



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



José Manuel Martínez Fuenzalida

Estudio de diseño del sistema eléctrico de un generador undimotriz

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



Estudio de diseño del sistema eléctrico de un generador undimotriz

José Manuel Martínez Fuenzalida

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Jorge Eduardo Mendoza Baeza
Profesor Guía

Sr. Jorge Luis Medina Hanke
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 05 de diciembre de 2017

*Ese mar que tranquilo nos
baña, nos prometa un futuro esplendor.*



Agradecimientos

Agradecer el apoyo incondicional otorgado por mi familia, la comprensión y cariño de mis padres, que en ningún momento dudaron de mí. Gustavo y Lorena, me dieron los valores necesarios para ser el hombre que soy hoy y me llenaron de oportunidades, algunas tan grandes como la de ser un profesional.

A mis hermanos que siempre fueron y serán un pilar fundamental en mi vida, a pesar de la distancia, siempre hemos sabido mantenernos unidos y compartiendo inmensas alegrías.

A mi novia, quien fue la acompañante en mis últimos años de universidad y testigo de mis esfuerzos a la hora de conseguir objetivos y concretar metas.

A mis compañeros, con los cuales se disfrutó y se sufrió, se vivieron etapas importantes en las vidas universitarias de cada uno, sin duda se crearon muchos recuerdos, pero no pierdo la esperanza de que aún nos queden muchos momentos por compartir a futuro.

A mis profesores y mentores Jorge Mendoza y Jorge Medina, quienes siempre estuvieron dispuestos a aportar a mi desarrollo profesional con paciencia y experiencia.

Valparaíso, 05 de diciembre de 2017

J.M.M.F



Resumen

Dentro de todas las problemáticas que afectan hoy en día a la sociedad, en términos globales se podría decir que son dos los que comparten la mayoría de los países, una de estas es la situación ambiental por la que estamos pasando, y otra es la creciente demanda energética. Hoy se necesita dar una mirada más ecológica y buscar soluciones responsables con el medio ambiente, donde las energías renovables no convencionales (ERNC) son fundamentales dentro de las matrices energéticas de los países. Una de las mayores fuentes de energía existentes en el mundo, son las otorgadas por el mar. Para Chile resulta muy atractivo esto, debido a su extensa costa.

El foco de este trabajo de investigación se centrará en que a través de algoritmo de optimización y en concordancia con los precios existentes en el mercado de los distintos dispositivos, se pueda validar la implementación de un sistema de generación undimotriz, donde en base a las alturas de las olas durante periodos de tiempo, el software sea capaz de entregar la configuración más adecuada para el sitio.

La herramienta utilizada para el ingreso de datos será Microsoft Excel y el procesamiento de los datos se realizará con el software Matlab.

El algoritmo será capaz de darnos la potencia, dimensiones, cantidad de cada uno de los dispositivos, si el traslado debe hacerse con corriente continua o con alterna, los costos que se tendrá para la inversión, datos económicos, la función objetivos, entre otros. Este último parámetro se ha desarrollado para tener tres tipos de optimización, dando lugar a moldearse de acuerdo a los intereses del inversionista.

Otro objetivo interesante que se encuentra presente en el trabajo, es que, a través del procesamiento de datos, se pueden disminuir los tiempo y cantidades de datos que se necesitan recolectar para una localidad.

Palabras claves: ERNC, generación eléctrica, undimotriz, energía, algoritmo, optimización.



Abstract

Within all the problems that affect society today, in global terms it could be said that there are two that most countries share, one of these is the environmental situation that we are going through, and another is the growing energy demand. Today we need to take a more ecological look and seek responsible solutions with the environment, where non-conventional renewable energies (NCRE) are fundamental within the countries' energy matrices. One of the largest sources of energy in the world, are those granted by the sea. For Chile this is very attractive, due to its extensive coastline.

The focus of this research work will be focused on the optimization algorithm and in accordance with the existing prices in the market of the different devices, can be validated the implementation of a wave generation system, where based on the heights of the waves during periods of time, the software is able to deliver the most appropriate configuration for the site.

The tool used for data entry will be Microsoft Excel and the data will be processed using the Matlab software.

The algorithm will be able to give us the power, dimensions, quantity of each of the devices, if the transfer should be made with direct or alternating current, the costs that will be had for the investment, economic data, the objective function, among others. This last parameter has been developed to have three types of optimization, resulting in being shaped according to the interests of the investor.

Another interesting objective that is present in the work is that, through data processing, the time and quantities of data that need to be collected for a locality can be reduced.

Keywords: NCRE, electrical generation, wave energy, algorithm, optimization.

Índice general

Introducción	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
1 Generación eléctrica	4
1.1 Descripción general	4
1.2 Tipos de generación eléctrica	5
1.3 Energías renovables no convencionales (ERNC).....	6
1.3.1 ERNC en Chile.....	6
1.4 Generación distribuida.....	10
1.4.1 Ventajas y desventajas de la generación distribuida	10
1.5 Generación distribuida en Chile	11
1.5.1 Legislación.....	11
1.5.2 Ley 20.018 (Ley corta II)	12
1.5.3 Ley 20.257 (ERNC)	13
1.5.4 Decreto supremo 244 y 101.....	13
2 Energía Undimotriz.....	15
2.1 Descripción General	15
2.2 Las Olas	16
2.2.1 Obtención de energía de las olas.....	17
2.3 Clasificación de las Tecnologías Utilizadas	18
2.3.1 Según su ubicación.....	18
2.3.2 Según su forma de obtención de energía	19
2.3.3 Según su tamaño y orientación	22
2.4 Undimotriz en el Mundo	22
2.4.1 WaveDragon.....	23
2.4.2 AquaBuOY	24
2.4.3 Pelamis	26
2.4.4 SDE.....	27
2.5 Undimotriz en Chile	28
2.5.1 Cifuncho II.....	29

2.5.2 MADIUN	29
2.5.3 Wilefko	31
2.6 Potencial Geográfico de Chile	32
3 Diseño eléctrico	34
3.1 Máquinas eléctricas	34
3.1.1 Generadores de corriente continua	34
3.1.2 Generador síncrono.....	35
3.1.3 Generador asíncrono.....	36
3.2 Convertidores de potencia	38
3.2.1 Rectificadores.....	39
3.2.2 Choppers	39
3.2.3 Inversores	39
3.2.4 Graduadores.....	39
3.3 Alternativas para el diseño	40
3.3.1 Generación en corriente continua	40
3.3.2 Generación en corriente alterna.....	40
3.4 Sistema recomendado para la aplicación	43
4 Optimización del diseño	44
4.1 Necesidad de optimizar	45
4.2 Algoritmo genético (AG)	46
4.2.1 Metodología	46
4.2.2 Inicialización.....	47
4.2.3 Selección.....	47
4.2.4 Operadores genéticos.....	48
4.2.5 Terminación.....	48
5 Desarrollo de algoritmo para optimización	49
5.1 Presentación de Algoritmo de Optimización (A.O.)	49
5.2 Descripción de A.O.....	49
5.2.1 Índice de optimización	49
5.2.2 Escenarios para la distribución de componentes.....	50
5.3 Componentes A.O.	52
5.3.1 Variables de entrada	52
5.3.2 Función objetivo	53
5.3.3 Variables de salida	53
5.3.4 Codificación	53
6 Aplicación en la V región	54
6.1 Metodología y Consideraciones.....	55
6.1.1 Metodología	55
6.1.2 Consideraciones	55
6.2 Valparaíso	56

6.2.1 Ubicación	56
6.2.2 Información de las olas	56
6.2.3 Aplicando algoritmo	58
6.3 San Antonio	61
6.3.1 Ubicación	61
6.3.2 Información de las olas	61
6.3.3 Aplicando algoritmo	63
6.4 Comparativa	66
6.4.1 Análisis por índice de optimización	66
6.4.2 Análisis por periodos de tiempo	67
Discusión y conclusiones	68
Bibliografía.....	70
A Reportes optimización Valparaíso.....	74
A.1 Por criterio de relación USD/kWh.....	74
A.2 Por criterio de VAN	79
A.3 Por criterio de Payback.....	83
B Reportes optimización San Antonio.....	88
B.1 Por criterio de relacion USD/kWh.....	88
B.2 Por criterio de VAN	92
B.3 Por criterio de Payback.....	97
C Generadores	100
C.1 Generador Axial 3 KW – 100 RPM.....	100
C.2 Generador Axial 5 KW – 100 RPM.....	105

Introducción

Un sistema eléctrico de potencia (SEP) es un conjunto de elementos que tiene como fin generar, transformar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica de tal forma que se logre la mayor calidad al menor costo posible. Este consta de plantas generadoras que producen la energía eléctrica, una red de transmisión y de distribución para transportar esa energía de las plantas a los puntos de consumo [1].

Las centrales de generación son instalaciones capaces de obtener la energía eléctrica, a partir de diferentes tipos de fuentes de energía primaria. Tradicionalmente, este tipo de centrales generan la electricidad a partir de energías no renovables, como el carbón o el gas natural. Con el avance de las tecnologías y la aparición de una mayor preocupación por el desarrollo sostenible, surgieron otro tipo de centrales de generación basadas en energías renovables [2].

La generación de energía eléctrica en centrales eléctricas centralizadas tiene muchas ventajas tales como bajo costo de producción, alta eficiencia y de fácil control de operación. Por otra parte, la generación convencional tiene algunas desventajas, el alto costo de las infraestructuras, la contaminación del aire, el agotamiento de los combustibles fósiles, etc. Estas son las razones que impulsan a utilizar energías renovables en los planes de generación distribuida. El aumento de los problemas relacionados con el medio ambiente mundial provoca una mayor preocupación y un aumento en el esfuerzo para encontrar una sustitución de los combustibles fósiles y la generación convencional. La mejor solución para este problema parece ser el uso de la generación descentralizada y la sustitución de unidades de producción de los combustibles fósiles por fuentes renovables, las también conocidas como energías renovables no convencionales (ERN) [3].

En Chile, durante muchos años se ha utilizado el método de generación de grandes cantidades de energía de manera centralizada, la que generalmente se encuentra ubicada en zonas alejadas del consumo, por lo que para abastecer estas cargas se hace uso de largas líneas de transmisión. En la actualidad, se ha complementado este método de generación con un proceso denominado "Generación Distribuida", la que fue promulgada como norma durante septiembre del año 2005 en el DS N° 244, modificada posteriormente en julio de 2016 publicándose en la norma técnica de conexión y operación de PMGD en instalaciones de media tensión [4]. La reforma establece la obligación de las empresas distribuidoras a permitir la conexión de pequeñas centrales a sus redes de distribución. Se elimina de esta forma una posible barrera de acceso para la comercialización

de la energía en el mercado spot o a clientes libres, debido a que las pequeñas centrales mayoritariamente se conectan al nivel de distribución. Esta nueva legislación además establece posibles exenciones en el pago de peajes troncales, con la excepción total o parcial para generación no convencional. Además, se establecen condiciones para dar mayor estabilidad y seguridad en la remuneración de la energía de las pequeñas centrales de generación, en particular para aquellas cuyo aporte de excedente de potencia al sistema eléctrico no supere los 9 [MW], y en menor medida para generadores de tamaño menor a 20 [MW] [5].

Dentro del marco de este último tema es que toma lugar la generación eléctrica que utiliza como fuente de energía las olas del mar, es decir, la generación undimotriz.

A modo de reseña histórica en [6] y [7] se ilustra que los primeros testimonios sobre la utilización de la energía de las olas se encuentran en China, en donde en el siglo XIII empiezan a operar molinos por acción del oleaje. Ya en el siglo XX, el francés Bouchaux-Pacei suministra electricidad a su casa en Royan, mediante un sistema neumático, parecido a las actuales columnas oscilantes.

Una mirada muy certera es la que hace [8], donde plantea que 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 esa 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.

Para comprender de buena manera esta inmensa fuente de energía, se debe conocer cómo se originan las olas. Estas se forman, principalmente, a partir de la fuerza de arrastre que ejercen los vientos sobre las capas superficiales de agua en el mar. La intensidad del oleaje, depende de la intensidad del viento, de su duración y de la longitud sobre la cual éste transmite energía a la ola. Las ondas marinas poseen la capacidad de almacenar su energía y trasladarse grandes distancias sin perder prácticamente su potencia; de tal forma que es posible la aparición de ondas en lugares donde no hay viento, esta es una interesante diferencia con la energía eólica donde necesariamente se necesita la presencia del viento. [6]- [7]

Los dispositivos existentes para la extracción de energía undimotriz, son muy variados, y se clasifican de distintas maneras, una de estas es según su posición respecto de la costa. Para esta modalidad existen tres grupos: onshore (cerca de la costa), nearshore (a distancia media de la costa) y offshore (lejos de la costa) [9]- [10].

Basado en la importancia de encontrar soluciones a la creciente demanda energética, se deben buscar soluciones a través de las ENRC, y a su vez estas deben presentarse al menor costo posible, así es como nace la inquietud de realizar los estudios necesarios para hallar un diseño eléctrico adecuado para un generador undimotriz, para esto se llevara a cabo la tarea de optimizar un

modelo que pueda ser empleado en la selección del equipamiento eléctrico que acompañará a un generador undimotriz con la ayuda de herramientas de técnicas heurísticas, de esta manera se podrán maximizar las ganancias producidas por la venta de la energía generada en relación al costo totales de la o las unidades generadoras, otorgándole un mayor beneficio a la implementación de este tipo de energías.

El no tener cuidado al seleccionar los componentes, podría traer consecuencias, ya que la mala elección del equipamiento eléctrico de dicho generador undimotriz, no solo podría traer problemas de estar produciendo energía fuera de su punto más eficiente, debido a que las potenciales ganancias se ven perjudicadas, si no que también esto puede traer problemas del tipo de necesitar constantes reparaciones y/o mantenciones al no encontrarse diseñado para el tipo y tamaño de olas de su ubicación geográfica.

La problemática que se desea enfrentar, involucra generadores undimotriz que se desean instalar en la región de Valparaíso, Chile, sitio donde se espera obtener muy buenos resultados desde la perspectiva de crear un punto de inyección de energía eléctrica a la red, de manera innovadora y amigable con el medio ambiente, junto con potenciar el desarrollo de nuevas tecnologías que vayan en aras de una mejor sociedad.

El camino a través del cual se pretende dar solución a dicha problemática, es el desarrollo de un modelo que, con la información de las olas de esa zona, pueda determinar la totalidad del equipamiento eléctrico a utilizar en una unidad generadora undimotriz, esto va de la mano con una estimación de los costos asociados a la implementación de dicha unidad generadora.

Objetivo general

- Realizar los estudios de diseño del sistema eléctrico de un generador undimotriz que permita el correcto funcionamiento para la obtención de energía de la forma más óptima dentro de las condiciones particulares de la quinta región.

Objetivos específicos

- Estudiar los diversos componentes de la generación undimotriz.
- Estudiar los componentes eléctricos que permiten la extracción de energía desde sistema de generación.
- Generar un modelo de optimización del sistema para un rango de condiciones de operación.
- Realizar las especificaciones técnicas de los diversos componentes.
- Realizar la evaluación económica del sistema.

1 Generación eléctrica

1.1 Descripción general

La generación de energía eléctrica consiste en transformar alguna clase de energía (química, cinética, térmica, lumínica, nuclear, solar entre otras), en energía eléctrica. Para la generación industrial se recurre a instalaciones denominadas centrales eléctricas, que ejecutan alguna de las transformaciones citadas. Estas constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico.

Desde que se descubrió la corriente alterna y la forma de producirla, se ha llevado a cabo un inmenso desarrollo tecnológico para llevar la energía eléctrica a todos los lugares habitados del mundo, por lo que, junto a la construcción de grandes y variadas centrales eléctricas, se han sumado extensos sistemas de transmisión y sistemas de distribución.

La demanda de energía eléctrica de una ciudad, región o país tiene una variación a lo largo del día. Esta variación es función de muchos factores, entre los que destacan: tipos de industrias existentes en la zona y turnos que realizan en su producción, tipo de electrodomésticos que se utilizan más frecuentemente, tipo de calentador de agua que haya instalado en los hogares, la estación del año y la hora del día en que se considera la demanda. La generación de energía eléctrica debe seguir la curva de demanda y, a medida que aumenta la potencia demandada, se debe incrementar la potencia suministrada.



Figura 1-1: Etapas de la generación eléctrica.

1.2 Tipos de generación eléctrica

Cuando se habla de tipos de generación eléctrica y los tipos de centrales eléctricas, no existe una única forma de catalogar los tipos existentes, son muchas las clasificaciones que se pueden atribuir a estas, es decir, se puede hacer por el tipo de combustible, si estas son o no convencionales, si son renovables, si se interconectan a algún sistema eléctrico o se encuentran aisladas, entre otros.

El autor de [11] decide que una buena forma de clasificar las centrales eléctricas es haciéndolo en función de la fuente de energía primaria que utilizan para producir la energía mecánica necesaria para generar electricidad (es la más utilizada y que mejor esclarece las diferencias para distinguir a cada una de ellas):

- **Centrales hidroeléctricas:** se produce a causa del agua de una corriente natural o artificial, por el efecto de un desnivel, actúa sobre las palas de una turbina hidráulica.
- **Centrales térmicas convencionales:** el combustible fósil (carbón, fueloil o gas) es quemado en una caldera para generar energía calorífica que se aprovecha para generar vapor de agua. Este vapor (a alta presión) acciona las palas de una turbina de vapor, transformando la energía calorífica en energía mecánica.
- **Centrales térmicas de ciclo combinado:** combina dos ciclos termodinámicos. En el primero se produce la combustión de gas natural en una turbina de gas, y en el segundo, se aprovecha el calor residual de los gases para generar vapor y expandirlo en una turbina de vapor.
- **Centrales nucleares:** la fisión de los átomos de uranio libera una gran cantidad de energía que se utiliza para obtener vapor de agua que, a su vez, se utiliza en un grupo turbina-alternador para producir electricidad.
- **Centrales eólicas:** la energía cinética del viento se transforma directamente en energía mecánica rotatoria mediante un aerogenerador.
- **Centrales fotovoltaicas:** el efecto fotovoltaico consiste en la conversión de la energía luminosa en energía eléctrica. La energía de radiación (fotones) que incide sobre una estructura heterogénea de material (celda fotovoltaica) es absorbida por electrones de las capas más externas de los átomos que forman este material, eso crea una corriente eléctrica interior de una tensión determinada
- **Centrales de biomasa o de residuos sólidos urbanos (RSU):** utilizan el mismo esquema de generación eléctrica que una central térmica convencional. La única diferencia es el combustible utilizado en la caldera, que proviene de nuestros residuos.

La mayor parte de la energía eléctrica generada a nivel mundial proviene de las de tipo térmicas. Todas estas centrales, excepto las fotovoltaicas, tienen en común el elemento generador, constituido por un alternador, movido mediante una turbina que será distinta dependiendo del tipo de energía primaria utilizada.

