrolito utilizado.
  - **Líquido airead.**: El electrolito se encuentra en estado líquido y es accesible al usuario para así realizar el mantenimiento pertinente. Los tapones del recipiente contenedor suelen ser de tipo recombinante para minimizar la pérdida de agua y evitar la emisión de H<sub>2</sub>.
  - **Electrolito inmovilizado.** El electrolito se absorbe utilizando fibra de vidrio microporosa o fibra polimérica, esta fibra rellena el espacio entre placas. No requieren mantenimiento, no desprenden gases, no se derraman, pero no tienen buen funcionamiento ante descargas profundas.
  - **Electrolito inmovilizado gelificado.** Incorporan un electrolito tipo gel de consistencia muy densa. No necesitan mantenimiento pero no son aptas para operar en sobre descarga ni altas temperaturas.

Los acumuladores reversibles que son más utilizados actualmente en equipos eléctricos de potencia y en telecomunicaciones son el acumulador plomo-ácido, el acumulador níquel-cadmio y el acumulador de litio. En la Tabla 2 se muestran algunas características de cada uno de ellos.

<b>Tipo de Acumulador</b>	<b>activa polo negativo</b>	<b>activa polo positivo</b>	<b>Electrolito</b>	<b>fuerza electromotriz</b>
plomo - ácido	Pb	PbO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) disuelto en H <sub>2</sub> O	U <sub>e</sub> =2,044 V
níquel - cadmio	Cd	NiO(OH)	K(OH) disuelto en H <sub>2</sub> O	U <sub>e</sub> =1,3V
ión - cobalto	CoO <sub>2</sub>	Li <sub>4</sub> C	Li(PF <sub>6</sub> ) disuelto en solvente orgánico	U <sub>e</sub> =3,7V
litio - manganeso	Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Li <sub>4</sub> C	Li(BF <sub>4</sub> ) disuelto en gel	U <sub>e</sub> =3,7V

**Tabla 2.** Características químicas de los tipos de acumuladores

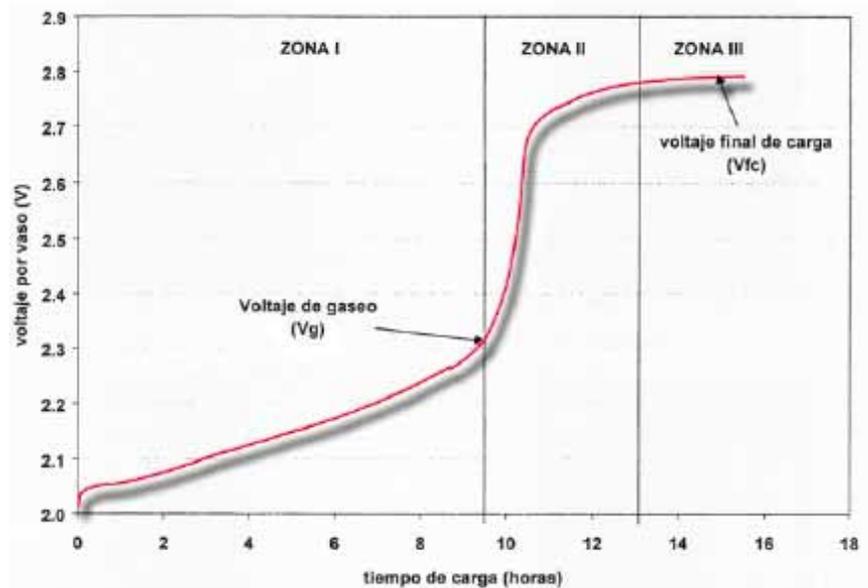
Para la elección de un acumulador, se deben considerar los siguientes aspectos:

- 1°. La tensión, pues es el que suele determinar si el acumulador conviene al uso a que se le destina.
- 2°. La corriente que puede suministrar el elemento. Especial importancia tiene en algunos casos la corriente máxima obtenible.
- 3°. La capacidad eléctrica

### 2.4.3. Características de la carga de baterías

La carga es el proceso por el cual la batería almacena energía eléctrica en forma de energía electroquímica. El proceso de carga suele caracterizarse suponiendo que se realiza a

corriente constante. Si se sigue esta metodología, el voltaje en circuito abierto de la batería alcanza 3 estados diferenciados que pueden ser apreciados en la Figura 18.



**Figura 18.** Estados de carga de la batería

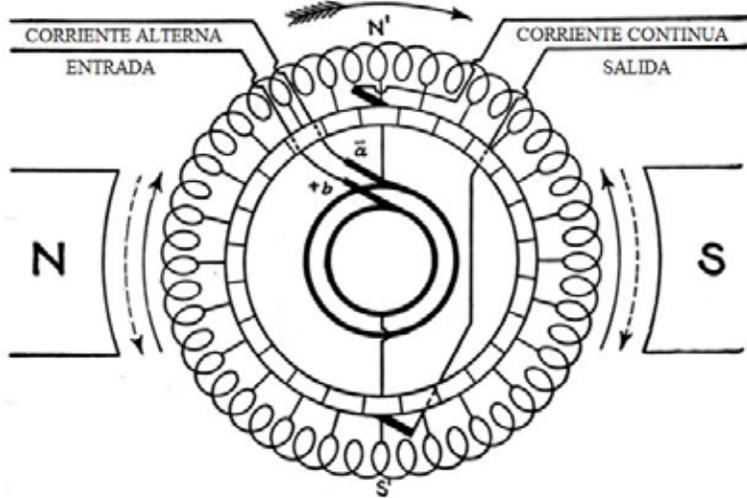
- **Zona I.** El voltaje de carga va aumentando de forma suave y lineal. Toda la corriente que circula a través de la batería se utiliza para restablecer los materiales activos.
- **Zona II.** El voltaje sufre una subida brusca. En esta segunda etapa se superponen dos fenómenos. Primero se siguen produciendo materiales activos como en la zona I y segundo, los reactivos que producen los materiales activos comienzan a escasear por lo que parte de la corriente que llega a la batería se invierte en la hidrólisis del agua del electrolito.
- **Zona III.** El voltaje alcanza un valor estable. En esta última etapa los materiales activos se han agotado y toda la corriente que llega a la batería se invierte en la hidrólisis del agua.

#### 2.4.4. Conversión de energía eléctrica

El amplio uso de dispositivos que funcionan con corriente alterna y la necesidad de contar con un sistema de acumulación de baterías, determina la utilización de un dispositivo que permita dicha conversión.

Desde fines del siglo 19 hasta mediados del siglo 20, la conversión DC-AC fue realizada usando convertidores rotatorios (ver Figura 19) o conjuntos motor-generador. A comienzos del siglo 19 los tubos de vacío y los tubos llenados con gas comenzaron a ser utilizados como interruptores en los circuitos de inversión.

La conversión de corriente puede ser realizada de diversas formas. La mejor manera depende de cuánto ha de parecerse a la onda sinusoidal ideal para realizar un funcionamiento adecuado de la carga de corriente alterna.



**Figura 19.** Esquema simplificado de un convertidor rotatorio

# Capítulo 3

## 3. Sistema de conversión mecánica eléctrica

A partir del prototipo de obtención de energía de las olas, desarrollado por Pedro Riquelme, es necesario seleccionar los dispositivos que serán necesarios para transformar la energía aportada por la boya a energía mecánica que sea aprovechable por un generador eléctrico.

En este capítulo se explica con más detalle cada uno de los dispositivos que formarán parte del diseño, se muestran las características mínimas con que debe contar el sistema mecánico y se hace un estudio de los sistemas eléctricos aplicables a la dinámica del movimiento (velocidad variable). Finalmente se describen los dispositivos que harían posible la utilización final del recurso.

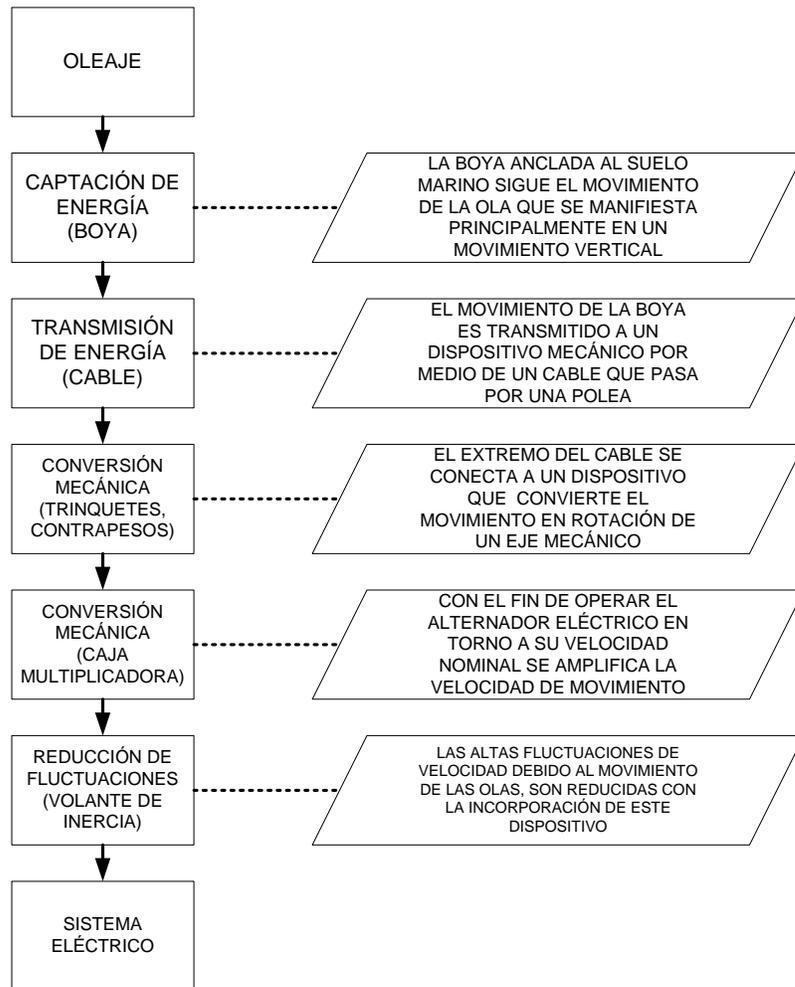
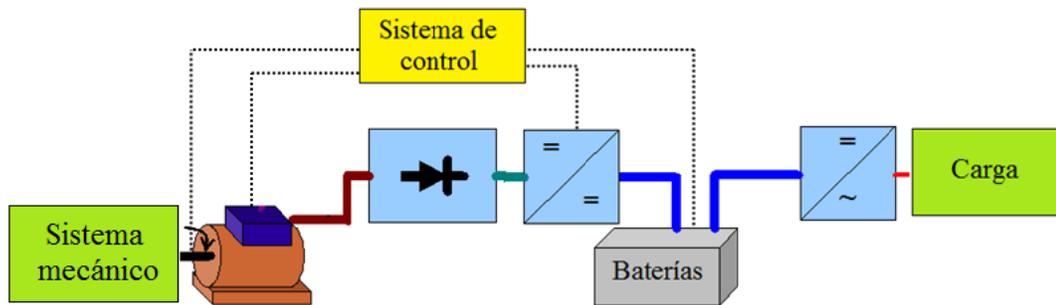


Figura 20. Diagrama de bloques del sistema mecánico



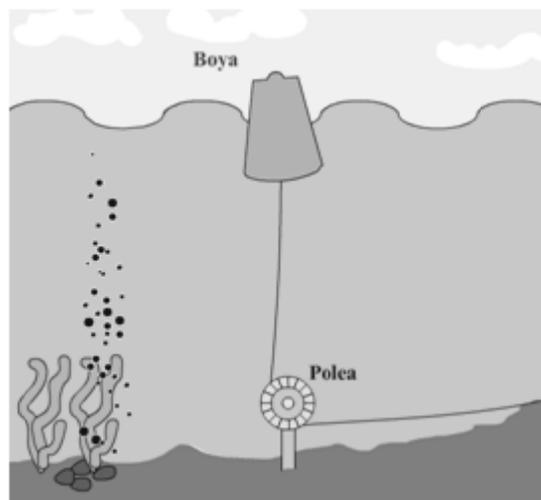
**Figura 21.** Esquema conceptual del sistema de conversión eléctrica

La Figura 20 muestra un diagrama de bloques con los elementos básicos que forman parte del sistema mecánico y que serán descritos en las páginas siguientes.

La Figura 21 muestra el diseño conceptual del sistema de conversión mecánica a eléctrica en base a un generador sincrónico, rectificador, convertidor DC-DC, sistema de acumulación, sistema de control e inversor de voltaje que en primera instancia cumpliría con los requerimientos. Más adelante se valida la incorporación de cada uno de estos dispositivos.

### 3.1. Sistema mecánico de obtención de energía

Una boya anclada al suelo marino capta la energía de la ola al flotar debido a que su densidad es menor a la del agua de mar. Esta energía se manifiesta mayoritariamente por un movimiento vertical oscilatorio.



**Figura 22.** Sistema de boya y polea

La boya se mantiene en el lugar gracias a un cable que pasa por una polea, la que permite que el movimiento oscilatorio unidireccional sea transmitido a un dispositivo mecánico en el borde costero susceptible de ser acoplado a un generador eléctrico (ver Figura 22).

La potencia y velocidad del movimiento dependerá de las características de la ola y del peso de la boya.

### 3.1.1. Movimiento de la boya

La boya actúa como un absorbedor puntual, es decir, es capaz de captar la energía de la ola y dada su construcción, de cuerpo de revolución, es indiferente a la dirección de propagación.

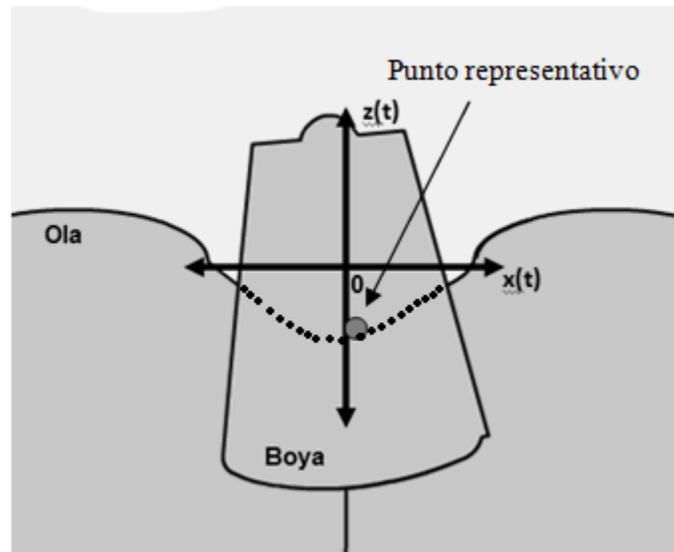


Figura 23. Eje de referencia para movimiento de la boya

El diseño de este elemento escapa al alcance de esta memoria, pero se puede suponer que su movimiento tendrá el mismo comportamiento de un punto en la superficie de la ola. Así entonces, a partir del eje de referencia propuesto en la Figura 23, se plantea un modelo básico del comportamiento de la ola para posteriormente modelar las características mecánicas que ésta adquiere.

#### 3.1.1.1. Modelo básico de ola

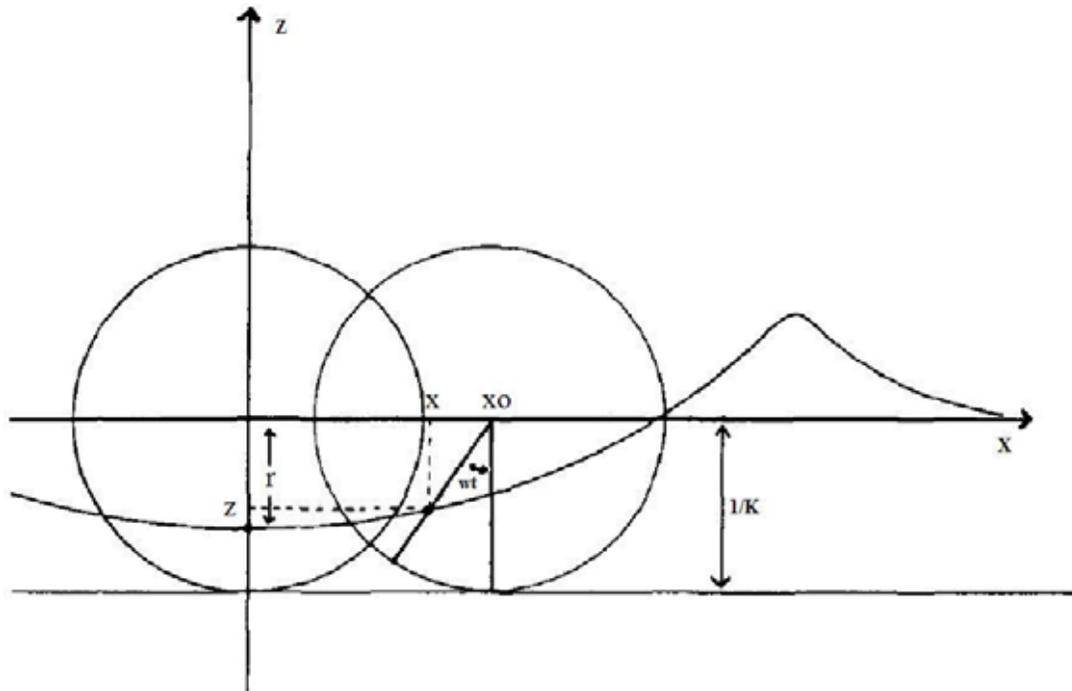
El movimiento de fluidos generalmente es estudiado por dos métodos. Uno de ellos es el método de Euler que considera un punto  $(x,y,z)$  y trata de modelar las propiedades del fluido como una función del tiempo, por ejemplo, la velocidad  $U = f(x,y,z,t)$ . El otro método es el Lagrangeano, que sigue la trayectoria de un punto del material a partir de una coordenada de partida en función del tiempo, por ejemplo, la velocidad según coordenadas  $V_x = f_x(x_0,y_0,z_0,t)$ . El primer método es útil para analizar las características del medio, pero en el caso de un modelamiento gráfico, la segunda opción es la más adecuada [12].

Dado lo anterior, la ecuación de movimiento propuesta para el plano XZ es la siguiente:

$$x = x_0 + r \sin(kx_0 - \omega t) \quad (8)$$

$$z = z_0 + r \cos(kx_0 - \omega t) \quad (9)$$

La altura de la ola es  $H = 2r$ , el ancho es  $L = \frac{2\pi}{k}$ , el período es  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  y la velocidad de propagación  $c = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k}$ . Gráficamente se puede apreciar el modelo en la Figura 24.



**Figura 24.** Modelo paramétrico básico de una ola [12]

El parámetro de interés es lo que sucede con la altura de la ola respecto al tiempo, ya que se puede suponer que la boya describirá la misma trayectoria de un punto de la superficie que se encuentra estático respecto de las coordenadas horizontales. Así entonces, la potencia y la velocidad que adquiere la boya pueden ser modelados como se muestra a continuación:

Un cuerpo que se mueve en un campo gravitacional realiza un trabajo que depende sólo de su posición y peso, lo que en este caso equivale al peso de la boya y la altura de la ola.

$$W = E \cdot H = p \cdot H = m \cdot g \cdot H \text{ [Julios]} \quad (10)$$

Con

E: Empuje de la ola [N]

p: Peso de la boya [N]

H: Altura de la ola [m]

m: Masa de la boya [kg]

g: aceleración de gravedad [m/s<sup>2</sup>]

La potencia estará dada por

$$P = \frac{W}{t} = \frac{m \cdot g \cdot H}{t} = m \cdot g \cdot v \quad (11)$$

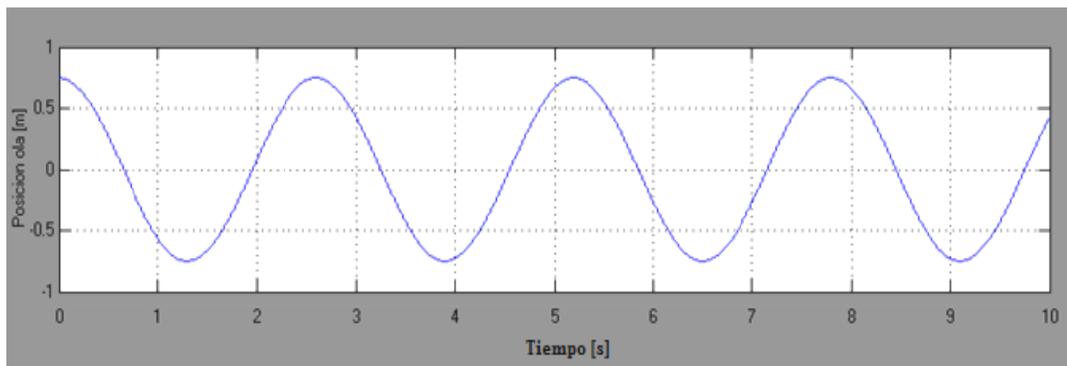
Con

P: Potencia [Watt]

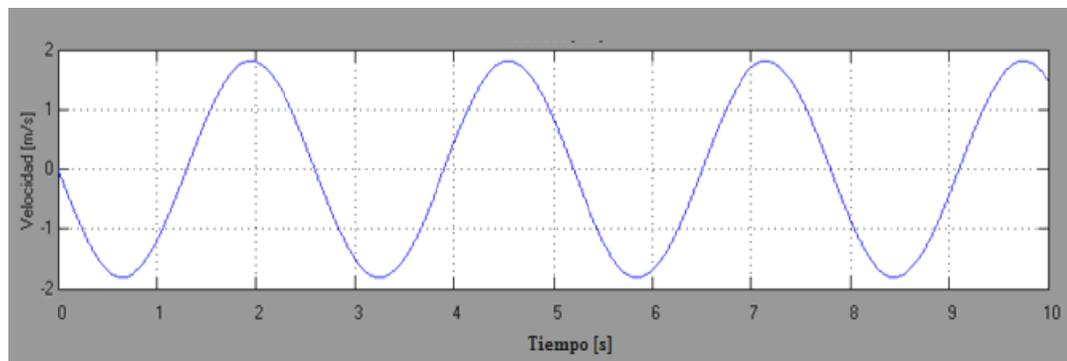
t: Tiempo [s]

v: Velocidad [m/s]

Por ejemplo, para una ola de altura 1.5 [m], período de 2.6 [s] y una boya de 500[kg] se tendrá, en un intervalo de 10 segundos, los resultados expuestos en la Figura 25 y la Figura 26.



**Figura 25.** Altura de la ola en función del tiempo



**Figura 26.** Velocidad de la ola en función del tiempo

### 3.1.2. Potencia aprovechable

Debido a las características constructivas, la potencia absorbida por la boya que puede ser aprovechada es la que se produce cuando ésta es empujada por la ola, lo que es equivalente a la situación en que el extremo del cable tira. Dado que es este último punto el que se conectara a un dispositivo mecánico que adaptará el movimiento para accionar el generador eléctrico, la velocidad y la potencia que serán aprovechadas por el generador tendrán un comportamiento como el que se puede apreciar en la Figura 27 y la Figura 28.

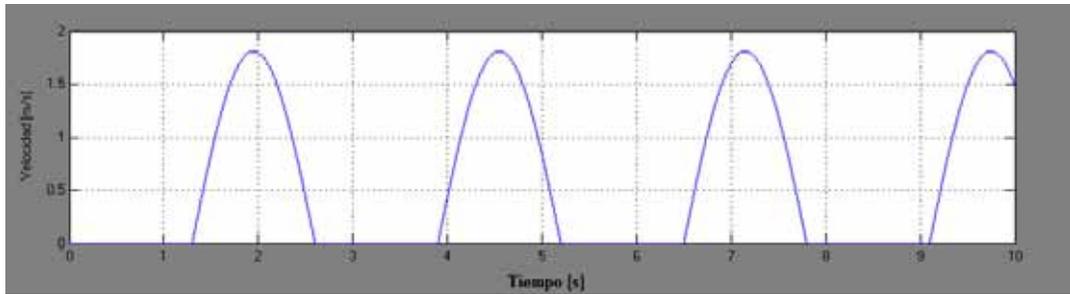


Figura 27. Velocidad aprovechable

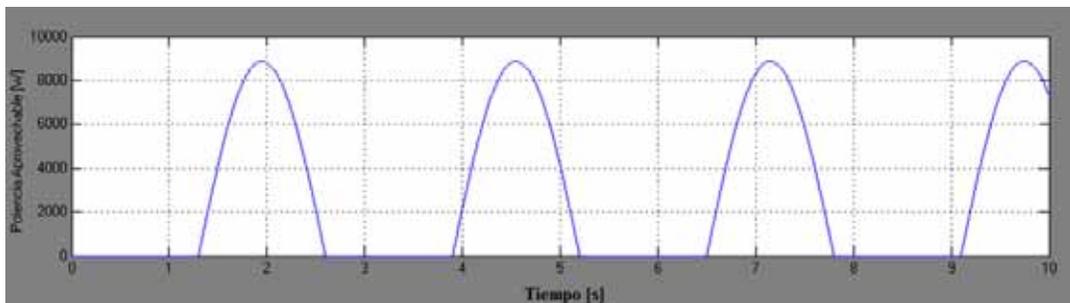


Figura 28. Potencia aprovechable

### 3.1.3. Conversión mecánica

Aunque escapa al alcance de esta memoria, es necesario definir las características básicas del sistema mecánico de obtención de energía a partir de las olas. Es por esto que se hace una revisión de los elementos básicos que constituirían el mecanismo, con el fin de ejemplificar de forma más detallada la dinámica del sistema.

Para que la máquina eléctrica funcione eficientemente es necesario que las fluctuaciones de velocidad de giro de su eje se mantengan dentro de un rango aceptable y que la velocidad de giro promedio sea cercana al punto de operación de máxima eficiencia. Cada tipo de máquina presenta distintas curvas características que definen su torque resistivo y velocidad de operación, la cual generalmente es de varias revoluciones por minuto.

Dadas las características de la potencia aprovechable, es necesario que el sistema mecánico sea capaz de convertir el movimiento unidireccional a un movimiento rotatorio,

amplificar la velocidad de movimiento y atenuar la fluctuación de velocidad. Este problema es comúnmente solucionado con el empleo de ejes, poleas, trinquetes, engranajes y volantes de inercia.

El diseño del sistema mecánico de conversión tiene como uno de sus principales inconvenientes la necesidad de restablecer la posición del cable una vez que la ola levanta la boya, es decir, devolver el extremo a una posición inicial antes de que termine el ciclo. Por el momento se abarcará el problema omitiendo la situación, luego en el capítulo de diseño se propondrán mecanismo que podrían solucionar este problema.

### 3.1.3.1. Trinquete

Un trinquete es un mecanismo que impide que el engranaje gire hacia el lado contrario trabándolo con sus dientes en forma de sierra (ver Figura 29). De esta forma se produce torque en un sentido, girando libremente en el sentido opuesto.

Es este el dispositivo que realiza la rectificación del movimiento, permitiendo que el eje en el cual será acoplado el generador eléctrico gire en un solo sentido.

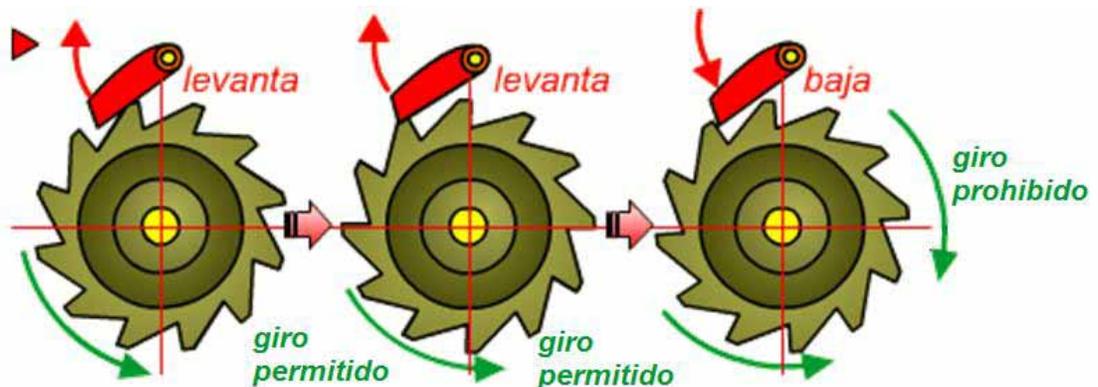
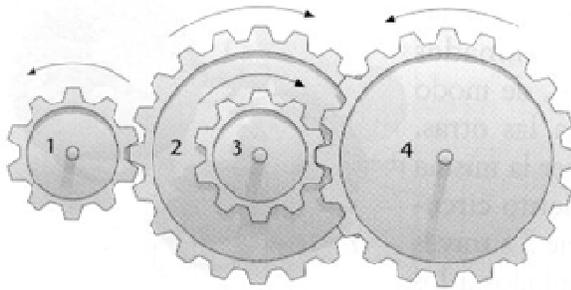


Figura 29. Trinquete

### 3.1.3.2. Multiplicador de velocidad

El engranaje es el mecanismo utilizado para transmitir potencia mecánica entre las distintas partes de un dispositivo. Sirve para transmitir movimiento circular mediante contacto de ruedas dentadas y una de las aplicaciones más importantes es la transmisión de movimiento desde el eje de una fuente de energía, hasta otro eje situado a cierta distancia y que ha de realizar un trabajo.



**Figura 30.** Multiplicador de velocidad

Un multiplicador de velocidad es un sistema de transmisión formado por engranajes, caracterizado porque su velocidad de salida es mayor que la de entrada. Es un sistema opuesto al reductor de velocidad, más habitual en la industria, ya que en la mayor parte de los casos la velocidad de giro de los motores es superior a la adecuada para el trabajo de las máquinas. Físicamente un multiplicador de velocidad coincide con un reductor de velocidad, diferenciándose en cuál es el eje de entrada y el de salida. La eficiencia de este dispositivo puede alcanzar valores entre 90% a 97% [13].

Para ejemplo en la Figura 30, sean  $N_i$  y  $D_i$ , con  $i = 1, 2, 3, 4$ , las velocidades angulares y diámetros para los engranajes 1, 2, 3 y 4. Entonces se cumplirá que:

$$D_1 N_1 = D_2 N_2 \quad (12)$$

$$D_3 N_3 = D_4 N_4 \quad (13)$$

$$N_2 = N_3 \quad (14)$$

$$\Rightarrow N_1 = \frac{D_2 D_4}{D_1 D_3} N_4 = k N_4 \quad (15)$$

Así entonces, si el factor  $k$  es mayor a 1, el arreglo de engranajes representa un multiplicador de velocidad si es que la entrada al sistema se da en el eje del engranaje  $n^\circ 4$ .

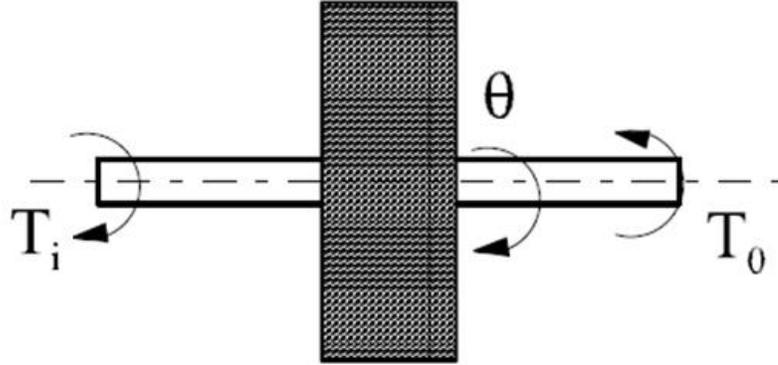
### 3.1.3.3. Volante de inercia

Un volante de inercia es un elemento pasivo, que únicamente aporta al sistema una inercia adicional de modo que le permite almacenar energía cinética. Este volante continúa su movimiento por inercia cuando cesa el torque que lo propulsa. De esta forma, el volante de inercia se opone a las aceleraciones bruscas en un movimiento rotativo. Así se consiguen reducir las fluctuaciones de velocidad angular. Es decir, se utiliza el volante para suavizar el flujo de energía entre una fuente de potencia y su carga.

Para el cálculo de un volante de inercia se suelen utilizar dos parámetros auxiliares: la velocidad angular media  $\omega_m$  y el coeficiente de fluctuación  $C_f$ , los que se definen de la siguiente forma:

$$\omega_m = \frac{\omega_{\min} + \omega_{\max}}{2} \quad (16)$$

$$C_f = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} \quad (17)$$



**Figura 31.** Esquema simplificado de un volante de inercia

La Figura 31 muestra el esquema simplificado de un volante de inercia, se definen entonces las siguientes variables:

- I: Momento de Inercia del Volante
- $\theta$ : La posición del volante
- $T_i$ : El torque de entrada
- $T_o$ : El torque de salida
- $\dot{\theta}_i$ : Velocidad angular de entrada
- $\dot{\theta}_o$ : Velocidad angular de salida

Tomando arbitrariamente  $T_i$  como positivo y  $T_o$  como negativo, se obtiene la siguiente ecuación para el movimiento del volante:

$$\sum M = T_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) - T_o(\theta_o, \dot{\theta}_o) - I\ddot{\theta} = 0 \quad (18)$$

$$\Rightarrow I\ddot{\theta} = T_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) - T_o(\theta_o, \dot{\theta}_o) \quad (19)$$

En general,  $T_i$  y  $T_o$  pueden depender tanto de los valores de  $\theta_i$  y  $\theta_o$  como de los valores de  $\dot{\theta}_i = \omega_i$  y  $\dot{\theta}_o = \omega_o$ . No obstante, normalmente el momento de torsión depende únicamente de uno de los dos parámetros, siendo frecuentemente  $\omega$  el decisivo. En un análisis menos exhaustivo del sistema formado por el volante, se puede suponer que el eje es rígido y en consecuencia tomar  $\theta_i = \theta_o = \theta$ . Así, la ecuación anterior queda simplificada del siguiente modo:

$$I\ddot{\theta} = T_i(\theta, \omega) - T_o(\theta, \omega) \quad (20)$$

$$\int_i^o I\omega d\omega = \int_i^o (T_i(\theta, \omega) - T_o(\theta, \omega)) d\theta \quad (21)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}I(\omega_o^2 - \omega_i^2) = E_o - E_i \quad (22)$$

$$\Rightarrow I = \frac{E_o - E_i}{C_f \omega_m^2} \quad (23)$$

Con  $E_i$  y  $E_o$  representando a las energías cinéticas asociadas a los dos instantes de tiempo. Así es posible en la práctica dimensionar la inercia del volante para un coeficiente de fluctuación, una velocidad media y una máxima fluctuación de energía cinética, ésta última determinada por la característica del torque del sistema [13].

### 3.1.3.4. Freno mecánico

La función del freno mecánico es mantener bloqueado o disminuir la velocidad el eje de giro durante operaciones de mantenimiento o cuando la velocidad alcanza amplitudes que pueden atentar contra la integridad del sistema mecánico y del generador.

Físicamente está constituido por un disco que gira solidario al eje acoplado al generador eléctrico y por una mordaza de frenado que roza con el disco cuando el freno es accionado, produciendo fricción (ver Figura 32).



**Figura 32.** Freno mecánico

El accionamiento de la mordaza será realizado vía eléctrica y el dispositivo estará constituido por un motor de corriente continua con un reductor de velocidad, el cual ejercerá el torque necesario sobre una cremallera o un eje sin fin, para ejercer presión sobre el disco.

El encendido del motor podrá ser de forma manual, pero para el caso de protección ante velocidades de giro extremas, será el sistema de control el que energizará el circuito.

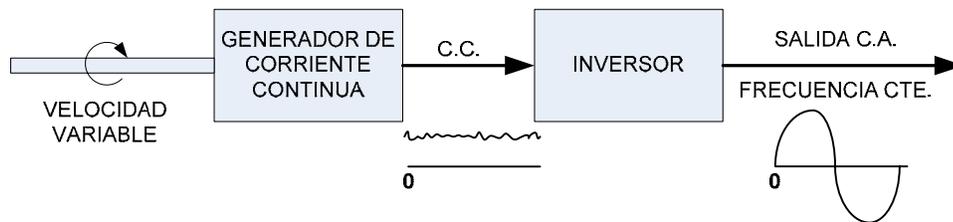
## 3.2. Elección del sistema de conversión mecánica eléctrica

### 3.2.1. Generación en corriente continua

La máquina de corriente continua es constructivamente más compleja que las máquinas de corriente alterna, el empleo de elementos como escobillas y colector la hacen comparativamente menos robusta, de mayor volumen y peso, además de necesitar de una mayor mantención acarreado finalmente un mayor costo a igual potencia y tensión.

Dependiendo del modo de conexión se define el comportamiento electromecánico de la máquina, donde se puede obtener los siguientes tipos de generador y motor.

- Excitación independiente (o separada)
- Excitación en paralelo (o shunt)
- Excitación en serie
- Excitación compensada acumulativa



**Figura 33.** Generador de corriente continua

Respecto a la máquina de corriente continua como generador y su aplicación particular en el sistema a velocidad variable y voltaje constante que se quiere desarrollar (ver Figura 33), se presentan las siguientes ventajas:

- Puede ser auto-excitada directamente.
- No se necesita el uso de un rectificador para abastecer los acumuladores.
- La tensión de salida puede ser controlada fácilmente mediante la corriente de campo a un bajo nivel de potencia.
- No necesita estar conectada a la red de potencia

### 3.2.2. Generación en corriente alterna

Constituyen uno de los medios más comunes de producción de energía eléctrica ya que son una buena alternativa para abastecer consumos directos y de ser necesaria energía en corriente continua sólo es necesaria la incorporación de un rectificador. Estos generadores se clasifican en generadores sincrónicos y asíncrónicos o de inducción.

Con respecto al de generación a velocidad variable y voltaje constante, se presentan a continuación ventajas y desventajas de algunos tipos de generadores de corriente alterna.

### 3.2.2.1. Generador sincrónico

Este generador tiene un rotor que utiliza corriente continua para generar un campo magnético, el que también puede ser reemplazado por un imán permanente. Se caracteriza además porque la frecuencia de las variables eléctricas que éste produce es proporcional a la velocidad de giro del rotor. La Figura 34 muestra un diagrama de bloques de un sistema de generación en corriente alterna y frecuencia constante a partir de un generador sincrónico y velocidad variable de giro del rotor.

- Ventajas
  - Puede ser auto excitado por electroimanes o imanes permanentes.
  - No requiere mantención periódica.
  - Más económicos que las máquinas de corriente continua.
  - Fácil control de la tensión de salida manipulando la corriente de campo.
- Desventajas
  - Necesitan de un equipo rectificador para alimentar algún banco de acumuladores.
  - Dificultad para regular la frecuencia de la tensión a la salida.

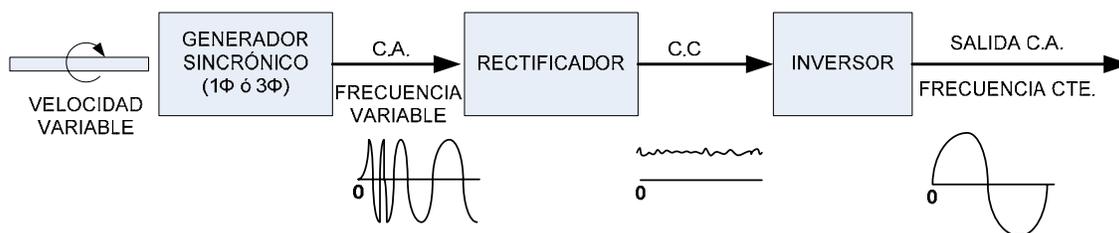


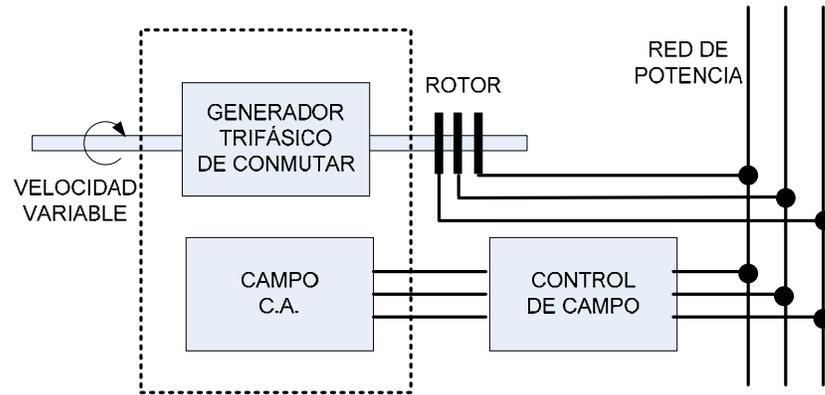
Figura 34. Generador sincrónico

### 3.2.2.2. Generador trifásico de conmutador

El sistema tiene una máquina con conmutador a la cual se le alimenta el campo trifásico con tensión de la frecuencia de red y se obtiene en el rotor una tensión de la misma frecuencia independiente de la velocidad del rotor. La magnitud de la tensión de salida debe ser controlada actuando sobre la magnitud de la tensión de alimentación del campo (ver Figura 35).

- Ventajas
  - No existen problemas de regulación de frecuencia.
  - Fácil control de la magnitud de la tensión a la salida.

- Desventajas
  - Se requiere mantención periódica al poseer un conmutador.
  - Se necesita de un rectificador para cargar baterías.
  - Debe ser ocupado en conexión a la red de potencia ya que se debe disponer de tensión alterna para alimentar el campo.

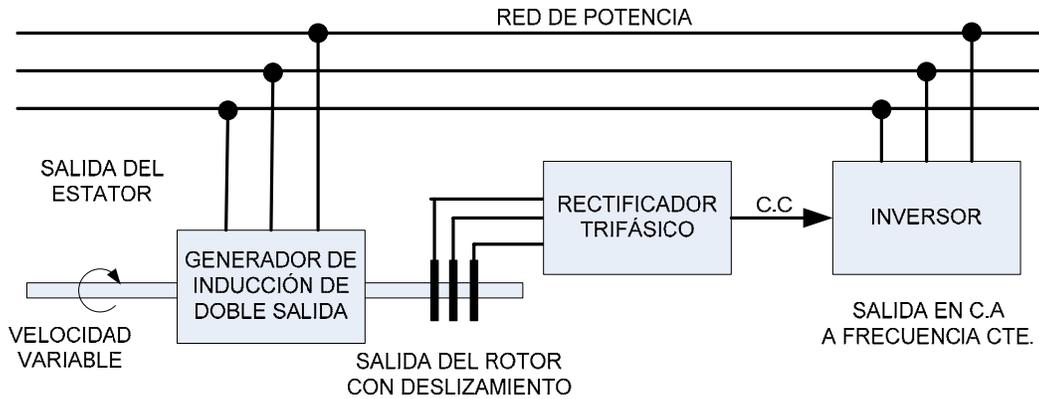


**Figura 35.** Generador trifásico de conmutador

### 3.2.2.3. Generador de inducción doblemente alimentado

Este sistema utiliza un generador de inducción de rotor bobinado de modo de aprovechar el efecto de variar la resistencia del rotor. Al hacer esto se puede modificar su característica de operación (potencia-velocidad) y se logra un funcionamiento más eficiente (ver Figura 36).

- Ventajas
  - Alta eficiencia por la regeneración del rotor.
  - Más económicas que la máquina de corriente continua.
- Desventajas
  - Se requieren equipos adicionales, tales como rectificador e inversor para su propio funcionamiento y la carga de baterías.
  - Es necesario que opere conectado a la red de potencia.
  - Se necesita un sistema de control más elaborado para su correcto funcionamiento.

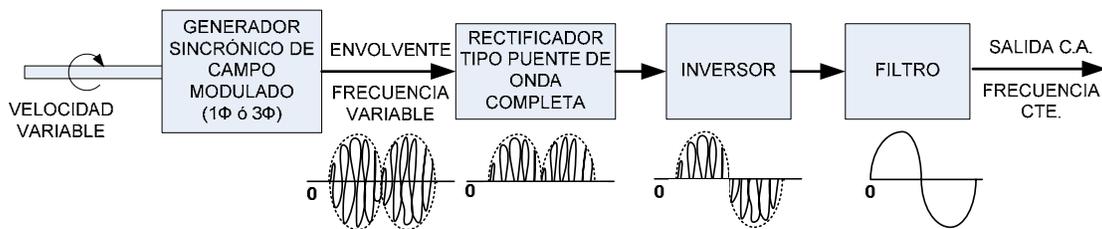


**Figura 36.** Generador de inducción de doble salida

### 3.2.2.4. Generador sincrónico de campo modulado

Se utiliza un generador sincrónico trifásico al cual se le alimenta el rotor con corriente alterna a la frecuencia que se desea obtener a la salida (ver Figura 37).

- Ventajas
  - No hay problemas de regulación de frecuencia.
- Desventajas
  - Presencia de armónicos.
  - El rotor debe ser laminado.
  - Para tener 3 fases es necesario realizar 3 modulaciones de forma separada.
  - El sistema no puede ser totalmente auto excitado.
  - Se requieren equipos adicionales para su funcionamiento, tales como rectificador, inversor y filtros.
  - Es necesario controlar la magnitud y fase de la tensión de excitación

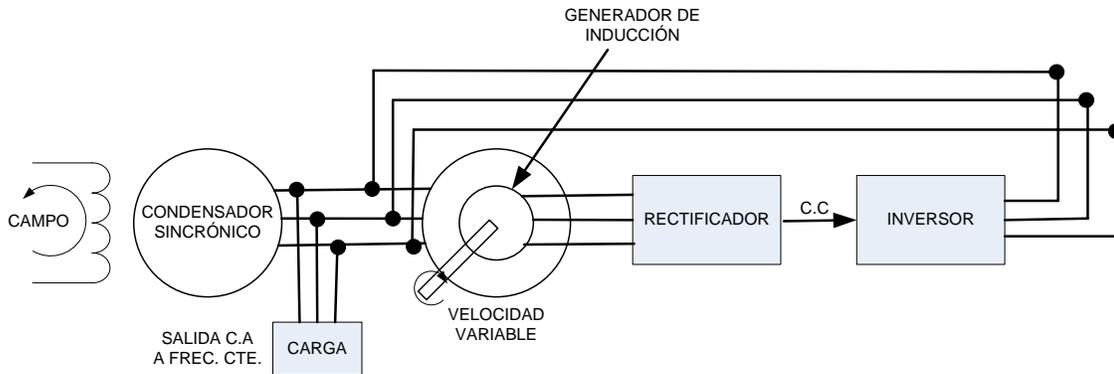


**Figura 37.** Generador sincrónico de campo modulado

### 3.2.2.5. Generador de inducción con condensador sincrónico

Se utiliza una máquina de inducción y una máquina sincrónica para generar tensión alterna en forma independiente de la red (ver Figura 38).

- Ventajas
  - Tensión alterna de frecuencia constante en forma directa.
  - Puede operar de forma aislada a la red.
- Desventajas
  - Se requieren dos máquinas de potencia similar para la operación del sistema.
  - Se necesita de un rectificador en el caso de la carga de baterías.



**Figura 38.** Generador de inducción con condensador sincrónico

### 3.2.3. Tecnologías recomendadas para la aplicación

El sistema de conversión mecánica eléctrica para el prototipo de generador undimotriz debe contar con un generador eléctrico que permita la obtención de energía a tensión continua y constante a partir de un eje que gira a una velocidad variable, con el fin de alimentar un banco de baterías. Dados estos requerimientos y las condiciones de tamaño (debe ser relativamente fácil de transportar) y ambientales de funcionamiento (humedad, corrosión, temperaturas altas, etc.) se debe optar por un sistema robusto, que no necesite de continua mantención.

Además de lo anterior, una de las características principales del sistema es que estará aislado de la red eléctrica de potencia, por lo tanto cualquier tipo de generador que requiera de este sistema queda descartado.

Así entonces, por el lado de la economía y mantención, se descarta la opción de un generador de corriente continua y un generador trifásico con conmutador. Por el lado de la independencia de la red eléctrica y la cantidad de máquinas, se descarta la opción del generador de inducción de doble salida, generador sincrónico de campo modulado y el generador de inducción con condensador sincrónico.

Finalmente, dada su simplicidad y la posibilidad de un control relativamente fácil sobre la magnitud de la tensión generada, el generador sincrónico trifásico auto excitado y

el generador sincrónico de imanes permanentes resultan ser las opciones más atractivas para el sistema.

A continuación, se hace un estudio más detallado de estos dos tipos de generador. Se exponen sus características constructivas, cualidades y defectos en la generación de electricidad a velocidad variable con el fin de seleccionar solo una de las alternativas y diseñar en función de su comportamiento.

### 3.2.3.1. Generador Lundell

El rotor de esta máquina es del tipo denominado “polos tipo garra” y en la actualidad es el único tipo de generador automotriz ocupado en la industria, con potencias de generación hasta 5 [kW] y velocidades de hasta 18000[rpm].

La estructura sólida del rotor, con excitación de la bobina de campo a través de anillos rozantes y escobillas que se conectan a la batería ha demostrado ser una alternativa simple y confiable, de bajo costo, bajo volumen y pocas pérdidas de potencia de excitación.

En general esta máquina es trifásica, con tres o seis ranuras por polo. Los polos son de 12, 14, 16 a 18 unidades y cuenta con un rectificador de onda completa.

El mayor inconveniente de este tipo de generadores es su baja eficiencia, con pérdidas de hasta 50%. La Figura 39 muestra los componentes de un generador de este tipo.

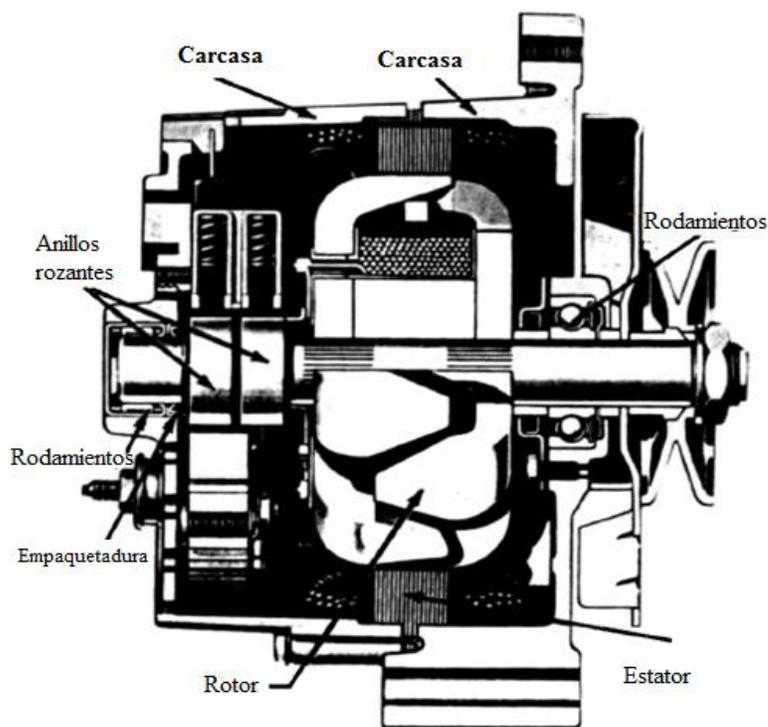


Figura 39. Generador tipo Lundell

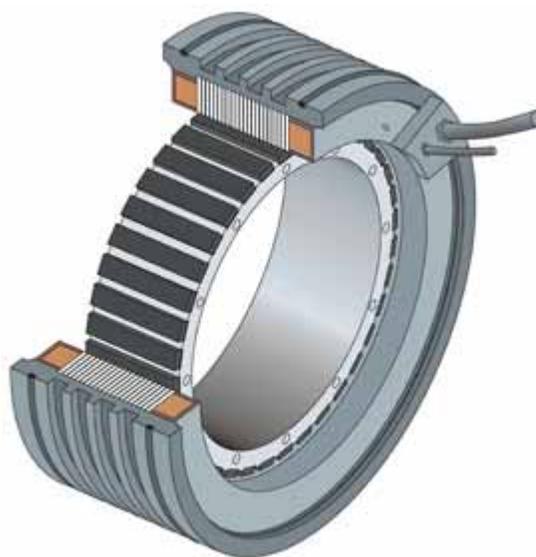
En el anexo 7.4 se muestra una curva característica de este tipo de alternadores. A partir de ahí se puede ver que llegado a su velocidad nominal, no hay un incremento en la generación de electricidad si se incrementa la velocidad de giro. Es por esto que este tipo de alternadores se tornan ineficientes a altas velocidades.

### 3.2.3.2. Generador de imanes permanentes

Se entiende por generador de imanes permanentes aquellos generadores sincrónicos sin escobillas, con flujo radial o axial, con enrollados concentrados o distribuidos, control de corriente sinusoidal o rectangular, con rotores de imanes interiores o exteriores. La Figura 40 muestra el rotor de un alternador de imanes permanentes.

La amplitud del voltaje generado es proporcional a la velocidad de rotación. En los casos donde la máquina que ejerce el torque sobre el generador mantiene una velocidad constante, el control de voltaje puede realizarlo el generador automáticamente dependiendo de su construcción y el empleo. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones necesitan la utilización de este tipo de generadores en aplicaciones con velocidad variable, donde es necesario el empleo de convertidores DC-DC con sistema de control retroalimentado.

La mayor ventaja de este tipo de generador es la alta eficiencia debido a la ausencia de pérdidas producto del enrollado de campo que alcanza valores de 90% a 95%.



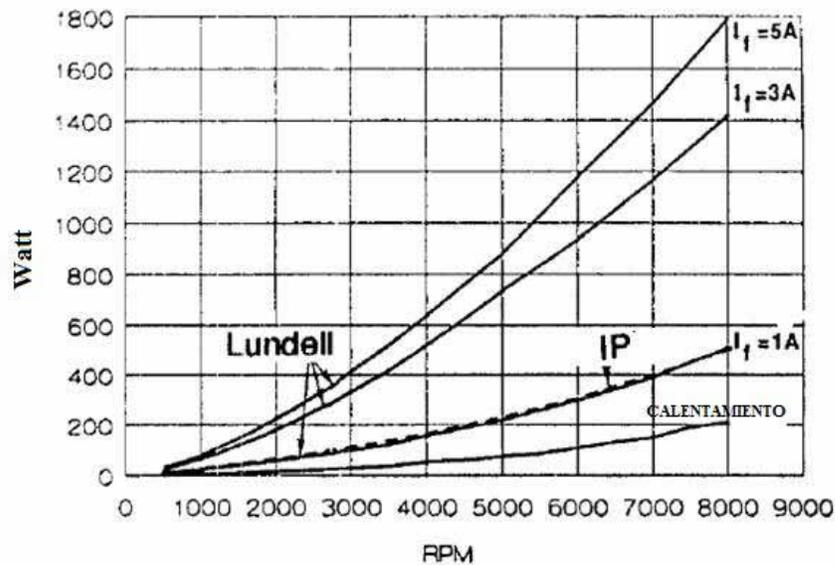
**Figura 40.** Rotor de un alternador de imanes permanentes

### 3.2.3.3. Comparación de alternativas

Dada una potencia demandada, la eficiencia del alternador seleccionado influirá directamente sobre las dimensiones de la boya, ya que, la potencia que aporta este dispositivo es la que deberá proveer las pérdidas y la potencia aprovechable. Por lo tanto,

en alternador con alta eficiencia acarreará consigo una menor demanda de potencia del sistema mecánico y por lo tanto un ahorro en materiales de construcción.

El alternador tipo Lundell, además de presentar una baja eficiencia, tiene por inconveniente de que en el mercado se encuentran modelos que alcanzan como máximo los 10[kW] de potencia y los rangos de velocidad para los cuales han sido concebidos es limitada, con un estándar de 6000[rpm]. Necesitan una batería o algún sistema que aporte la corriente para el enrollado de campo por lo menos a la partida y el sistema de control necesita de la electrónica para suministrar una corriente de campo variable, dependiendo del voltaje generado. La Figura 41 muestra un gráfico comparativo de las pérdidas de potencia del generador de imanes permanentes versus el generador tipo Lundell para distintos valores de corriente de campo.



**Figura 41.** Pérdidas de potencia del alternador IP versus Lundell.

Por todo lo anterior, se plantea como mejor alternativa la obtención de electricidad por medio de un generador de imanes permanentes, ya que además de ser más eficiente existe en el mercado una mayor variedad de velocidades de operación. Su construcción es más simple y demanda menor mantención al no contar con anillos rozantes. A continuación, en la Tabla 3 se presenta un resumen de las características de ambos alternadores.

<i>Características</i>	<i>Tipo Lundell</i>	<i>Imanes Permanentes</i>
Altas Potencias	Estudios hasta 10[kW] Mercado hasta 5[kW]	Mayor a 10 [kW]
Mantenimiento	Anillos rozantes, escobillas, desgaste.	Bajo
Simplicidad de Control	Control de corriente de campo y convertor DC-DC a la salida. Relativamente simple con dispositivos electrónicos y de electrónica de potencia.	Convertor DC-DC a la salida con dispositivos electrónicos y de electrónica de potencia.
Eficiencia	50% a 60% a máxima potencia	90% a 95 %
Velocidad de Funcionamiento	Nominal en torno a los 6000[rpm], para aplicaciones automotrices y marinas.	Amplio rango

**Tabla 3.** Tabla comparativa alternador Lundell versus imanes permanentes

### 3.3. Sistemas de control

En los generadores sincrónicos con control de excitación se aplica una corriente continua al enrollado del rotor, la cual produce un campo magnético. El rotor gira mediante un dispositivo primario y produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo magnético rotacional induce un grupo trifásico de voltajes en los devanados (o enrollados) del estator del generador. En esencia, el rotor de un generador sincrónico es un gran electroimán.

Como se debe suministrar una corriente al enrollado del rotor y dado que este se encuentra girando, se requiere de un arreglo especial para entregar la potencia con forma de corriente continua necesaria. Existen dos formas comunes de suministrar esta potencia.

- Suministrar la potencia desde una fuente externa al rotor por medio de anillos rozantes y escobillas.
- Suministrar la potencia desde una fuente especial montada directamente en el eje del generador sincrónico.

En generadores y motores grandes se utilizan excitadores (o excitatrices) sin escobillas para suministrar la corriente de campo a la máquina. Un excitador sin escobillas es un generador pequeño de corriente alterna, cuyo circuito de campo está montado en el estator y su circuito de armadura está montado sobre el eje del rotor. La salida trifásica del generador excitador es rectificadora a corriente continua por un circuito rectificador trifásico

montado también en el eje del generador y se incluye en el circuito principal del campo de continua. Controlando la pequeña corriente de campo del generador excitador es posible ajustar la corriente de campo de la máquina principal sin el problema de los anillos rozantes ni escobillas, lo que requiere de mucho menos mantenimiento en comparación al primer caso.

Así entonces, en las máquinas de corriente alterna el voltaje inducido por el rotor en los bobinados es proporcional al flujo magnético, la velocidad rotacional y una constante que depende de la construcción de la máquina. Se tiene entonces que

$$e_{ind} = N_c \phi \omega \cos(\omega t) \quad (24)$$

Donde  $e_{ind}$  es el voltaje inducido,  $N_c$  representa el número de vueltas de la bobina,  $\omega$  la velocidad angular de giro del rotor y  $\phi$  el flujo magnético inducido por el rotor.

Generalizando a las tres bobinas que forman parte del estator de un generador sincrónico trifásico y reemplazando la velocidad angular por  $\omega = 2\pi f$  se tiene entonces que la tensión que puede ser alcanzada por el sistema será:

$$E_{max} = N_c \phi f \quad (25)$$

$$E_{rms} = \sqrt{2} \pi N_c \phi f \quad (26)$$

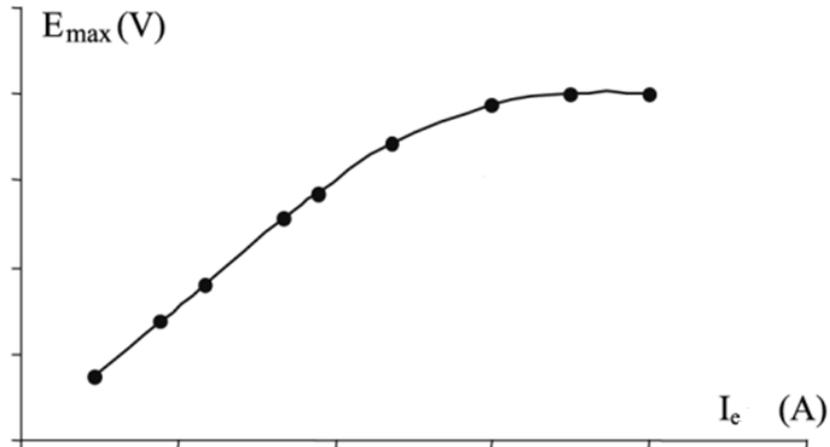
Lo que también puede ser escrito como

$$E_{rms} = cte \cdot \phi(I_{excitacion}) \cdot f \quad (27)$$

De esta forma, a partir de un generador sincrónico que gira a velocidad variable, es posible mantener relativamente constante la tensión producida en los bornes, logrando que el producto  $\phi(I_{excitacion}) \cdot f$  se mantenga constante. Así entonces se tiene que una primera forma de controlar la tensión sería administrar una corriente de excitación que tenga la siguiente característica

$$I_{excitacion} = F\left(\frac{cte^2}{f}\right) \quad (28)$$

Una curva típica para un generador sincrónico girando a una velocidad constante se presenta en la Figura 42.



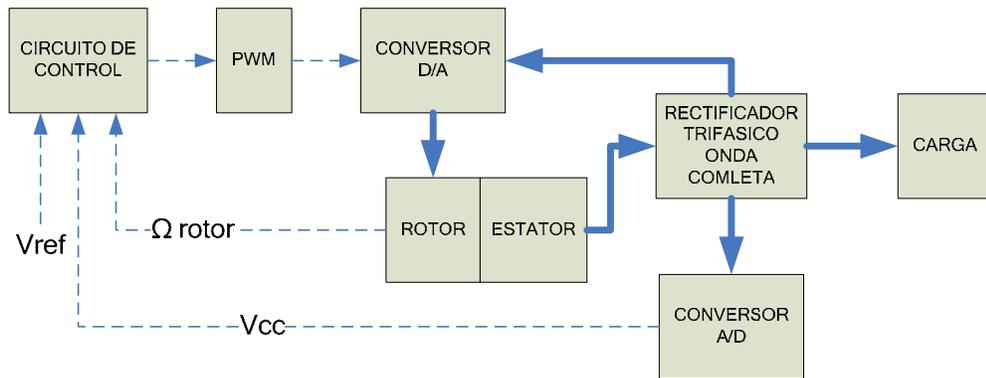
**Figura 42.** Curva tensión inducida versus corriente de campo

El efecto de un cambio en la frecuencia de giro del rotor desplaza la curva anterior de forma horizontal, así un incremento en la velocidad requiere de una amplitud menor de corriente de campo para mantener una tensión inducida constante.