1.3 Energías renovables no convencionales (ERNC)

Las energías renovables se caracterizan porque, en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil, no se consumen ni se agotan en una escala humana de tiempo. Entre estas fuentes están: la hidráulica, la solar (térmica y fotovoltaica), la eólica y la de los océanos (mareomotriz, undimotriz, entre otras). Además, dependiendo de su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables aquellas provenientes de la biomasa y de fuentes geotérmicas.

Su lento desarrollo se debe principalmente a la estacionalidad de su utilización y al alto grado de estudios requeridos, tanto para implementarlas como para almacenarlas, lo que se traduce en la práctica, que satisfagan un porcentaje bajo (alrededor del 10%) de los requerimientos energéticos mundiales.

Dependiendo de su forma de aprovechamiento, las ERNC pueden generar impactos ambientales significativamente inferiores que las fuentes convencionales de energía. Además, las ERNC pueden contribuir a los objetivos de seguridad de suministro y sostenibilidad ambiental de las políticas energéticas.

1.3.1 ERNC en Chile

En lo que ha a Chile respecta, el autor en [12] afirma que a comienzos de 2005 y como resultado de un proceso que comenzó en agosto de 2003, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), presentaron un informe sobre los resultados de la evaluación del desempeño ambiental de Chile. Parte de las recomendaciones de este informe estuvieron directamente vinculadas con el uso eficiente de la energía y el desarrollo de las energías renovables.

La demanda de electricidad de Chile crece anualmente dos puntos porcentuales por sobre el producto interno bruto (PIB); es decir, en torno al 7% (se calcula entre un 6 y 7,5% en el periodo comprendido entre 2005 y 2006, y a largo plazo entre un 5 y 6%). Ello obliga a materializar proyectos en generación que aseguren el abastecimiento de energía, y a la vez que las fuentes primarias sean diversas.

En los últimos años han mejorado significativamente las condiciones para el desarrollo de las ERNC en Chile, lo que se está traduciendo en un creciente interés de inversionistas nacionales e internacionales en el desarrollo de estos proyectos en el país, así como en la puesta en marcha de proyectos en el SIC que usan energía eólica y biogás, y de nuevas pequeñas centrales hidroeléctricas y de biomasa [13].

Históricamente la matriz energética de Chile ha contado con una participación importante de energías renovables, representada principalmente por la energía hidráulica convencional, utilizada para generación eléctrica. Esta participación ha disminuido en los últimos años, pero no de manera significativa.

El mes de junio de 2017 finalizó con 28 proyectos de energía renovable no convencional declarados en construcción, los cuales alcanzan los 999 [MW], según la resolución N° 262/2017 de la Comisión Nacional de Energía (CNE). En ella se especifica que la entrada a operación de los proyectos se prevé entre junio 2017 y octubre 2018 [14].

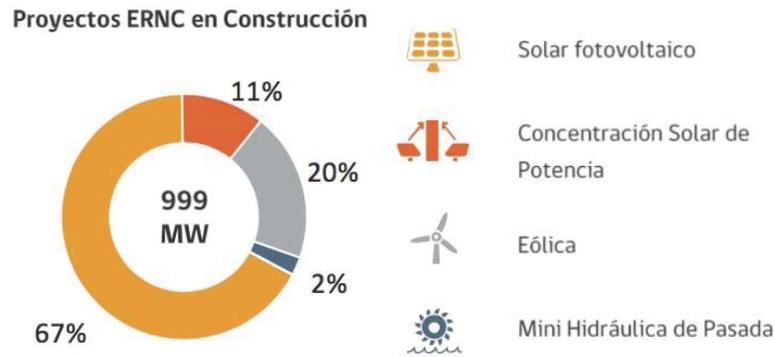


Figura 1-2: Proyectos ERNC en construcción, según tecnología [14].

A continuación, se presenta un cuadro de resumen, donde se especifican los [MW] que se encuentran en operación, construcción, con su resolución de comisión ambiental aprobada y los que están en clasificación. Para cada una de las ERNC que actualmente se desarrollan en Chile.

Tabla 1-1 Tabla resumen de estado de proyectos ERNC en Chile [14].

Tecnología	Operación ⁽¹⁾ [MW]	Construcción [MW]	RCA Aprobada ⁽²⁾ [MW]	En Calificación [MW]
Biomasa ⁽³⁾	459	0	469	79
Eólica	1.230	196	8.964	2.020
Geotermia	24	0	120	50
Mini Hidro ⁽⁴⁾	446	24	805	108
Solar – PV	1.536	669	14.871	6.134
Solar – CSP	0	110	1.898	750
Total	3.695	999	27.127	9.141

RCA= Resolución de Calificación Ambiental.

(1) Considera solo proyectos entregados a explotación comercial.

(2) Considera todos los proyectos aprobados a la fecha.

(3) Considera los proyectos de biogás.

(4) Representa las centrales hidroeléctricas de pasada con capacidad instalada inferior a 20 [MW].

La capacidad instalada en base a tecnologías ERNC, a junio 2017 asciende a 3.695 [MW], con un 86,1% interconectado al Sistema Interconectado Central (SIC), un 13,0% conectado al Sistema Interconectado Norte Grande (SING), un 0,7% en el Sistema Eléctrico de Aysén (SAE) y un 0,1% en el Sistema Eléctrico Magallanes (SEM).

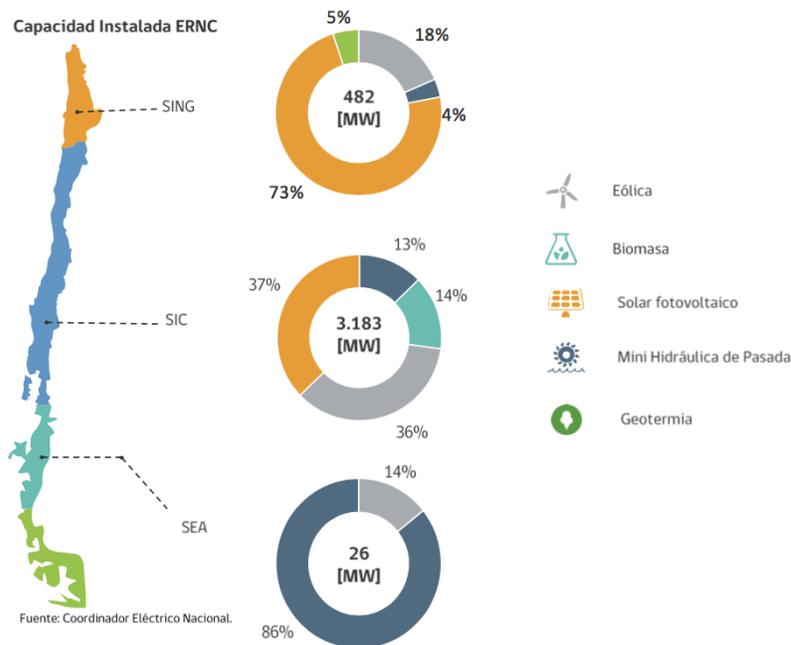


Figura 1-3: Capacidad instalada de ERNC, según tecnología [14].

En lo que respecta al panorama nacional, incluyendo las fuentes convencionales de energías, la capacidad instalada de ERNC corresponden a un 16% de la capacidad eléctrica total en los sistemas eléctricos nacionales.

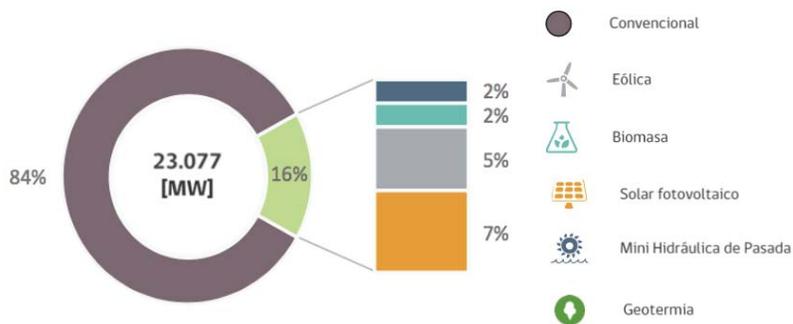


Figura 1-4: Capacidad instalada de ERNC y fuentes convencionales en la matriz nacional [14].

La capacidad instalada de generación eléctrica de la matriz nacional al mes de junio de 2017, asciende a 23.077 [MW]. Considerando al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) con 5.564 [MW] (24,1%), al Sistema Interconectado Central (SIC) con 17.346 [MW] (75,1%), al Sistema Eléctrico de Aysén (SEA) 63 [MW] (0,3%) y al Sistema Eléctrico de Magallanes (SEM) con 104 [MW] (0,5%) [15].

Si se analiza el párrafo anterior con un mayor detalle de las tecnologías que componen la capacidad instalada a nivel nacional en sus cuatro sistemas eléctricos, y se traspasa a gráficos, se obtendrá la Figura 1-5.

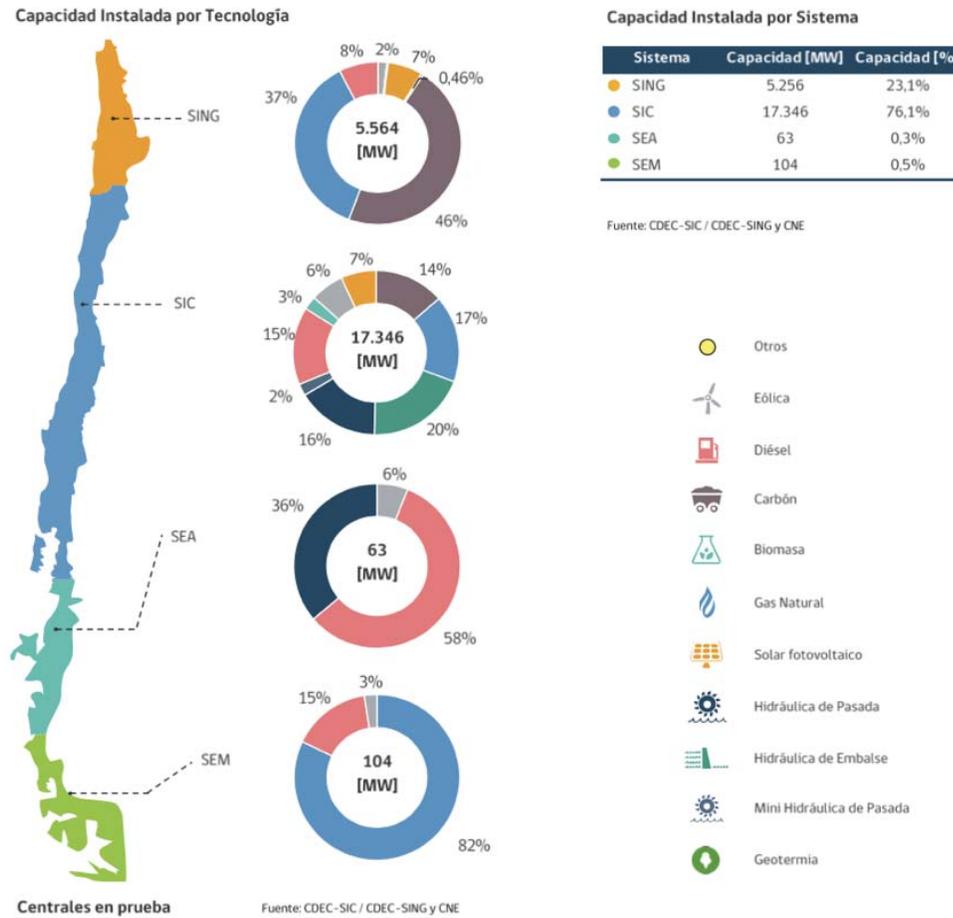


Figura 1-5: Capacidad instalada en cada sistema eléctrico [15].

Si bien el porcentaje correspondiente a las ERNC no es el que se esperaría ver, se debe mantener una actitud optimista, ya que estas cifras van en constante crecimiento y se alinean de buena manera con la agenda de energía que presentó el ministerio de energía el año 2014, en donde se establecía, “Levantar las barreras existentes para las ERNC del país, comprometiendo que un 45% de la capacidad de generación eléctrica que se instalará en el país entre los años 2014 a 2025 provenga de este tipo de fuentes, cumpliendo de esta manera la meta de un 20% de inyección de ERNC en nuestro sistema eléctrico para el año 2025, conforme a la ley vigente.” [16].

1.4 Generación distribuida

En [17] se hace un análisis que busca dar con la definición más cercana a la realidad sobre el término, dilucidando que a los sistemas de generación distribuida (GD) se los conoce también como sistemas de generación descentralizada; ya que se desarrollan en base a centros de generación eléctrica dispersos y aislados, en contraparte con los sistemas de generación centralizados. El concepto fue reintroducido como tal, en la década de 1970, aunque el término de “generación distribuida” no fue acuñado hasta la década de 1990.

A nivel mundial, no existe todavía un consenso acerca de lo que es exactamente la Generación Distribuida; puesto que los factores relacionados con estos sistemas no están muy bien definidos. Dichos factores dependen principalmente de las tecnologías empleadas, la conexión a la red, entre otros. Asimismo, existe cierta disparidad de criterios a la hora de establecer el límite máximo de potencia en los distintos países.

La GD es un sistema que involucra todo tipo de recursos y tecnologías de generación eléctrica, normalmente de pequeña o mediana capacidad, situados cerca de los centros de consumo o junto a los consumidores, con la posibilidad de interactuar (comprar o vender energía) con las redes eléctricas existentes”.

En el año 2012 en nuestro país, se aprobó la ley 20.571, que regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales, con el fin de establecer un sistema de incentivo a los pequeños medios de generación distribuida a base de energías renovables no convencionales en un sistema conocido como balance neto (Net Metering), en este concepto, el usuario de la red no sólo puede autoabastecerse de energía, sino que también aprovechar cualquier excedente en la generación en otro momento.

1.4.1 Ventajas y desventajas de la generación distribuida

Ventajas

Dentro de los aportes que posee la GD, en [17] destacan que algunos de estos beneficios identificados en los sistemas de generación distribuida radican en los siguientes aspectos.

- Cuando los sistemas de transporte se congestionan, la implementación de plantas de GD podrían remediar dicho problema, aplazando además la necesidad de recaudar los activos de transmisión.
- Las unidades de Generación Distribuida pueden ser usadas como sistemas de apoyo para suministrar energía durante los periodos de mayor demanda; a la vez que lograrían mejorar la fiabilidad del sistema.
- La conexión de generadores distribuidos a las redes conduce generalmente a un incremento en la tensión. En áreas donde el control de tensión se dificulta, la instalación de un generador distribuido puede mejorar la calidad de servicio.
- La producción en sitio evita los costos de transmisión y distribución, que de otro modo equivaldría cierta cantidad adicional del costo del suministro de electricidad.

- Los generadores distribuidos aprovechan fuentes energéticas renovables o residuos de combustible, reduciendo de manera significativa el impacto ambiental.

Desventajas

Así mismo en contraparte, también existen desventajas en la implementación de estos sistemas, las cuales son principalmente [17].

- La presencia de unidades descentralizadas, puede producir también un incremento considerable de las pérdidas en un sistema, debido principalmente a la potencia suministrada a la red por generadores distribuidos localizados en sitios remotos.
- Un sistema operando en condiciones normales, los flujos de electricidad producidos por generadores distribuidos pueden a su vez causar dificultades en el sistema. Existen aspectos relacionados con fluctuaciones de voltaje con el correspondiente impacto en los consumidores vecinos.
- Un sistema de adquisición de datos mucho más complejo sería requerido, para el adecuado funcionamiento de las unidades de generación distribuida en la red eléctrica existente.
- Las unidades de generación distribuida tienen alto costo de inversión en comparación a las grandes plantas centralizadas. Para ciertas tecnologías como los sistemas fotovoltaicos, los costos de operación son muy bajos pero los altos costos de capital los hacen incompetentes.
- Algunos sistemas cuentan con promulgaciones que son demasiado exigentes para pequeñas unidades de generación distribuida. En otros casos, la carencia de estándares para la conexión de pequeños generadores distribuidos impide su desarrollo.

1.5 Generación distribuida en Chile

Debido al fuerte impacto que produce la inserción de generación distribuida a las redes de distribución eléctrica chilenas, nacen nuevas normativas y reglamentos que permiten una adecuada compatibilidad entre los diversos elementos involucrados en las redes eléctricas.

1.5.1 Legislación

El sector eléctrico se encuentra regulado por la ley general de servicios eléctricos (LGSE) contenida en el DFL N°1 de 1982, cuyo texto refundido y coordinado fue fijado por el DFL N°4 del 2006 del ministerio de economía la cual ha sufrido una serie de modificaciones en búsqueda de solucionar las falencias iniciales.

También es importante mencionar el decreto supremo 327 que fija el reglamento de LGSE en el año 1998 y la norma técnica de seguridad y calidad de servicio (NTSyCS) del año 2009, que establece exigencias mínimas para el diseño de instalaciones y estándares de seguridad y calidad de servicio.

El estado como regulador ha operado tradicionalmente bajo el principio de neutralidad, esto quiere decir que no se privilegia a una fuente de generación por sobre otra. No obstante, en el

último tiempo se ha intentado dar ciertas garantías e incentivos a las generadoras de pequeña escala (hasta 20 [MW]), lo que constituye una oportunidad para las fuentes no tradicionales.

En base a lo anterior es que nace la siguiente normativa.

Ley 19.940 (ley corta I)

La ley corta I, publicada el 13 de marzo del año 2004, realizó modificaciones a dos artículos de la LGSE regulando el mercado de transmisión, clarificando sus tarifas y ayudando a pequeñas generadoras. Donde se establece lo siguiente [18]:

- Se asegura el derecho a la venta de energía y potencia en el mercado mayorista (spot) a cualquier generador independiente de su tamaño.
- Se establecen condiciones no discriminatorias para los pequeños generadores (menores a 9 [MW]) que participen en ese mercado, permitiéndoseles un tratamiento comercial simplificado (estabilización de precios).
- Se da certeza jurídica de acceso a las redes de distribución para evacuar la energía generada para generadores menores a 9[MW].
- Se libera total o parcialmente del pago de peajes de transmisión troncal para las fuentes no convencionales menores a 20[MW].