El generador sincrónico auto excitado requiere de su propia energía para alimentar el bobinado de campo ubicado en el rotor, necesitando para la partida el aporte de energía de un elemento externo, por ejemplo una batería.

El sistema de control para una tensión constante a velocidad variable hace uso de dispositivos como rectificadores y rectificadores controlados para retroalimentarse desde sus propios bornes. La corriente de campo es manipulada indirectamente controlando la tensión a la cual es sometido el enrollado de campo, tensión que puede ser manipulada, por ejemplo, por un rectificador trifásico controlado por modulación de ancho de pulso (PWM).

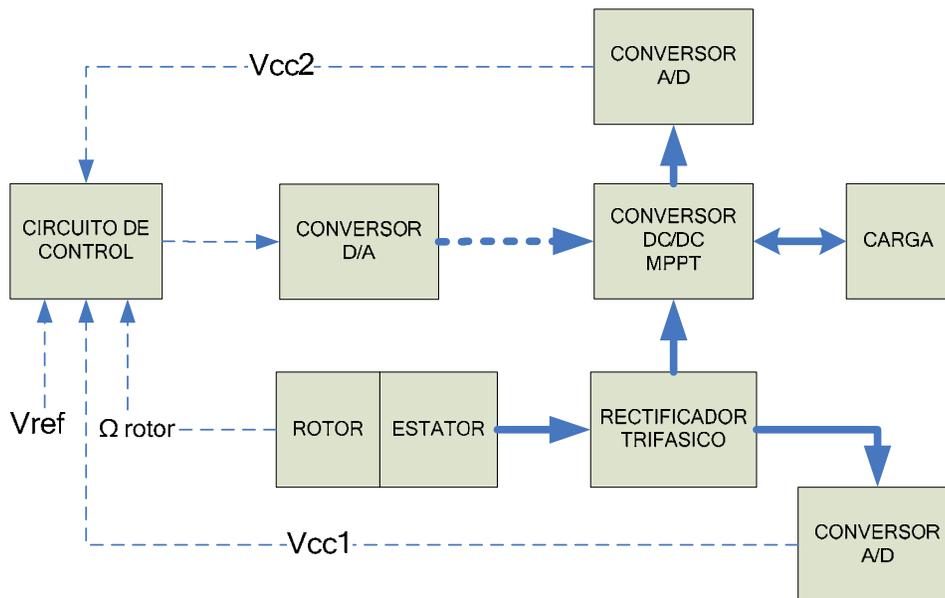
La Figura 43 muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de tensión para un generador sincrónico con control de corriente de campo.



**Figura 43.** Diagrama de bloques control generador Lundell

El circuito de control, en función de la tensión de referencia, la tensión rectificada a la salida del generador y la velocidad mecánica del rotor, controla el circuito de ciclo de trabajo del PWM.

Para el caso del generador sincrónico de imanes permanentes, sólo es posible controlar la tensión generada mediante el uso de un rectificador controlado o la incorporación de un rectificador más un convertor DC-DC. La última alternativa será la escogida ya que involucra una mayor simplicidad de construcción. El diagrama de bloques de este sistema de control se puede ver en la Figura 44.



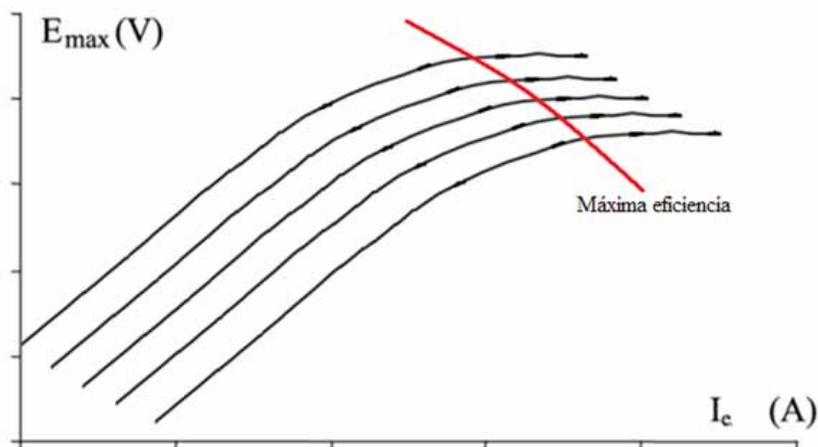
**Figura 44.** Diagrama de bloques control generador de imanes permanentes

Este circuito de control monitoriza le velocidad mecánica del rotor, el voltaje rectificado y el voltaje a la salida del conversor DC-DC de forma de controlar el ciclo de trabajo del conversor dentro de los parámetros adecuados. Más adelante se explica en detalle el funcionamiento y los elementos que componen cada uno de los dos controladores.

En cada uno de los diagramas de bloques es posible ver la utilización de un rectificador de onda completa a la salida del alternador. Este elemento no se considerará como parte del diseño de aquí en adelante, debido a su simplicidad y que generalmente forman parte del alternador comercial, donde si bien son concebidos bajo los principios de una máquina de corriente alterna, son destinados a su utilización en corriente continua.

### 3.3.1. Eficiencia en la transferencia de potencia

La transformación de la energía mecánica a energía eléctrica tiene asociada una eficiencia en la conversión determinada por las características del generador eléctrico. Un generador sincrónico con control de excitación presenta un comportamiento como el de la Figura 45, donde distintas velocidades de giro determinan una familia de curvas para voltaje inducido en función de la corriente de campo.



**Figura 45.** Familia de curvas para corriente de campo versus voltaje inducido

Las distintas velocidades de giro del rotor del generador determinan una familia de pares  $(I_c, E_{\max})$  que representan el punto de operación óptimo a partir del cual se obtiene la máxima potencia que puede aportar el generador para una velocidad determinada. Así entonces, para un generador sincrónico con control de excitación, la máxima transferencia de potencia se logrará controlando la corriente de campo en función de la velocidad de giro del rotor y la tensión generada.

La curva de máxima eficiencia de generación es independiente de cada generador y es necesario entonces contar con las especificaciones técnicas para modelar los datos y

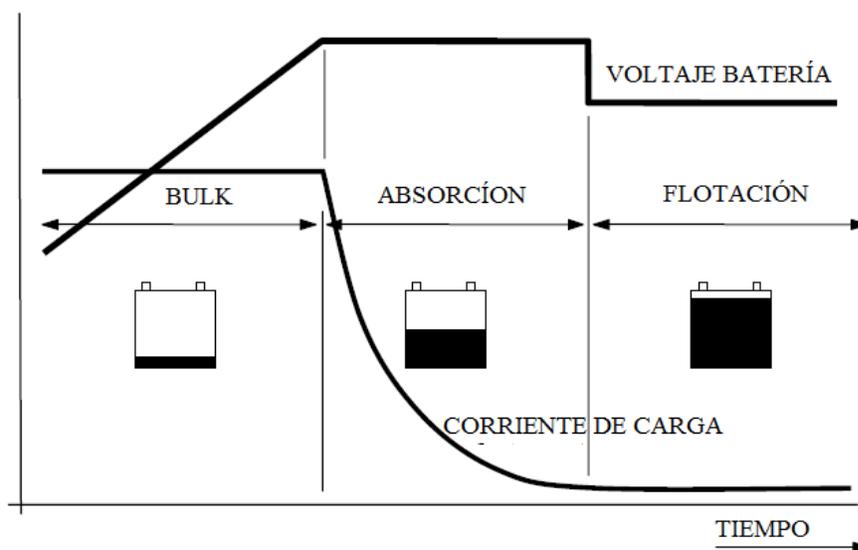
ajustar el sistema de control para que opere como es deseado. Así el generador operará de forma óptima independientemente de la carga que este deba abastecer.

A diferencia del generador sincrónico con control de excitación, el generador sincrónico de imanes permanentes no puede ser controlado, y las características de sus variables eléctricas dependen exclusivamente de la velocidad a la cual su rotor está girando.

En ambos casos es necesario ajustar el valor del voltaje para que sea factible la conexión de una carga cuyas especificaciones de consumo han sido previamente establecidas. Por esto la incorporación de un convertor DC-DC permite ajustarse a los requerimientos de la carga manteniendo la operación del generador en su máxima eficiencia.

El convertor DC-DC además de mantener un voltaje constante a la salida, al poder ser controlado, permite la optimización del suministro de consumos como por ejemplo, la carga de las baterías.

Dependiendo de la temperatura de operación y del estado de carga de la batería, existen distintos voltajes de carga (ver Figura 46). Una monitorización de la temperatura y de la corriente de carga permite al sistema de control determinar el estado de la batería y ajustar el voltaje de forma que represente el par (V, I) óptimo.



**Figura 46.** Etapas de carga de una batería<sup>8</sup>

Para la optimización de la transferencia de potencia en el caso de un generador de imanes permanentes es suficiente la incorporación del el último dispositivo mencionado. A continuación se hace un estudio más detallado de este elemento.

<sup>8</sup> Fase Bulk: Etapa de carga donde la batería acepta el máximo de corriente de carga disponible.

### 3.3.2. Conversor DC-DC

Los convertidores son circuitos de potencia donde los semiconductores, o llaves de potencia, conmutan a una frecuencia mucho mayor que la de variación de las formas de onda de entrada y salida del convertidor permitiendo emplear filtros pasa-bajos para eliminar los componentes armónicos no deseados. Forman parte de un grupo de convertidores que controlan el flujo de energía entre dos sistemas de corriente continua.

Los métodos de conversión se pueden clasificar en:

- **Lineales:** Disminuyen el voltaje de entrada. Son ineficientes porque disminuyen el voltaje disipando calor. Son baratos y confiables, y mucho más simples que los reguladores de conmutación. También provocan una menor distorsión de la tensión de salida y son mucho más adecuados para circuitos sensibles al ruido en la señal.
- **De conmutación:** Cambian el nivel del voltaje almacenando la energía de entrada temporalmente para luego dejarla salir a un nivel de voltaje distinto. El almacenaje de energía puede ser realizado por componentes magnéticos o condensadores. Este método es más eficiente que el lineal, del orden de 80% a 98%. Los inconvenientes incluyen el costo, la complejidad y distorsión electrónica.
- **Magnéticos:** Cambian el nivel de voltaje almacenando energía en un componente magnético (como un inductor o un transformador) por un determinado período de tiempo (desde 30 [kHz] a 5 [MHz]). Ajustando el ciclo de trabajo del PWM el flujo de potencia es controlado. Por lo general, esto se hace para controlar el voltaje de salida, a pesar de que se puede hacer para controlar la corriente de entrada, la corriente de salida o mantener una potencia constante. Los convertidores basados en transformadores puede proveer aislamiento entre la entrada y la salida.

El tipo de convertidor DC-DC que se sugiere utilizar en el circuito eléctrico del sistema de conversión será del tipo Conmutación. Un Chopper reductor/elevador de voltaje, también llamado Regulador Buck-Boost [14]. El circuito básico de este tipo de convertidor puede ser observado en la Figura 47.

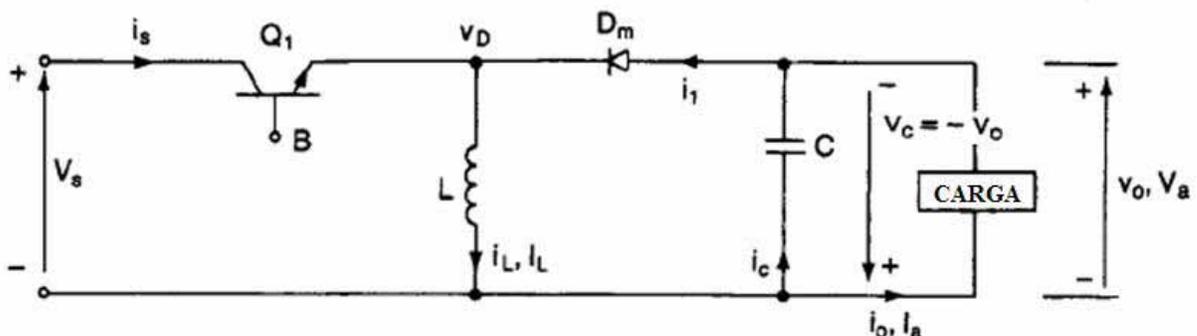


Figura 47. Conversor Buck-Boost (polaridad invertida)

Se distinguen dos modos de operación según si la corriente que por el inductor L se anula en el período de operación T: modo de conducción continua (MCC), cuando la mencionada corriente no se anula, y modo de conducción discontinua (MCD), cuando la corriente por L se anula durante un intervalo.

Debido a que el alternador se encontrará en un movimiento continuo por efecto del movimiento de las olas será el modo MCC con el que operará el conversor.

El ciclo de trabajo del PWM que acciona el transistor Q1 determinará la amplitud de la tensión de salida del inversor.

$$\begin{aligned}
 t_1 &= kT \\
 0 &< k < 1 \\
 \frac{V_c}{V_f} &= -\frac{k}{1-k} \qquad (29)
 \end{aligned}$$

Con

- k: Ciclo de trabajo del PWM
- T: Período
- $V_c$ : Voltaje de salida del conversor
- $V_f$ : Voltaje de entrada del conversor

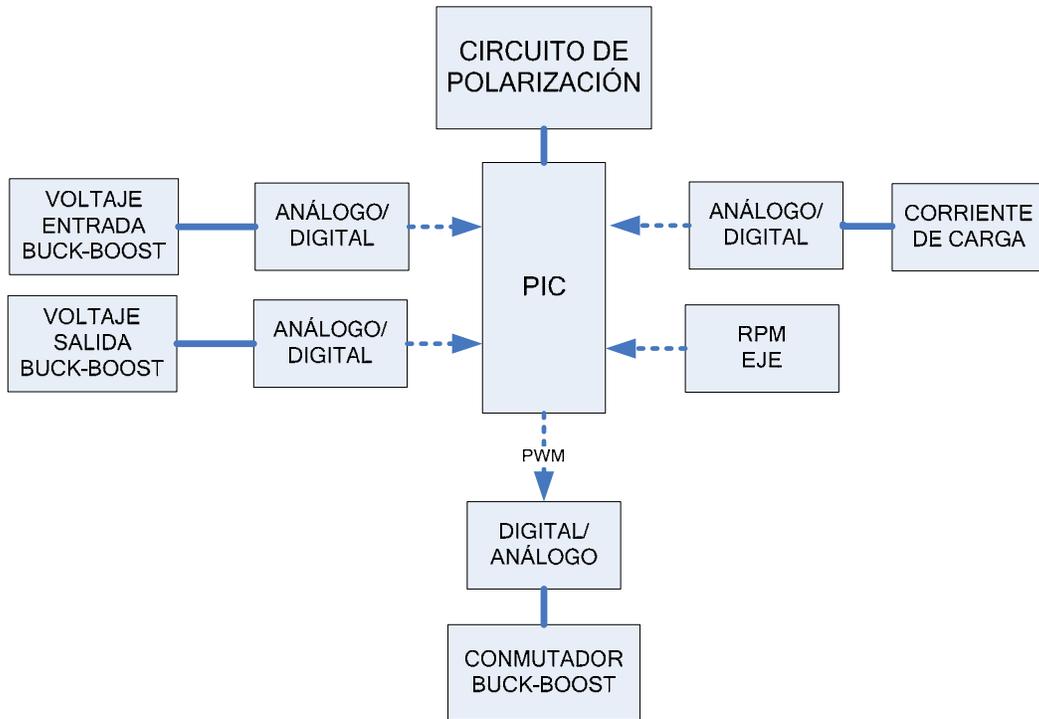
### 3.3.3. Electrónica del controlador

El sistema de control mostrado en la Figura 44 debe tener la electrónica necesaria para medir las variables que determinarán la operación del circuito de conmutación del conversor DC-DC. Debe obtener como mínimo valores equivalentes a las revoluciones del eje del alternador, la corriente de carga y los voltajes a la entrada y salida del conversor Buck-Boost.

La utilización de un micro controlador PIC<sup>9</sup> simplifica la construcción del controlador de voltaje, debido a que una vez que son obtenidas las lecturas de las variables de interés por medio de conversores análogo-digital, la manipulación del ciclo de trabajo del conmutador queda a cargo del algoritmo programado en lenguaje ensamblador y del conversor digital-análogo. En la Figura 48 es posible apreciar un diagrama de bloques del sistema de control y las variables involucradas en el proceso.

---

<sup>9</sup> Peripheral Interface Controller (Controlador de Interfaz Periférico)

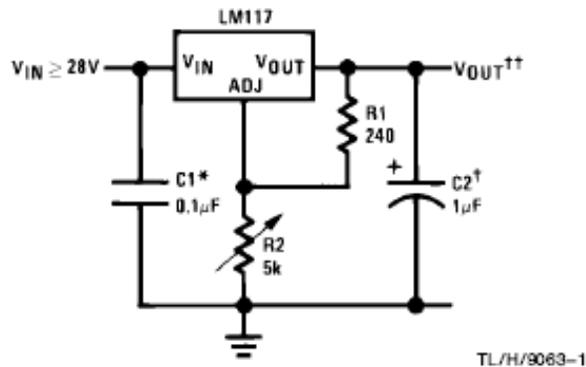


**Figura 48.** Diagrama de bloques sistema de control

### 3.3.3.1. Circuito de polarización

El dispositivo electrónico necesita de un voltaje continuo para operar, cuyo valor típico es del orden de los 5V. Este nivel de tensión puede ser obtenido desde el banco de acumuladores por un regulador de voltaje simple constituido por circuitos integrados (ver Figura 49).

Un elemento capaz de hacer esta tarea, que a la vez puede ser configurado como limitador de corriente para proteger los dispositivos (ver Figura 50), es el circuito integrado de tres terminales LM317.



**Figura 49.** LM317 como regulador de voltaje para una fuente DC

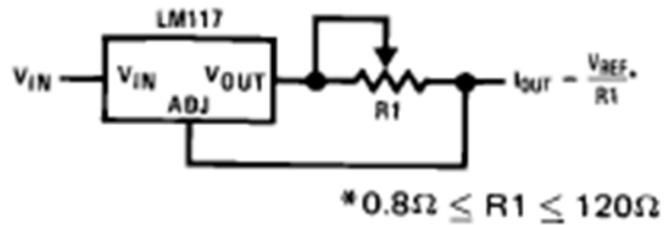


Figura 50. LM317 como limitador de corriente

### 3.3.3.2. Conversor análogo-digital para corriente

El sensor de efecto Hall o simplemente sensor Hall es utilizado para la medición de campos magnéticos, corrientes o para la determinación de la posición de un elemento.

Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. Si se crea el campo magnético por medio de corriente que circula por una bobina o un conductor, entonces se puede medir el valor de la corriente en el conductor o bobina (ver Figura 51).

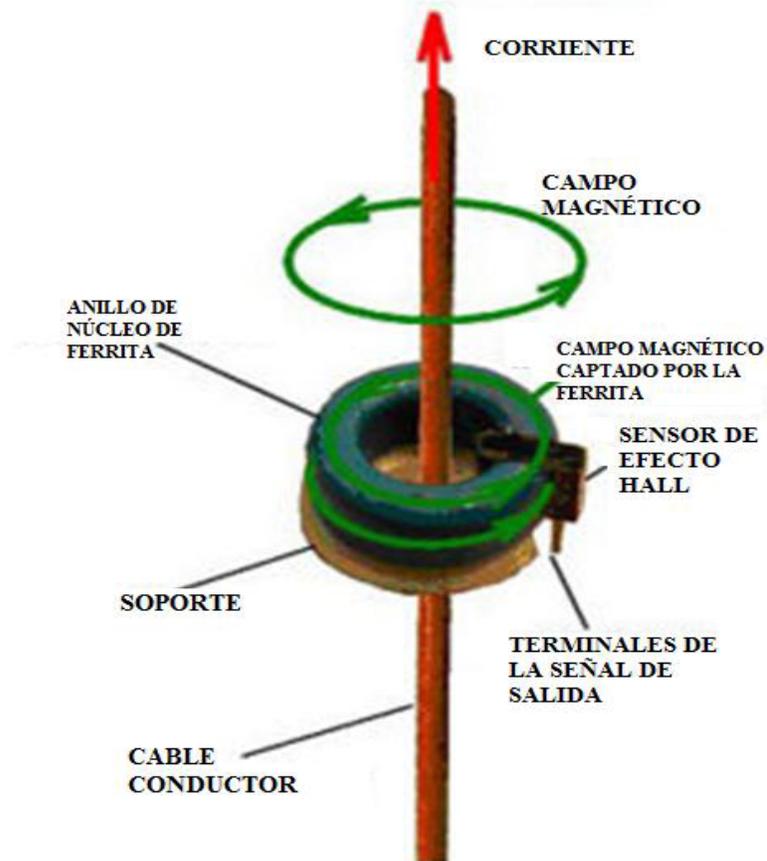
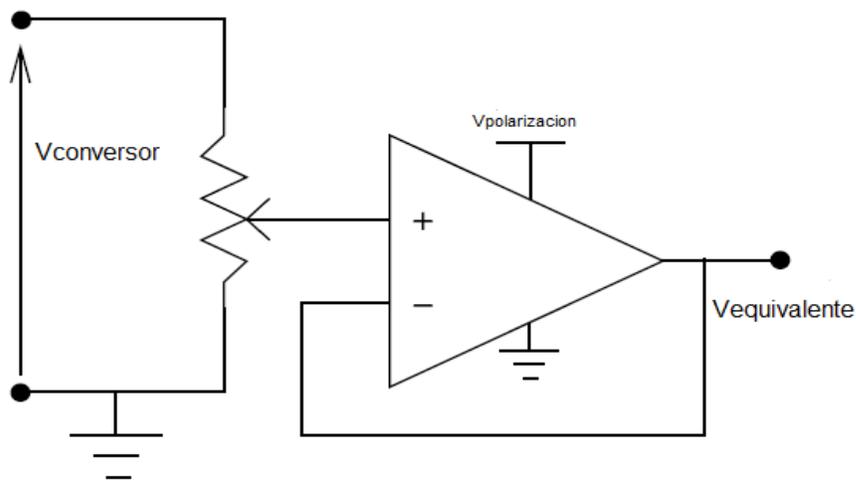


Figura 51. Sensor de efecto Hall

### 3.3.3.3. Conversor análogo-digital para voltaje

Este conversor, o sensor de voltaje, está formado por un divisor de tensión a la entrada del dispositivo, con el cual se obtiene un voltaje de magnitud menor pero proporcional al de la variable de interés. Para aislar el circuito de control del sistema de potencia se hace uso de un amplificador operacional (OPAMP) en la configuración de seguidor de voltaje, obteniendo así un voltaje entre 0 Volt y el voltaje del circuito de polarización (5V) el cual finalmente es proporcional al de la etapa de potencia (ver Figura 52).



**Figura 52.** Divisor de voltaje mas aislación de etapa de potencia (seguidor de voltaje)

### 3.3.3.4. Sensor de velocidad

La forma más simple de medir la velocidad del eje del alternador es la utilización de un sensor óptico que permita detectar las variaciones en la superficie de un encoder.

Por ejemplo un led infrarrojo y un receptor, uno frente a otro, entre los cuales pasa un disco con una cantidad determinada de perforaciones. Al girar el disco se produce una interferencia entre el receptor y el diodo produciendo una señal cuya frecuencia será equivalente a la velocidad de rotación del eje (ver Figura 53).

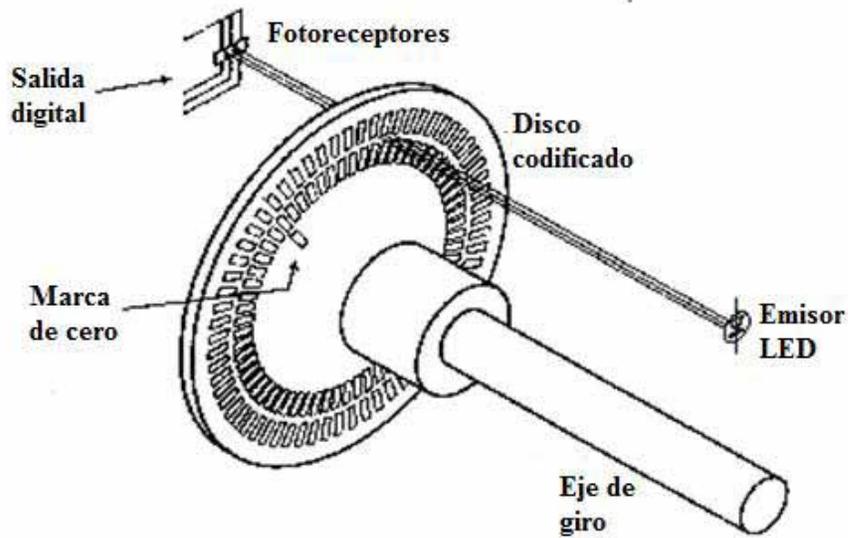


Figura 53. Sensor de velocidad

### 3.3.3.5. Push-Pull

Es la interfaz entre el PWM generador por el PIC y el transistor que permite la conducción en el convertor DC-DC. Este dispositivo proporciona y evacúa los portadores involucrados en el cambio de estado del transistor sin lo cual éste respondería a los cambios solicitados de forma mucho más lenta limitando el funcionamiento del controlador. El esquema de conexiones de este dispositivo puede ser observado en la Figura 54.

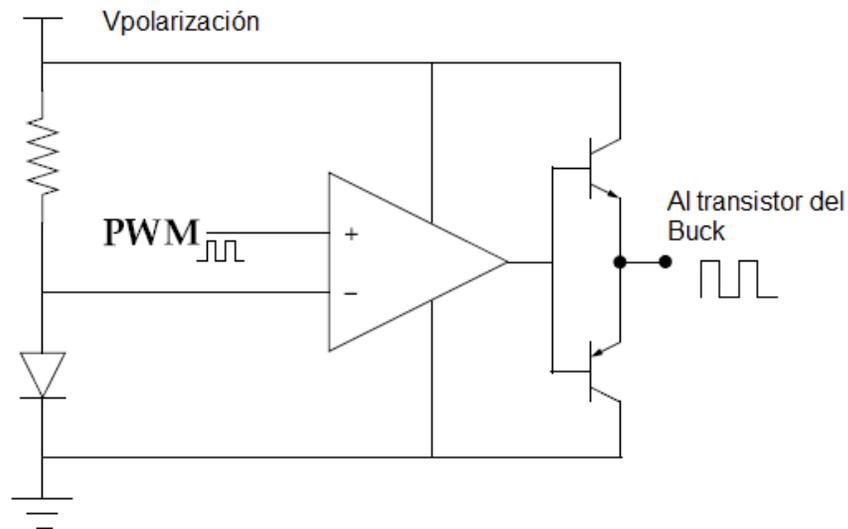


Figura 54. Circuito Push-Pull

### 3.3.3.6. Circuitos de protección

Para la protección de señales digitales, como es el caso del PWM y el sensor de velocidad, el circuito que se recomienda es la optocoupla (ver Figura 55). Por otro lado, para la protección en la lectura del voltaje, la utilización de fusibles sería suficiente [15].

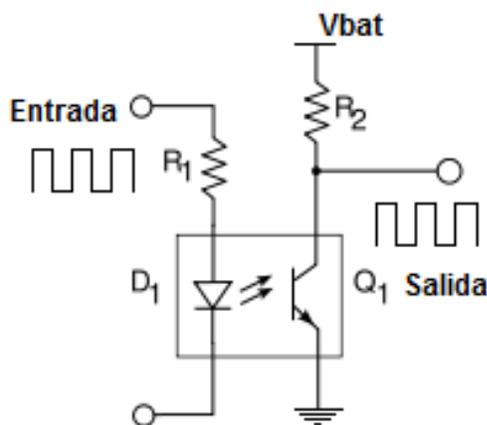


Figura 55. Optocoupla

### 3.3.3.7. Circuito de sobrecarga

Básicamente consta de un circuito resistivo cuya función es disipar potencia cuando la corriente aportada por el generador sea excesiva para el proceso de carga de las baterías. Estará conectado en paralelo por medio de un interruptor, que será activado por el sistema de control cuando sea necesario.

## 3.4. Baterías

Para la aplicación que se pretende dar al sistema eléctrico del prototipo no es posible la utilización de baterías comunes, por ejemplo las utilizadas en automóviles o en vehículos marinos. Estas están diseñadas para suministrar altas cantidades de amperes al momento de encender el motor sin soportar que esta operación sea realizada repetitivamente en cortos periodos de tiempo. Además no soportan descargas profundas, las cuales típicamente ocurren en sistemas que no tienen asegurado un ingreso permanente de energía de carga a la batería.

Las baterías fabricadas especialmente para trabajar con energías renovables, tienen sistemas capaces de soportar descargas profundas, extendiendo la vida útil de la misma. El acumulador plomo-ácido parece ser una alternativa atractiva, pero ésta produce hidrógeno y ácidos corrosivos al momento de cargarla, por lo tanto necesitan ser instaladas en un lugar bien ventilado y protegido de posibles derrames.

Otra alternativa resulta ser el uso de acumuladores de níquel-cadmio, los cuales pueden soportar una mayor cantidad de descargas profundas, pero pueden almacenar una menor cantidad de energía que las de plomo-ácido, además son más escasas.

Por otro lado se tienen los acumuladores sellados y particularmente los cuales su electrolito es un gel. Estos presentan la gran ventaja de que no necesitan mantención y tienen una mayor libertad para las características del lugar donde van a ser instalados. Al ser sellados no presentan derrames y pueden ser transportados fácilmente. Además, gracias a su diseño, se pueden cargar más rápido que los acumuladores convencionales de plomo-ácido y soportan temperaturas más bajas de operación, pudiendo llegar a congelarse [16].

Los acumuladores sellados son muy usados en energías renovables, pero presentan el inconveniente de ser más costosos. Típicamente además almacenan menos energía y tienen una esperanza de vida menor que los de plomo-ácido.

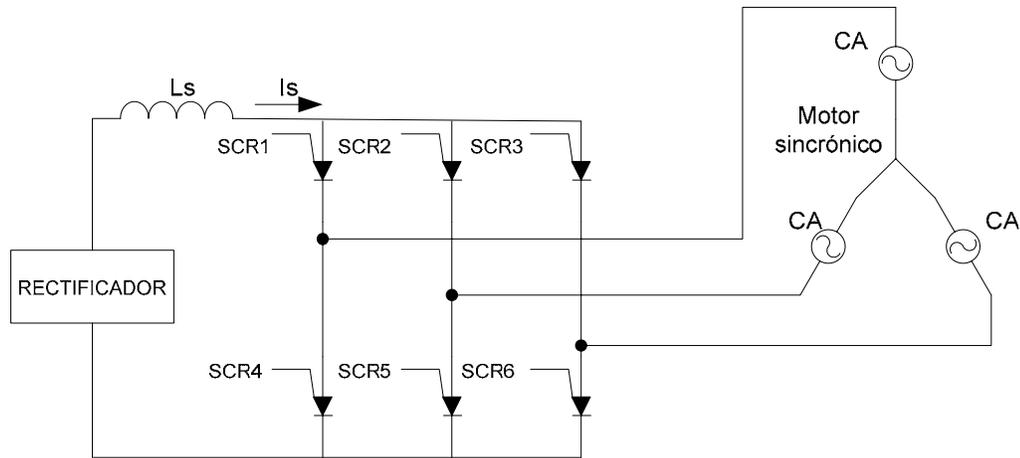
Así entonces, dada su economía y que las características físicas del lugar donde se pretendería instalar el sistema cumplen con condiciones de ventilación (muy cercano al borde costero), se escoge el acumulador de plomo-ácido de ciclo profundo.