1.5.2 Ley 20.018 (Ley corta II)

Otra modificación a la normativa eléctrica es la Ley Corta II (Ley 20.018) que entró en vigencia en mayo del 2005. El principal objetivo de esta ley es enfrentar de mejor manera el efecto de los cortes de gas argentinos, estableciendo mecanismos que permitan asegurar la continuidad del suministro. Los aspectos centrales de la ley son [18]:

- Introducción de un nuevo mecanismo de licitación de contratos de suministro por parte de las distribuidoras, para consumos de clientes regulados a partir de 2009, con condiciones de largo plazo y precio fijo. Para la primera licitación, el precio tendrá un límite máximo de 20% sobre el precio de nudo vigente. Si dicha licitación no es exitosa, el precio máximo puede ampliarse hasta 35%.
- Cambio en el mecanismo de ajuste del precio medio teórico estimado en el proceso de fijación de precios de nudo, ampliando la banda con que se ajusta el precio medio teórico* respecto del precio medio de mercado. Esta banda se amplió desde $\pm 5\%$ a un rango variable, con un máximo de $\pm 30\%$, esperando que con esto el sistema de precios tenga mayor flexibilidad y pueda reflejar los cambios en el mercado.
- Se elimina la falta de abastecimiento de gas natural importado como fuerza mayor y se imponen derechos de compensación.
- Se establece un período de transición, hasta el término del año 2008, durante el cual se compensará a las empresas generadoras que deben abastecer de energía a distribuidoras sin contratos de suministro. Los generadores recibirán pagos valorados a costo marginal, mientras que las distribuidoras seguirán pagando a precio de nudo, traspasando a sus

clientes la diferencia entre ambos valores en contra o a favor de los clientes finales, dependiendo si el costo marginal está por sobre o bajo el precio de nudo.

- Permite a los generadores tomar medidas para reducir consumos de sus clientes de manera directa o a través de los distribuidores.

1.5.3 Ley 20.257 (ERNC)

El compromiso del país con la sustentabilidad de su matriz energética y las Energías Renovables no Convencionales (ERNC) llevo a promulgar la ley 20.257 durante abril del 2008, que obliga a las empresas que comercializan energía eléctrica con distribuidoras u otros clientes a realizar una oferta mínima.

Esta normativa tuvo su primera modificación el año 2010 con la ley 20/20, que fija una meta para el 2014 del 5% aumentando un 0.5% cada año hasta llegar el 2024 al 10%.

Finalmente, durante el 2013 se aprobó el proyecto de ley 20/25, que eleva la meta de inserción de la ERNC a un 20% para el año 2025.

De esta forma se comienza a estimular la integración de las ERNC, todo para cubrir la necesidad de instalar 750 [MW]/año promedio y así atender los incrementos de demanda de los próximos años.

1.5.4 Decreto supremo 244 y 101

El D.S. 244, promulgado en septiembre del 2005, sufrió unas modificaciones a través del Decreto 101 promulgado en agosto del 2014 y que entro en vigencia en septiembre del 2015. Este decreto aprueba el reglamento para medios de generación no convencionales y pequeños medios de generación establecidos en la LGSE. Se aplica a las empresas que posean medios de generación conectados y sincronizados a un sistema eléctrico cuya capacidad instalada de generación sea superior a 200 [MW] y que se encuentren en alguna de las siguientes categorías [19]:

- **Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD):** Medios de generación cuyos excedentes de potencia sean menores o iguales a 9 [MW], conectados a instalaciones de una empresa concesionaria de distribución, o a instalaciones de una empresa que posea líneas de distribución de energía eléctrica que utilicen bienes nacionales de uso público.
- **Pequeños Medios de Generación (PMG):** Medios de generación cuyos excedentes de potencia suministrables al sistema sean menores o iguales a 9 [MW] conectados a instalaciones pertenecientes a un sistema troncal, de subtransmisión o adicional.
- **Medios de Generación No Convencionales (MGNC):** Medios de generación renovables no convencionales e instalaciones de cogeneración eficiente cuyos excedentes de potencia suministrada al sistema sean inferiores a 20 [MW].

El decreto supremo 244 exige a todas las empresas distribuidoras permitir la conexión de cualquier PMGD que pueda conectarse a la red ya sea mediante líneas propias o de terceros. Así mismo, exige a las empresas distribuidoras entregar toda la información necesaria a los interesados para la adecuada instalación, diseño y evaluación de la conexión del PMGD. Por otra

parte, fija los precios con que los medios de generación deben vender la energía que evacuan al costo marginal instantáneo y los excedentes al precio de nudo de potencia.

Con respecto a la operación de la máquina, el decreto establece que todo PMGD operara con auto-despacho, considerando que esta no dispone de la capacidad de regulación de sus excedentes, siendo los propietarios u operadores los responsables de terminar la potencia inyectada a la red. Por otra parte, los PMG podrán optar a la opción de funcionar con auto-despacho solicitándolo previamente al CDEC.

2 Energía Undimotriz

2.1 Descripción General

La energía undimotriz o energía de las olas es una forma de almacenamiento de la energía solar. El sol produce diferentes temperaturas a través del planeta generando vientos que soplan sobre la superficie del océano que a su vez causan el oleaje. Las olas pueden viajar cientos de kilómetros con mínima pérdida de energía y con una densidad de potencia mayor que la potencia del viento o la potencia del sol. Estas olas de aguas profundas no deben ser confundidas con las olas que vemos rompiendo contra las costas o las playas [20].

Existen más de 1.000 sistemas patentados para captar y aprovechar la energía de las olas, la más habitual es aquella tecnología mediante la cual se instalan turbinas en el fondo del mar unidas a boyas que transmiten el movimiento de las olas hasta la turbina generando electricidad. Otro sistema utilizado comúnmente consiste en unas máquinas flotantes articuladas que obtienen la energía del movimiento relativo entre estas partes y que se conocen por “serpientes marinas”. También existen dispositivos que, anclados al fondo del mar, oscilan bajo la acción de la ola incidente [20].



Figura 2-1 Ejemplos de dispositivos para generación de energía undimotriz.

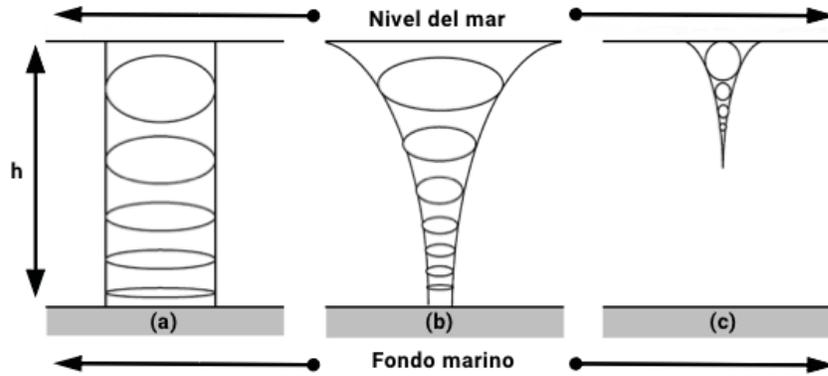


Figura 2-3: Variación de la ola para diferentes profundidades.

2.2.1 Obtención de energía de las olas

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 la ecuación (2-1) [23].

$$E_T = E_c + E_p = \frac{(\rho g H^2)}{8} \quad (2-1)$$

Donde E_T (de ahora en adelante E) es la energía total por unidad superficial de agua, ρ 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 la ecuación (2-2).

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

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 determinada por la ecuación (2-3).

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

Donde c es la velocidad de la ola o velocidad de fase.

Para olas irregulares, la relación vendrá dada por la ecuación (2-4).

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

Donde H_s es la altura significativa 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.

2.3 Clasificación de las Tecnologías Utilizadas

El movimiento de las olas puede convertirse en energía mecánica y luego en energía eléctrica usando sistemas apropiados. Los conversores de energía de las olas generalmente se refieren en la literatura como dispositivos WEC que es el acrónimo de Wave Energy Converter.

Se han instalado dispositivos de conversión de energía undimotriz en la costa, cerca de ella o mar adentro, siendo además instalados de manera unitaria o mediante arreglos de varios dispositivos. La selección de la tecnología es determinada según la topografía de la zona, el recurso disponible y/o la demanda energética [20].

Las tecnologías actuales se pueden clasificar por distintas categorías, las cuales pueden ser:

2.3.1 Según su ubicación

Una de las más utilizadas es la clasificación que determina la distancia de las costas que se encuentra el dispositivo. Para ellos tenemos 3 posibilidades.

- **Onshore:** son aquellos equipos que se posicionan en el borde costero y que probablemente utilizan como fuente de generación el rompimiento de la ola. Usualmente se encuentran anclados a la costa, por lo que son equipos de mantenimiento más sencillo y menos costoso. Sin embargo, están más desgastados asociado a la exposición al viento y las olas. Además, el potencial energético es ligeramente menor al potencial existente mar adentro.
- **Nearshore:** se ubican cerca del litoral, hasta a 500 metros de la costa, con profundidades de entre 20 y 30 metros. En este punto lo que se aprovecha es la velocidad de las olas
- **Offshore:** son los equipos que se ubican en alta mar, con mayores profundidades. La mayor ventaja de estos equipos es el alto potencial energético que se obtiene y su desventaja es que el mantenimiento es más costoso; el traslado es más costoso y existen altas pérdidas energéticas en la transmisión, que se debe realizar mediante cableado submarino, lo que también supone interferencia con el tráfico submarino y la fauna y flora presentes.

Para entenderlo de manera más gráfica se debe observar la Figura 2-4.

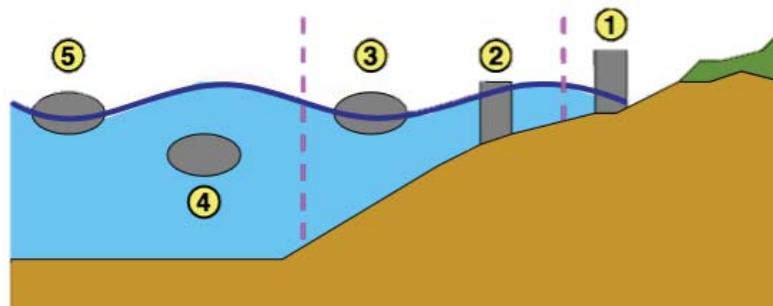


Figura 2-4 Ubicaciones de convertidores [24].

En donde se tiene que para (1) se utilizaran equipos Onshore, apoyados, en (2) Nearshore, apoyado, (3) Nearshore, flotante, (4) Offshore, sumergido y (5) Offshore, flotante.

2.3.2 Según su forma de obtención de energía

- **Sistema Atenuador:** Un atenuador es un dispositivo flotante el cual tiene la capacidad de operar paralelamente en la dirección del oleaje y adecuarse de forma efectiva a él. Estos dispositivos capturan energía desde el movimiento relativo a través de dos estructuras mecánicas unidas, como por ejemplo el dispositivo Pelamis de la Figura 2-5, el cual se basa en una estructura articulada que dispone entre sus nodos de unión un sistema hidráulico que actúa sobre un generador eléctrico. Se estima que la cantidad de energía obtenida por 30 de estos sistemas podría abastecer aproximadamente 20.000 hogares con un consumo medio europeo. Se trata de una tecnología comercialmente afianzada.



Figura 2-5 Pelamis P2, UK. Potencia nominal de 0,75 MW [25].

- **Dispositivos desbordantes:** Estos dispositivos capturan la energía de un frente de olas mediante un colector de olas para mover una o varias turbinas hidráulicas de salto reducido, denominadas turbinas Kaplan, aprovechando la energía potencial de las olas. Se distinguen dos tipos de convertidores, los de estructura fija o situados en la costa, y los de estructura flotante, alejados de ella. En los dispositivos de estructura fija el funcionamiento es similar a las centrales hidroeléctricas. Las olas entrantes acceden a un depósito situado en una cota superior a la del mar a través de una rampa, para después hacer pasar el agua por unas turbinas acopladas a unos generadores eléctricos antes de ser devuelta al mar. Podemos distinguir: el SSG (Seawave Slot- Cone Generator), el cual almacena agua en varios dispositivos colocados a distintas alturas y utiliza una turbina con varias etapas (ver Figura 2-6). Entre los dispositivos convertidores de estructura flotante, cuyo funcionamiento es similar a los anteriores, se puede citar al convertidor de olas danés Wavedragon, el cual se muestra en la Figura 2-7, caracterizado por tener un reflector que dirige las olas incidentes por una rampa hasta un depósito situado en la parte posterior por encima del nivel del mar.



Figura 2-6 Sea Wave Slot - Cone Generator, Noruega. Potencia nominal de 1MW [26].



Figura 2-7 Wave Dragon, Dinamarca. Potencia nominal 11 MW [25].

- **Absorbedores puntuales:** Los absorbedores puntuales son básicamente de traslación, como por ejemplo las boyas Power Buoy, la cual puede observarse en la Figura 2.10. Las boyas obtienen energía a partir del movimiento relativo entre el flotador y el mástil mediante un sistema hidráulico que acciona un generador. La salida eléctrica se transforma de baja a media tensión en una subestación submarina desde donde se lleva mediante una línea eléctrica submarina hasta la subestación en la costa. Entre otros absorbedores puntuales tenemos, el primer absorbedor puntual a escala real del mundo, conocido con el nombre de IPS Buoy, el Aqua Buoy y el Wavebob.



Figura 2-8 PowerBuoy PB150, UK. Potencia nominal 150 kW [25].

- Generador undimotriz oscilante (OSWEC):** Estos dispositivos típicamente tienen un extremo fijado a una estructura o el fondo del mar mientras que el otro extremo es libre de moverse. La energía se recoge a partir de la absorción del choque de ondas de oleaje producido por el movimiento de las partículas de agua. El eje de la paleta oscila como un péndulo montado en una articulación que pivotea en respuesta al movimiento del oleaje. A menudo vienen en forma de flotadores, aletas, o membranas. En la Figura 2-9 se presenta Oyster 800, una estructura que está anclada al fondo marino a una media milla de la costa (menos 1 km) y a unos diez metros de profundidad. La cercanía a la costa tiene las ventajas de ahorrar en costos (instalación, mantenimientos, etc.) sin reducir sus prestaciones, si se colocan en zonas con abundantes oleajes durante el año. Las bisagras disponen una parte flotante (boyas alargadas) sujetas por dos pistones hidráulicos.

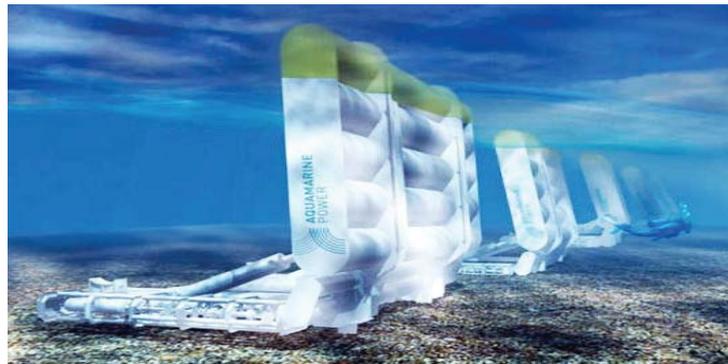


Figura 2-9 Oyster 800, UK. Potencia nominal 800 kW [25].

- Columnas de agua oscilantes (OWC):** El OWC de la Figura 2-10, captura la energía entregada por las olas, la transfiere a una turbina tipo Wells que, acoplada a un generador, la inyecta a la red. Es una estructura normalmente ubicada en la costa, cuya parte superior forma una cámara de aire y cuya parte inferior está sumergida en el agua y abierta a la acción de las olas. El flujo bidireccional de aire desplazado por la columna de agua mueve una turbina de aire montada en la parte superior de la estructura. Al utilizar energía neumática para generar energía mecánica, el mantenimiento es más sencillo y económico.

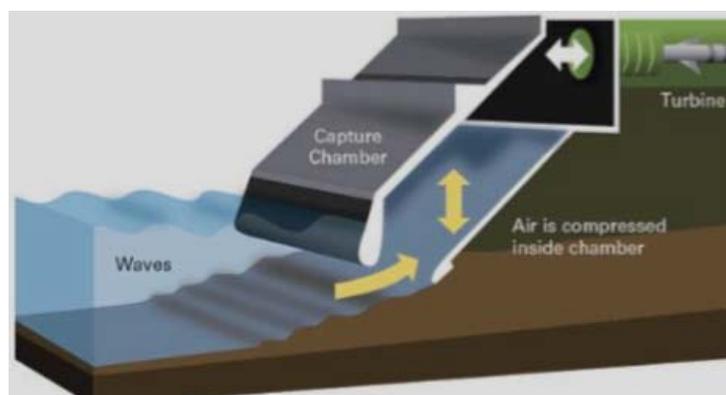


Figura 2-10 Prototipo Limpet, Escocia. Potencia nominal 500 kW [25].

2.3.3 Según su tamaño y orientación

- **Absorbedores puntuales:** Son estructuras pequeñas en comparación con la ola incidente; suelen ser cilíndricas y, por lo tanto, indiferentes a la dirección de la ola; generalmente se colocan varios agrupados formando una línea.
- **Atenuadores:** Se colocan paralelos a la dirección de avance de las olas, y son estructuras largas que van extrayendo energía de modo progresivo; están menos expuestos a daños y requieren menores esfuerzos de anclaje que los terminadores
- **Terminadores:** Están situados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola y pretenden captar energía de una sola vez.

La Figura 2-11, ejemplifica gráficamente las tres posibles categorías.

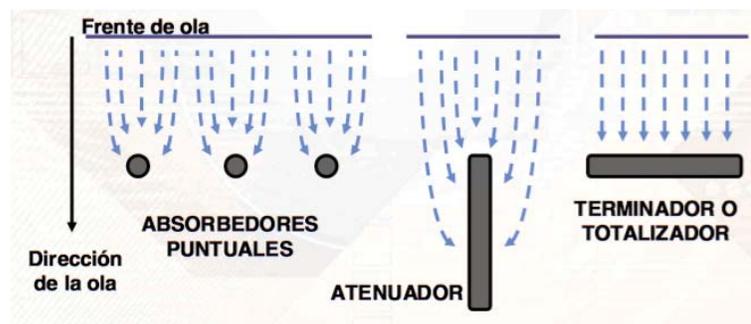


Figura 2-11 Clasificación de los convertidores según tamaño y orientación [24].

2.4 Undimotriz en el Mundo

El uso del mar como fuente de generación de energía no es nuevo. En el mundo existen varios tipos de tecnologías que buscan sacar provecho a su potencial, el cual alcanza 29.500 TWh/año. Los puntos con mayores potenciales se señalan en la Figura 2-12.



Figura 2-12 Países con mayor potencial de energía undimotriz [27].

A continuación, se abordarán algunos de los proyectos más destacados que se han llevado a cabo.

2.4.1 WaveDragon

WaveDragon es un gran dispositivo de desbordamiento, el que combina una rampa curva de desborde y dos brazos reflectores, que se utilizan para concentrar la energía en la cuenca de desborde. Se utilizan múltiples turbinas Kaplan modificadas conectadas directamente con generadores de imanes permanentes para la conversión eléctrica del agua a baja altura. La potencia generada depende del clima de ola, encontrándose en el rango de 4 a 11 MW. Hoy en día, es el mayor dispositivo (por su capacidad nominal y el tamaño físico) en el marco de desarrollo. El dispositivo está anclado mediante amarres flojos y es capaz de girar de forma de que siempre enfrente la dirección de las olas [21].



Figura 2-13 Prototipo escala real WaveDragon [21].

La estructura se construye utilizando una combinación de acero y hormigón armado, que puede ser construido localmente utilizando las técnicas de construcción estándar en la mayoría de los astilleros, con el detalle que WaveDragon es un dispositivo físicamente grande, como muestra la Figura 2-14, por lo que se requiere un patio de construcción de gran envergadura para su montaje, además de necesitar como mínimo una profundidad de 25 metros para su operación. Por su gran tamaño no existe una preocupación mayor a que falle frente a condiciones extremas, tan sólo existe la preocupación de que se libere de su sistema de amarre y quede a la deriva [28].

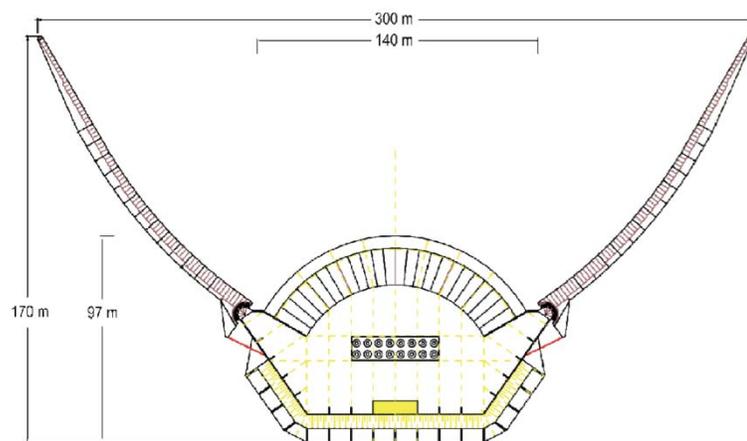


Figura 2-14 Layout con medidas del WaveDragon [28].

2.4.2 AquaBuOY

El AquaBuOY es un dispositivo que utiliza el principio de punto de absorción mediante una boya de libre flotación, la que reacciona contra una columna de agua ubicada por debajo. Esta columna de reacción mueve un conjunto de pistones que impulsan una bomba de agua de acero reforzado, la cual aumenta la presión del agua. La utilización de un acumulador de alta presión permite suavizar la potencia y la descarga que se realiza sobre una turbina. La sincronización con la red se realiza mediante un accionamiento de variación de velocidad y la utilización de un transformador de paso para el nivel de voltaje adecuado.

La Figura 2-16 (a) muestra la anatomía de la boya en donde es posible apreciar los principales elementos que la componen: la boya que actúa como flotador; la turbina alojada en el flotador; el tubo acelerador, el cual permite la entrada de agua por ambos extremos para que circule de ida y vuelta, forzando al pistón a moverse; el pistón, el que al ser movido por la circulación de agua comprime y amplía las bombas peristálticas³ y el cable submarino, el que permite la transmisión de electricidad.

La Figura 2-16 (b) muestra como el agua bombeada por el movimiento de la boya es turbinada en la parte superior del sistema. La Figura 2-16 (c) muestra el comportamiento del dispositivo cuando la boya es elevada por las olas, debido a esto es que el pistón es desplazado hacia abajo, forzando la bomba peristáltica superior a contraerse y enviar agua a través de la turbina. Al mismo tiempo la bomba inferior se expande, absorbiendo agua. En la Figura 2-16 (d) es posible apreciar el proceso inverso, cuando la boya desciende debido a la ola, el pistón sube, forzando a la bomba inferior a impulsar agua a la turbina.



Figura 2-15 Dispositivo AquaBuOY [29].

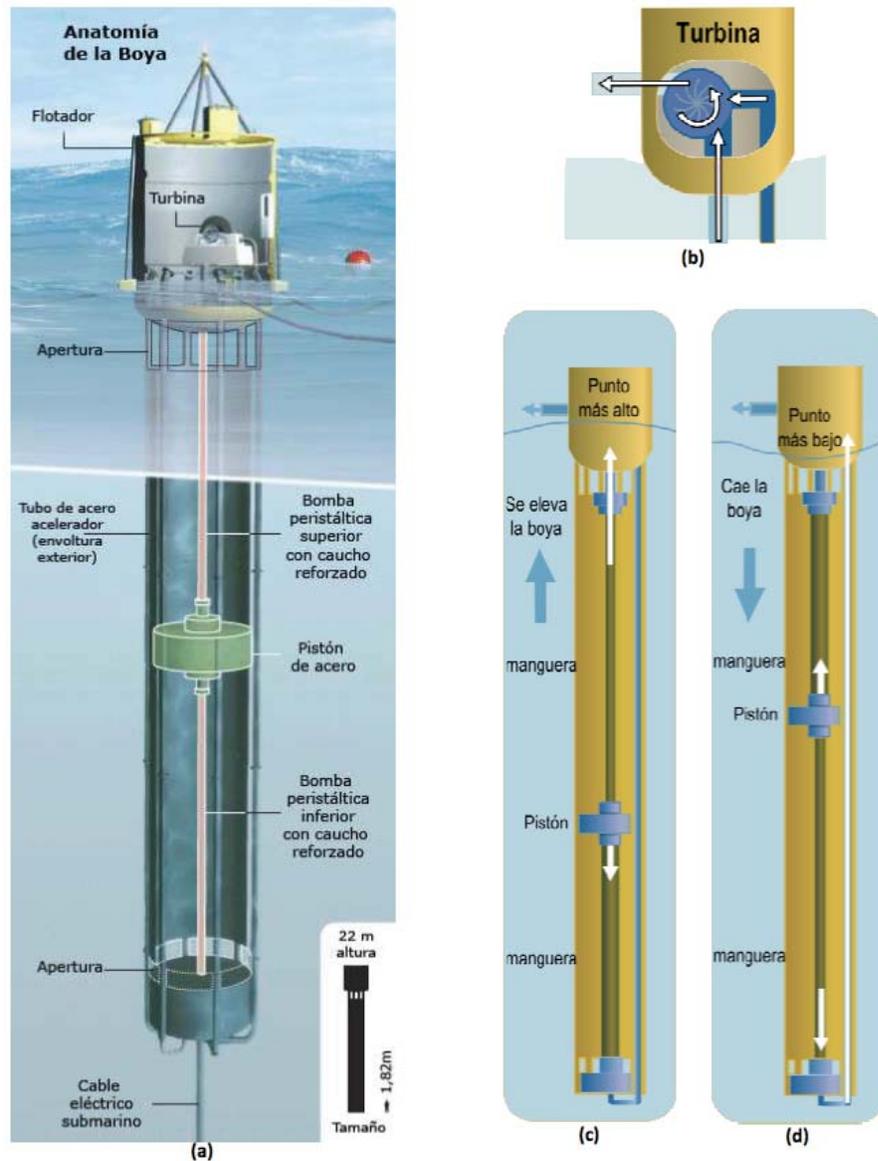


Figura 2-16 Boya AquiaBuOY, (a) Anatomía de AquaBuOY; (b) Turbina; (c) Comportamiento en el punto más alto; (d) comportamiento en el punto más bajo [21].

El diseño del dispositivo de obtención de potencia puede ser un sistema de circuito cerrado o circuito abierto. Una de las desventajas que presenta es que el dispositivo es sintonizado lentamente a medida que las olas pasan, disminuyendo su rendimiento. La estructura de soporte corresponde a una estructura de acero que puede ser construida localmente utilizando técnicas habituales de construcción disponibles en la mayoría de los astilleros. Esta estructura se extiende por aproximadamente 30 metros en el agua, por lo que se requiere como mínimo profundidades de agua de unos 50 metros [28].

2.4.3 Pelamis

Es un dispositivo semi-sumergido, compuesto por cuatro secciones cilíndricas unidas mediante bisagras que permiten movilidad. El movimiento inducido por la ola en las uniones del dispositivo Pelamis, es resistido por cilindros hidráulicos, los cuales bombean aceite a alta presión a motores hidráulicos a través de acumuladores. Este motor hidráulico es el encargado de hacer girar un generador de inducción para la producción de electricidad, que en total para un dispositivo es de 750 kW. La potencia de todo el conjunto es llevada al fondo marino mediante un único cable, siendo posible conectar varios dispositivos entre sí, para la utilización de un único cable de poder submarino hasta la costa [30].



Figura 2-17 Dispositivo Pelamis [25].

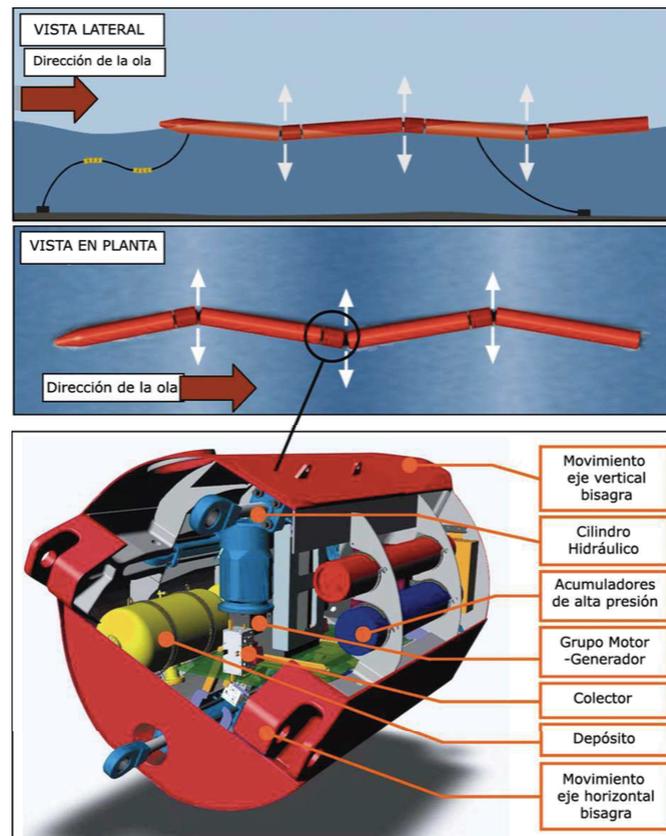


Figura 2-18 Diagrama del sistema de conversion pelamis y el layout del sistema de conversion [30].

La Figura 2-18 muestra el dispositivo Pelamis tanto en su vista frontal como en planta, además de incluir el diseño físico del sistema de conversión utilizado. La estructura posee un largo total de 150 metros, un diámetro de 3,5 metros y tres unidades de conversión independientes. Funciona con presiones entre los 100 y 350 Bar y cada unidad cuenta con dos generadores trifásicos de 125 kW, 415/690 Vac 50/60 Hz.

Se utiliza una configuración especial en las uniones para inducir una respuesta resonante que permite incrementar la obtención de energía en pequeños mares. El control de suspensión aplicado a las articulaciones permite que esta respuesta resonante sea incrementada en los pequeños mares donde la eficiencia de captura debe aprovecharse al máximo, o bien permite limitar las cargas y movimientos en condiciones de supervivencia. Por lo que el dispositivo puede diseñarse para que coincidan la respuesta resonante y la frecuencia fundamental de la ola del lugar a instalar, minimizando de esta forma la potencia reactiva necesaria [21].

2.4.4 SDE

El método SDE utiliza balsas pivotantes que flotan sobre el oleaje del mar para mover pistones y crear presión hidráulica, la cual es acumulada y dirigida hacia un motor hidráulico que mueve un generador eléctrico de inducción. El sistema posee la capacidad de acumular presión para los movimientos en ambos sentidos. Este sistema aprovecha la velocidad, altura, profundidad, subida, caída y flujo de retorno de la ola, produciendo energía de manera más eficiente y económica que otras tecnologías convencionales que requieren gran cantidad de espacio.

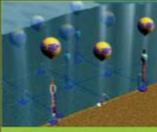
Un modelo a escala fue operado en Israel, produciendo en promedio 40 kW/h por 8 meses. Esta tecnología se desarrolló para proporcionar protección a las zonas del borde costero sujeta a grandes olas junto con la utilización de la energía de las olas. Para esto es necesario contar con una zona de a lo menos 5 metros de profundidad, con oleaje moderado y línea de costa disponible a menos de 300 metros de distancia.

El tamaño de las balsas es de aproximadamente 4 metros de ancho por 5 metros de largo, con un rango operacional de ola de 0,8 a 4 metros peak to peak y una ola límite de 8 metros. Posee un sistema de protección mediante la inmersión del eje y los colectores, evitando de esta forma las olas sobre los límites establecidos [31].



Figura 2-19 Dispositivo SDE [31].

Si bien los dispositivos anteriores son solo los más populares que existen hoy en día, no debemos olvidar que la energía undimotriz nos ofrece variadas alternativas para aprovechar todo el potencial del mar. A continuación, se agrega un cuadro de resumen con más proyectos a nivel global, en donde se clasifican según su ubicación, forma de obtención de energía y tamaño. Ver Figura 2-20.

	OWC	Efecto Arquimedes	Cuerpo boyante individual	Cuerpo boyante múltiple	Rebosamiento	Impacto
Offshore	 OE Buoy Ocean Energy (IRL)	 AWS AWS Ocean (UK)	 PowerBuoy OPT (USA)	 Pelamis PWP (UK)	 Wave Dragon Wave Dragon (DK)	
Nearshore	 OWC Oceanlinx (AU)	 Ceto I REH (UK)	 Ceto II REH (UK)	 WaveStar Wave Star (DK)		 Oyster Aquamarine (UK)
Onshore	 Limpet WaveGen (UK)				 SSG WAVEnergy (NO)	

Terminador

Abs. puntual

Atenuador

Figura 2-20 Ejemplos de tecnologías Undimotriz en el mundo. [32]

2.5 Undimotriz en Chile

Actualmente, Chile tiene la posibilidad de transformarse en un actor relevante en el contexto Latinoamericano y mundial en temas de energía de los mares. Las condiciones para el desarrollo de las energías marinas están entre las más favorables a nivel mundial, dado los altos valores estimados de energía de olas y de mareas en la costa de Chile continental, y el dinamismo de la economía local.

La energía undimotriz a lo largo de la costa chilena aumenta de norte a sur, y se encuentra en el rango de 25 kW/m en el norte hasta cerca de 110 kW/m en el sur y los factores de planta para proyectos de energía undimotriz en Chile se encuentran entre los más altos en el mundo (50%), debido a la alta consistencia de las olas. Existen variadas empresas interesadas en la energía undimotriz de Chile.

Sin duda que la idea de desarrollar un país que base su matriz energética de forma amigable con el medio ambiente se vuelve sumamente atractivo y desafiante. A continuación, se dan a conocer algunos de los proyectos que se desarrollan en las costas chilenas.

2.5.1 Cifuncho II

Es el proyecto que presenta más avance, desarrollado por Ausind Ltda. que consiste en un equipo absorbedor puntual. El equipo consiste en una estructura de 4 cilindros equidistantes posicionados en una matriz circular que otorgan flotabilidad al sistema, todo para permitir el accionamiento de un sistema eléctrico parecido a un dínamo ubicado en el eje central del mecanismo, que se mueve gracias la oscilación del de Cifuncho II en el mar, permitiendo la obtención de energía eléctrica directamente. Con él se pueden obtener de 50 a 100 kW de potencia eléctrica, con una vida útil que puede llegar a los 40 años de funcionamiento.



Figura 2-21 Proyecto Cifuncho II, Quintay, Quinta Región.

2.5.2 MADIUN

Madiun, la característica principal de este equipo es que el 80% de su estructura principal se encuentra instalado en tierra, lo que facilita el acceso ante cualquier maniobra razón por lo cual esta tecnología resulta ser económicamente más rentable en comparación con otras tecnologías asociadas a energías marinas y de bajo impacto hacia el medio ambiente.

Su funcionamiento se basa en un conjunto de boyas que son capaces de extraer la energía transportada por la ola para así mediante un sistema de cuerdas transmitir el movimiento a la estructura principal ubicada en tierra. En esta estructura ubicada en tierra el movimiento lineal transmitido desde el conjunto de boyas es convertido en un movimiento rotatorio gracias a un conjunto de elementos mecánicos para así accionar un generador eléctrico. Uno de los principales problemas asociado a la energía de las olas es la poca uniformidad que este recurso presenta, sin embargo, el equipo de trabajo del proyecto Madiun logro afrontar este problema mediante la implementación de un volante de inercia produciendo así un almacenamiento de energía mecánica para proveer de un movimiento continuo al generador acoplado.

Fue instalado un prototipo en la V región de Chile, específicamente en la ciudad de Valparaíso, con una potencia instalada de 2 kW bajo un sistema de energía de tipo off-grid o también conocido como aislado de red, ver Figura 2-23.

Cabe destacar que a causa del fuerte temporal que afecto a la zona en agosto del 2015, el prototipo fue destruido, tras solo un par de meses de operación. Esta fue una oportunidad para re-diseñar el prototipo y dar pie a nuevos conceptos, los que aún se encuentran en desarrollo, ver Figura 2-24.

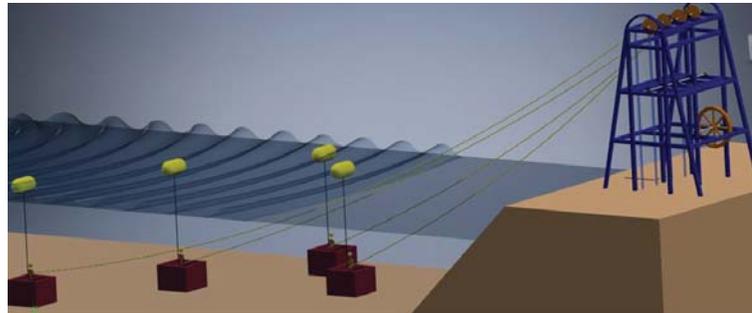


Figura 2-22 Diseño de prototipo MADIUN.



Figura 2-23 Prototipo instalado en ciudad de Valparaíso.



Figura 2-24 Prototipo después de temporal de agosto de 2015.

2.5.3 Wilefko

Wilefko significa “Brillo de Agua” en lengua Mapudungun, el dispositivo de la Figura 2-26 extrae la energía cinética de las olas en rompiente. Se ha observado que este tipo de olas se convierte en una pared de agua, que se desplaza a 30 Km/h y es 800 veces más densa que el aire. A partir de lo anterior se desarrolló un motor de olas, capaz de transformar esos miles de impactos en un movimiento continuo. Este motor lo se utiliza para suministrar aire, agua y electricidad.

Dentro de las características que destaca su equipo fabricante, están:

- La mayor ventaja competitiva con respecto a otras energías renovables no convencionales (ERNC) es la capacidad de almacenamiento de energía con aire comprimido, que permite entregar electricidad en los peak de la demanda, como por ejemplo el suministro nocturno, un gran problema en la minería.
- Suministrar aire comprimido o bombeo de agua salda a faenas industriales o portuarias.
- Obtención de agua dulce a partir de agua salada, si se acopla la tecnología WILEFKO con un filtro de ósmosis inversa.
- El diseño de la tecnología WILEFKO contempla multipaletas que son capaces de extraer de 2-3 veces más energía a partir de una ola.
- Finalmente, la forma Cónca de la PALETA de WILEFKO, tiene una eficiencia del 57% en la captura de la energía (CFD Star-ccm+).