### **3.5. Sistema de inversión de corriente**

Los inversores son sistemas que permiten generar tensión en corriente alterna, a una frecuencia fija o variable, a partir de una fuente continua. Se clasifican en dos tipos básicos según la técnica de conmutación que se utilice: de conmutación externa y los de auto conmutación. Los inversores de conmutación externa son aquellos en los cuales la energía necesaria para apagar los SCR la suministra una fuente de potencia externa (ver Figura 56). Es llamado también inversor de conmutación de carga.

Si no es posible contar con una fuente externa que suministre la tensión inversa necesaria para apagar el SCR se debe utilizar entonces un inversor de auto-conmutación. Este es un inversor en el cual los SCR activos han sido apagados con energía almacenada en un condensador cuando otro SCR ha sido encendido.

Hay tres tipos principales de inversores de auto-conmutación: los inversores de alimentación de corriente, los inversores de alimentación de voltaje y los inversores por modulación de ancho de pulso. Los primeros dos inversores mencionados son más sencillos que los inversores de ancho de pulso, ya que estos últimos necesitan un mayor y complejo control sobre los elementos de los circuitos y más rapidez de conmutación que los componentes de los inversores de tensión y corriente.



**Figura 56.** Inversor de conmutación externa

En los inversores de alimentación de corriente, la forma de onda de la corriente a la salida del SCR será aproximadamente cuadrada ya que el flujo de corriente  $I_s$  se fuerza a ser casi constante por efecto de la inductancia de  $L_s$ . La forma de onda del voltaje entre fases será aproximadamente triangular. Es fácil limitar las condiciones de sobre corriente en este diseño, pero el voltaje de salida fluctúa ampliamente, como reacción a las variaciones de la carga.

En el inversor de voltaje de alimentación, se conecta la fuente de corriente continua por medio de un inductor  $L_s$  y un condensador en paralelo  $C$ . La capacitancia de  $C$  es suficientemente grande como para forzar a que el voltaje de mantenga constante. La forma de onda de la tensión entre fases será aproximadamente una onda cuadrada. El flujo de corriente de salida será aproximadamente triangular. Las variaciones de voltaje son pequeñas pero las corrientes pueden variar ampliamente con los cambios de carga.

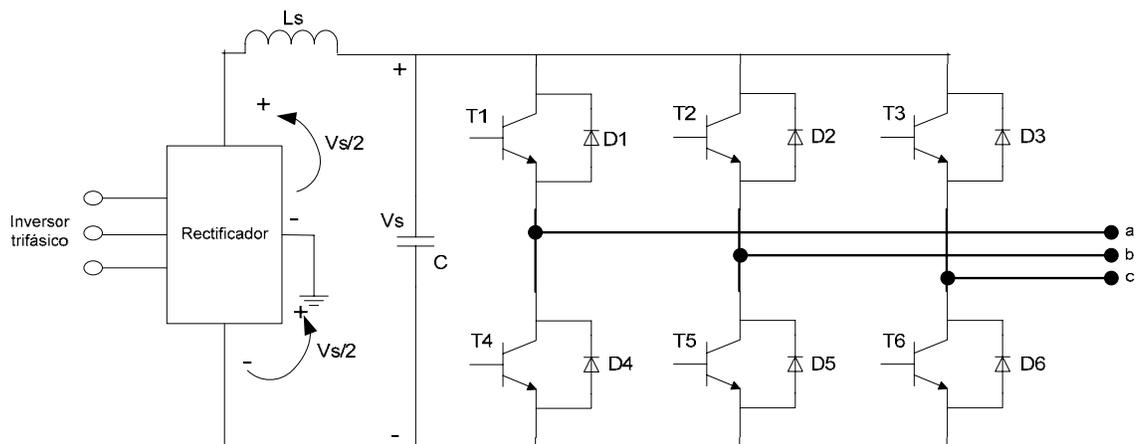
Las frecuencias de los inversores de alimentación, tanto de corriente como de voltaje, pueden modificarse fácilmente, cambiando las pulsaciones de encendido de las compuertas de los SCR, de tal modo que ambos inversores pueden usarse para poner en marcha motores de corriente alterna a velocidades variables.

La Tabla 4 presenta una comparación entre el inversor de corriente de alimentación y el inversor de corriente de alimentación. Se muestran entre otras características, el circuito simplificado de conexión y las formas de onda obtenidas por cada inversor.

	<b>Inversor de corriente de alimentación</b>	<b>Inversor de voltaje de alimentación</b>
<b>Configuración del circuito principal</b>		
<b>Clase de fuente</b>	<b>Fuente de corriente <math>I_s</math> casi constante</b>	<b>Fuente de voltaje <math>V_s</math> casi constante</b>
<b>Impedancia de salida</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>
<b>Forma de la onda de salida</b>		
<b>Características</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fácil de controlar, condiciones de sobrecarga de corriente con este diseño.</li> <li>2. El voltaje de salida varía ampliamente con los cambios de carga.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Difícil de limitar la corriente debido al condensador.</li> <li>2. Pequeñas variaciones de voltaje debido al condensador.</li> </ol>

**Tabla 4.** Comparación de inversores de alimentación de corriente y voltaje

A continuación, en la Figura 57, se muestra un inversor de voltaje de alimentación trifásico que utiliza, como elementos activos, transistores de potencia. Los transistores intervienen en el orden T1, T6, T2, T4, T3 y T5. Luego se muestran las tensiones de fase en función del encendido de cada transistor.



**Figura 57.** Inversor de alimentación de voltaje trifásico

### 3.5.1. Inversores comerciales

En el mercado existe una variada cantidad de inversores, listos para su conexión y uso en aplicaciones de artefactos domésticos hasta industriales. El precio de estos equipos se ve incrementado a medida que se buscan inversores de mayor potencia.

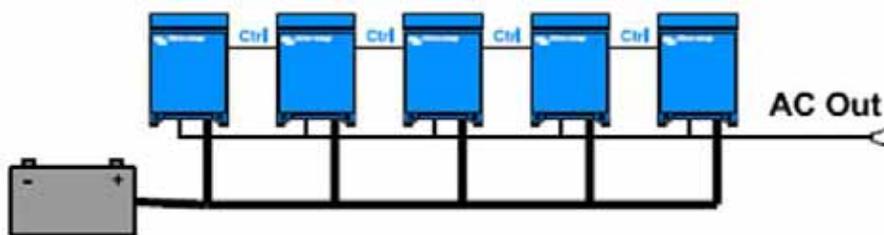
En la práctica, a la hora de escoger un inversor el primer aspecto a considerar es el voltaje del sistema de corriente continua. Comúnmente el estándar es para valores de 12, 24 y 48 Volts.

Una vez definido el voltaje de entrada, es necesario determinar la forma de onda que se quiere tener a la salida del dispositivo. Básicamente se tienen dos tipos, los de onda sinusoidal modificada y los de onda sinusoidal pura.

Los inversores de onda sinusoidal modificada son menos costosos que los de onda sinusoidal pura y pueden ser utilizados en muchas aplicaciones que no necesitan tanta exactitud en la forma de la señal, como por ejemplo algunos televisores, luces, herramientas y computadores. Si se necesita utilizar elementos que necesiten de una alimentación de fidelidad, es el inversor de onda sinusoidal pura el que debe ser adquirido.

Luego de dar por superadas las interrogantes anteriores, los últimos criterios a la hora de escoger el inversor serán la potencia nominal, la máxima potencia que el sistema puede generar, la amplitud del voltaje, fases, la frecuencia y la eficiencia.

Otra característica importante, es que algunos fabricantes conciben sus inversores para que puedan ser conectados en paralelo con otros inversores del mismo tipo (ver Figura 58). Así es posible incrementar la potencia a la salida del sistema.



**Figura 58.** Ejemplo de conexión paralelo de 5 inversores de 3 [kVA]

# Capítulo 4

## 4. Diseño

En este capítulo se realiza el cálculo de los parámetros que definen los elementos que conforman el sistema de conversión mecánica eléctrica del generador de electricidad a partir de la energía de las olas de mar. Se toma como base del diseño la elección del tipo de generador eléctrico y el modelo de captación de energía mecánica que fueron expuestos en el capítulo anterior.

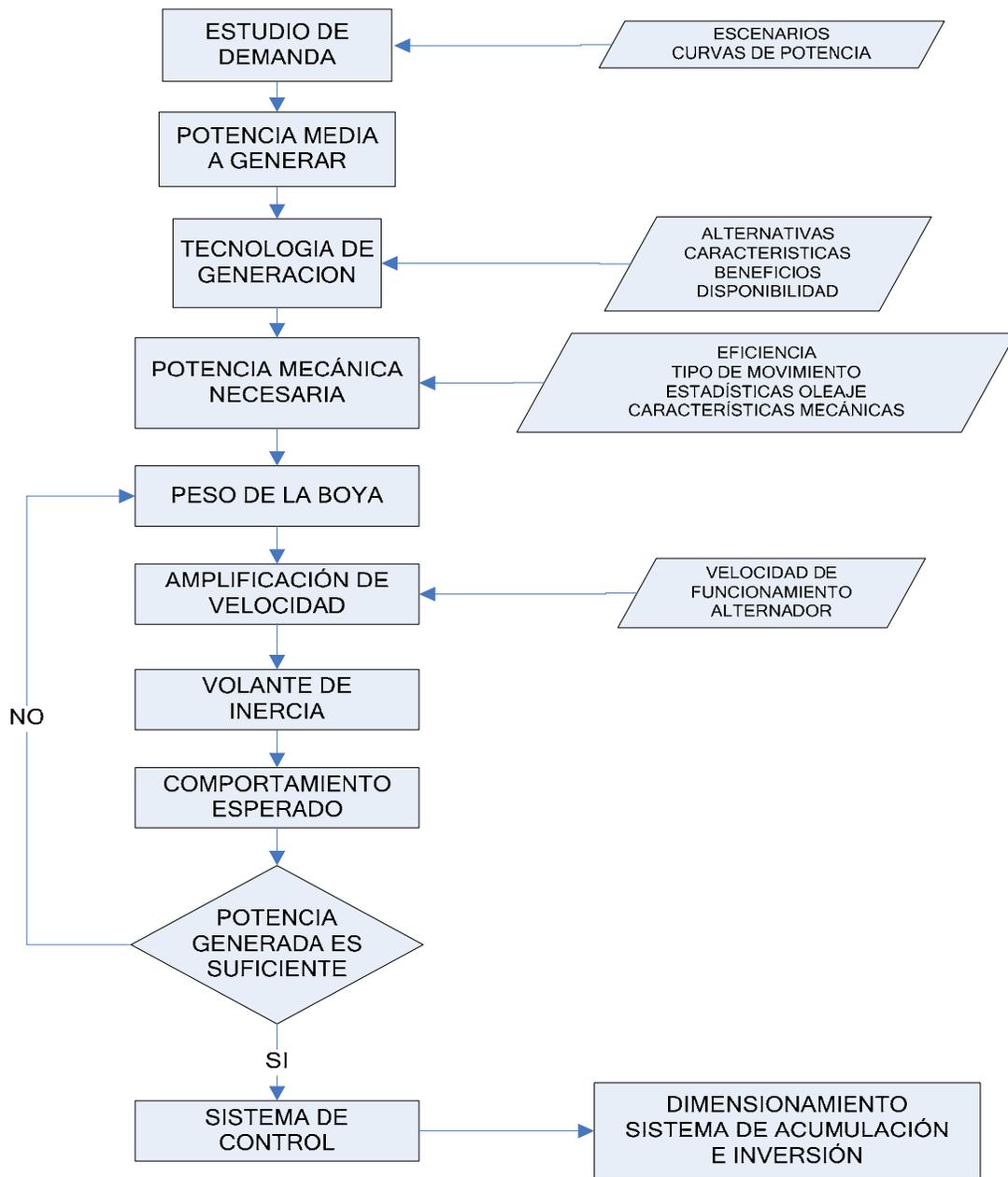
A continuación se expone la estrategia de diseño adoptada, seguida de los cálculos y finalmente una simulación del comportamiento dinámico del sistema.

### 4.1. Estrategia de diseño

La metodología para determinar las características del sistema de conversión considera los siguientes pasos:

- 1°. Un estudio de la demanda que debe satisfacer el sistema de conversión. Se evalúa el escenario de funcionamiento con el fin de dimensionar la potencia media que debe suministrar el sistema y la energía que deberán almacenar el acumulador de electricidad.
- 2°. Determinar la tecnología de generación de electricidad más adecuada para la aplicación final del sistema de conversión (capítulo 4).
- 3°. Luego de evaluar las eficiencias de los sistemas secundarios (acumulador e inversor) se determinan las características del alternador que es capaz de cumplir con el requerimiento, es decir, potencia, eficiencia y velocidad de funcionamiento.
- 4°. Determinar la potencia mecánica que debe aportar el sistema mecánico a partir del tipo de movimiento y de la potencia resistiva del alternador eléctrico.
- 5°. Determinar la potencia que debe suministrar la boya.
- 6°. Cálculo del peso de la boya a partir de las estadísticas del oleaje.
- 7°. Determinar la amplificación del multiplicador de velocidad a partir de la velocidad de funcionamiento del alternador.
- 8°. Cálculo del volante de inercia.
- 9°. Simulación de la potencia eléctrica suministrada por el alternador.
- 10°. Correcciones a los cálculos si potencia no es suficiente.
- 11°. Funcionamiento con controlador de voltaje.
- 12°. Dimensionamiento del sistema de acumulación.
- 13°. Dimensionamiento sistema de inversión.

En la Figura 59 se muestra el diagrama de flujo de la estrategia de diseño en función de los pasos expuestos anteriormente.



**Figura 59.** Diagrama de flujo de la estrategia de diseño

## 4.2. Estimación de la demanda

El estudio de la demanda es el proceso más importante en todo proyecto de generación. Una estimación adecuada permite diseñar proyectos eficientes y confiables que representan la alternativa más adecuada para la entidad a la cual se le prestará el servicio.

Si bien no es el propósito de esta memoria hacer un estudio detallado de demanda, es necesario contar una potencia mínima como requerimiento para el sistema. Es por esto que se plantearán algunos casos de funcionamiento.

### 4.2.1. Escenarios de funcionamiento

Entre las posibles aplicaciones en las que el generador mareomotriz puede ser aplicado se ha optado por la estimación de demanda en tres escenarios aislados de la red eléctrica de potencia: iluminación de muelles, poblados costeros y zonas productivas.

#### 4.2.1.1. Iluminación de muelles

Este tipo de aplicación presenta un consumo constante por un período determinado de tiempo.

Desde el punto de vista práctico este escenario representa uno de los más simples en cuanto a dimensionamiento de energía, ya que es una curva simple, fácil de integrar y limitada solo por la cantidad y potencia de las luminarias (ver Figura 60).



**Figura 60.** Demanda de un sistema de iluminación

Así, en un escenario donde  $P_{lum}$  representa el consumo del conjunto de luminarias encendidas, es posible encontrar un equilibrio entre el sistema de generación y la capacidad del sistema de acumulación de la siguiente forma:

$$E = \int_0^{24} P(t) dt = \int_0^{t1} P(t) dt + \int_{t1}^{t2} 0 dt + \int_{t2}^{24} P(t) dt \quad (30)$$

$$E = P_{lum}(t1 - 0) + P_{lum}(24 - t2) = P_{lum}(24 - t2 + t1) = P_{lum}t_{tot} \quad (31)$$

$$P_{media} = \frac{Pt_{tot}}{24} = P_{gen}^{min} \quad (32)$$

$$E_{acumulacion} = P_{gen}^{min}(t2 - t1) \quad (33)$$

Con  $P_{gen}^{min}$  y  $E_{acumulacion}$  la potencia mínima que debe abastecer en promedio el generador y la energía que se debería acumular respectivamente. Este sencillo cálculo

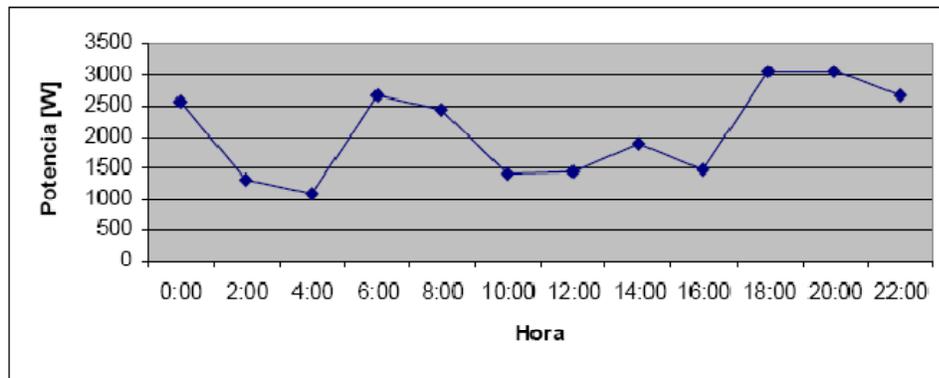
acota características técnicas del sistema, las que luego un estudio económico permitirán la toma de una decisión.

La potencia  $P_{lum}$  que determina el dimensionamiento del sistema depende de muchos factores, tales como la cantidad de superficie que se quiere iluminar, la intensidad, la altura y el tipo de luminarias entre otros factores. Pero comparativamente representa un escenario en que el consumo, comparado con los otros dos que se plantean, sería el menor de todos y por lo tanto el más económico.

#### 4.2.1.2. Poblados costeros

Este tipo de consumos presenta un comportamiento variable en el tiempo, con marcados incrementos al amanecer, mediodía y atardecer. Esta situación se puede explicar sencillamente por el comportamiento de una persona en su día cotidiano, se levanta y enciende algunos consumos, luego los apaga y enciende nuevamente algunos al mediodía, luego hay una pequeña baja que se extiende hasta el atardecer donde se produce el mayor incremento del día con el uso de la iluminación, luego alrededor de medianoche el consumo decae considerablemente para luego repetir el ciclo.

Un ejemplo de este tipo de consumos puede ser extraído de la memoria de Pablo Daniel Hidalgo [17], en donde estima el consumo residencial de la localidad de Camar al norte de Chile (ver Figura 61).



**Figura 61.** Curva demanda residencial de la localidad de Camar (17)

Para estimar la energía requerida por un escenario de este estilo primero es necesario construir la curva por medio de una medición (si es el caso de un reemplazo de tecnología, por ejemplo diesel), o por una proyección (como es el caso de la memoria citada). En ambas situaciones es necesario integrar la curva por métodos matemáticos para obtener la energía que deberá suministrar el sistema. Una vez obtenida esta energía, al igual que el caso anterior, es posible estimar una potencia promedio que debe suministrar el sistema.

A continuación se realiza el ejercicio de cálculo para la demanda de Camar. Para esto es necesario utilizar la Regla de Simpson, que es una forma de obtener la aproximación de la integral.

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx =$$

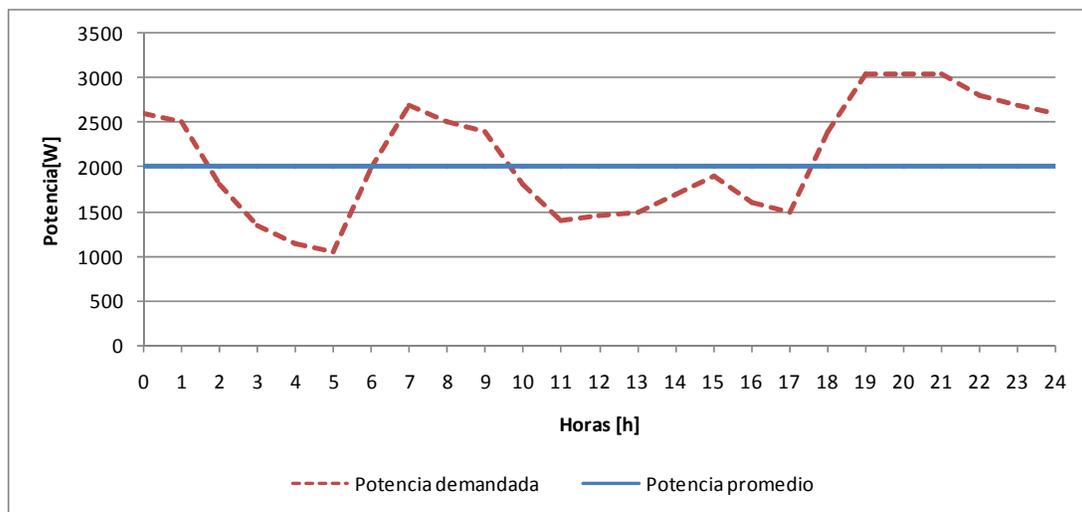
$$\frac{h}{3} (f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)) \quad (34)$$

$$h = \frac{x_n - x_0}{n} \quad (35)$$

Hora [h]	Pot [W]								
0	2.600	5	1.050	10	1.800	15	1.900	20	3.050
1	2.500	6	2.000	11	1.400	16	1.600	21	3.050
2	1.800	7	2.700	12	1.450	17	1.500	22	2.800
3	1.350	8	2.500	13	1.490	18	2.400	23	2.700
4	1.150	9	2.400	14	1.700	19	3.050	24	2.600

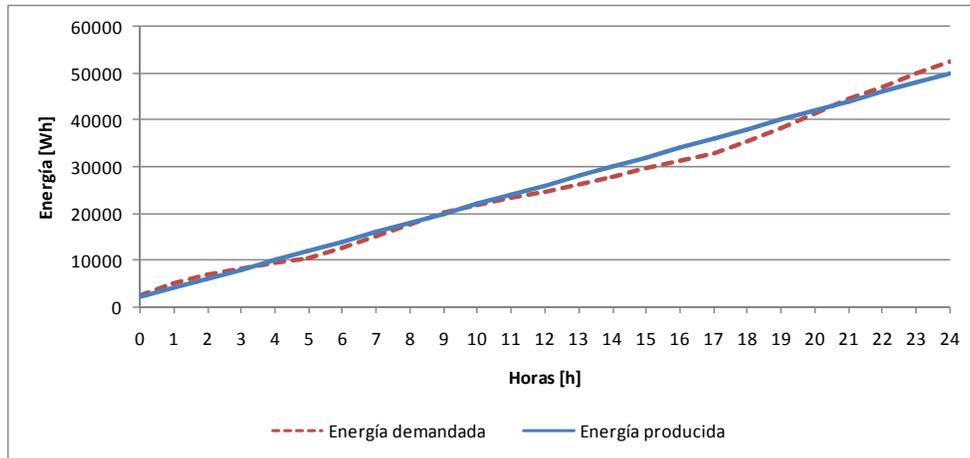
**Tabla 5.** Datos demanda de la localidad de Camar

Así entonces, para los datos de la Tabla 5, se obtiene que la energía asociada a la integral de la curva de potencia es de  $E_{demanda} = 48.019,2 [Wh]$  con lo que se obtiene una potencia promedio demandada de  $P_{prom} = 2000,8 [W]$  que en primera instancia sería la potencia mínima que debería suministrar el sistema de generación eléctrica. Gráficamente esto puede ser observado en la Figura 62.

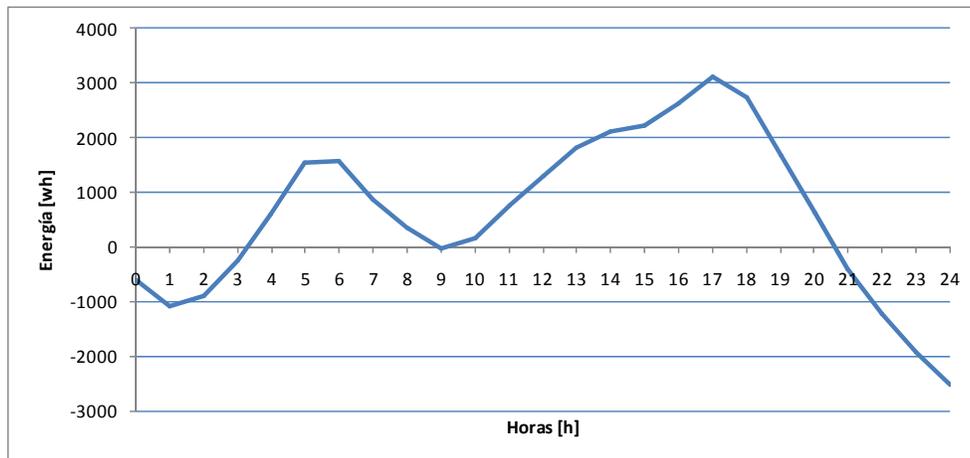


**Figura 62.** Potencia demandada y potencia promedio Camar

Suponiendo entonces que el aporte del sistema eléctrico será de 2[kW] en promedio se puede estimar exceso o déficit de energía para el día. La Figura 63 muestra la energía demandada y la energía producida para el escenario propuesto en Camar.



**Figura 63.** Energía producida y energía demandada



**Figura 64.** Diferencia energética durante el día

De la Figura 64 se puede inferir que el sistema de acumulación deberá tener una capacidad de acumulación de energía de alrededor de 3 [kWh], lo cual, suponiendo una tensión del banco de baterías de 24 [V] sería equivalente a una capacidad de 125[Ah].

#### 4.2.1.3. Zonas productivas

Al igual que el caso anterior, este tipo de escenarios presenta curvas de demanda variables en el tiempo y muy marcadas dependiendo del tipo de actividad que se realiza. Para dimensionar la potencia de generación y la capacidad de acumulación es necesario entonces contar con un modelo de la demanda en cada caso.

Por otro lado, estos lugares necesitan de mayores cantidades de energía debido a la utilización de equipos industriales como por ejemplo iluminación de alto consumo, calefactores, refrigeración y principalmente motores. Este escenario se presenta como el más exigente en cuanto a potencia, ya que además de soportar una alta demanda, el sistema debe soportar los grandes incrementos producidos al momento de partida de los motores.

### 4.3. Generador eléctrico

Se escoge una demanda promedio de 5[kW], lo suficiente para abastecer el consumo ejemplificado de la localidad de Camar [17] o en su defecto la utilización continua de un par de bombas hidráulicas centrífugas de 2 [hp] cada una.

Considerando que el prototipo debe incorporar una etapa de conversión DC-DC y posteriormente una inversión de corriente, es necesario considerar las eficiencias de estos dispositivos para dimensionar la potencia promedio que realmente debería aportar el alternador y el sistema mecánico. La etapa de rectificación se considerará como incluida en la eficiencia del alternador.

Idealmente, el conversor DC-DC debería contar con una eficiencia del 100%, pero en la práctica ésta alcanza rangos entre 70% a 95% [18]. De igual forma en el caso de los inversores, los dispositivos comerciales alcanzan una eficiencia dentro del rango de 85% a 95%. Se tendrá entonces lo siguiente.

$$P_{demanda} = \eta_{conversor} \eta_{inversor} P_{generador} \quad (36)$$

$$P_{generador} = \eta_{generador} \eta_{mecanica} P_{ola} \quad (37)$$

Con:

$\eta$  : Eficiencia

P: Potencia

Si se quiere una potencia promedio de 5 [kW], en el peor de los casos se necesitará una potencia promedio generada de:

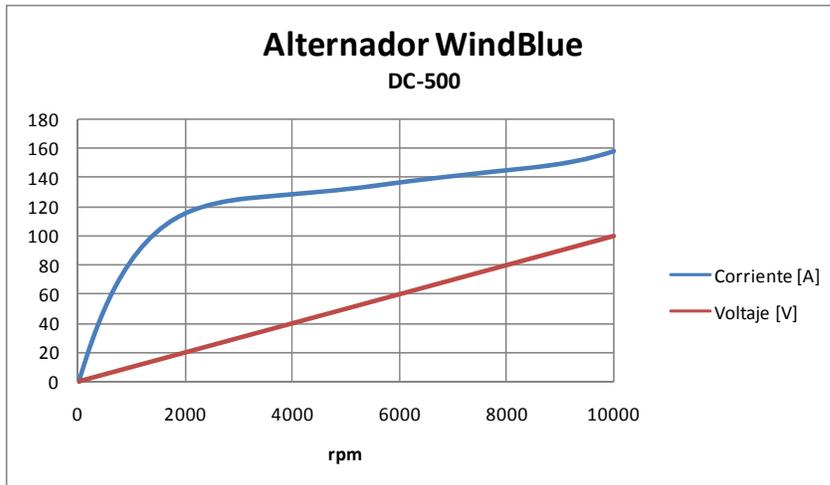
$$P_{generador} = \frac{P_{demanda}}{\eta_{conversor} \eta_{inversor}} = \frac{5000}{0,70 \cdot 0,85} = 8403 \approx 8[kW] \quad (38)$$

El alternador escogido es un alternador de imanes permanentes de marca WindBlue<sup>10</sup>. Las características de este tipo de alternadores permiten que en el mercado se pueda escoger entre alternadores de similares características eléctricas pero de distintas velocidades nominales. En este caso se ha optado por la utilización de un alternador que genere la potencia requerida en torno a las 6000 [RPM] con el fin de que la tensión rectificadora posea menos fluctuaciones y los engranajes del sistema mecánico se vean sometidos a menores esfuerzos de torque.

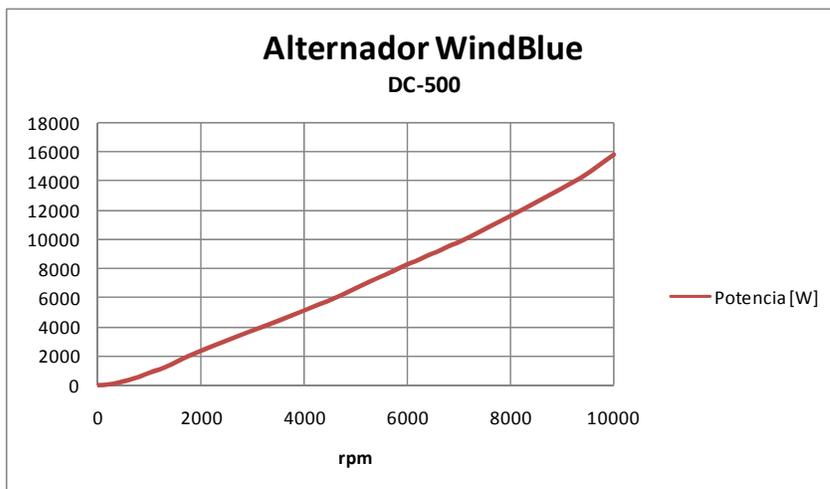
Dado lo anterior, el alternador escogido posee las características eléctricas que se muestran en la Figura 65, Figura 66 y Figura 67.

---

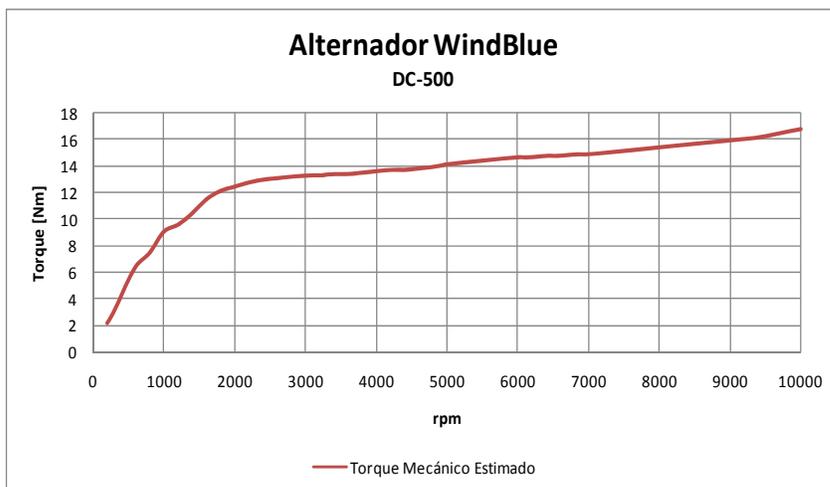
<sup>10</sup> <http://www.windbluepower.com>



**Figura 65.** Característica voltaje-corriente alternador WindBlue



**Figura 66.** Característica de potencia alternador WindBlue



**Figura 67.** Torque mecánico estimado

## 4.4. Dimensionamiento del sistema mecánico

Como se expuso en el capítulo 4, son tres los aspectos más importantes a considerar en el diseño del sistema mecánico de obtención de energía: la potencia que debe absorber la boya, la amplificación del multiplicador de velocidad y la inercia del volante.

### 4.4.1. Potencia mecánica

Según la ecuación N° (19) de balance de momentos se tiene que:

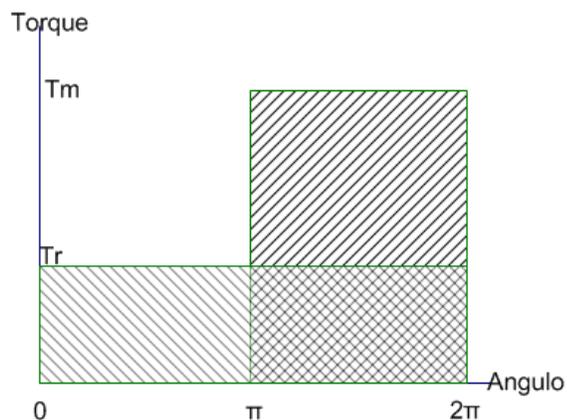
$$I\ddot{\theta} = T_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) - T_o(\theta_o, \dot{\theta}_o) \quad (39)$$

Lo anterior puede ser interpretado como: la diferencia promedio entre el torque que aporta el sistema mecánico y el torque resistivo del alternador debe ser en promedio igual al torque que aporta el volante de inercia.

Dada la rectificación que es realizada al movimiento, se tiene que durante la mitad del ciclo no existe torque aportado por la boya (o torque motor), entonces para que continúe el movimiento del alternador en el momento que deja de existir torque motor será necesario que al menos se cumpla que:

$$T_o(\theta_o, \dot{\theta}_o) = I\ddot{\theta} \quad (40)$$

El torque motor aportado durante la mitad del ciclo, dada la característica del movimiento, es constante y por el otro lado, como se desea que el alternador funcione en torno a una determinada velocidad de rotación se espera en el caso ideal que el torque resistivo también lo sea. Gráficamente en la condición ideal se tendría la situación expuesta en la Figura 68.



**Figura 68.** Momentos de torque

Según lo anterior se tendrá entonces que el torque promedio durante el ciclo deberá ser igual al torque resistivo de la máquina.

$$\frac{T_m \pi - T_r 2\pi}{2\pi} = T_r \quad (41)$$

$$T_m = 4T_r \quad (42)$$

$$\Rightarrow P_m = 4P_r \quad (43)$$

La ultima ecuación viene de  $P = T\omega$ , donde se cumple además que la velocidad angular es la misma al estar sobre el mismo eje rígido.

La potencia mecánica aportada por la boya depende del peso y la velocidad que ésta adquiere. Así entonces, la potencia promedio durante la mitad del ciclo en que está presente está dada por:

$$P_{media} = \int_{\pi}^{2\pi} \frac{P(\theta)}{\pi} d\theta = \int_{\pi}^{2\pi} \frac{MgH\pi}{T} \frac{\text{sen}(-\theta)}{\pi} d\theta \quad (44)$$

$$P_{media} = \frac{MgH}{T} \int_{\pi}^{2\pi} \text{sen}(-\theta) d\theta = \frac{2MgH}{T} \quad (45)$$

$$\Rightarrow M = \frac{2P_r T}{gH} \quad (46)$$

Con:

- M: Masa de la boya [kg]
- Pr: Potencia resistiva promedio del alternador [W]
- T: Período de la ola [s]
- g: Aceleración de gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- H: Altura de la ola [m]

Suponiendo que el sistema podría ser ubicado en las costas de la región de Coquimbo, al norte de Chile, se tendrá que el período y altura de las olas será en promedio de 2.5 segundos y 1.3 metros respectivamente, esto según el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) [19]. Por lo tanto, para esta ubicación particular se tendrá:

$$M = \frac{2 \cdot 2.5}{9.8 \cdot 1.3} \cdot P_r = 0.3925 \cdot P_r [kg] \quad (47)$$

Como se mencionó anteriormente, el alternador de imanes permanentes posee una eficiencia entre 90% a 95%. En el peor de los casos, si se quiere generar una potencia de 8[kW], la potencia mecánica requerida por el alternador será:

$$P_r = \frac{8000}{0.9} = 8.89 [kW] \quad (48)$$

$$\Rightarrow M \approx 3489[kg] \quad (49)$$

#### 4.4.2. Multiplicador de velocidad

Para calcular la amplificación del multiplicador de velocidad es necesario contar con las dimensiones de los mecanismos de entrada y salida del sistema mecánico, es decir, el diámetro de la polea donde se conecta el cable enlazado a la boya y el diámetro de la polea adherida al alternador eléctrico.

Se supondrá que el alternador tendrá una polea de 4 pulgadas adherida a su eje, lo que equivale a 10.16 [cm] de diámetro. De mayor interés es el diámetro de la polea de entrada al sistema, ya que dependerá de cómo funcionará el mecanismo de rectificación.

Como se explico en el capítulo anterior, el mecanismo encargado de realizar la rectificación del movimiento es el trinquete, pero el inconveniente es el devolver el sistema a su posición inicial antes de que comience el nuevo ciclo de trabajo. Es por esto que a continuación se muestran dos mecanismos que podrían dar solución a este inconveniente y que permiten estimar el diámetro de la polea de entrada al sistema.

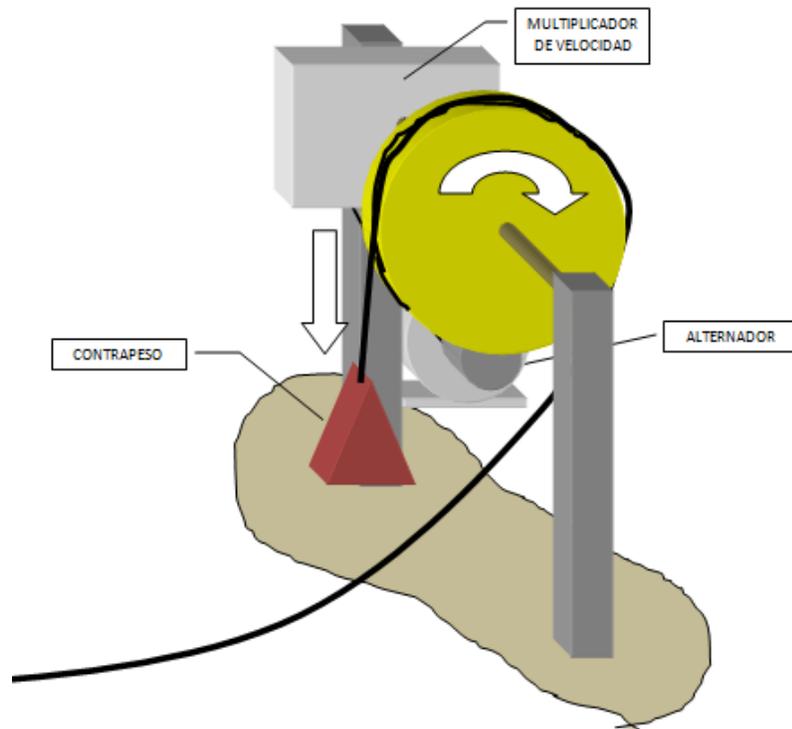
##### 4.4.2.1. Mecanismos de transformación del movimiento de entrada

La idea es que el segmento de cable desplazado cuando la boya es empujada por la fuerza de la ola retorne de alguna forma luego de que la boya tira, produciendo el movimiento de todo el sistema de engranajes.

El segmento será de un largo equivalente a la altura que alcanza la ola y la fuerza necesaria para restablecerlo a su posición deberá ser mayor a la fuerza necesaria para sostener todo el peso del cable utilizado.

Intuitivamente la solución al problema es poner contrapesos, de forma que el peso equivalente de éstos permita recoger el cable hasta su posición original. La masa del contrapeso será mayor a la masa equivalente del cable y su incidencia en el funcionamiento del sistema restará potencia a la boya, al igual que el peso del cable. Esto es solucionable aumentando la masa de la boya de forma de restituir la potencia mínima que se debe aportar al sistema mecánico.

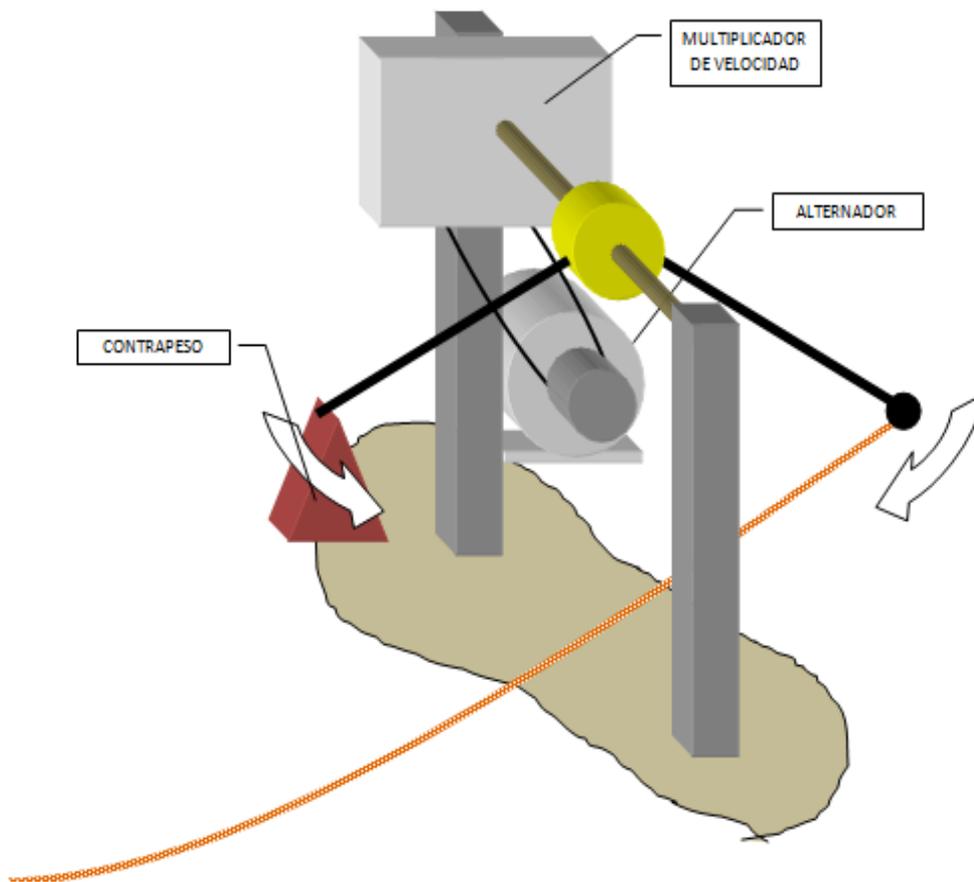
A continuación se presentan distintos modelos mecánicos de transformación de la energía aportada por la boya para que pueda ser utilizada en el movimiento de un eje donde será acoplado el generador.



**Figura 69.** Sistema de contrapeso N°1

El primer sistema de contrapeso (ver Figura 69) consta básicamente de una polea por donde es enrollado el cable que se conecta a la boya y en el extremo es conectado el contrapeso. Al tirar del cable la polea gira en el mismo sentido levantando la pesa desde su posición original. Luego, cuando la boya deja de ejercer torque, la pesa se encarga de retornar el cable a su posición original haciendo girar la polea en dirección contraria.

La distancia entre la pesa y el punto medio de la polea deberá ser al menos la altura que alcanza la boya y a medida que el diámetro de la polea se hace más pequeño es mayor la velocidad angular del eje, disminuyendo la amplificación que el multiplicador de velocidad debería aportar.



**Figura 70.** Sistema de contrapeso N°2

El segundo sistema de contrapesos consta básicamente de un mecanismo tipo péndulo (ver Figura 70). La pesa se encarga de restablecer el sistema a su posición original.

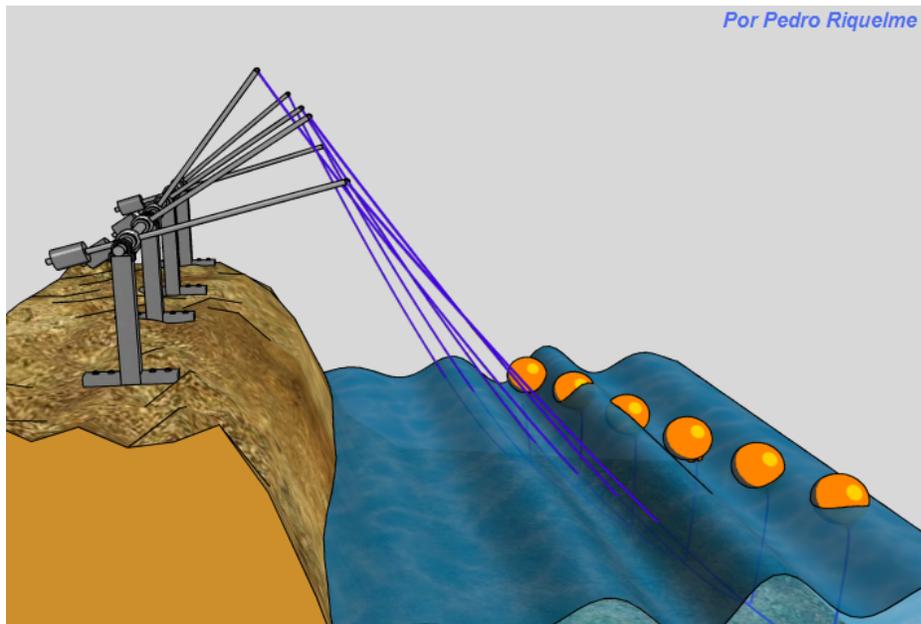
A diferencia del caso anterior no se desea que el mecanismo gire  $360^\circ$ , es más, ya con un movimiento de  $100^\circ$  es muy probable que la estructura gire y pierda su utilidad. Por esto es necesario que el radio de brazo conectado al cable sea lo suficientemente largo para que el ángulo equivalente al perímetro que describe el movimiento circular (igual a la altura que alcanza la boya) no supere el límite permitido. Considerando lo anterior, aún existe la posibilidad de que este sistema se gire y por lo tanto es necesario incluir limitadores de movimiento en la estructura del mecanismo o invertir el movimiento tal como se muestra en el modelo de la Figura 71.

Así entonces, en el mismo escenario de la costa de Coquimbo, donde la altura máxima que alcanza la ola es de 4.8 [m] según el SHOA [19], si se quiere que el movimiento no sea superior a  $90^\circ$  se tendrá entonces:

$$4.8 = 2 \cdot \text{radio} \cdot \alpha = 2 \cdot \text{radio} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (50)$$

$$\Rightarrow \text{radio} = 1.53[\text{m}] \quad (51)$$

Como tercer modelo se presenta el de la Figura 71. Es una variación del segundo modelo al utilizar un movimiento tipo péndulo ayudado de contrapesos, pero incorpora más de un brazo mecánico, obteniendo así un movimiento con menos fluctuaciones que el anterior. Este modelo implicaría una reducción en las dimensiones del volante de inercia necesario para obtener un movimiento estable sobre el eje del generador, pero por otro lado, involucra la instalación de una mayor cantidad de boyas.



**Figura 71.** Sistema de contrapeso N°3

#### 4.4.2.2. Amplificación del multiplicador de velocidad

La velocidad media que alcanzará el extremo del cable durante el período aprovechable está dada por la ecuación:

$$v_m = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{H\pi}{T} \text{sen}(-\theta) d\theta \quad (52)$$

$$\Rightarrow v_m = \frac{2H}{T} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (53)$$

Con:

H: Altura promedio de la ola

T: Período de la ola

Así entonces, para las olas de Coquimbo se tendrá que la velocidad promedio que alcanza el cable será de:

$$v_m = \frac{2 \cdot 1.3}{2.5} = 1.04 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (54)$$

La velocidad angular promedio de entrada al sistema de contrapeso número 2 será entonces:

$$\omega_m = \frac{2\pi \cdot v_m}{radio} = \frac{2\pi \cdot 1.04}{1.53} = 4.27 \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (55)$$

Si se desea una velocidad promedio de 6000 [rpm] en el eje de salida, la amplificación del multiplicador de velocidad será de:

$$k = \left( \frac{6000 \cdot 2\pi}{60} \right) / 4.271 = 628.32 / 4.271 = 147.115 \approx 147 \quad (56)$$

#### 4.4.3. Volante de inercia

Se quiere que el torque motor ejercido sobre el eje del generador de mantenga más o menos constante durante todo el ciclo de trabajo pero en la ausencia de un volante de inercia se tiene el comportamiento que muestra la Figura 72.

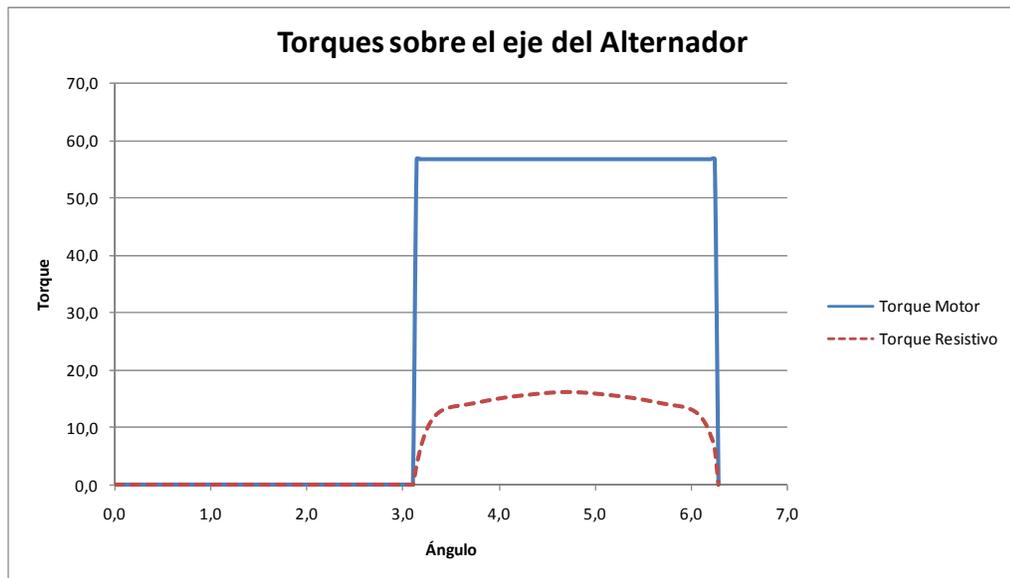


Figura 72. Torques sobre el eje del alternador

Integrando por la regla de Simpson la diferencia entre los torques se obtiene una energía de  $E=132.4034$ . Según la ecuación (23) se tendrá que para una velocidad media de 628.32 [rad/s] y un coeficiente de fluctuación de 0.002, la inercia del volante será:

$$I = \frac{E}{C_f \omega_m^2} = \frac{132.4034}{0.002 \cdot 628.32^2} = 0.16769 [kg \cdot m^2] \quad (57)$$

Por otro lado también se cumple que la inercia del volante (o disco) es:

$$I = \frac{1}{2}MR^2 \quad (58)$$

Con:

- M: Masa del disco [kg]
- W: ancho del disco [m]
- R: Radio del disco [m]

Suponiendo un volante de acero, la densidad del material es de  $7850[\text{kg}/\text{m}^3]$  y su volumen está determinado por:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot W \quad (59)$$

Para un ancho de 5 [cm] se tendrá lo siguiente:

$$\frac{1}{2}MR^2 = \frac{1}{2}7850 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot 0.05 \cdot R^2 = 0.16769 \quad (60)$$

$$\Rightarrow R = \sqrt[4]{\frac{0.16769}{616.538}} = \sqrt[4]{0.000272} = 0.1284[\text{m}] \approx 13[\text{cm}] \quad (61)$$

#### 4.5. Comportamiento esperado

Modelando la dinámica del sistema en Matlab-Simulink, según la Figura 73 y la Figura 74, se obtienen los resultados expuestos desde la Figura 75 hasta la Figura 82 para un horizonte de 60 segundos.

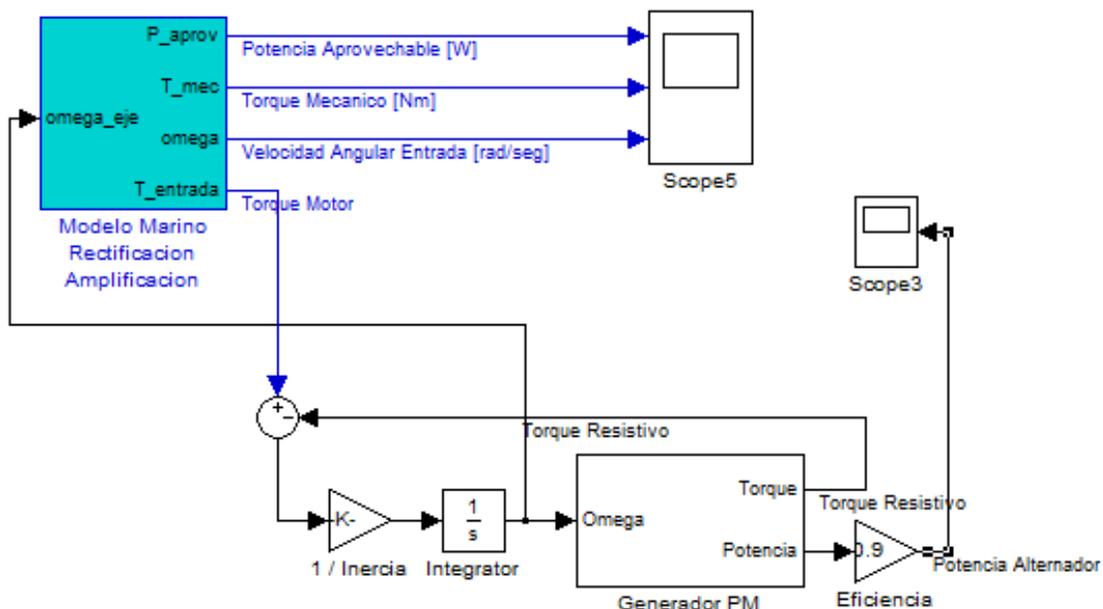
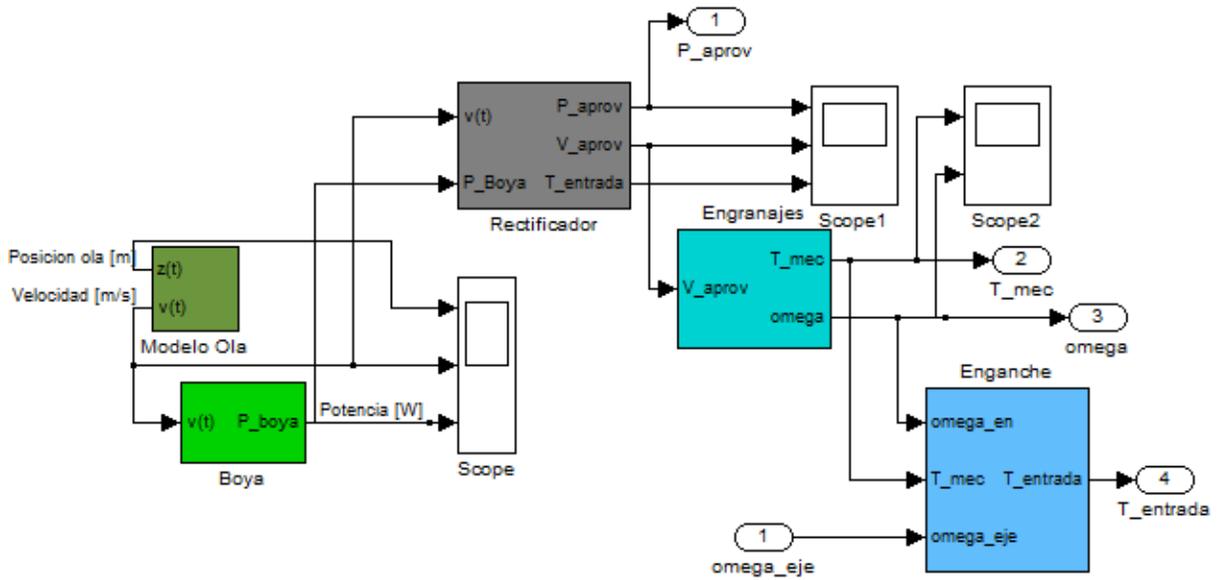
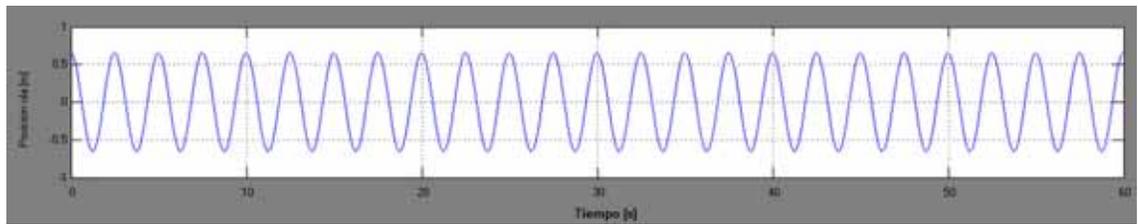


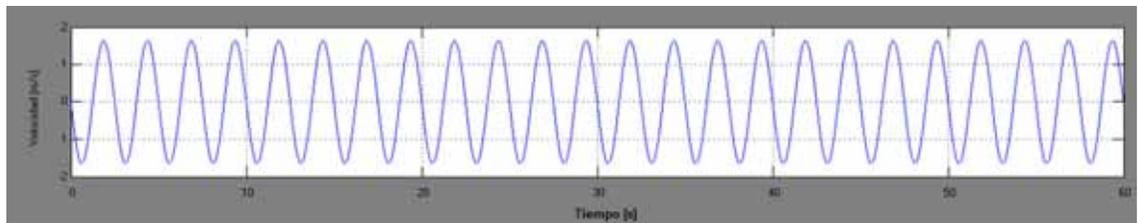
Figura 73. Modelo dinámico Simulink



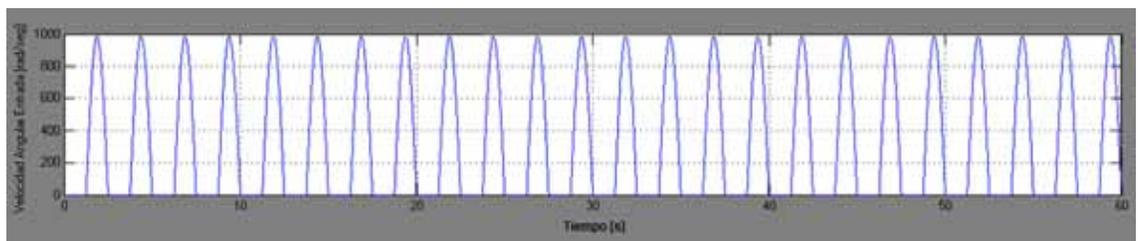
**Figura 74.** Modelo marino / rectificación / amplificación



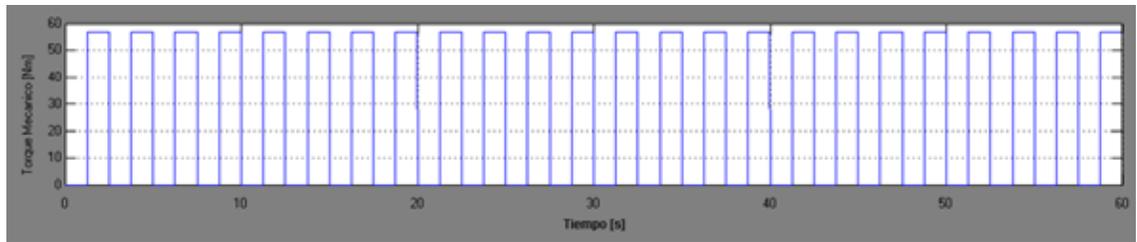
**Figura 75.** Altura de la ola según el tiempo



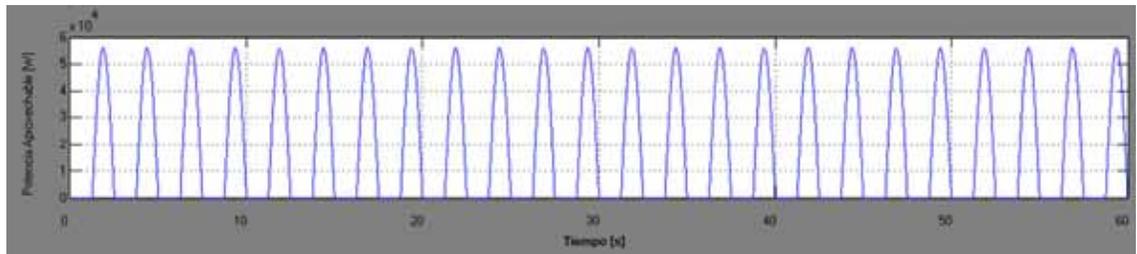
**Figura 76.** Velocidad de movimiento de la ola según el tiempo



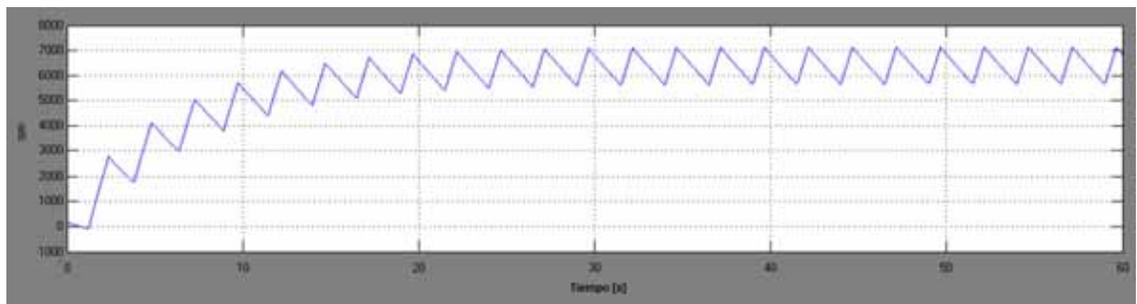
**Figura 77.** Velocidad angular aportada por la boya sobre el eje del alternador



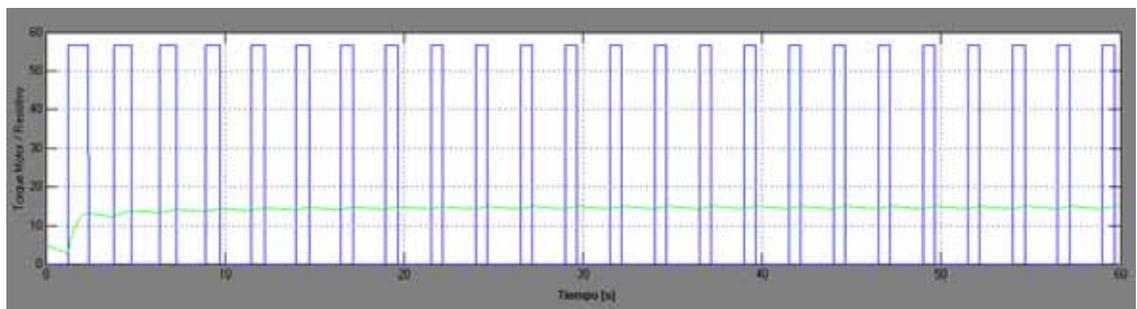
**Figura 78.** Torque aportado por la boya sobre el eje del alternador



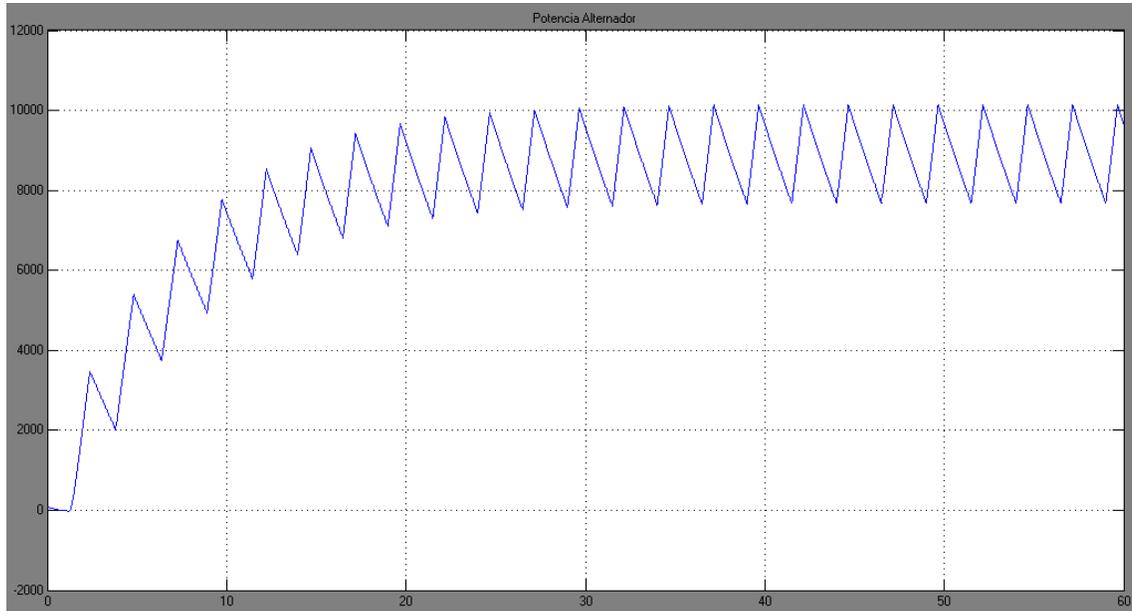
**Figura 79.** Potencia aportada por la boya sobre el eje del generador



**Figura 80.** Revoluciones por minuto sobre el eje del alternador



**Figura 81.** Torque motor y torque resistivo sobre el eje del alternador



**Figura 82.** Potencia generada por el alternador

## 4.6. Sistema de control

Se escoge una tensión 24 [V] para el sistema de acumulación, por lo tanto el voltaje a la salida del conversor DC-DC deberá mantenerse en torno a los 28.5 [V] para que se pueda realizar la carga.