Figura 2-25 Dispositivo Wilefko utilizado para pruebas.



Figura 2-26 Modelo 3D del Dispositivo Wilefko de 100 kW de potencia.

2.6 Potencial Geográfico de Chile

Existen varios estudios y evaluaciones que muestran un gran potencial a lo largo de la costa chilena, como el informe preparado para la “27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering” [33], que en general demuestran que Chile es uno de los sitios más adecuados en el mundo para la generación de energía eléctrica mediante energía de olas.

Como se mencionó en el capítulo 2.2 y se ilustra en la Figura 2-2, el potencial de Chile es reconocido internacionalmente como un nicho para el desarrollo de este tipo de tecnologías.

La Figura 2-27 corresponde al potencial de extracción de energía de la costa chilena y que refuerzan el hecho de que existe un importante potencial para el uso de conversores undimotrices de energía. Como se observa, la energía undimotriz a lo largo de la costa chilena aumenta exponencialmente de norte a sur, encontrándose en el rango de 25 kW/m en el norte y hasta cerca de 110 kW/m en el sur. Además, el factor de planta o rendimiento de extracción podría ser mucho mayor que en otros lugares con valores cercanos al 50%, en contraste con el 30% estimado por dispositivos en costas inglesas. La energía undimotriz es mayor que 5 kW/m por lo menos el 95% del tiempo [34].

Un factor importante de las olas chilenas es la escasa variación de potencia (menor al 6% que es más bajo que en Reino Unido) en las distintas estaciones del año, son regulares, con baja dispersión direccional y con periodos grandes. Las características de las olas chilenas se deben principalmente a la presencia de oleaje en los grandes océanos. Otra de las ventajas del mar chileno es la fuerte pendiente del fondo del mar en comparación con otros lugares en el mundo, por lo que se alcanza la profundidad buscada relativamente cerca de la costa, así es posible reducir el costo de interconexión a la red eléctrica [20].

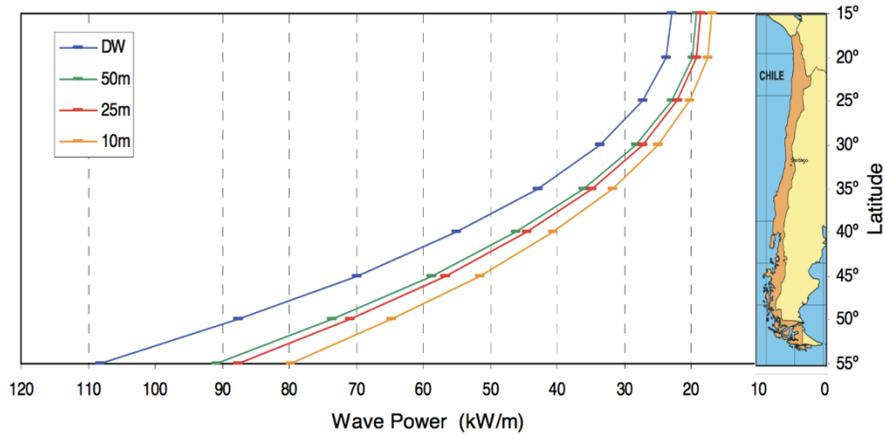


Figura 2-27 Distribución de potencia a lo largo de la costa chilena para distintas profundidades [33].

Si se considera el potencial de la energía undimotriz en comparación con las otras alternativas de energías renovables no convenciones en Chile, la comisión de minería y energía del senado tiende una apreciación que se representa en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Potencial ERNC Chile. [32]

Tecnología ERNC	Potencial Optimista [MW]	Potencial Conservador [MW]
Hidroeléctrico	23.000	20.400
Geotermia	16.000	3.300
Biomasa	13.700	470
Biogás	400	400
Minihidro	1.400	1.400
Eólica	40.000	7.200
Solar	228.000	100.000
Undimotriz	240.000	164.000
Mareomotriz	800	600

Al observar las cifras y las magnitudes de la energía que se podrían obtener del mar de manera renovable, se vuelve una necesidad tomar cartas en el asunto y dar comienzo al desarrollo de estas tecnologías.

3 Diseño eléctrico

Para proceder a determinar un diseño eléctrico apto para utilizar en el área de energías marinas, principalmente en la undimotriz, se revisarán los distintos componentes del universo de las maquinas eléctricas y la forma de estas para transformar la energía mecánica (u otra) en eléctrica.

3.1 Máquinas eléctricas

Las máquinas eléctricas comprenden a la familia de equipos capaces de transformar un tipo de energía en otro, estando de una u otra manera involucrada la electricidad. Se clasifican en tres grandes grupos: generadores, motores y transformadores. Los transformadores y convertidores son aquellos dispositivos que conservan la forma de la energía, pero transforman sus características. Son principalmente máquinas fijas; los motores tienen la facultad de transformar la energía eléctrica en mecánica mediante un torque aplicado a su eje; y los generadores, que realizan el proceso inverso de los motores, transforman la energía mecánica en energía eléctrica.

A continuación, se presentan los principales tipos de generadores existentes y utilizados actualmente en los sistemas eléctricos de potencia.

3.1.1 Generadores de corriente continua

Es denominada así debido a que sus salidas proporcionan energía en forma de corriente continua. Esta máquina es una de las más complejas en términos constructivos, formada por dos núcleos de hierro, generalmente laminado, uno fijo (estator) y otro que gira (rotor o armadura). En ambos núcleos van ubicadas bobinas de diferentes configuraciones que crean campos electromagnéticos que interactúan, de modo de obtener una tensión generada en los terminales de las bobinas para el caso de trabajar como generador. En algunos casos se utilizan imanes permanentes para generar el campo magnético en el estator.

La construcción de este tipo de máquina debe considerar la presencia de un conmutador, que es simplemente un rectificador mecánico formado en términos elementales por dos semi-anillos aislados entre sí (delgas) y que sirven de bornes de las bobinas, junto con escobillas fijas de metal o carbón que se mantienen presionadas sobre el conmutador. Cuando el rotor gira, las escobillas se ponen en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador.

El efecto de la corriente continua por el devanado de campo (bobinas en el estator) es crear una distribución de flujo magnético estacionario. De igual modo, el efecto del conmutador, cuando pasa corriente continua a través de las escobillas, es crear una distribución de flujo magnético en la armadura que también está fija en el espacio con respecto al rotor. La interacción entre estas dos distribuciones de flujo es lo que crea el par electromagnético de la máquina. La acción del conmutador permite, además, invertir el sentido de dirección de la distribución de flujo magnético en la armadura, obteniendo una rectificación de onda completa.

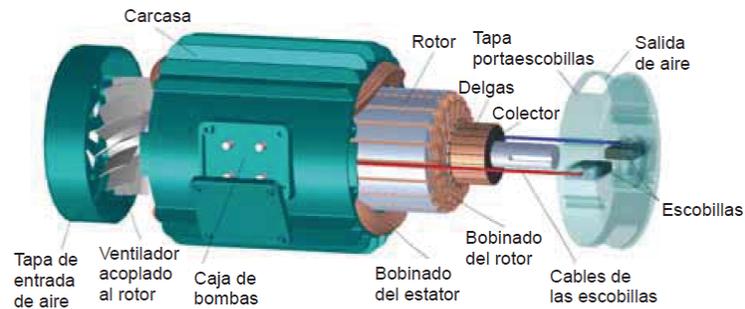


Figura 3-1 Máquina de corriente continua

3.1.2 Generador síncrono

Tanto las máquinas síncronas como las asíncronas se diferencian de las de corriente continua en que no necesitan de corriente continua para funcionar o bien no producen energía de esta forma.

El nombre de la máquina sincrónica se debe a que esta se encuentra en sincronismo con la red. Cuando está conectada como motor al sistema, la velocidad de su eje depende directamente de la frecuencia de las variables eléctricas y también del número de polos y de forma inversa en el caso de funcionar como generador, ya que la frecuencia de las variables eléctricas generadas dependerá directamente de la velocidad con que gire el eje.

En estas máquinas el estator se encuentra alimentado por corriente alterna cuando trabaja como motor, en cambio, el rotor posee una alimentación continua a través de un enrollado de campo o bien imanes permanentes para generar una distribución de flujo magnético estacionario.

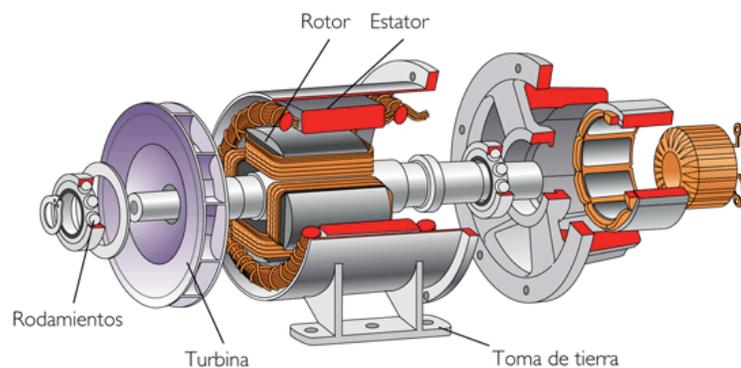


Figura 3-2 Máquina síncrona

El estator posee 3 fases desfasadas en 120° y que al alimentarse con corriente alterna en su trabajo como motor, crea una distribución de flujo magnético variable que interactúa con el flujo magnético estacionario del rotor. La variación del flujo creado por el estator es el que está directamente relacionado con la frecuencia de las variables eléctricas. En el caso de trabajar como generador tan sólo es necesario alimentar al rotor que gracias al giro del eje inducirá una tensión alterna en los bornes de las bobinas y que estará desfasada en 120° eléctricos entre cada fase.

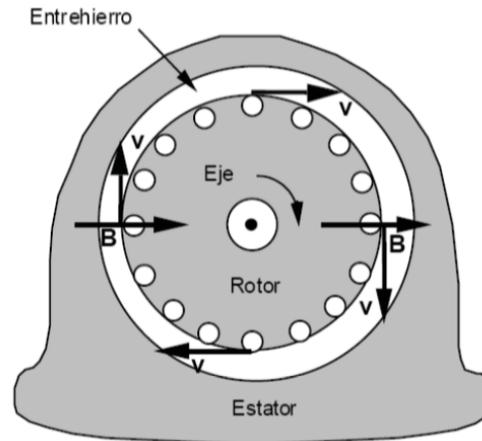


Figura 3-3 Modelo de funcionamiento de una máquina síncrona

3.1.3 Generador asíncrono

Estas máquinas representan la mayor parte del mercado en la industria, debido a que poseen un menor costo de fabricación y mantenimiento, y que junto a al desarrollo de la electrónica de potencia ha podido multiplicar el rango de usos al mejorar las habilidades de control.

El funcionamiento como motor consiste en alimentar sus 3 enrollados de campo ubicados cada 120° mediante una tensión trifásica desplazada en el tiempo, que genera una distribución de flujo magnético variable que a su vez induce una tensión en las bobinas del rotor. Al encontrarse cortocircuitadas, aparece una corriente alterna en cada una de ellas, lo que produce otra distribución de flujo magnético. La interacción entre ambos produce un torque motriz capaz de hacer girar el rotor, permitiendo el movimiento.

El funcionamiento como generador ocurre de forma inversa. En este caso, las bobinas interiores deben ser alimentadas con corriente alterna trifásica. Debido al movimiento del eje y a la distribución de flujo magnético variable que genera el rotor, se induce una tensión alterna trifásica en los terminales de las bobinas del estator.

El estator está compuesto por láminas que reducen los efectos de las corrientes parasitarias. Mientras que el rotor puede ser de tipo embobinado (ver Figura 3-4) o de tipo jaula de ardilla (ver Figura 3-5). En tanto, el rotor jaula de ardilla posee barras cortocircuitadas en sus extremos. Es de diseño simple y robusto que le dan una gran ventaja contra las escobillas de los motores de corriente continua

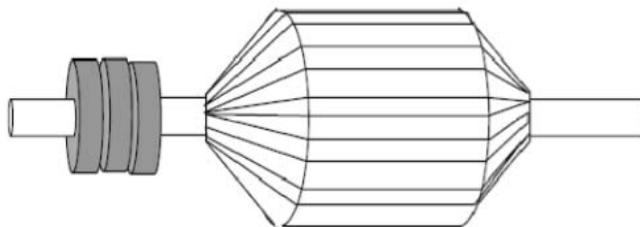


Figura 3-4 Rotor embobinado.

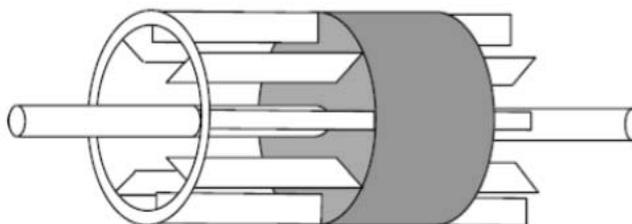


Figura 3-5 Rotor jaula de ardilla.

En cambio, el rotor embobinado se construye de forma similar al estator, contando con el mismo número de polos, además de anillos rozantes para efectuar la alimentación. Si bien los anillos presentan una desventaja frente al rotor jaula de ardilla, mediante este método es posible mejorar condiciones de partida al agregar resistencias al enrollado o incluso mejorar la potencia al ser usado como generador.

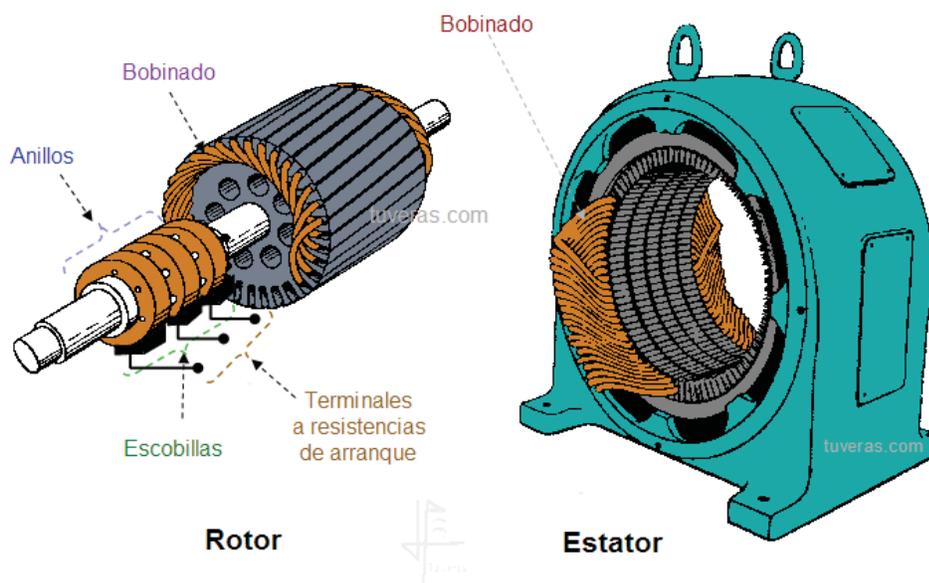


Figura 3-6 Imagen de un motor asíncrono con rotor bobinado.

3.2 Convertidores de potencia

No hay duda de que la energía eléctrica constituye la fuente básica de energía de los sistemas electrónicos. Sin embargo, esta energía no se produce ni se consume de una forma unificada, esto es, está disponible con diferentes formatos: corriente continua, alterna en formato monofásico o trifásico, pulsada, etc. Es necesario, por tanto, disponer de elementos de conversión que permitan transformar la energía entre los diferentes formatos, con el máximo rendimiento posible. Uno de los problemas que aparecen cuando se diseñan convertidores de elevado rendimiento es la generación de subproductos no deseados. Existe, por tanto, una antítesis eficiencia energética – calidad de la conversión que debe tenerse en cuenta para un correcto diseño y utilización de los convertidores [35].

Un convertidor de energía es un sistema o equipo electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferentes.

El concepto inicial de convertidor puede extenderse para incluir aspectos como: eficiencia, reversibilidad, grado de idealidad, fiabilidad, volumen o tecnología por citar las más importantes. En la Figura 3-7 se muestra la estructura básica de un convertidor.

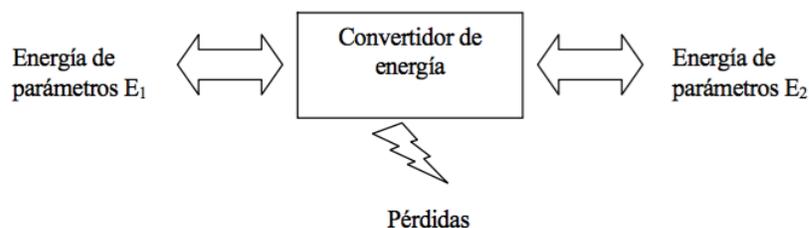


Figura 3-7 Estructura básica de un convertidor electrónico de energía [35].

Los convertidores pueden clasificarse según diferentes criterios. Uno de los más comúnmente utilizados es agruparlos según el formato de las energías de entrada y salida. Básicamente y según este criterio pueden establecerse cuatro grandes grupos, los cuales se ven relacionados en la Figura 3-8.

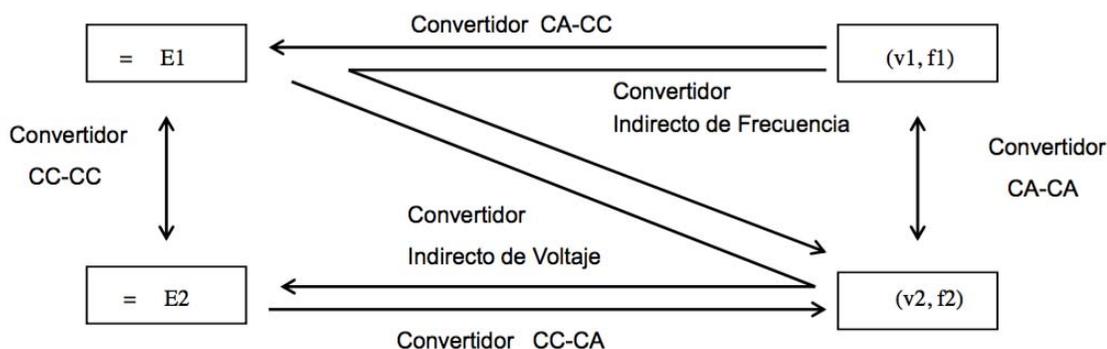


Figura 3-8 Convertidores catalogados por formato de entrada y salida de la energía [36].

3.2.1 Rectificadores

Convertidores ca/cc. Este tipo de convertidores convierten la corriente alterna a corriente continua, el rectificador está constituido por diodos, de los que se aprovecha la propiedad que tienen de conducir la corriente eléctrica en un solo sentido, cuando conducen se dice que están polarizados en forma directa y cuando no conducen se dice que están polarizados en forma inversa.

La corriente alterna en un momento tendrá valores positivos, luego de un tiempo tendrá valores negativos, su valor de voltaje irá alternando en el tiempo. Además, pasado un tiempo sus valores de voltaje se repiten y es a ese tiempo que tardan en repetirse esos valores a lo que se le llama periodo, de ahí que se diga que la corriente alterna es periódica, y a la inversa de este tiempo se le conoce como frecuencia

3.2.2 Choppers

Convertidores cc/cc. Este tipo de convertidores transforman un determinado valor de corriente continua de entrada en uno distinto de salida, con la posibilidad de incluir, además, aislamiento galvánico entre entrada y salida. Desde el punto de vista del accionamiento, su campo de aplicación es el mismo que el de los convertidores ca/cc, con la diferencia de que la fuente de energía no es alterna, sino continua. Su utilización se restringe a sistemas embarcados, donde la distribución de energía se realiza en corriente continua, o en algunas situaciones especiales, su utilización combinada con los rectificadores no controlados permite diseñar convertidores ca/cc con un mejor factor de potencia.

3.2.3 Inversores

Convertidores cc/ca. Este tipo de convertidores básicamente realizan una conversión de corriente continua en corriente alterna, con la posibilidad de poder controlar tanto la frecuencia como el valor eficaz de la tensión o intensidad de salida, lo que les hace fundamentales para el diseño de accionamientos basados en máquinas asíncronas y síncronas. Dado que normalmente la distribución de energía se realiza en corriente alterna, suelen ir asociados a un rectificador. Se utilizan también para acoplar al sistema eléctrico la energía generada por los generadores eólicos, que se caracterizan por un motor primario de velocidad muy variable.

3.2.4 Graduadores

Convertidores ca/ca. Este tipo de convertidores se utilizan ampliamente en el diseño de arrancadores suaves para reducir la intensidad demandada durante el arranque de los motores de inducción. En su estructura de control más básica, su función es modificar el valor eficaz de la tensión de entrada, conservando su frecuencia, aunque también puede conseguir una tensión de salida con una frecuencia submúltiplo de la de entrada. En este último caso reciben el nombre específico de cicloconvertidores, habiendo obtenido durante la última década un especial protagonismo en el diseño de sistemas de tracción eléctrica.

3.3 Alternativas para el diseño

3.3.1 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

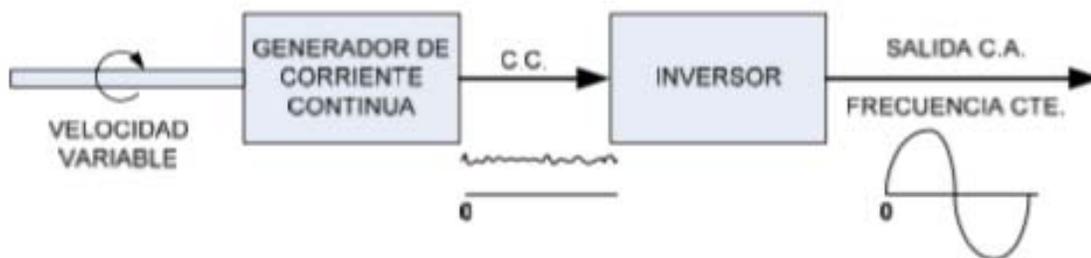


Figura 3-9 Generador de corriente continua

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, se presentan las siguientes ventajas:

- Puede ser auto-excitada directamente.
- No se necesita el uso de un rectificador para abastecer los posibles 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

3.3.2 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 asincrónicos (o de inducción).

Generador Síncrono

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 3-10 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.

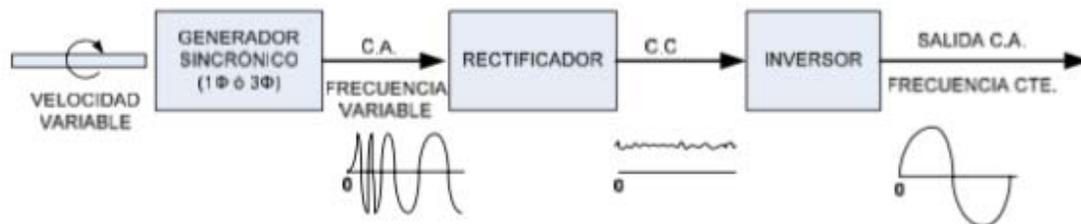


Figura 3-10 Generador síncrono

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 3-11).

Ventajas:

- Alta eficiencia por la regeneración del rotor.

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.

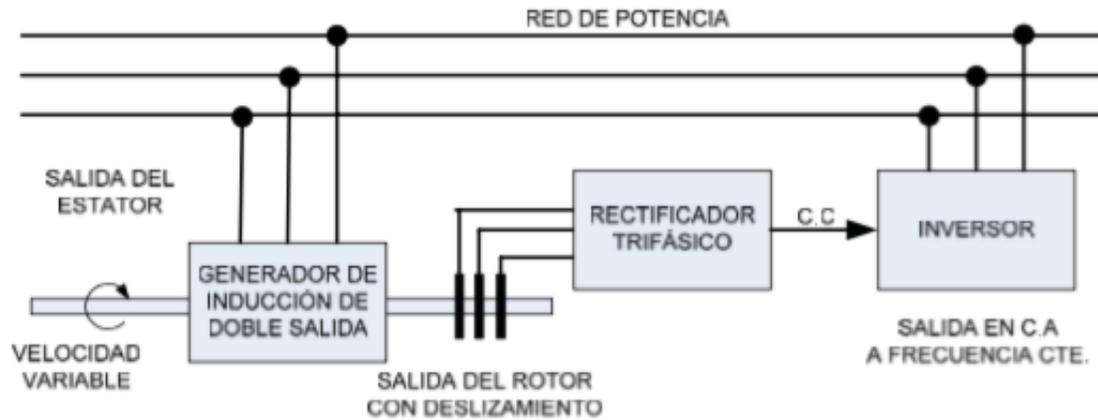


Figura 3-11 Generador de inducción doblemente alimentado.

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 3-12).

Ventajas:

- No hay problemas de regulación de frecuencia.
- Más económicas que la máquina de corriente continua.

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

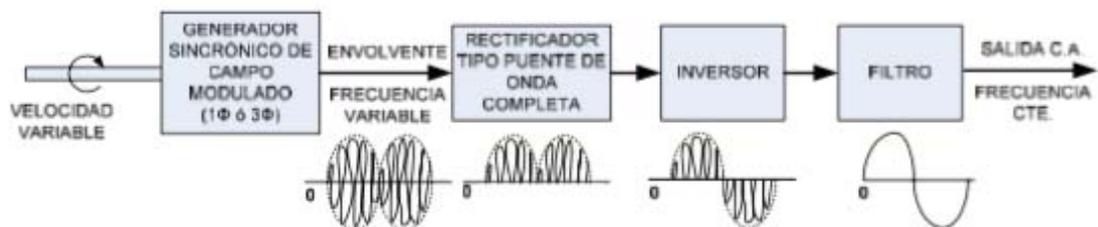


Figura 3-12 Generador sincrónico de campo modulado

3.4 Sistema recomendado para la aplicación

El sistema de conversión mecánica eléctrica para un 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 o a la red. 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. Por el lado de la independencia de la red eléctrica y la cantidad de máquinas, se descarta la opción del generador de inducción doblemente alimentado y el generador sincrónico de campo modulado.

Finalmente, dada su simplicidad y la posibilidad de un control relativamente fácil sobre la magnitud de la tensión generada, la utilización de un sistema de 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 una mayor eficiencia.

Ajustando el diagrama de la Figura 3-10 a los componentes que mejor se acomodan a nuestros requerimientos, se obtiene la configuración de la Figura 3-13.

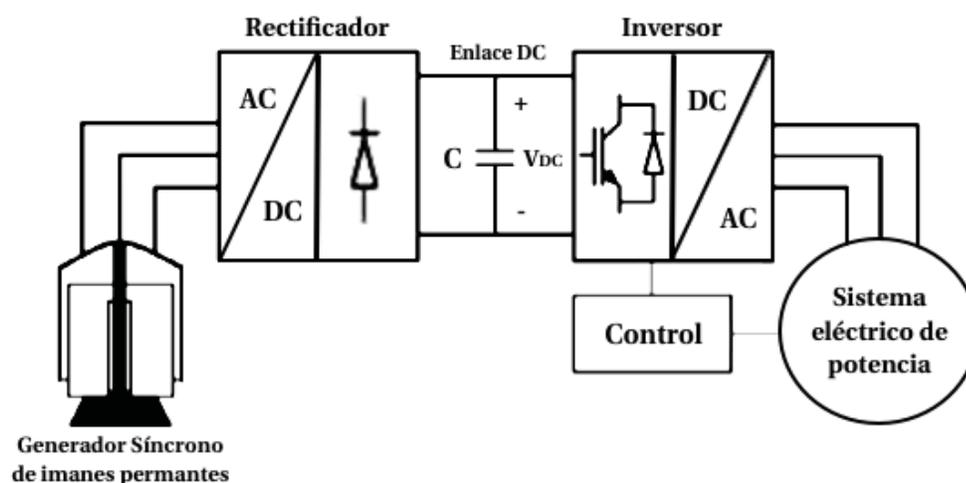


Figura 3-13: Sistema recomendado para la aplicación de un generador undimotriz.

4 Optimización del diseño

De forma genérica, puede definirse la optimización como aquella ciencia encargada de determinar las mejores soluciones a problemas matemáticos que a menudo modelan una realidad física. Los problemas complejos de optimización multidimensionales, no lineales y altamente multimodales pueden encontrarse en ingeniería, economía, geofísica y prácticamente en todos los campos de la ciencia. En este aspecto, la optimización numérica ha adquirido mucha atención entre la comunidad científica durante las últimas décadas, y quizás lo más confuso para el diseñador reside en decidir qué algoritmo de optimización se ajusta mejor a las características del problema físico bajo análisis [37].

El objetivo que se persigue al resolver un problema de optimización es encontrar la mejor solución con un coste computacional razonable. Aunando estas dos premisas puede establecerse una clasificación preliminar de los métodos de optimización en dos grandes bloques, distinguiendo por un lado los métodos de búsqueda local y, por otro, las así denominadas técnicas de optimización global. Los métodos locales obtienen la mejor solución posible en las inmediaciones del punto inicial, atribuyéndoseles una fuerte dependencia del punto de arranque del algoritmo.

La mayor parte de los métodos locales utilizan la información del gradiente, requieren el cálculo de derivadas y, en definitiva, imponen sobre el espacio de búsqueda unas condiciones de diferenciabilidad y continuidad, difíciles de garantizar y controlar en la práctica en gran parte de los problemas de diseño. En el extremo opuesto, las técnicas de optimización global exhiben una gran independencia de la naturaleza del espacio de soluciones y, a diferencia de las técnicas de búsqueda local, son capaces de atravesar un espacio de búsqueda con múltiples mínimos o máximos locales y alcanzar una solución global al problema, entendiendo como tal la mejor solución posible o una solución en las inmediaciones de la región que contiene a la solución óptima. Por otro lado, los métodos de optimización global exploran de forma exhaustiva el espacio de soluciones, sin aprovechar las características locales del espacio de búsqueda como ocurre al operar por ejemplo con gradientes, ralentizando así la convergencia [37].

4.1 Necesidad de optimizar

Dadas las características de la problemática que se enfrenta, diseñar el conjunto del convertidor undimotriz de manera adecuada para la zona donde se ubique geográficamente, se vuelve necesario poner mucha atención antes de tomar una decisión.

Como se mencionó en el Capítulo 2, dentro de las características de este tipo de energía, está la irregularidad de sus olas, sus cambios tanto de altura, periodo y dirección, todos factores importantes para determinar las dimensiones y magnitudes para las cuales se diseñarán los componentes, buscando siempre hacerlo de la manera más eficiente posible.

Si se piensa en la línea azul de la Figura 4-1 como el perfil de la altura que tiene una ola respecto al tiempo. Ahora se supone que se realiza un diseño de tal manera que sea el adecuado para las alturas promedio que ocurren en determinado lapso de tiempo, se debería basar el diseño en la línea amarilla (D2). Otra manera de pensar debido a la Ecuación (2-4), la cual demuestra que la altura de la ola influye cuadráticamente, sería focalizándonos en las crestas de altura (línea verde (D1)), en donde se obtendrán mayores bloques de energía, pero estos sólo ocurrirían en unos pocos momentos del día. Por el contrario, si los intereses van por menores potencias, pero durante largos periodos del día, la mejor alternativa sería la línea roja (D3).

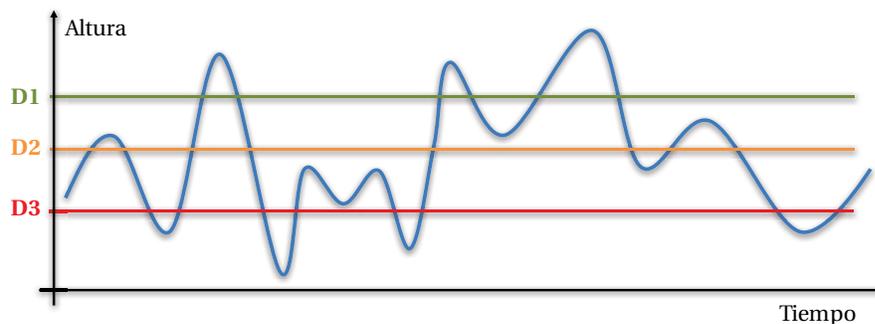


Figura 4-1: Perfil de ola respecto al tiempo.

A raíz del ejemplo planteado anteriormente y entendiendo que las inversiones que se realicen tanto en los equipos como en el capital humano, deberán ser eficientes respecto al beneficio que se obtenga de esta, es decir a la cantidad de energía que se pueda obtener del dispositivo undimotriz. Se debe hacer uso de las herramientas que entrega la ingeniería para dar con la mejor opción.

Dentro de todas las alternativas de las cuales se dispone para optimizar, y dado a las características que este problema presenta, se ha optado por realizar el proceso a través de la técnica heurística de un Algoritmo Genético, el cual se desarrollará en la plataforma del software Matlab, contando con la integración de hojas de cálculo para la lectura de datos.

4.2 Algoritmo genético (AG)

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a estos los mismos métodos de la evolución biológica: selección basada en la población, reproducción sexual y mutación [38].

En el campo de la informática de inteligencia artificial, un algoritmo genético (GA) es una heurística de búsqueda que imita el proceso de selección natural. Esta heurística (también llamada meta heurística) se utiliza rutinariamente para generar soluciones útiles a problemas de búsqueda y optimización. Los algoritmos genéticos pertenecen a la clase más grande de los algoritmos evolutivos (AE), que generan soluciones a problemas de optimización con técnicas inspiradas en la evolución natural, como la herencia, mutación, selección y cruce [39].

Los algoritmos genéticos encuentran aplicación en bioinformática, filogenética, ciencias de la computación, ingeniería, economía, química, fabricación, matemáticas, física, y otros campos.

En la Figura 4-2 se puede observar un diagrama de flujo con las distintas etapas propias del Algoritmo Genético, las cuales corresponden a: i: inicialización, $f(x)$: evaluación, ?: condición de termino, Se: selección, Cr: cruzamiento, Mu: mutación, Re: reemplazo, X^* : mejor solución.

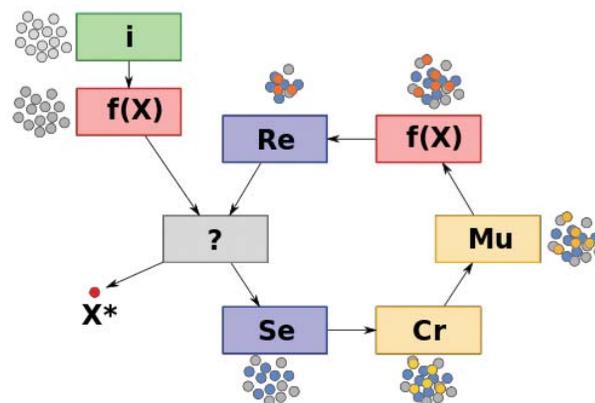


Figura 4-2: Diagrama de flujo para Algoritmos Genéticos [39].

4.2.1 Metodología

En un AG, una población de soluciones candidatas (llamadas individuos, criaturas o fenotipos) a un problema de optimización se desarrolla hacia mejores soluciones. Cada solución candidata tiene un conjunto de propiedades (sus cromosomas o genotipos) que pueden ser mutados y alterados. Tradicionalmente, las soluciones se representan en binario como cadenas de ceros y unos, pero también son posibles otras codificaciones [39].

La evolución suele partir de una población de individuos generados al azar, y es un proceso iterativo, con la población en cada iteración llamada generación. En cada generación, se evalúa la aptitud de cada individuo en la población. La aptitud suele ser el valor de la función objetivo en

el problema de optimización que se está resolviendo. Los individuos más aptos son seleccionados estocásticamente de la población actual, y el genoma de cada individuo es modificado (recombinado y posiblemente mutado al azar) para formar una nueva generación. La nueva generación de soluciones candidatas se utiliza entonces en la siguiente iteración del algoritmo. Comúnmente, el algoritmo termina cuando se ha producido un número máximo de generaciones, o se ha alcanzado un nivel de aptitud satisfactorio para la población.

Un algoritmo genético típico requiere:

- Una representación genética del dominio de la solución.
- Una función de aptitud para evaluar el dominio de la solución.

Una representación estándar de cada solución candidata es como una matriz de bits. Las matrices de otros tipos y estructuras se pueden utilizar esencialmente de la misma manera. La propiedad principal que hace convenientes estas representaciones genéticas es que sus partes son fácilmente alineadas debido a su tamaño fijo, lo que facilita las operaciones de cruce simple. También se pueden usar representaciones de longitud variable, pero la implementación del entrecruzamiento cromosómico es más compleja en este caso. Las representaciones arborescentes se exploran en la programación genética y las representaciones en forma de gráfico se exploran en la programación evolutiva. Una mezcla de ambos cromosomas lineales y árboles se explora en la programación de expresión genética.

Una vez que se define la representación genética y la función de acondicionamiento físico, un AG procede a inicializar una población de soluciones y luego a mejorarla mediante la aplicación repetitiva de los operadores de mutación, entrecruzamiento cromosómico, inversión y selección.

4.2.2 Inicialización

El tamaño de la población depende de la naturaleza del problema, pero normalmente contiene varios cientos o miles de posibles soluciones. A menudo, la población inicial se genera aleatoriamente, permitiendo toda la gama de posibles soluciones (el espacio de búsqueda). Ocasionalmente, las soluciones pueden ser "sembradas" en áreas donde es probable encontrar soluciones óptimas.