Suponiendo que el alternador no superará los 10.000 [rpm], el máximo voltaje que podrá generar será, según la Figura 65, de 100 [V]. Por lo tanto, el ciclo de trabajo del PWM del sistema de control estará acotado inferiormente por:

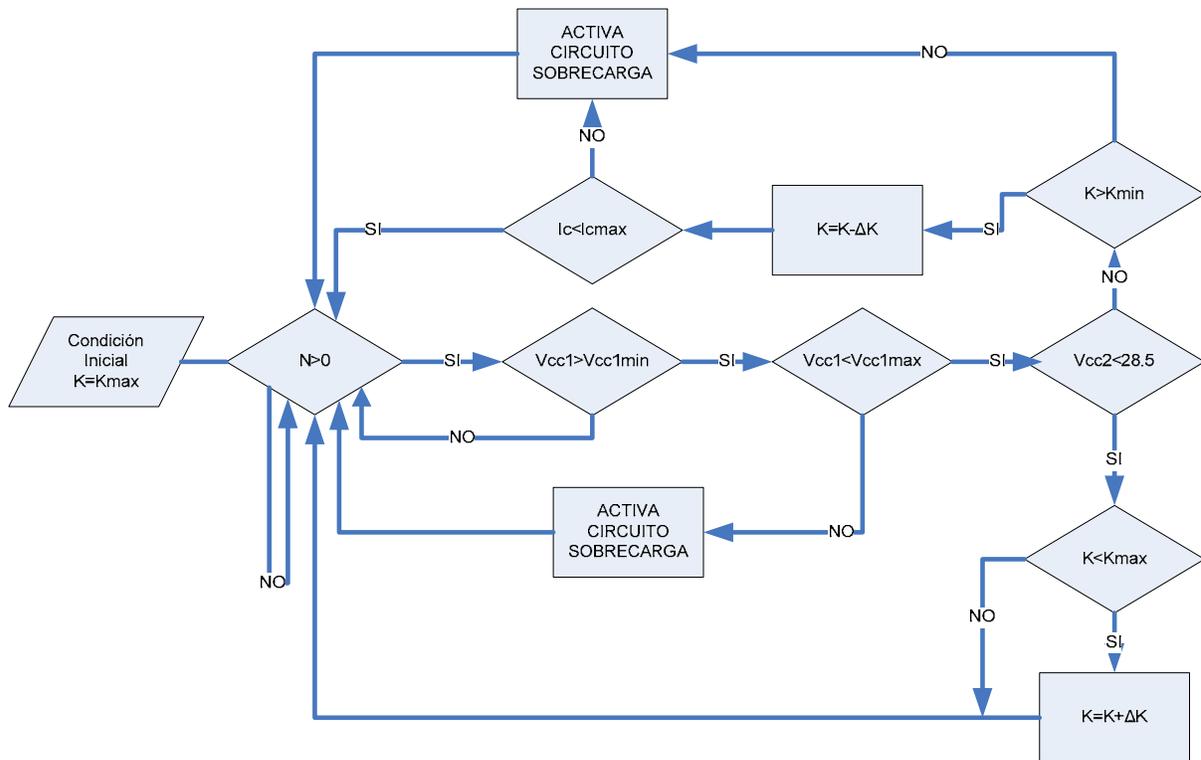
$$\frac{28.5}{100} = \left| -\frac{k}{1-k} \right| \quad (61)$$

$$\Rightarrow k = 0.222 \quad (62)$$

El límite superior para el ciclo de trabajo queda acotado por la potencia mínima que el alternador es capaz de generar. Como este tipo de dispositivos comienzan a producir electricidad a muy bajas revoluciones se escoge un límite superior para el ciclo de trabajo de 0.95, con lo cual se debería comenzar a obtener el voltaje de carga cuando se alcanzan como mínimo 1.5 [V] en los bornes del generador.

### 4.6.1. Algoritmo del sistema de control

Se sugiere la siguiente secuencia de programación expuesta en la Figura 83 para el micro controlador. Los nombres de las variables involucradas se pueden obtener de la Tabla 6.



**Figura 83.** Algoritmo de control PWM

<i>Variable</i>	<i>Identificación</i>
Ciclo de trabajo PWM	K
Voltaje de entrada Conversor	Vcc1
Voltaje de salida Conversor	Vcc2
Corriente de Carga	Ic
Revoluciones eje	N

**Tabla 6.** Variables algoritmo de control

La idea del algoritmo de control en cada ciclo de ejecución compruebe que el valor del voltaje en los bornes del alternador se mantenga dentro de los valores de funcionamiento. Si el voltaje no es suficiente se genera un ciclo infinito hasta que el mínimo es superado. Por el contrario, si el voltaje es excedido se dará la orden a algún circuito de sobrecarga para que disipe la potencia en exceso.

Luego se verifica que el voltaje en la salida del conversor se mantenga en torno al voltaje de carga manipulando el ciclo de trabajo del PWM (variable k), en el caso de que la corriente de carga sea excedida o el voltaje ya no pueda ser disminuido por el ciclo de trabajo, se da la orden de operación al circuito de sobrecarga. Este último circuito como primera medida disipa potencia sobre el circuito se sobrecarga, si esto no es suficiente, da

la orden al motor de corriente continua que acciona el freno mecánico para que opere y disminuya así la velocidad de giro del rotor del alternador.

#### 4.7. Banco de baterías

La capacidad del sistema de acumulación dependerá de las características de la demanda a la cual se verá enfrentado el sistema.

Suponiendo que el sistema se encuentra funcionando bajo las condiciones que determinan el comportamiento del alternador de la Figura 82, donde la potencia generada en promedio alcanza los 9 [kW], la potencia promedio después del conversor DC-DC será de 6.3 [kW] en el peor de los casos (eficiencia de 70%).

Con una demanda diaria de 5 [kW] constantes y la utilización de elementos de iluminación y calefacción durante el periodo nocturno que demandarían el resto de energía generada, se tendrá el escenario donde será necesario almacenar la energía equivalente a 1.3 [kW] por 12 horas.

Como de expuso en el capítulo anterior, el acumulador (o batería) recomendado para este tipo de aplicaciones plomo ácido de ciclo profundo. Un acumulador de este tipo es el fabricado por CCB Industrial Battery Co.<sup>11</sup>

Utilizando un acumulador de 12 [V] y de capacidad 100 [Ah] será necesario la utilización de una cantidad mínima de 8 elementos para satisfacer la energía que se desea almacenar y la tensión de 24 [V] en un arreglo serie paralelo. En la Tabla 7 se muestran las características del acumulador antes mencionado.

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Voltaje Nominal	12 [V]
Capacidad	100 [Ah] @ 12 hr
Corriente de carga máxima	50 [A]
Corriente de descarga máxima	800 [A]
Resistencia Interna	3.5 [mOhms]

**Tabla 7.** Características del acumulador CCB

#### 4.8. Inversor

El sistema de inversión es uno de los dispositivos más costosos seguido del sistema de acumulación. Su valor se ve incrementado conforme se requiere un equipo de mayor capacidad. Por esta razón es recomendable la utilización de dispositivos que funcionen en corriente continua, evitando la utilización de este sistema y ahorrando la pérdida de potencia provocada por la conversión de energía.

<sup>11</sup> <http://www.battery-oem.com/>

A pesar de lo anterior, si se desea una generación en corriente alterna de 6 [kVA], la utilización de dos inversores de 3[kVA] conectados en paralelo resulta suficiente. De esa forma, además de cumplir con la potencia que se necesita, se respalda el sistema en caso de la falla de alguno de ellos pudiendo funcionar a la mitad de la potencia.

Un inversor capaz de cumplir con los requerimientos antes mencionados puede ser el Phoenix Combi de 24 [V], fabricado por Victron Energy <sup>12</sup> cuyas características se presentan en la Tabla 8.

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Voltaje de alimentación	19.5 - 33 [V]
Potencia permanente [VA]	3000 [VA]
Potencia permanente [W]	2500/2000 [W]
Forma de onda	Senoidal pura
Potencia instantánea Máxima	6000 [W]
Rendimiento máximo	94%
Consumo sin carga	15 [W]
Fases	1
Voltaje salida	230 [V] ± 2%
Frecuencia	50 [Hz] ± 0.2%

**Tabla 8.** Características del inversor Phoenix Combi

#### 4.9. Costo de dispositivos

El valor aproximando en el mercado de los dispositivos que se han mencionado en este capítulo se presenta en la Tabla 9. El resto de los elementos es necesario construirlos.

<i>Equipo</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Valor Unitario</i>	<i>Total</i>
Alternador	1	\$ 160.000	\$ 160.000
Acumuladores	8	\$ 157.080	\$ 1.256.640
Inversor	2	\$ 1.730.000	\$ 3.460.000
		TOTAL	\$ 4.876.640

**Tabla 9.** Costo de dispositivos en el mercado

<sup>12</sup> <http://www.victronenergy.com.es>

# Capítulo 5

## 5. Conclusiones y comentarios

### 5.1. Conclusiones

El presente trabajo ha desarrollado una metodología completa para la toma de decisiones respecto de los dispositivos constituyentes de un sistema de generación eléctrica a partir de la energía de las olas. El principal inconveniente de este tipo de generación es la variabilidad del recurso, que se traduce en una velocidad de rotación variable sobre el rotor de un generador eléctrico.

Se ha conseguido diseñar un sistema de conversión de la energía de las olas en energía eléctrica susceptible de alimentar consumos tanto en corriente alterna como en corriente continua, además con la capacidad de almacenar la energía excedente para ser utilizada en momentos que requieran de una mayor disponibilidad de potencia eléctrica.

Respecto de los objetivos impuestos al inicio del trabajo se plantean las siguientes conclusiones:

- Se ha hecho una completa revisión de las manifestaciones de energía del océano y los métodos de extracción de aquellas aplicables en la generación de energía eléctrica en el Capítulo 2. Particularmente ha sido estudiada la energía contenida en las olas y las tecnologías existentes (anexo 7.1).
- A partir del movimiento mecánico obtenido por el prototipo propuesto inicialmente por Pedro Riquelme, el cual a la vez está determinado por el movimiento de las olas, se han propuesto y dimensionado los elementos mecánicos necesarios para obtener un movimiento rotatorio sin grandes fluctuaciones en un eje que puede ser acoplado a un generador eléctrico. Además se ha elaborado una metodología para la simulación de las características mecánicas del prototipo.
- En base a un eje que gira a velocidad variable y un sistema que se encuentra alejado de la red eléctrica de potencia, se ha escogido el sistema de generación más adecuado consistente en un alternador de imanes permanentes. Se ha especificado el sistema de control a voltaje constante y se han determinado los mecanismos de protección, tanto electrónicos como mecánicos.

- La simulación del comportamiento del sistema eléctrico ha permitido la estimación de la potencia que éste es capaz de producir para un escenario de funcionamiento supuesto.
- Se ha propuesto una metodología para el dimensionamiento de un sistema de acumulación de energía eléctrica además de las características eléctricas y físicas que este dispositivo debe tener. Se han especificado el funcionamiento y las características eléctricas que debe tener el sistema de inversión de voltaje.
- Finalmente en el Capítulo 4 se han propuesto fabricantes y precios de aquellos dispositivos que demandan una mayor dificultad de fabricación.

## **5.2. Comentarios**

El océano es una fuente inagotable de energía que se manifiesta en variadas formas. Existe una diversidad de métodos para aprovecharla, que van desde reacciones moleculares hasta desplazamientos de masa utilizados para accionar elementos mecánicos, transformándola así, en energía aprovechable para el ser humano.

En la actualidad, debido a la importancia que ha tomado el aprovechamiento de las energías renovables no convencionales (ERNC) se están realizando muchos estudios respecto de tecnologías que sean capaces de obtener energía a partir del océano, de forma eficiente y económicamente rentable. Existen muchas organizaciones con diseños y prototipos de generadores mareomotrices en busca de financiamiento y otras, que ya cuentan con dispositivos en el mercado.

La obtención de energía a partir de las olas de mar, al ser menos invasiva respecto de la energía de las mareas (se necesitan condiciones geográficas e instalaciones para retener agua) y la energía de las corrientes (es necesario la instalación de turbinas bajo flotadores o sobre el lecho marino), se traduce en una alternativa atractiva para abastecer de energía eléctrica a consumos pequeños ubicados en zonas costeras. En el caso estudiado solo se requiere la construcción de la boya y la estructura para anclarla al suelo marino, lo que resulta una tarea simple respecto de otras alternativas.

### **5.2.1. Respecto del sistema mecánico**

Las pérdidas de potencia asociadas a este dispositivo se manifiestan en la generación de calor debido al roce de los elementos, el cual se ve incrementado al funcionar a altas velocidades, haciéndose necesaria la utilización de equipos de enfriamiento. Por otro lado, a bajas velocidades, los engranajes se ven sometidos a mayores esfuerzos debido al mayor torque que deben soportar. Un diseño que logre un equilibrio entre los dos casos extremos puede alcanzar una alta eficiencia en la conversión.

### **5.2.2. Respecto del sistema eléctrico**

El alternador de imanes permanentes resulta ser la alternativa de generación más atractiva que se encuentra disponible en el mercado para la generación a velocidad variable y aislada de la red de potencia. El resto de los generadores eléctricos son concebidos para su funcionamiento con motores diesel o sistemas donde, a pesar trabajar a una velocidad de giro variable, no se ven sometidos a las altas fluctuaciones a las que se podría ver enfrentado el generador mareomotriz.

A diferencia de los alternadores auto excitados con inducción electromagnética, el alternador de imanes permanentes no necesita de una velocidad mínima para operar, produciendo electricidad a bajas velocidades. Tiene una característica de potencia versus velocidad casi lineal, además de una alta eficiencia de conversión. Resultan económicos y de bajo mantenimiento al no necesitar anillos ni escobillas.

La simplicidad del diseño del alternador de imanes permanentes permite que en el mercado se disponga de una variada cantidad de diseños, que pueden fácilmente ajustarse a los requerimientos de velocidad que se necesiten.

La utilización de un micro controlador para generar la señal de control permite una holgura a la hora de realizar modificaciones al algoritmo de control. Esto resulta muy útil a la hora de realizar correcciones en terreno.

Además del control en la conmutación en el convertidor, el micro controlador permitiría la incorporación de interfaces para reconfigurar los puntos de operación y enviar información a dispositivos que permitan la visualización de las lecturas de las variables que el PIC obtiene, como son la corriente de carga, los voltajes en el convertidor y la velocidad de rotación del eje.

Al ser el acumulador eléctrico un elemento costoso, que necesita mantenimiento y se deteriora con el tiempo, es necesario estimar sus dimensiones de forma óptima para no incurrir en gastos innecesarios.

El oleaje, si bien no es constante en cuanto a amplitud y frecuencia, está presente casi todo el tiempo y por lo tanto el alternador estará continuamente generando electricidad. Una demanda constante en torno a la potencia generada, minimizaría la necesidad de capacidad de acumulación

El inversor de voltaje introduce una pérdida de potencia debida a la conversión de energía. Es un dispositivo muy costoso por su complejidad de construcción. La calidad de la señal de salida es un factor determinante en el valor de uno de estos dispositivos en el mercado. Es por esto que si el consumo lo permite, se recomienda la utilización de cargas que utilicen corriente continua.

### **5.2.3. Trabajo futuro**

El comportamiento de la energía producida por el alternador bajo el régimen del oleaje hace necesario que el conversor DC-DC sea construido especialmente para la aplicación. Es por esto que se plantea como trabajo futuro el diseño y construcción de este dispositivo según las especificaciones eléctricas que serán determinadas por la demanda que el sistema deberá abastecer.

Por otro lado, la versatilidad que le otorga al sistema de control la utilización de un micro controlador permite la incorporación de un algoritmo más elaborado y la lectura de más variables. Así entonces, con la ayuda de un sensor de temperatura, puede ser diseñado un algoritmo que permita la carga óptima del acumulador, ajustando el voltaje a la salida del conversor según la zona de operación en que se encuentre la batería. Además, como se mencionó anteriormente, se pueden incorporar elementos de visualización de los valores instantáneos de las variables involucradas en el algoritmo, tales como velocidad, corriente de carga y voltajes.

El peso de la boya influye directamente en la potencia que es capaz de generar el sistema, por lo tanto, la capacidad de generación se ve limitada por la construcción de este elemento. La eficiencia del sistema de conversión mecánica eléctrica es del orden del 12% y cualquier mejora en el sistema mecánico significaría un ahorro significativo a la hora de la construcción del prototipo.

# Capítulo 6

## 6. Bibliografía

- [1] **Bianucci, Ing. Hca. Paola.** Energías Renovables. [En línea] 2002. <http://arandu.org.ar/pub/apunte1-mareomotriz.pdf>.
- [2] **EcoPortal.net.** Energías. [En línea] <http://energias.ecoport.net/>.
- [3] **Fundación Mar de Chile.** Portal de los siete Mares. [En línea] <http://www.mardechile.cl>.
- [4] **Hocott, Claude R. y Purser, Paul E.** *Energy and the Oceans*. 1983.
- [5] **Bregman, Ron, Knapp, R. H. y Takahashi, P. K.** *Design considerations for ocean energy resource systems*. Hawaii Univ. : s.n., 1995.
- [6] *Presentación EU-LAC workshop, Renewable Energy Session.* **Bard, Jochen.** Mexico : s.n., 2006.
- [7] **Dpto. de Servicios de Información del Royal Greenwich Observatory.** Las Mareas. [En línea] <http://www.oarval.org/tidessp.htm>.
- [8] **Wikipedia.** [En línea] <http://www.wikipedia.org>.
- [9] **Algaze Odano, David Jacob.** *Diseño de un Generador Eléctrico a partir de la Energía del Océano*. s.l. : Universidad de Chile, 2004.
- [10] **Chapman, Stephen J.** *Máquinas Eléctricas*. Colombia : Mc Graw Hill, 2000.
- [11] **Fouled García, Jose.** *Acumuladores electroquímicos : fundamentos, nuevos desarrollos y aplicaciones*. s.l. : McGraw-Hill, 1994.
- [12] *A simple model of Ocean Waves.* **Reeves, William T.** Toronto : s.n., 1986.
- [13] **Shingley, Joseph E. y Mischke, Charles R.** *Diseño en ingeniería mecánica*. Mexico : Mc Graw hill, 2002. ISBN 970-10-3646-8.
- [14] **Aycaguer H., Auger.** Apuntes del curso "Electrónica de Potencia" (EM722). Santiago : s.n., 2007.
- [15] **Antezana Nuñez, Juan Cristóbal.** *Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical*. Santiago : Universidad de Chile, 2004.
- [16] **Chiras, Dan.** *The Homeowner's Guide to Renewable Energy*. s.l. : New Society Publishers, 2006. ISBN: 9780865715363 .

- [17] **Daniel Hidalgo, Pablo.** *Proyecto de electrificación rural, localidad de Camar, 2ª región, Antofagasta.* Santiago : Universidad de Chile, 2006.
- [18] *DC-DC Power Converters.* **Erickson, Robert W.** University of Colorado : Department of Electrical and Computer Engineering.
- [19] **Henríquez Olavarría, Andrés.** *Información Oceanográfica para la Aplicación de la Generación de Energía.* s.l. : Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 2008.
- [20] **Wavegen.** Wavegen: A Voith and Siemens Company. [En línea] <http://www.wavegen.co.uk>.
- [21] **Ltda., S.D.E. Energy.** Sea Wave Power Plants. [En línea] <http://www.sde.co.il>.
- [22] **Energy, CETO Wave.** CETO Wave Energy. [En línea] <http://www.ceto.com.au>.
- [23] **Ltda., Dexa Wave UK.** DEXA Wave Energy Economy. [En línea] <http://dexawaveenergy.co.uk>.
- [24] **AWS Ocean Energy Ltd.** AWS Ocean Energy Ltd - Offshore Subsea Wave Energy. [En línea] <http://www.awsocan.com/>.
- [25] **AW Energy.** Waveroller - Harnessing the Energy of the Oceans. [En línea] <http://www.aw-energy.com>.
- [26] **Energy, Wave Star.** Wave Star Energy. [En línea] <http://www.wavestarenergy.com/>.
- [27] **AS, WAVEEnergy.** WaveEnergy. [En línea] <http://www.waveenergy.no/>.
- [28] **ORECon Ltd.** ORECon. [En línea] <http://www.orecon.com/>.
- [29] **Ocean Energy Ltda.** Ocean Energy. [En línea] <http://www.oceanenergy.ie>.
- [30] **Offshore Wave Energy Ltda.** OWEL The Wave Energy Converter. [En línea] <http://www.owel.co.uk>.
- [31] **AB, SEABASED.** Seabased AB: Bringing ocean power to the world. [En línea] <http://www.seabased.com/>.
- [32] **Ocean Navitas.** Ocean Navitas Ltda. [En línea] <http://oceannavitas.com>.
- [33] **SyncWave Energy Inc.** Welcome to SyncWave™ Energy Inc. [En línea] <http://www.syncwaveenergy.com>.
- [34] **Tidal Energy Pty Ltd.** Tidal Energy. [En línea] <http://tidalenergy.net.au/>.

- [35] **Verdant Power.** Verdant Power. [En línea] <http://verdantpower.com/>.
- [36] **Vortex Hydro Energy.** Vortex Hydro Energy. [En línea] <http://www.vortexhydroenergy.com/>.
- [37] **Blue Energy International .** Renewable Energy and Ethical Investment. . [En línea] <http://bluenergy.com/>.
- [38] **Hydro Green Energy.** Hydro Green Energy. [En línea] <http://www.hgenenergy.com/>.
- [39] **Ocean Flow Energy.** Evapod Ocean Flow Energy. [En línea] <http://www.oceanflowenergy.com/>.
- [40] **Tidal Sails.** Tidal Sails. [En línea] <http://www.tidalsails.com>.
- [41] **Group, StatKraft.** Statkraft. [En línea] <http://www.statkraft.com>.

# Capítulo 7

## 7. Anexos

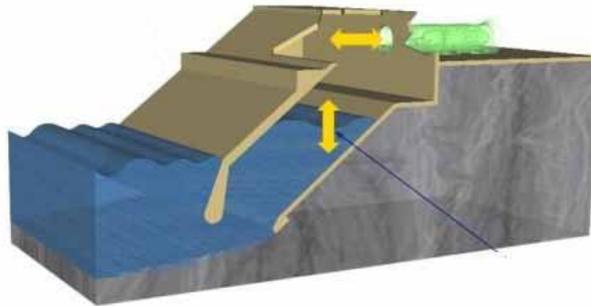
### 7.1. Sistemas de conversión de energía a partir del océano.

A continuación se hace una revisión de sistemas que se encuentran en actual desarrollo, así como también de aquellos que están disponibles en el mercado.

#### 7.1.1. Conversores a partir de las olas

##### 7.1.1.1. Limpet: Oscilación de columna de agua

Consiste en una cámara por la cual entra agua de mar impulsada por la fuerza de la ola, cuya oscilación tiene como efecto comprimir el aire contenido al interior. Éste aire bajo presión es expulsado a través de una turbina, la cual es capaz de generar electricidad en ambos sentidos de flujo de aire (ver Figura 84).



**Figura 84.** Sistema Limpet [20]

Este sistema pertenece a la empresa Wavegen en Escocia y existe un modelo en funcionamiento en la isla de Islay en el mismo país. El desempeño de esta unidad está determinado por la intensidad de las olas y oscila entre los 15 a 25 kW/m. Cuenta con dos generadores de 250 kW cada uno [20].

##### 7.1.1.2. SDE: Energía de las olas

El sistema SDE consiste en el aprovechamiento del movimiento de las olas para generar presión hidráulica, con la cual, a través de una turbina, se genera electricidad. El sistema es optimizado según la velocidad, envergadura, profundidad, altura y caída de la ola, además del flujo de retorno que se produce una vez que ésta rompe (ver Figura 85).

Existe un modelo operativo en Israel, el cual genera a un promedio 40kW. La empresa propietaria es S.D.E Energy Ltda. [21].

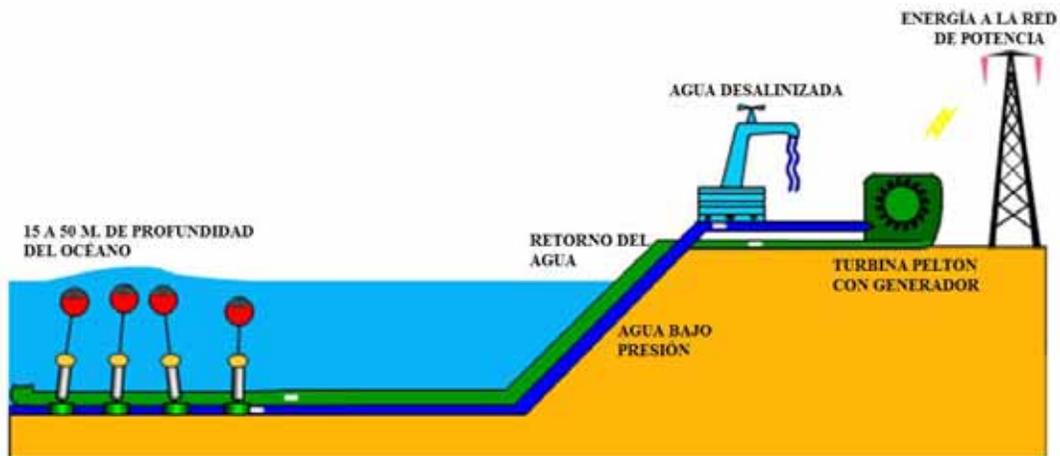


**Figura 85.** Sistema SDE [21]

### 7.1.1.3. CETO: Agua de mar a presión por efecto de las olas

A través del uso de boyas sumergidas y ancladas al lecho marino, el sistema CETO convierte el movimiento axial de la boya a un efecto de bombeo, que succiona agua de mar y la impulsa al borde costero, donde dada la alta presión, es posible la generación de electricidad por medio de una turbina Pelton (ver Figura 86).

El sistema continúa en desarrollo y contempla la instalación de una granja submarina de boyas con el sistema CETO, además de la posibilidad de desalinizar el agua de mar dada la disposición de ésta en tierra firme [22].



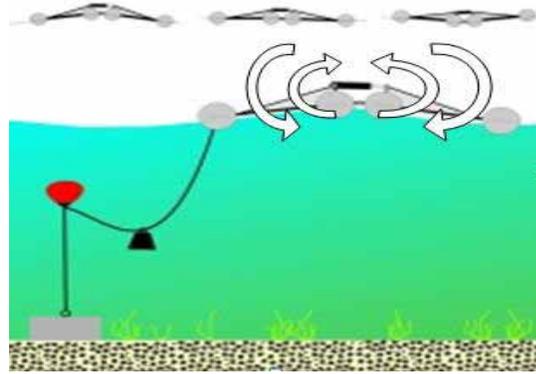
**Figura 86.** Sistema CETO Technology [22]

### 7.1.1.4. DEXA: Principio de movimiento angular de dos planos

El principio de funcionamiento de este sistema consta de dos objetos de una superficie extendida, flotando y cambiando el ángulo relativo entre uno y otro plano por efecto del movimiento de las olas. Este desplazamiento angular crea presión sobre aceite

en un cilindro hidráulico, el cual es transportado hacia un generador para producir electricidad (ver Figura 87).