4.2.3 Selección

Durante cada generación sucesiva, una parte de la población existente se selecciona para criar una nueva generación. Las soluciones individuales se seleccionan a través de un proceso basado en la aptitud, donde las soluciones de acondicionamiento (como medido por una función de acondicionamiento físico) son típicamente más probables de ser seleccionadas. Ciertos métodos de selección evalúan la aptitud de cada solución y preferentemente seleccionan las mejores soluciones. Otros métodos califican sólo a una muestra aleatoria de la población, ya que el proceso anterior puede llevar mucho tiempo.

La función de fitness se define sobre la representación genética y mide la calidad de la solución representada. La función de acondicionamiento físico depende siempre del problema.

En algunos problemas, es difícil o incluso imposible definir la expresión de la condición física. En estos casos, se puede utilizar una simulación para determinar el valor de la función de aptitud de un fenotipo (por ejemplo, la dinámica de fluidos computacional se usa para determinar la resistencia al aire de un vehículo cuya forma se codifica como fenotipo).

4.2.4 Operadores genéticos

El siguiente paso es generar una población de segunda generación, de soluciones de las seleccionadas a través de una combinación de operadores genéticos: cruza (también llamado crossover o recombinación) y mutación.

Para cada nueva solución que se ha producido, se ha seleccionado un par de soluciones "padre" para la cría de la agrupación seleccionada previamente. Al producir una solución de "cría" usando los métodos de cruza y mutación arriba mencionados, se crea una nueva solución que típicamente comparte muchas de las características de sus "padres". Se seleccionan nuevos padres para cada nueva cría, y el proceso continúa hasta que se genere una nueva población de soluciones de tamaño apropiado. Aunque los métodos de reproducción que se basan en el uso de dos padres son más "biología inspirada", algunos temas de investigación sugieren que más de dos "padres" puedan generar cromosomas de mayor calidad.

Estos procesos finalmente resultan en la siguiente generación de población de cromosomas, que es diferente a la generación inicial. En general, la aptitud física promedio se ha incrementado por este procedimiento para la población, ya que sólo los mejores organismos de la primera generación son seleccionados para la cría, junto con una pequeña proporción de soluciones menos aptas. Estas soluciones menos aptas aseguran la diversidad genética dentro del grupo genético de los padres y, por lo tanto, aseguran la diversidad genética de la siguiente generación de hijos.

Una tasa de mutación muy pequeña puede conducir a la deriva genética. Una tasa de recombinación que es demasiado alta puede conducir a la convergencia prematura del algoritmo genético. Una tasa de mutación demasiado alta puede conducir a la pérdida de buenas soluciones, a menos que se utilice una selección elitista.

4.2.5 Terminación

Este proceso generacional se repite hasta que se alcanza una condición de terminación. Las condiciones de terminación comunes son:

- Se encuentra una solución que satisface los criterios mínimos.
- Se alcanza un número fijado de generaciones.
- Se alcanza el presupuesto asignado (tiempo de cálculo / dinero).
- La aptitud de la solución de la clasificación más alta está alcanzando o ha alcanzado una meseta tal que las sucesivas iteraciones ya no producen mejores resultados.
- Inspección manual.
- Combinaciones de las anteriores.

5 Desarrollo de algoritmo para optimización

Una vez seleccionado el tipo de algoritmo que se utilizará para la optimización, se determinan las distintas variables que lo compondrán, cuáles serán los datos de entrada y salida, la(s) función(es) objetivo, la codificación que se empleara, además de todo lo necesario para entender el comportamiento del algoritmo.

5.1 Presentación de Algoritmo de Optimización (A.O.)

Para llevar a cabo el desarrollo del algoritmo de optimización se ha seleccionado la plataforma Matlab, ya que como es sabido, es una herramienta sumamente poderosa al momento de procesar datos y en la obtención de resultados.

Si bien se tiene cubierto el software que realizara el trabajo pesado, este necesita que se le ingresen datos para procesarlos, estos pueden ser miles de miles, por lo que para facilitar esta tarea, es que se ha optado por complementar el trabajo de Matlab con Microsoft Excel, ya que es una herramienta conocida y de uso común.

5.2 Descripción de A.O.

Si bien en el Capítulo 3.4 se dio a conocer cuál era el diseño que se recomienda, este solo toma en cuenta los componentes, no considerando las magnitudes, potencias, costos y configuraciones, las cuales juegan un rol fundamental para el éxito de un proyecto, sobre todo considerando que estas dependerán del lugar donde se quiera instalar el dispositivo.

5.2.1 Índice de optimización

Primero se analizarán las variables que nos interesa optimizar, es decir la Función Objetivo (F.O.). Para que el Algoritmo de Optimización sea más completo, se toma la decisión de no limitar a una única Fitness Function, es decir, que junto con la entrada de datos, le indique al software bajo cual parámetro se desea que optimice los datos.

Después de estudiar cuales serían las mejores opciones, se determinaron tres alternativas para optimizar:

- La menor relación existente entre la energía generada y el costo de inversión.
- El mayor valor actual neto (VAN) que se pueda obtener.
- El menor tiempo de retorno de la inversión en años.

Se obtuvo de esta forma, tres distintas perspectivas para la posterior toma de decisión.

5.2.2 Escenarios para la distribución de componentes

El otro factor de suma importancia es la ubicación que los componentes tendrán, es decir, de qué forma se distribuirán entre la costa y el punto en el mar de donde obtendrán la energía.

Bajo la configuración que ilustro la Figura 3-13, el algoritmo de optimización será capaz de determinar la mejor alternativa para la conexión de estos, dentro de cuatro escenarios posibles, los cuales se describen a continuación a través de imágenes.

Para la Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 y Figura 5-4, la simbología de los recuadros es la siguiente; G: Generador, R: Rectificador, C: Capacitor (o Condensador), I: Inversor, C.C.: Corriente Continua, C.A.: Corriente Alterna.

Se tomó para este ejemplo la existencia de 3 unidades generadoras.

Escenario 1

El primer escenario dentro de los cuatro que el algoritmo evaluará es el que se muestra en la Figura 5-1, en donde cómo se puede observar, tanto el Generador como el Rectificador se encuentran en alta mar y transmiten en corriente continua la energía hasta la costa, en donde es recibida por el Capacitor y luego Inversor, para luego ser inyectada a la red.

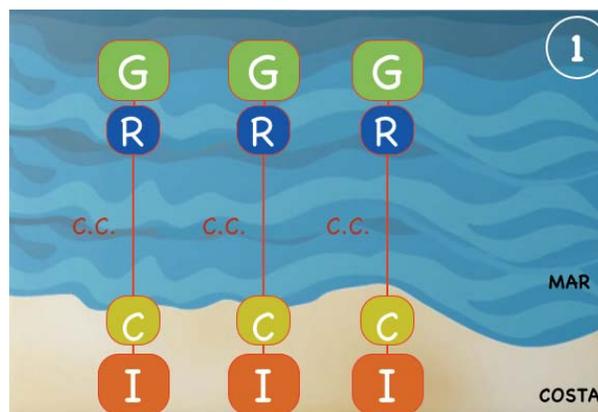


Figura 5-1: Escenario 1 de A.O..

Escenario 2

El siguiente escenario, el de la Figura 5-2, muestra toda la distribución en altamar y el tramo más extenso, el que los separa de la costa, es transmitido en corriente alterna. En este caso y en el anterior, son sistemas totalmente independientes el uno del otro.

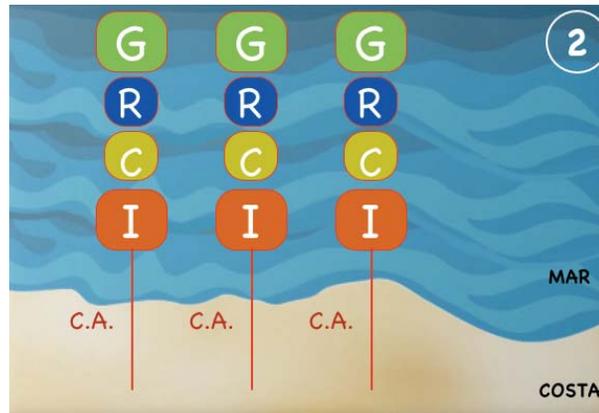


Figura 5-2: Escenario 2 de A.O..

Escenario 3

Como se puede apreciar en la Figura 5-3, ahora se está frente a un escenario que posee un BUS DC, al cual se conectan los rectificadores y varios generadores salen a la costa a través de un único cable en corriente continua, luego en la tierra firme, se produce la transformación de corriente continua a alterna, por parte del inversor y posterior inyección a la red.

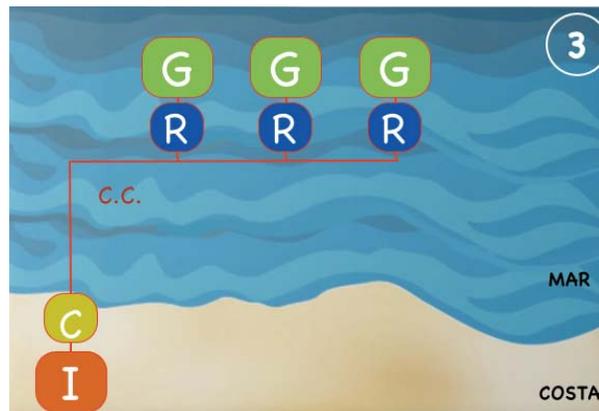


Figura 5-3: Escenario 3 de A.O..

Escenario 4

El cuarto y último escenario en el cual el algoritmo buscara optimizar los resultados, es el mostrado en la Figura 5-4, donde nuevamente se encuentran todos los dispositivos en altamar, pero esta vez no se encuentran independientes, si no más bien con un BUS DC, el inversor cruza el mar hasta llegar a la costa en corriente alterna.

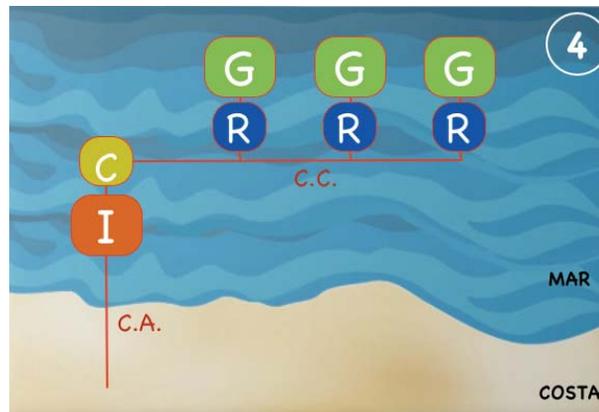


Figura 5-4: Escenario 4 de A.O..

En este punto en donde ya se ha dado a conocer la forma en que trabajará el algoritmo de optimización, se puede proceder a explicar cuáles serán los componentes de este.

5.3 Componentes A.O.

5.3.1 Variables de entrada

Entre los datos con los que se alimentará este algoritmo, se tendrá la información referida a las olas, y los detalles sobre los dispositivos que se probarán:

Tren de olas:

- Altura
- Periodo
- Registro temporal

Costos y potencia:

- Dispositivos (Generador, Inversor, Capacitor, Rectificador)

Datos generales:

- Precio km conductor CC y CA
- Precio venta energía
- Plazo en años para inversión
- Rendimiento convertidor undimotriz
- Costo por metro de longitud del convertidor
- Longitud del conductor en kilómetros
- Longitud máxima del convertidor
- Cantidad máxima de módulos generadores
- Tasa de descuento (VAN)
- Índice de optimización (descrito en sección 5.2.1)

5.3.2 Función objetivo

También conocida como “*fitness function*”, esta vendrá dada por el índice de optimización que se ingresa como dato de entrada, que estará con la siguiente nomenclatura:

- **\$/kWh**: La menor relación existente entre la energía generada y el costo de inversión.
- **VAN**: El mayor valor actual neto que se pueda obtener.
- **PayBack**: El menor tiempo de retorno de la inversión en años.

5.3.3 Variables de salida

Las variables que se esperan obtener serán correspondientes a la configuración óptima para los datos ingresados, los valores que resulten darán detalles de los componentes a utilizar.

- Cantidad de módulos.
- Longitud convertidor.
- Generador, Inversor, Capacitor, Rectificador.
- Escenario en el cual están involucrados los componentes anteriores.

5.3.4 Codificación

La codificación utilizada será la siguiente:

- [(Unidades ; Longitud ; Generador ; Inversor ; Rectificador ; Capacitor)]

La Figura 5-5: Diagrama de algoritmos muestra en diagrama en el cual se da a conocer el modo de operar de nuestro de algoritmo de optimización con las variables anteriormente descritas.

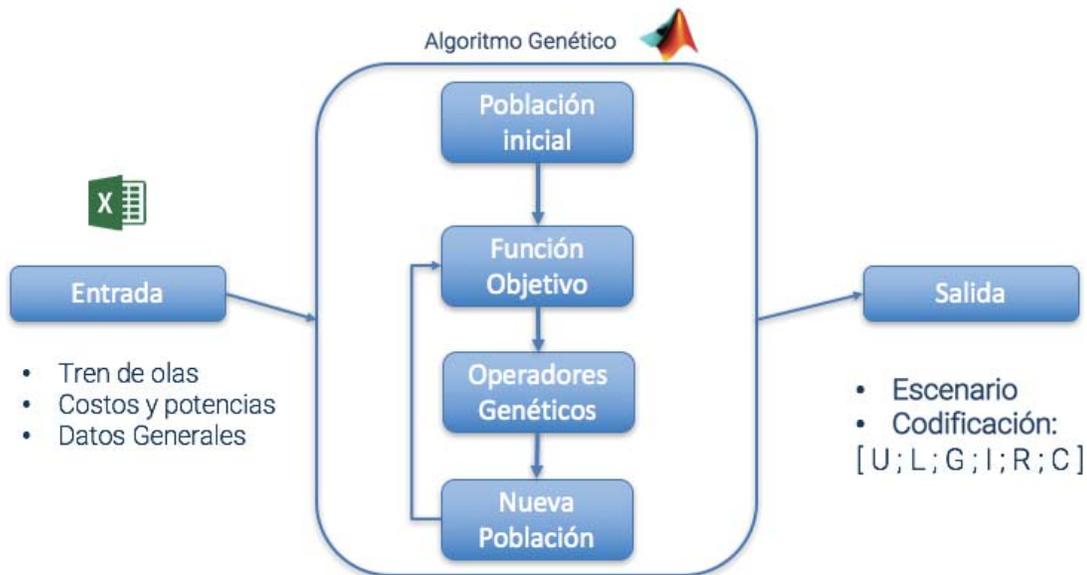


Figura 5-5: Diagrama de algoritmo.

6 Aplicación en la V región

En concordancia con el objetivo general propuesto, el proceso de este trabajo de investigación se desarrolló para que su aplicación fuese en la Quinta Región de Chile, es por esto que se llevarán a cabo los análisis en esta locación.

Se analizará la viabilidad de la instalación de generadores undimotrices en dos puntos de la quinta región, a través de los cuales se espera obtener los primeros avances y nociones que se deben considerar para llevar a cabo un proyecto de este tipo.

En primera instancia estas dos locaciones, serán elegidas de forma aleatoria, cercanas a la costa y con algún punto de referencia de fácil ubicación.

Los de datos del oleaje, serán extraídos gracias al departamento de geofísica de la Universidad de Chile, a través de la herramienta del explorador de energía marina [40].

Se ha optado por tomar el puerto de Valparaíso y el puerto de San Antonio como referencias para el presente análisis.



Figura 6-1: Izquierda: Puerto de San Antonio. Derecha: Puerto de Valparaíso.

6.1 Metodología y Consideraciones

A continuación, se describirán dos ítemes esenciales para los análisis, ya que estos pueden alterar los resultados, para bien o para mal. Cabe destacar que muchas de las consideraciones acá incluidas se determinaron de manera empírica o tras prueba y error.

6.1.1 Metodología

Antes de ejecutar el código, se seguirá la siguiente Metodología:

- Se realizarán los análisis para las tres alternativas de optimización:
 - La menor relación existente entre la energía generada y el costo de inversión.
 - El mayor valor actual neto (VAN) que se pueda obtener.
 - El menor tiempo de retorno de la inversión en años.
- Una vez obtenidos los resultados tanto para el caso de Valparaíso como para el de San Antonio, se realizará una comparación y análisis de estos, para lograr determinar una conclusión.
- Luego se realizarán análisis para distintos periodos de tiempo (cantidad de datos ingresados), esto con el fin de esclarecer el orden de magnitud bajo el cual se puede tornar viable un proceso de optimización.
- El proceso de comparativa para esta etapa, se verá envuelto en un cruce de los resultados obtenidos y las proyecciones en términos temporales para los distintos casos.

6.1.2 Consideraciones

En lo que respecta a las consideraciones, tendremos las siguientes:

- Para el estudio, la cantidad máxima de unidades o módulos será “3”.
- La longitud máxima del convertidor será de 5.00 mts.
- Los registros se encuentran cada una hora.
- Para el AG se consideró un tamaño de población de 100.
- Para el AG se consideró la selección “estocástica uniforme”.
- Para el AG se consideró un cruce “disperso”.
- Para el AG se consideró un 5% de elitismo.
- Para el AG se consideró un número máximo de 200 generaciones.
- Para el AG se consideró que se detenga si durante 50 valores, no hay variación.
- Se estimó en USD 750 cada metro de longitud del convertidor.
- El precio de cada km de conductor CC se estimó en USD 1.500.
- El precio de cada km de conductor CA se estimó en USD 2.000.
- El precio de venta de energía se estimó en USD 0,1333.
- La tasa de descuento para el caculo del VAN, será del 10%.
- El Plazo considerado para los cálculos de la inversión, será de 20 años.

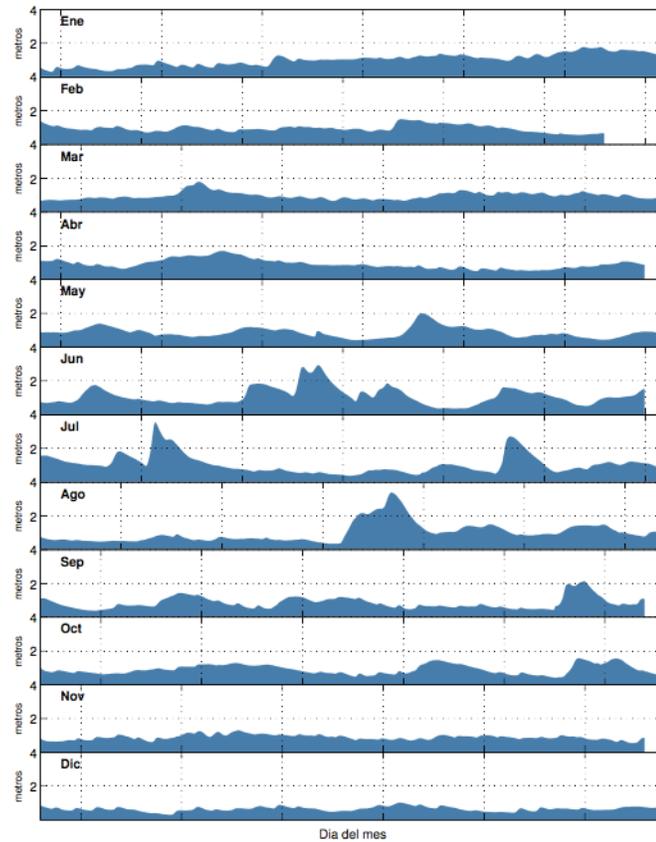


Figura 6-3: Altura significativa durante el año 2010, para Valparaíso.