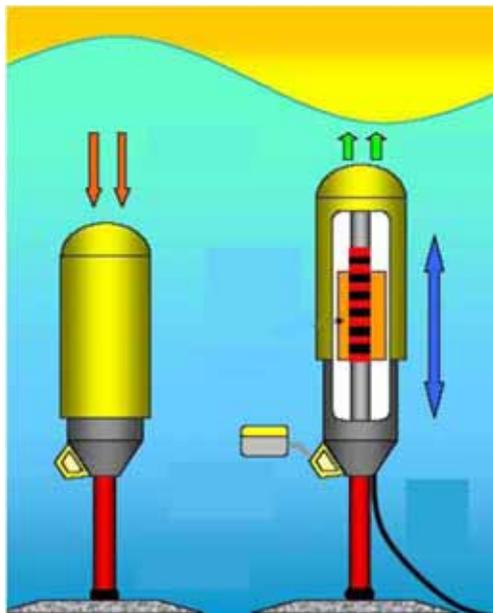
Las dimensiones de este sistema en peso van desde los 100 kg a las 1000 toneladas, con potencias de 220W a 2.2MW respectivamente [23].



**Figura 87.** Sistema DEXA [23]

#### **7.1.1.5. AWS: Principio de movimiento de las olas de Arquímedes**

Este sistema consta de un sistema de dos cilindros con forma de boya, uno al interior del otro, anclado al fondo marino. El movimiento de las olas provoca que la configuración de estos cilindros se contraiga y expanda verticalmente, gracias al aire contenido al interior, el cual permite que el sistema vuelva siempre a su configuración inicial. Este movimiento unidireccional es aprovechado por un generador lineal (ver Figura 88).

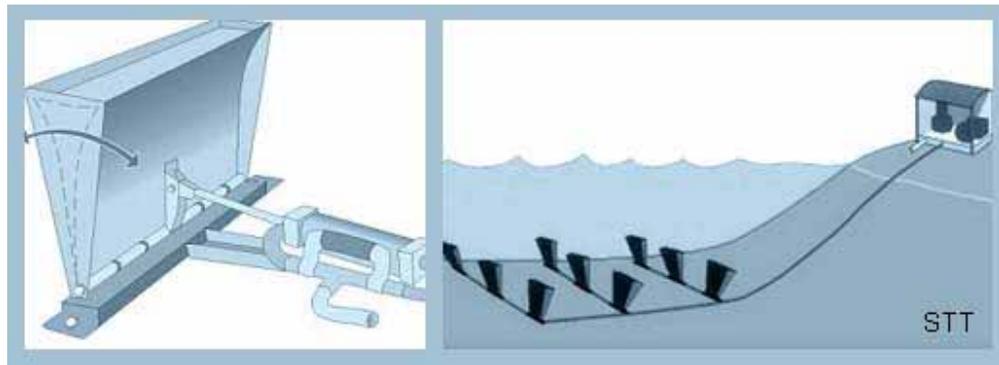


**Figura 88.** Sistema AWS [24]

El modelo fue puesto a prueba a escala completa en el año 2004 en una planta piloto que se instaló frente a la costa de Portugal y se espera que el modelo comercial sea capaz de producir 1.25MW [24].

#### **7.1.1.6. Waveroller: Aprovechamiento de las olas superficiales**

Este dispositivo consiste en un plato anclado por su parte inferior al fondo marino. El efecto de las olas tiene como consecuencia sobre el plato un movimiento del tipo péndulo. Ésta energía resultante es aprovechada por un pistón, el cual envía agua bajo presión a una turbina acoplada a un generador ubicada en el borde costero (ver Figura 89).



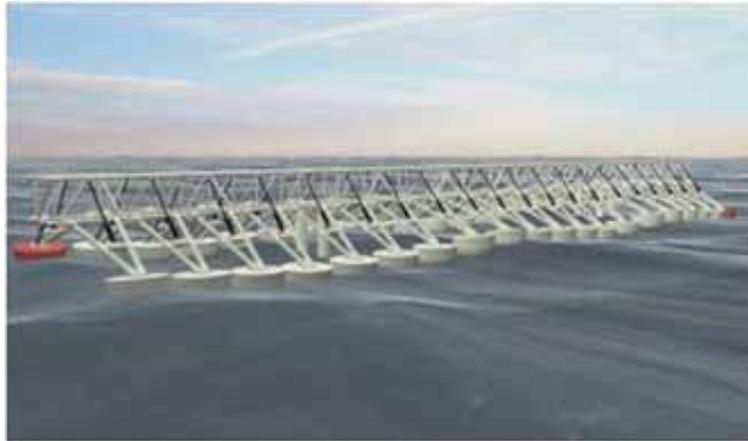
**Figura 89.** Sistema Waveroller [25]

Se estima que una unidad por sí sola es capaz de producir alrededor de 13kW en buenas condiciones de oleaje [25].

#### **7.1.1.7. Wave Star: Absorbedor multipunto.**

Es denominado absorbedor multipunto debido a su configuración, ya que está equipado con una cantidad determinada de flotadores, los cuales, por efecto de las olas accionan unas bombas hidráulicas que conducen aceite bajo presión a una turbina hidráulica, la que a su vez impulsa un generador eléctrico (ver Figura 90).

Con respecto a la seguridad de la estructura, el sistema cuenta con una característica que le permite protegerse de las tormentas, levantado los flotadores hasta una posición segura mientras el oleaje sea muy intenso, luego de lo cual automáticamente vuelve a la normalidad [26].

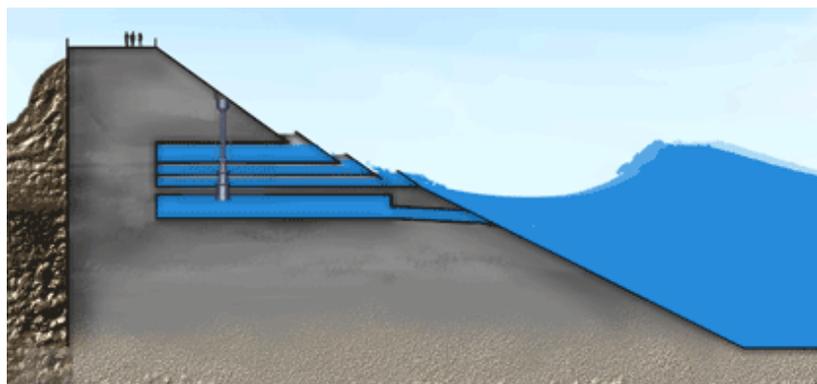


**Figura 90.** Sistema Wave Star [26]

Un modelo a escala 1:10 ha sido probado en la localidad de Nissum Brending en Dinamarca. Está formado por 40 flotadores esféricos de un diámetro de un metro y un generador de 5,5 kW. Se espera comercializar el sistema una vez que el modelo de 500kW haya alcanzado pruebas satisfactorias para la venta, lo cual sería en alrededor de 3 a 4 años.

#### **7.1.1.8. SSG WaveEnergy: Convertidor de la energía de las olas**

El SSG es un convertidor de la energía de las olas basado en el llenado de tres estanques, uno sobre otro, los cuales se llenan de agua cuando la altura de la ola es suficiente para sobrepasar la altura de las paredes contenedoras. Posteriormente la energía potencial contenida en esta agua almacenada es transformada a energía eléctrica cuando el agua pasa a través de una turbina (ver Figura 91). El concepto de utilizar varios contenedores mejora significativamente la eficiencia del sistema en comparación a un solo contenedor [27]. El proyecto se encuentra en etapa de diseño.

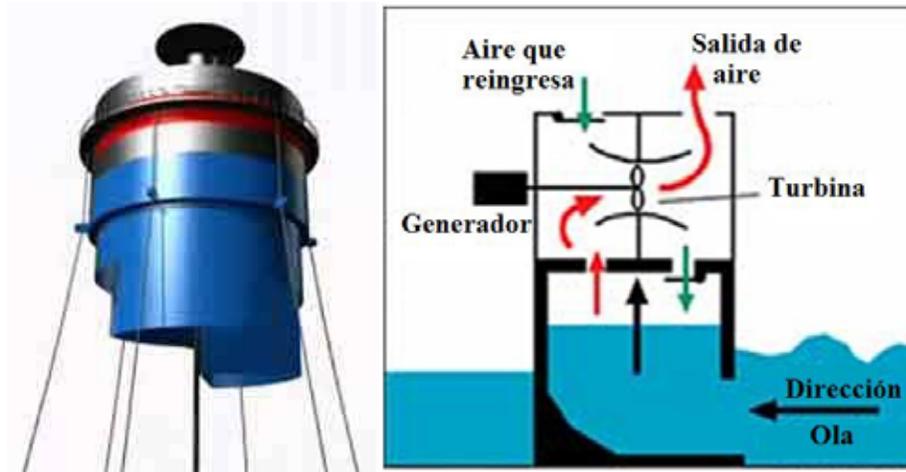


**Figura 91.** SSG de WaveEnergy [27]

#### **7.1.1.9. ORECON: Oscilación de columna de agua con cámaras multiresonantes**

Este generador se encuentra firmemente adherido a un flotador, el cual está anclado al fondo marino. Tiene una cámara donde el agua sube y baja por efecto del movimiento de

las olas. Sobre esta cámara se encuentra un compartimiento donde es instalada una turbina de forma que cuando el agua sube, el aire es obligado a pasar a través de ella y cuando baja, el aire succionado la hace girar nuevamente siempre en la misma dirección (ver Figura 92).

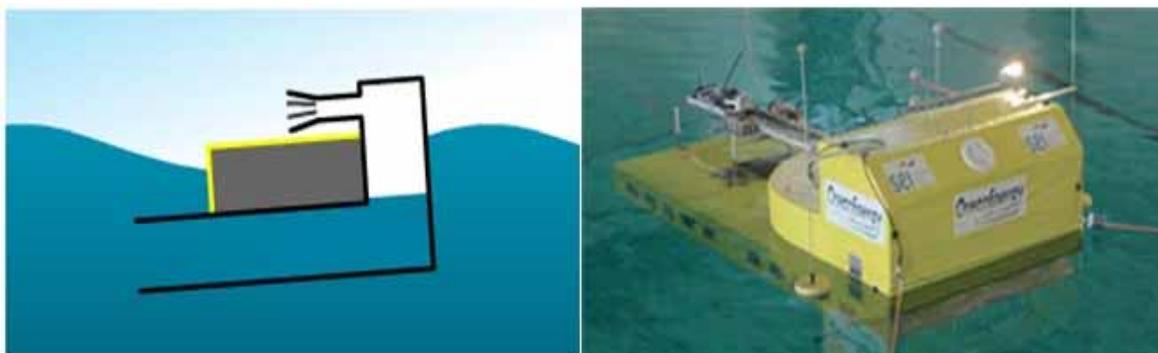


**Figura 92.** Sistema Orecon MRC [28]

El dispositivo no tiene partes móviles exceptuando la turbina, por lo tanto es robusto para enfrentar las inclemencias marinas. Se encuentra en etapa de desarrollo y se espera que una unidad pueda producir alrededor de 1MW [28].

#### 7.1.1.10. Boya OceanEnergy: Oscilación de columna de agua

El aire en una cámara es expulsado y succionado por efecto del movimiento del agua que se encuentra libre dentro del dispositivo. El aire pasa a través de una turbina que convierte el flujo en energía rotacional el cual acciona el generador eléctrico. El flujo de aire es rectificado, de forma que la turbina gire siempre en un mismo sentido (ver Figura



93).

**Figura 93.** Boya OceanEnergy [29]

Se han desarrollado modelos de prueba de escala 1:50 y 1:15 testados con éxito en Irlanda y Francia respectivamente [29].

#### 7.1.1.11. OWEL: Oscilación de columna de agua

De forma similar a la boya OceanEnergy, el sistema OWEL aprovecha el movimiento del agua de mar en una cámara para hacer circular aire bajo presión por una turbina, la cual estando acoplada a un generador eléctrico transforma la energía (ver Figura 94).

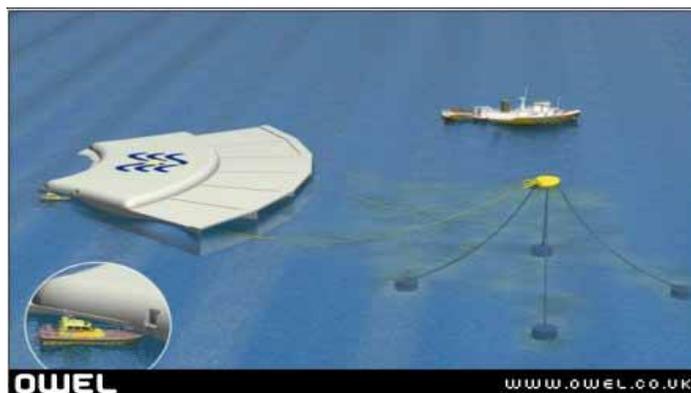


Figura 94. Sistema OWEL [30]

Su diseño tiene la forma de un conducto horizontal flotante, de manera que el francobordo<sup>13</sup> es aproximadamente igual a la amplitud de la ola. El conducto está abierto en un extremo y el sistema de anclaje asegura que este extremo sea el que enfrenta la entrada de las olas. Se espera que un prototipo a escala esté formado por seis unidades conectadas una al lado de otra, formando así una plataforma más menos triangular con un ancho de hasta 200 metros y se espera que tenga una capacidad de 6MW [30].

#### 7.1.1.12. Sistema Seabased AB

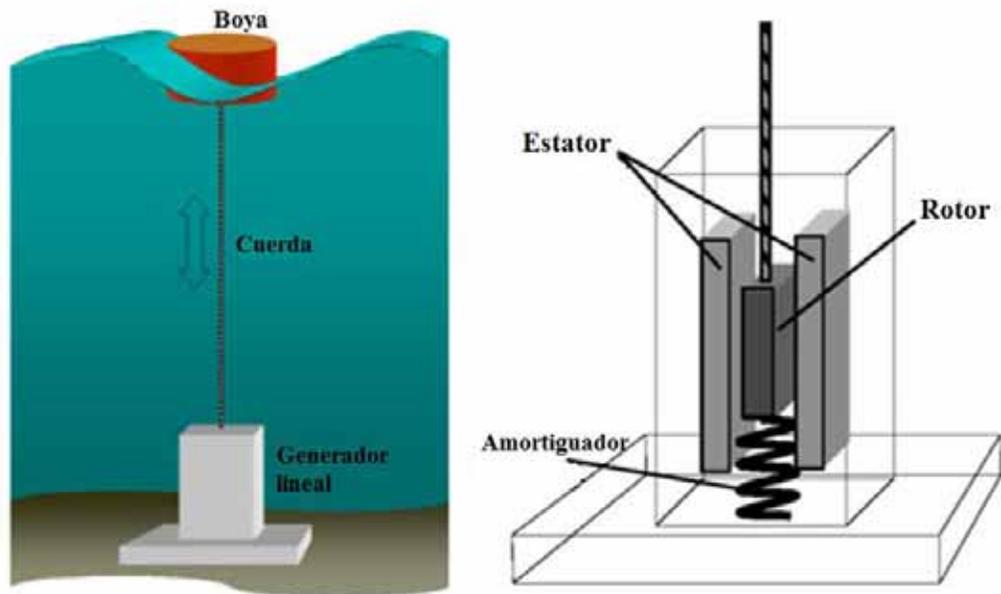
Este sistema está basado en un generador lineal, trifásico, de imán permanente, directamente accionado por un absorbedor puntual en la superficie marina (ver Figura 95).

De esta forma el absorbedor, en este caso una boya enganchada al generador, sube y baja por efecto de las olas logrando accionar el generador, el cual posee un sistema de resorte que lo hace volver siempre a su posición natural asemejando el movimiento de un pistón [31].

La idea es que la planta de energía esté constituida por un conjunto de boyas cuya disposición asemeje a un enmallado, de forma que se pueda producir alrededor de 10MW.

---

<sup>13</sup> El francobordo, según lo definido en el Convenio Internacional sobre Líneas de Carga de la Organización Marítima Internacional (IMO), es la distancia medida verticalmente en el centro del buque, desde la intersección de la cara superior de la cubierta de francobordo con la superficie exterior del forro, hasta la línea de carga correspondiente.



**Figura 95.** Sistema Seabased AB [31]

#### 7.1.1.13. Aegir Dynamo

Consiste en un mecanismo que genera corriente en una fase por medio de un generador lineal acoplado a un sistema de boyas que oscilan una dentro de otra. El equipo se encuentra en etapa de desarrollo con prototipos de 2kW (ver Figura 96). Se estima que la eficiencia del sistema alcance un 93% [32].

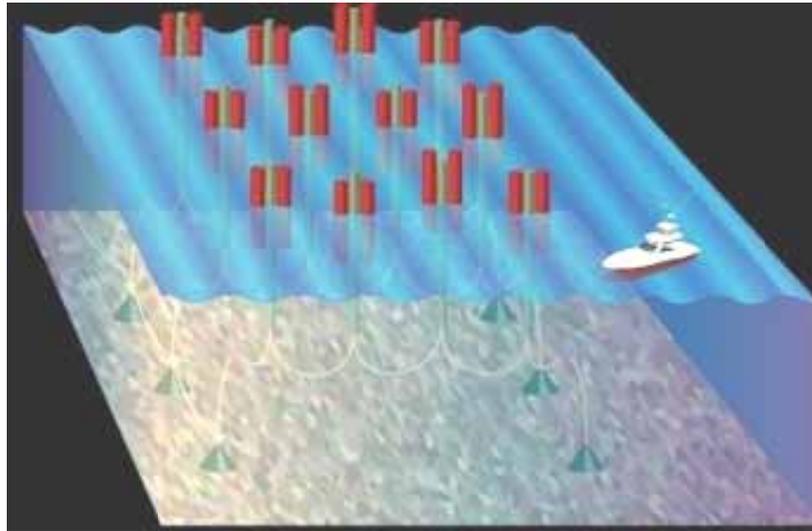


**Figura 96.** Sistema Aegir Dynamo [32]

#### 7.1.1.14. Syncwave Energy

Es un absorbedor puntual que funciona bajo el principio de resonancia. Este mecanismo una vez sumergido en el agua se sintoniza con la frecuencia de oscilación de las

olas. Básicamente está formado por dos estructuras conectadas por un generador eléctrico. Se desarrollo y probó un prototipo durante el año 2006 obteniendo resultados acordes con las simulaciones realizadas antes de su construcción. Para el año 2009 se tendrá un segundo prototipo luego del cual se espera entrar al mercado (ver Figura 97). Finalmente se estima que el sistema es eficiente para potencias menores a 1MW [33].



**Figura 97.** Sistema Syncwave Energy [33]

## **7.1.2. Conversores a partir de las mareas**

### **7.1.2.1. La Rance**

Fue la primera central mareomotriz del mundo, construida entre 1960 a 1967 y consiste en una central de 240 MW ubicada en la desembocadura del río La Rance, Francia. Posee una diferencia de altura entre mareas de 13.4 m, y contiene 24 turbinas. En 1997 reemplazaron las turbinas existentes por turbinas bidireccionales.

Cuenta un caudal de 20.000 metros cúbicos por segundo, un salto de agua de 8 metros y un dique de más de 700 m, siendo la superficie de agua embalsada de 17 km<sup>2</sup>.



**Figura 98.** Central La Rance

### **7.1.3. Conversores a partir de las corrientes**

#### **7.1.3.1. Turbina Venturi**

Una turbina de eje vertical gira por efecto es capaz de generar electricidad o bombear agua para desalinizar. El diseño de la patentada Venturi es el elemento estrella del diseño, ya que mejoraría 3.85 veces la eficiencia de las otras tecnologías de aprovechamiento de las corrientes marinas (ver Figura 99). El proyecto se encuentra en etapa de comercialización [34].



**Figura 99.** Turbina Venturi [34]

### 7.1.3.2. Verdant Power

Utiliza una turbina con una hélice de tres aspas para generar electricidad. La empresa cuenta con un prototipo en funcionamiento que genera energía trifásica y está compuesto por seis turbinas que pueden generar hasta 10 [MW] (ver Figura 100).

El prototipo fue puesto en marcha el año 2007 en la ciudad de Nueva York, Estados Unidos, a lo largo de la costa este de la isla de Roosevelt [35].

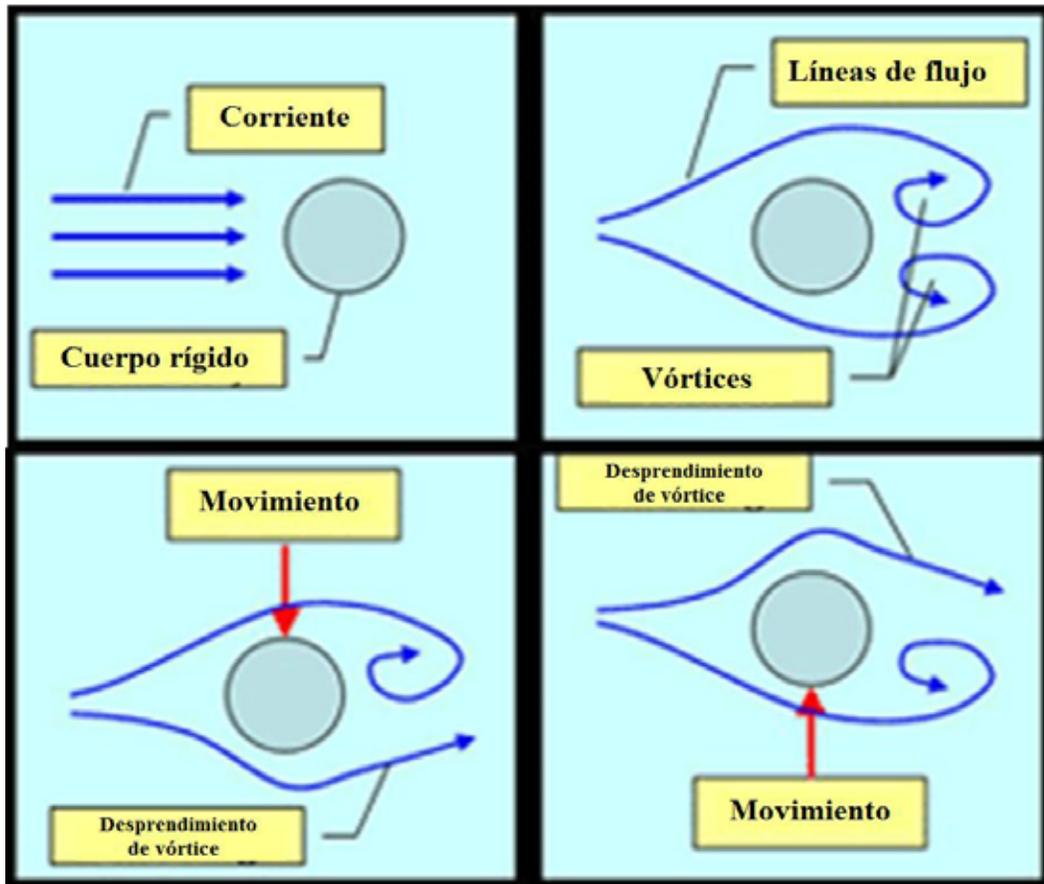


**Figura 100.** Verdant Power [35]

### 7.1.3.3. Vortex Hydro Energy

Extrae energía de los ríos, corrientes y otros medios acuáticos para un amplio rango de velocidades de cursos de agua. Aprovecha el fenómeno de las vibraciones inducidas por los vórtices formados en la parte posterior de un cuerpo que se opone al movimiento de un líquido. Tales vibraciones son aprovechadas para generar energía (ver Figura 101).

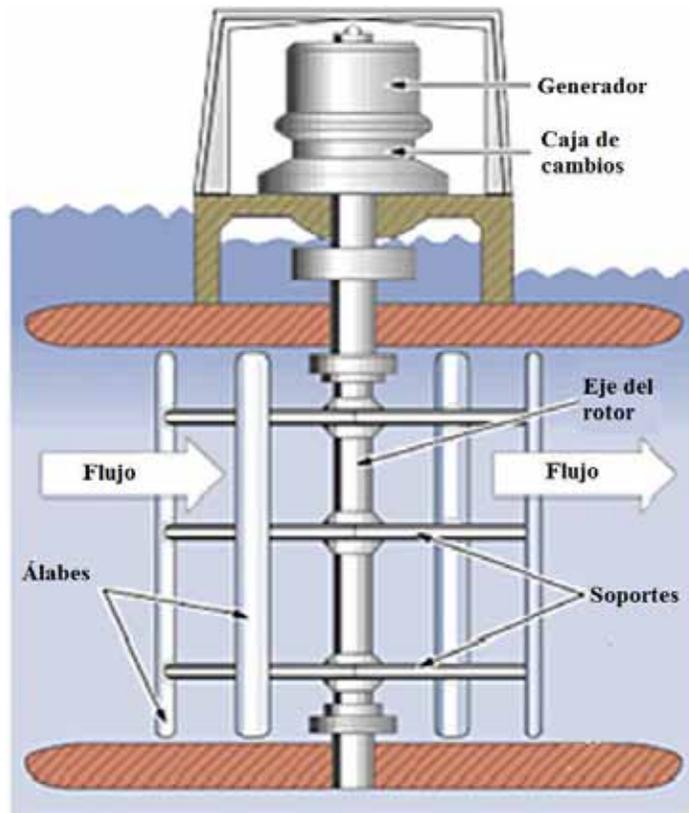
Existe un prototipo creado por el departamento de energía e investigación de Estados Unidos que se encuentra en el laboratorio de marina hidrodinámica de la universidad de Michigan [36].



**Figura 101.** Principio de funcionamiento sistema Vortex [36]

#### 7.1.3.4. Blue Energy

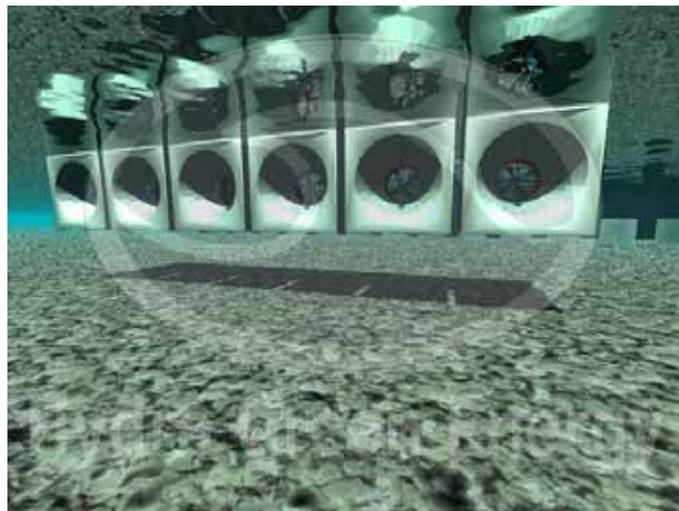
Utiliza una turbina de eje vertical para accionar un generador eléctrico. El proyecto se encuentra en la etapa de construcción de dos turbinas de 250 [kW] que se espera esté en funcionamiento dentro de 20 meses (ver Figura 102). El proyecto final espera poder generar potencias desde 2 a 2000 [MW] [37].



**Figura 102.** Sistema Blue Energy [37]

### 7.1.3.5. Hydro Green Energy

Consiste en una turbina ubicada en la parte inferior de un flotador. La corriente marina acciona la turbina que se encuentra acoplada a un generador, produciendo así electricidad (ver Figura 103) [38].



**Figura 103.** Turbina Hydro Green Energy [38]

### 7.1.3.6. Tidal Generation Limited

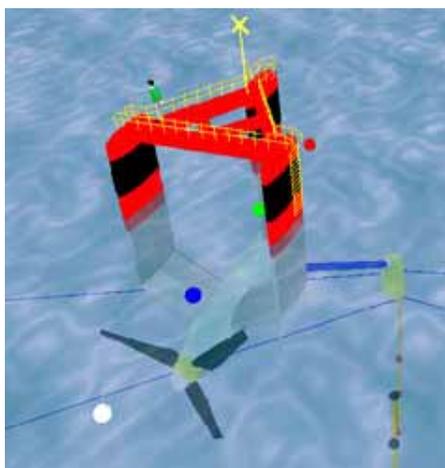
Está desarrollando un generador de 1 [MW] completamente sumergido, aprovechando el recurso en profundidades mayores a 30 [m]. Actualmente se está desarrollando un prototipo para ser instalado en el centro europeo de energía marina en Orkney (ver Figura 104). Se espera que esté terminado para el año 2010 [34].



**Figura 104.** Sistema Tidal Generation Limited [34]

### 7.1.3.7. Evapod Ocean Flow Energy

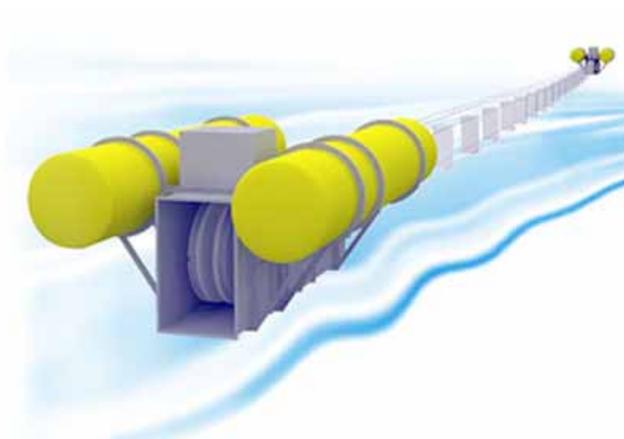
Utiliza un sistema de amarras que permite a un dispositivo flotante obtener energía de las corrientes que fluyen por su parte inferior con la utilización de una turbina de alta eficiencia. Se puede acceder por barco para el mantenimiento y ha sido desarrollado específicamente para hacer frente a la necesidad de contar con un dispositivo que pueden operar en aguas profundas expuestos a altas inclemencias del medio ambiente (ver Figura 105). Se ha implementado un prototipo de escala 1:10 en el norte de Irlanda [39].



**Figura 105.** Sistema Evapod [39]

### 7.1.3.8. Tidal Sails

El sistema asemeja a un conjunto de persianas verticales bajo el agua. Enormes velas arrastradas por la corriente accionan un generador eléctrico ubicado en un flotador. Consta de dos estaciones a los extremos, las que además de contener el generador son las encargadas de desplegar y plegar las velas (ver Figura 106). Se encuentra en etapa de diseño [40].



**Figura 106.** Sistema Tidal Sails [40]

### 7.1.4. Conversores termales

#### 7.1.4.1. Sistema CETO de ciclo cerrado

En 1979 se desarrolló en Hawái un modelo de planta de conversión de energía termal del océano, la cual presentó algunos problemas en la elección de los metales del intercambiador de calor, teniendo como resultado un fuerte impacto económico a la hora de generar energía.

Por otro lado, el Instituto Nacional de Tecnologías Oceánicas de India, en conjunto con la universidad de Saga en Japón, desarrollaron un modelo cuyo fluido de trabajo era amoníaco. Este líquido circulaba por tuberías de polietileno de alta densidad, los cuales fueron instalados en una barcaza en una configuración que permitía formar parte de la estructura del bote. Esta barcaza contaba con una fuente de agua cálida, un enfriador, e intercambiadores de calor para el condensador y el evaporador.

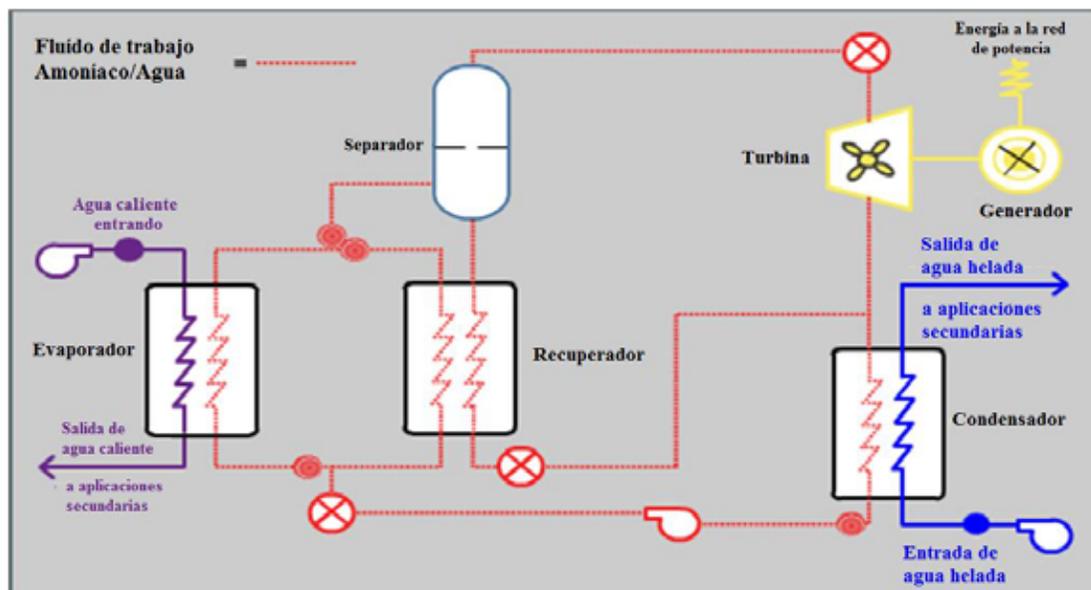
El modelo presentó algunos problemas, donde algunos elementos sufrieron daños que no pudieron ser recuperados y a partir de 1996 la barcaza, llamada Sagar-Shakthi, se encuentra anclada en el puerto de Tuticorin en India (Figura 107).



**Figura 107.** Sagar-Shakthi en el puerto de Tuticorin

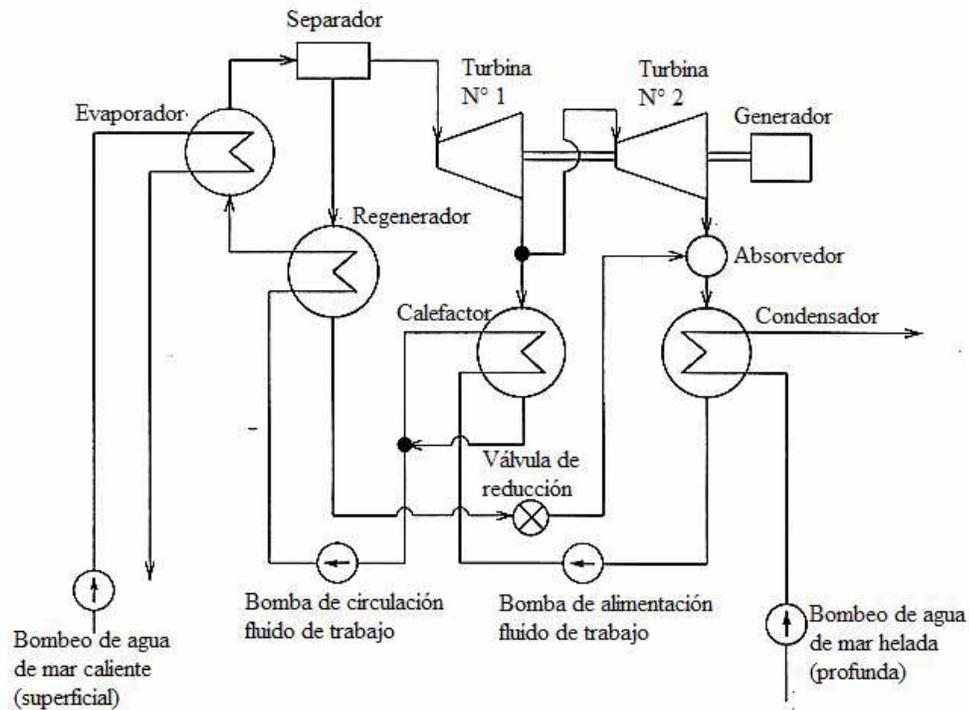
Organismos de investigación han desarrollado variaciones al proceso CETO de ciclo cerrado, entre estos se pueden mencionar el ciclo CETO Kalina (ver Figura 108) y el ciclo CETO Uehara (ver Figura 109).

Kalina es una variación del ciclo tradicional, la cual incorpora una mezcla de amoníaco con agua que reemplaza al amoníaco tradicional o al propileno como fluido de trabajo empleado en los primeros diseños. Este sistema incrementa en alrededor de 80% la eficiencia de los sistemas previos controlando la concentración de la mezcla agua-amoníaco. Esta variación fue producto de la investigación de la empresa Ocean Engineering & Energy Systems (OCEES).



**Figura 108.** Ciclo CETO cerrado Kalina

Por otro lado, el sistema Uehara incorpora un rediseño al ciclo cerrado, incorporando sistemas que permiten mejorar la eficiencia de un 50 a 100% respecto del sistema tradicional. Fue desarrollado por la empresa Xenesis Incorporated en conjunto con la Universidad de Saga en Japon.



**Figura 109.** Ciclo CETO cerrado Uehara

#### 7.1.4.2. Sistema CETO de ciclo abierto

Las primeras investigaciones en esta área las desarrollo el laboratorio nacional de energía de Hawaii en 1983 y obtuvo como resultado la construcción de una planta operativa a 210 kW desde 1992 a 1998. Durante este período, esta planta fue la mayor productora mundial de energía a partir de éste principio de extracción y demostró que como producto secundario se podía obtener agua potable (ver Figura 110). Luego de cumplir el objetivo de estudio, la planta fue desmantelada en 1999.

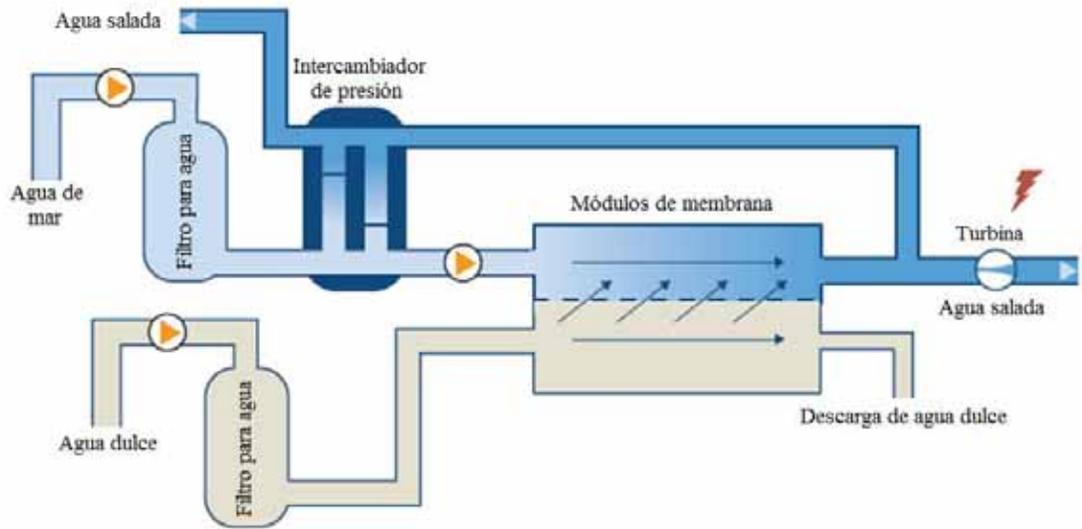


**Figura 110.** CETO de ciclo abierto, Keahole, Hawaii

## **7.1.5. Conversores a través de gradientes de salinidad**

### **7.1.5.1. Statkraft: Osmosis de presión retardada**

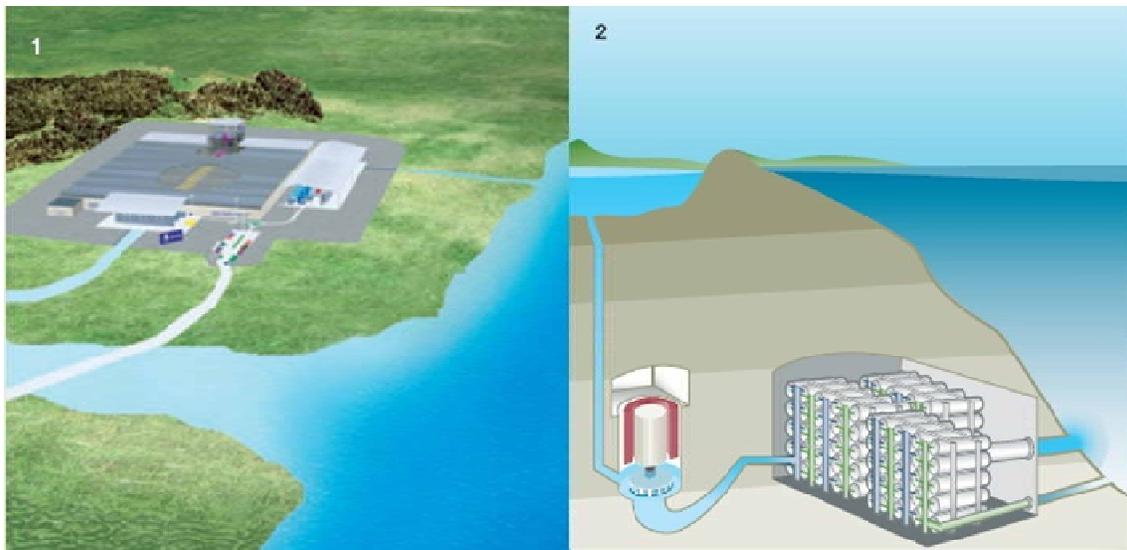
Agua dulce es bombeada y filtrada antes de pasar por las membranas, lugar donde un 80 a 90% del volumen es transferido por osmosis hacia el sector de agua de mar. El proceso de osmosis incrementa el flujo volumétrico de agua a alta presión, con lo cual es posible generar electricidad a través de una turbina. El agua salada a lado de la membrana, se separa en dos flujos, aproximadamente 1/3 del agua va hacia la turbina y los 2/3 restantes retornan al intercambiador de presión para presurizar el agua de mar que está siendo absorbida por el sistema (ver Figura 111).



**Figura 111.** Sistema Statkraft [41]

Este proceso fue inventado en 1973 por Sidney Loeb, y algunos estudios fueron desarrollados durante los años 70 y 80, sin embargo no ha habido un mayor progreso debido a la poca eficiencia de las membranas. Con respecto a esto, Statkraft inició en el año 1997 el proyecto más grande de desarrollo de esta tecnología y se espera, de continuar tal desarrollo, que la energía a partir del principio de osmosis sea un recurso energético renovable competitivo en alrededor de 10 años [41].

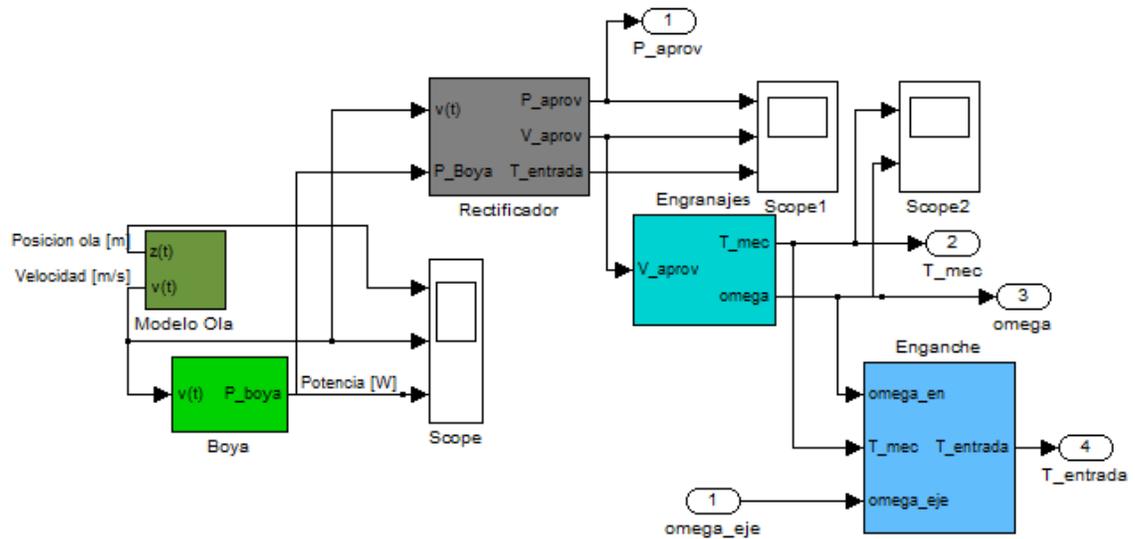
Se han desarrollado prototipos de plantas de energía como los que se muestran en la Figura 112.



**Figura 112.** Modelos de plantas de generación por gradiente de Salinidad [41]

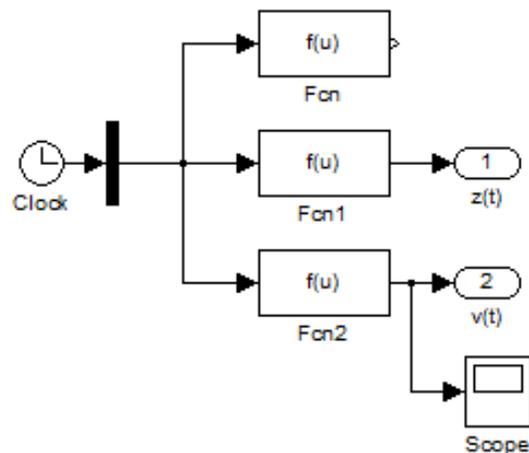
1) Planta a nivel del mar; 2) Planta subterránea.

## 7.2. Bloques del modelo mecánico-eléctrico Matlab-Simulink



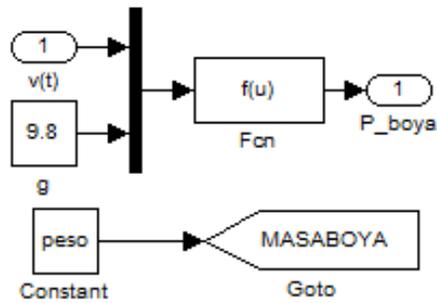
**Figura 113.** Modelo marino/rectificación/amplificación

El modelo implementado en la Figura 113 permite realizar una simulación del comportamiento mecánico del sistema de obtención de energía. Primero se genera la posición y velocidad de un punto ubicado en la superficie de una ola, luego se calcula la potencia de la boya ubicada en tal posición. Posteriormente se simula el sistema mecánico de rectificación y amplificación de velocidad. Se detalla a continuación cada bloque.



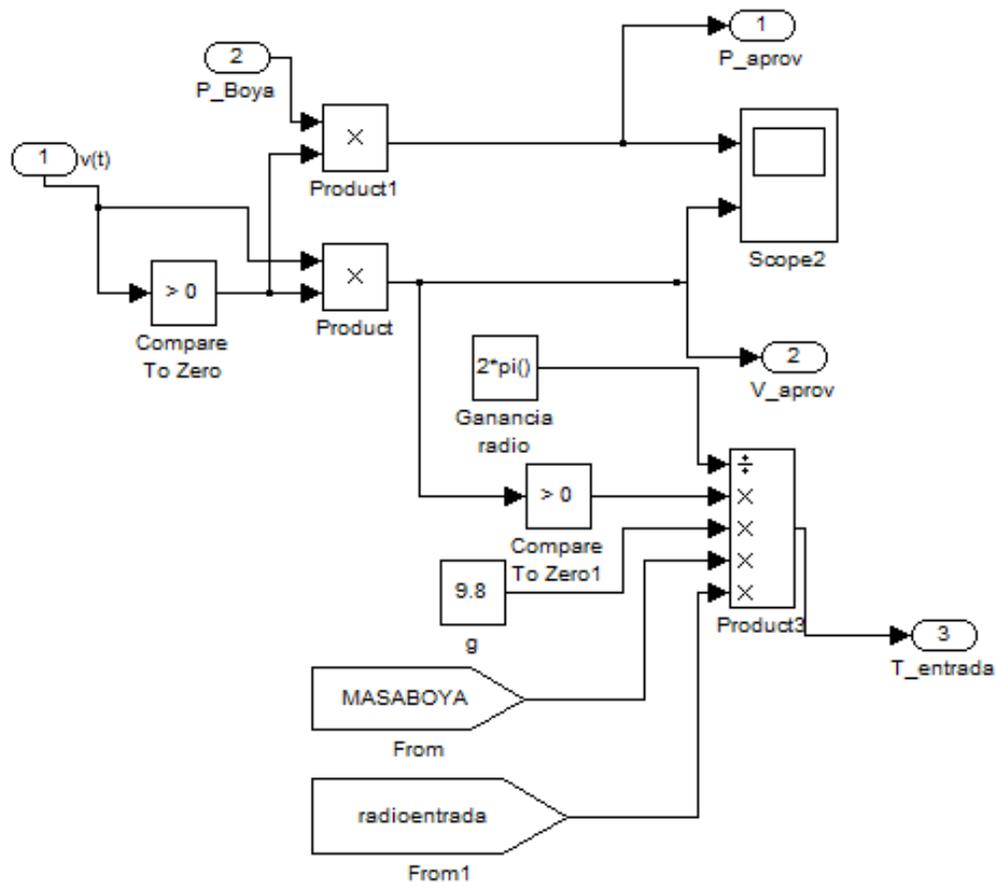
**Figura 114.** Modelo marino

Según las ecuaciones de las ecuaciones vistas anteriormente se genera la velocidad, posición vertical y horizontal de un punto en la superficie marina (ver Figura 114). Son ondas sinusoidales cuyo comportamiento depende del período y amplitud de la ola.



**Figura 115.** Modelo potencia adquirida por la boya

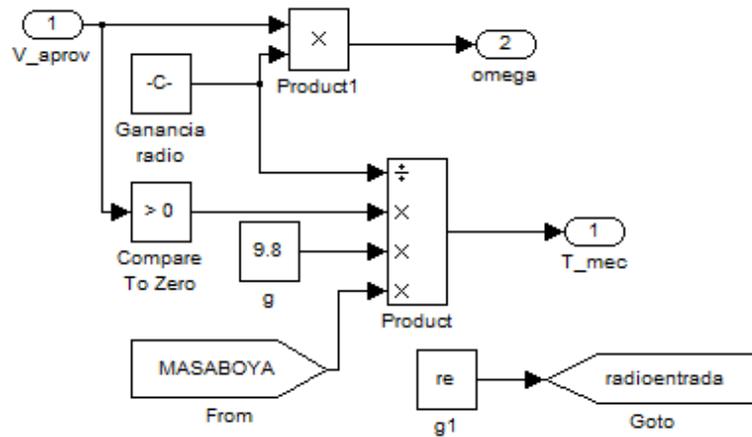
En función de la masa de la boya y la fuerza de gravedad, se calcula la potencia que adquiere al oscilar según el comportamiento de la ola, es decir, según la velocidad de ésta adquiere. Este cálculo se realiza según el modelo mostrado en la Figura 115.



**Figura 116.** Rectificador

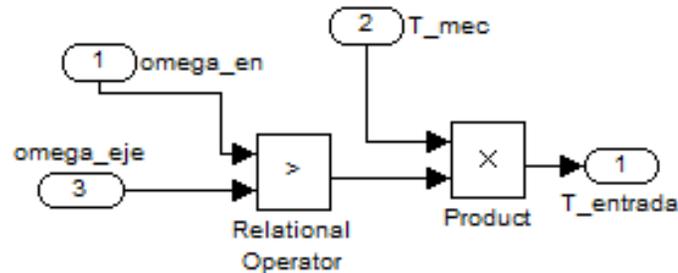
El bloque de la Figura 116 simula parte del comportamiento del rectificador mecánico, tarea que es realizada por los trinquetes. Solo se aprovecha el movimiento producido cuando la ola empuja a la boya, es decir, cuando la ola sube. De esta forma se

considera como útil, la velocidad y potencia de la mitad de un ciclo. Además se calcula el torque a la entrada del sistema.



**Figura 117.** Engranajes (multiplicador de velocidad)

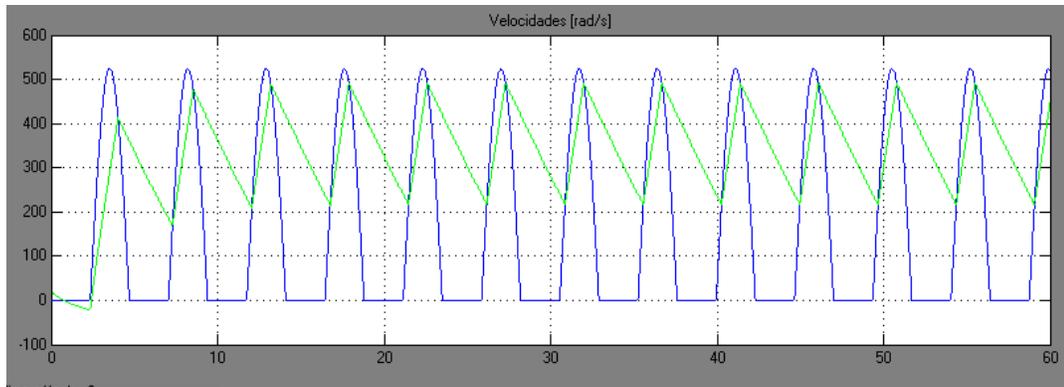
En función de los radios de los elementos de entrada y salida al sistema mecánico, y de la amplificación del multiplicador de velocidad se calcula la velocidad mecánica en el eje de salida y el torque producido sobre él (ver Figura 117).



**Figura 118.** Enganche

Por efecto de los trinquetes, el torque mecánico solo tendrá efecto sobre el eje del alternador cuando la velocidad angular equivalente al movimiento de la boya alcance la velocidad a la cual se está moviendo el eje cuando se produce el enganche. Este comportamiento es modelado según la Figura 118.

Así entonces, el sistema mecánico ejerce torque sobre el eje del alternador solo cuando la velocidad de giro, por efecto de la inercia, es menor a la velocidad aportada por la boya (ver Figura 119).



**Figura 119.** Velocidad aportada por la boya y velocidad del eje alternador



**Figura 120.** Bloque alternador

Finalmente, según la ecuación de equilibrio de momentos sobre el eje del alternador, se simula la velocidad que se adquiere y la potencia que el alternador genera (ver Figura 120).

### 7.3. Características alternador de imanes permanentes

Velocidad [rpm]	Corriente [A] (hoja datos)	Voltaje [V] (hoja datos)	Potencia [W] (estimada)	Corriente [A] (estimada por interpolación)	Potencia [W] (estimada por interpolación)	Torque (estimado)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
200,00	20,00	2,00	40,00	23,46	96,63	2,12
400,00	40,00	4,00	160,00	43,30	246,82	4,24
600,00	60,00	6,00	360,00	59,95	439,41	6,37
800,00	70,00	8,00	560,00	73,83	664,84	7,43
1000,00	85,00	10,00	850,00	85,31	915,05	9,02
1200,00	90,00	12,00	1080,00	94,73	1183,31	9,55
1400,00	98,00	14,00	1372,00	102,39	1464,07	10,40
1600,00	108,00	16,00	1728,00	108,56	1752,89	11,46
1800,00	114,00	18,00	2052,00	113,48	2046,28	12,10
2000,00	117,00	20,00	2340,00	117,37	2341,57	12,41
2200,00	120,00	22,00	2640,00	120,41	2636,85	12,73
2400,00	122,00	24,00	2928,00	122,77	2930,81	12,94
2600,00	123,00	26,00	3198,00	124,60	3222,71	13,05
2800,00	124,00	28,00	3472,00	126,01	3512,23	13,16
3000,00	125,00	30,00	3750,00	127,11	3799,42	13,26
3200,00	125,00	32,00	4000,00	127,99	4084,63	13,26
3400,00	126,00	34,00	4284,00	128,73	4368,39	13,37
3600,00	126,00	36,00	4536,00	129,37	4651,42	13,37
3800,00	127,00	38,00	4826,00	129,97	4934,51	13,48
4000,00	128,00	40,00	5120,00	130,57	5218,49	13,58
4200,00	129,00	42,00	5418,00	131,18	5504,21	13,69
4400,00	129,00	44,00	5676,00	131,83	5792,45	13,69
4600,00	130,00	46,00	5980,00	132,53	6083,92	13,79
4800,00	131,00	48,00	6288,00	133,28	6379,25	13,90
5000,00	133,00	50,00	6650,00	134,09	6678,92	14,11
5200,00	134,00	52,00	6968,00	134,93	6983,29	14,22
5400,00	135,00	54,00	7290,00	135,82	7292,58	14,32
5600,00	136,00	56,00	7616,00	136,74	7606,84	14,43
5800,00	137,00	58,00	7946,00	137,68	7926,01	14,54
6000,00	138,00	60,00	8280,00	138,62	8249,90	14,64
6200,00	138,00	62,00	8556,00	139,57	8578,19	14,64
6400,00	139,00	64,00	8896,00	140,50	8910,49	14,75
6600,00	139,00	66,00	9174,00	141,41	9246,35	14,75
6800,00	140,00	68,00	9520,00	142,29	9585,29	14,85
7000,00	140,00	70,00	9800,00	143,14	9926,89	14,85
7200,00	141,00	72,00	10152,00	143,96	10270,75	14,96
7400,00	142,00	74,00	10508,00	144,75	10616,64	15,07
7600,00	143,00	76,00	10868,00	145,51	10964,51	15,17
7800,00	144,00	78,00	11232,00	146,26	11314,57	15,28
8000,00	145,00	80,00	11600,00	147,00	11667,34	15,38
8200,00	146,00	82,00	11972,00	147,76	12023,79	15,49
8400,00	147,00	84,00	12348,00	148,56	12385,37	15,60
8600,00	148,00	86,00	12728,00	149,43	12754,13	15,70
8800,00	149,00	88,00	13112,00	150,38	13132,81	15,81
9000,00	150,00	90,00	13500,00	151,47	13524,95	15,92
9200,00	151,00	92,00	13892,00	152,72	13935,01	16,02
9400,00	152,00	94,00	14288,00	154,18	14368,48	16,13
9600,00	154,00	96,00	14784,00	155,89	14831,99	16,34
9800,00	156,00	98,00	15288,00	157,89	15333,48	16,55
10000,00	158,00	100,00	15800,00	160,25	15882,30	16,76

Tabla 10. Datos teóricos y aproximados del alternador de imanes permanentes

## 7.4. Características alternador Lundell

<i>Velocidad [rpm]</i>	<i>Corriente [A] (hoja datos)</i>	<i>Corriente [A] (estimado por aproximación)</i>	<i>Potencia [W] (estimada)</i>
1250	0,00	0,00	0,00
1500	5,36	3,97	47,67
1600	6,89	5,32	63,78
1750	8,35	7,10	85,24
2000	10,40	9,57	114,85
2250	12,04	11,52	138,19
2500	13,50	13,05	156,58
2750	14,37	14,26	171,08
3000	15,11	15,21	182,50
3250	15,75	15,96	191,51
3500	16,25	16,55	198,60
3750	16,65	17,02	204,20
4000	16,96	17,38	208,60
4250	17,30	17,67	212,08
4500	17,60	17,90	214,82
4750	17,90	18,08	216,97
5000	18,10	18,22	218,67
5250	18,32	18,33	220,01
5500	18,46	18,42	221,07
5750	18,64	18,49	221,90
6000	18,71	18,55	222,56
6250	18,75	18,59	223,08
6500	18,75	18,62	223,48
6750	18,75	18,65	223,81
7000	18,75	18,67	224,06
7250	18,75	18,69	224,26
7500	18,75	18,70	224,42
7750	18,75	18,71	224,54
8000	18,75	18,72	224,64
8250	18,75	18,73	224,71
8500	18,75	18,73	224,77
8750	18,75	18,74	224,82
9000	18,75	18,74	224,86

**Tabla 11.** Datos teóricos y aproximados para alternador tipo Lundell

La curva característica de este tipo de alternador es aproximada por la siguiente función:

$$I(n) = a \cdot I_0 \left( 1 - e^{-\frac{(n-n_0)}{\gamma}} \right) \quad (63)$$

$$a = 1 \quad n \geq n_0 \quad (64)$$

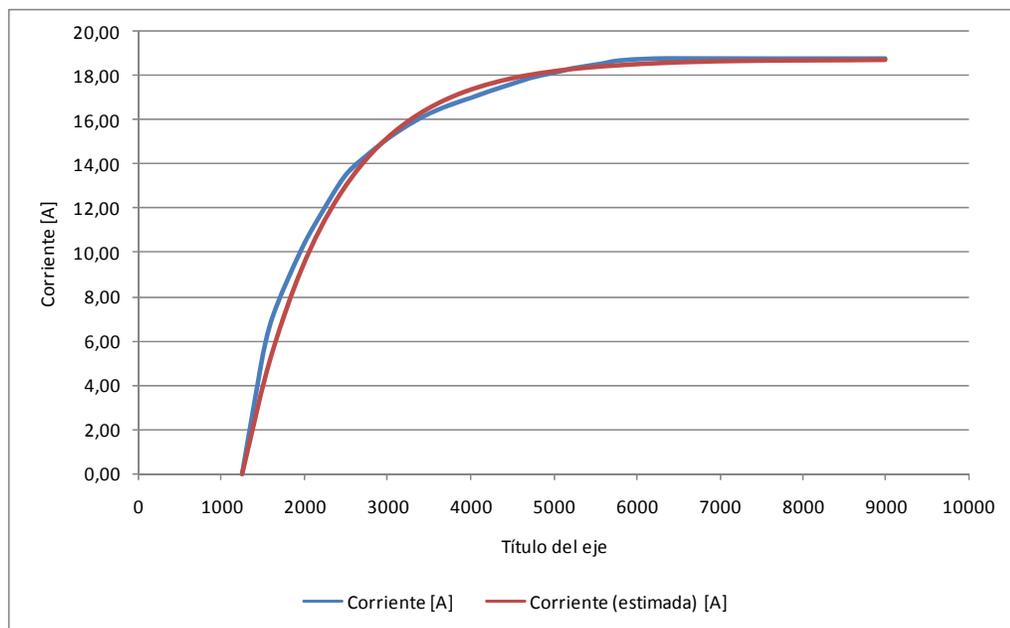
$$a = 0 \quad n < n_0 \quad (65)$$

Con

$I_0$ : Corriente máxima que genera el alternador.

$n_0$ : Velocidad a la cual comienza a generar.

$\gamma$ : Constante de velocidad de la curva.



**Figura 121.** Curva característica alternador tipo Lundell