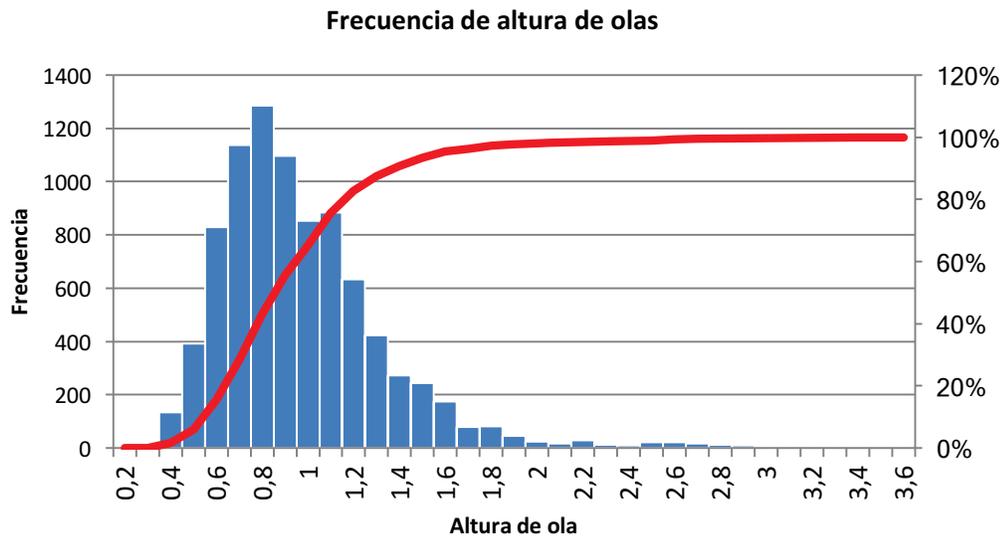


Figura 6-4 : Histograma de la altura de las olas para el año 2010, Valparaíso.

De donde se aprecia que la gran mayoría de las olas ronda entre los 0,6 y 1 metro de altura.

6.2.3 Aplicando algoritmo

Como bien se explicó el funcionamiento del algoritmo de optimización en el Capítulo 5.2 , y luego en la sección 6.1, se dieron a conocer la metodología y consideraciones bajo las cuales se realizarán los estudios. Se procede a ejecutar el código creado en Matlab con la recopilación de datos que se obtuvieron del Explorador Marino [40].

Análisis por índices de optimización

La Tabla 6-2, resume los resultados anuales obtenidos para el caso de Valparaíso, el que a partir del reporte que se configuro para que genere una vez terminado el procesamiento de datos (dichos reportes se pueden revisar en el Apéndice A). Se dan a conocer los resultados más relevantes para las 3 alternativas de optimización, es decir, los índices de F.O. (Función Objetivo o Fitness Function).

Tabla 6-2: Resultado al optimizar caso Valparaíso.

Indice F.O.	USD/kWh	VAN	Payback
Inversión Total (USD)	28.434	47.940	28.412
Energía generada (kWh)	95.783	128.666	95.700
Relación USD/kWh	0.2969	0.3726	0.2969
VAN (USD) (Tasa al 10%)	80.021	97.749	79.950
TIR (%)	44.78	35.62	44.77
PayBack (años)	3.23	3.8	3.23
Codificación	[3 ; 5.00 ; 4 ; 12 ; 2 ; 3]	[3 ; 5.00 ; 5 ; 10 ; 2 ; 3]	[3 ; 4.99 ; 4 ; 12 ; 2 ; 3]
Potencia Generador (kW)	5	10	5
Escenario	3	1	3

Análisis por periodos de tiempo

Como se planteó en el capítulo 6.1.1 donde parte de la metodología era realizar pruebas con distintos periodos de tiempo, dando una nueva perspectiva de la cantidad de datos que vuelven confiable un proceso de optimización mediante el análisis propuesto.

Análisis durante un día (Lunes 05 de Julio de 2010)

```

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:      3
Longitud del convertidor (mt):         1.44
El Generador número:                   4
El Rectificador número:                 1
El Capacitor número:                   3
El Inversor número:                     12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC
-----
La energía generada es de: 212.46 [kWh]
La potencia máxima generada es: 11.53 [kW]
En su(s) [ 3 ] módulo(s).
Alcanzada en [ 1 ] hora(s):
[2]
-----
El costo total de la inversión es de:
US$ 20379.00
La relacion de dolares por kilowatt-hora
es: 95.9199 [US$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de -22.49 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US$ -20138.43
El Período de recuperación es de:
999.00 años ( 999 años, 0 meses, 0 días )
-----
Se analizo un total de: 24 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 10.182 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 113

```

Figura 6-5 : Reporte obtenido por el algoritmo aplicado a un día en Valparaíso.

Análisis durante una semana (Lunes 05 al Domingo 11 de Julio de 2010)

```

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:      3
Longitud del convertidor (mt):         3.69
El Generador número:                   4
El Rectificador número:                 1
El Capacitor número:                   3
El Inversor número:                     12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC
-----
La energía generada es de: 2021.09 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [ 3 ] módulo(s).
Alcanzada en [ 30 ] hora(s):
[2 5 8 11 14 17 20 23 41 44]
-----
El costo total de la inversión es de:
US$ 25441.50
La relacion de dolares por kilowatt-hora
es: 12.5880 [US$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de -11.72 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US$ -23153.01
El Período de recuperación es de:
999.00 años ( 999 años, 0 meses, 0 días )
-----
Se analizo un total de: 168 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 18.528 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 98

```

Figura 6-6: Reporte obtenido por el algoritmo aplicado a una semana en Valparaíso.

Análisis durante un mes (Julio de 2010)

```

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:      3
Longitud del convertidor (mt):         4.76
El Generador número:                   4
El Rectificador número:                 1
El Capacitor número:                   3
El Inversor número:                     12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC
-----
La energía generada es de: 8266.90 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [ 3 ] módulo(s).
Alcanzada en [ 111 ] hora(s):
[2  5  8  11  14  17  20  23  26  29]
-----
El costo total de la inversión es de:
US$ 27849.00
La relacion de dolares por kilowatt-hora
es: 3.3687 [US$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de -2.15 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US$ -18488.35
El Periodo de recuperación es de:
999.00 años ( 999 años,  0 meses,  0 días )
-----
Se analizo un total de: 744 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 38.927 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 124

```

Figura 6-7: Reporte obtenido por el algoritmo aplicado a un mes en Valparaíso.

Análisis durante un año (2010)

```

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:      3
Longitud del convertidor (mt):         5.00
El Generador número:                   4
El Rectificador número:                 2
El Capacitor número:                   3
El Inversor número:                     12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC
-----
La energía generada es de: 95782.82 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [ 3 ] módulo(s).
Alcanzada en [ 1203 ] hora(s):
[281 284 287 290 293 296 299 302 311]
-----
El costo total de la inversión es de:
US$ 28434.00
La relacion de dolares por kilowatt-hora
es: 0.2969 [US$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de 44.78 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US$ 80021.27
El Periodo de recuperación es de:
3.23 años ( 3 años,  2 meses, 23 días )
-----
Se analizo un total de: 8760 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 1921.870 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 169

```

Figura 6-8: Reporte obtenido por el algoritmo aplicado a un año en Valparaíso.

6.3 San Antonio

6.3.1 Ubicación

Como segundo punto a evaluar, se considera una ubicación que se encuentra aproximadamente a 1.500 metros al oeste del puerto de San Antonio, como se puede observar en la Figura 6-9 , ubicado más exactamente en las coordenadas de la Tabla 6-3.

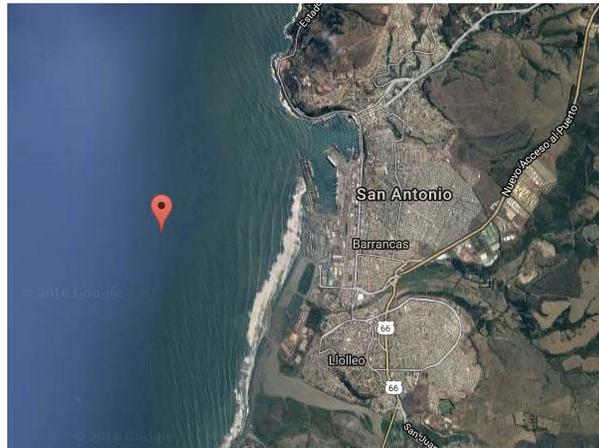


Figura 6-9 Ubicación cercana al puerto de San Antonio, utilizada para análisis de datos.

Tabla 6-3 Coordenadas del sitio seleccionado cercano a puerto de San Antonio.

Latitud	33.60 S
Longitud	71.65 O

6.3.2 Información de las olas

Como se mencionó anteriormente, la información relacionada a la medición de las olas será extraída del sitio del departamento de geofísica de la universidad de Chile, a través de la herramienta del explorador de energía marina [40].

En la Figura 6-10 se puede ver la serie de tiempo de la altura significativa de las olas para todo el año 2010.

Para tener un mejor entendimiento y otra perspectiva, se ha realizado un histograma con la frecuencia de ocurrencia de la altura de las olas, cabe destacar que para este análisis se utilizó la totalidad de los datos existentes para el 2010 (8760 datos). Ver Figura 6-11.

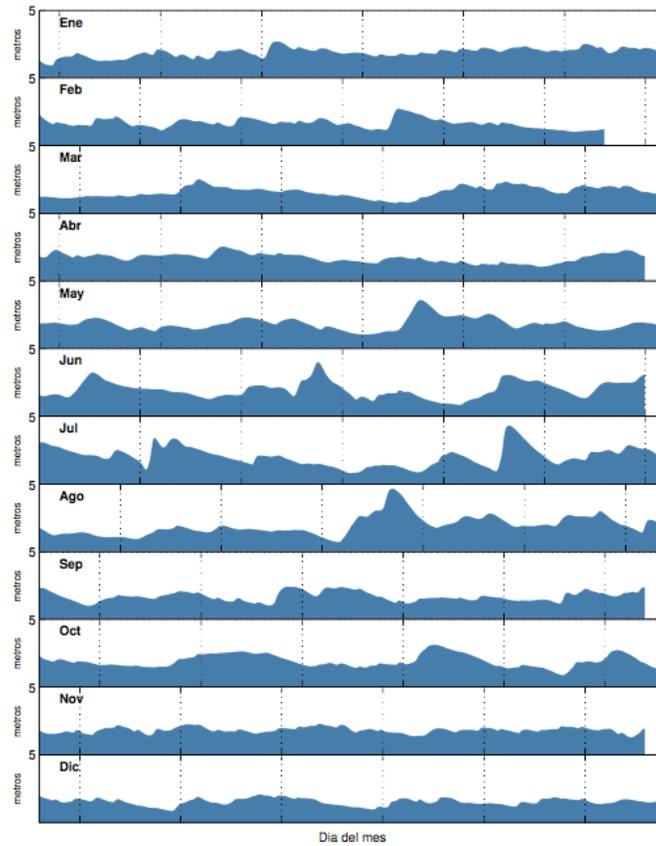


Figura 6-10: Altura significativa durante el año 2010, para San Antonio.

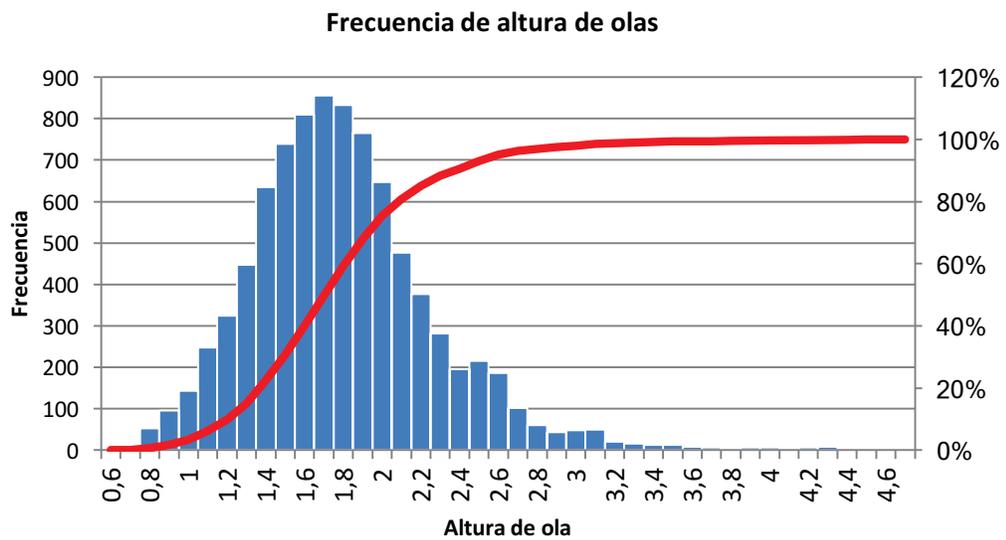


Figura 6-11 : Histograma de la altura de las olas para el año 2010, San Antonio.

De donde apreciamos que la gran mayoría de las olas ronda entre los 1,6 y 2 metro de altura.

6.3.3 Aplicando algoritmo

Análogamente a la sección 6.2.3, se realiza el análisis para el segundo caso que se propuso, está vez en las cercanías del puerto de San Antonio. Las alturas de las olas y los periodos de estas corresponden a los datos recabados del Explorador Marino [40].

Análisis por índices de optimización

La Tabla 6-2, resume los resultados obtenido para el caso de San Antonio, el que a partir del reporte que se configuro para que genere una vez terminado el procesamiento de datos (dichos reportes se pueden revisar en el Apéndice B). Se dan a conocer los resultados más relevantes para las 3 alternativas de optimización, es decir, los índices de F.O. (Función Objetivo o Fitness Function).

Tabla 6-4: Resultado al optimizar caso San Antonio.

Indice F.O.	USD/kWh	VAN	Payback
Inversión Total (USD)	23.116	51.090	23.116
Energía generada (kWh)	121.665	249.440	121.665
Relación USD/kWh	0.1900	0.2048	0.1900
VAN (USD) (Tasa al 10%)	114.646	231.352	114.646
TIR (%)	70.00	64.93	70.00
PayBack (años)	2.43	2.54	2.43
Codificación	[3 ; 2.19 ; 4 ; 12 ; 1 ; 3]	[3 ; 5.00 ; 5 ; 10 ; 2 ; 3]	[3 ; 2.19 ; 4 ; 12 ; 1 ; 3]
Potencia Generador (kW)	5	10	5
Escenario	3	1	3

Análisis por periodos de tiempo

Como se planteó en el capítulo 6.1.1 donde parte de la metodología era realizar pruebas con distintos periodos de tiempo, dando una nueva perspectiva de la cantidad de datos que vuelven confiable un proceso de optimización mediante el análisis propuesto.

Análisis durante un día (Lunes 05 de Julio de 2010)

```

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:      3
Longitud del convertidor (mt):         1.44
El Generador número:                   4
El Rectificador número:                1
El Capacitor número:                   3
El Inversor número:                    12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC
-----
La energía generada es de: 356.25 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [ 3 ] módulo(s).
Alcanzada en [ 7 ] hora(s):
[2  5  8  11  14]
-----
El costo total de la inversión es de:
US$ 21429.00
La relacion de dolares por kilowatt-hora
es: 60.1524 [US$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de -20.26 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US$ -21025.62
El Período de recuperación es de:
999.00 años ( 999 años,  0 meses,  0 días )
-----
Se analizo un total de: 24 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 16.168 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 179

```

Figura 6-12 : Reporte obtenido por el algoritmo aplicado a un día en San Antonio.

Análisis durante una semana (Lunes 05 al Domingo 11 de Julio de 2010)

```

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:      3
Longitud del convertidor (mt):         1.64
El Generador número:                   4
El Rectificador número:                1
El Capacitor número:                   3
El Inversor número:                    12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC
-----
La energía generada es de: 2372.94 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [ 3 ] módulo(s).
Alcanzada en [ 43 ] hora(s):
[2  5  8  11  14  17  20  23  44  47]
-----
El costo total de la inversión es de:
US$ 21879.00
La relacion de dolares por kilowatt-hora
es: 9.2202 [US$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de -9.73 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US$ -19192.12
El Período de recuperación es de:
999.00 años ( 999 años,  0 meses,  0 días )
-----
Se analizo un total de: 168 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 22.942 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 140

```

Figura 6-13: Reporte obtenido por el algoritmo aplicado a una semana en San Antonio.

Análisis durante un mes (Julio de 2010)

```

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:      3
Longitud del convertidor (mt):         1.91
El Generador número:                   4
El Rectificador número:                 1
El Capacitor número:                   3
El Inversor número:                     12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC
-----
La energía generada es de: 10143.50 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [ 3 ] módulo(s).
Alcanzada en [ 184 ] hora(s):
[2  5  8  11  14  17  20  23  26  29]
-----
El costo total de la inversión es de:
US$ 22486.50
La relacion de dolares por kilowatt-hora
es: 2.2168 [US$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de 1.80 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US$ -11000.97
El Período de recuperación es de:
17.67 años ( 17 años,  8 meses,  0 días )
-----
Se analizo un total de: 744 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 31.383 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 87

```

Figura 6-14: Reporte obtenido por el algoritmo aplicado a un mes en San Antonio.

Análisis durante un año (2010)

```

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:      3
Longitud del convertidor (mt):         2.20
El Generador número:                   4
El Rectificador número:                 2
El Capacitor número:                   3
El Inversor número:                     12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC
-----
La energía generada es de: 121783.62 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [ 3 ] módulo(s).
Alcanzada en [ 2134 ] hora(s):
[38  41  44  47  50  53  56  113  116  119]
-----
El costo total de la inversión es de:
US$ 23184.00
La relacion de dolares por kilowatt-hora
es: 0.1904 [US$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de 69.86 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US$ 114712.08
El Período de recuperación es de:
2.43 años ( 2 años,  5 meses,  5 días )
-----
Se analizo un total de: 8760 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 1340.184 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 121

```

Figura 6-15: Reporte obtenido por el algoritmo aplicado a un año en San Antonio.

6.4 Comparativa

Ya concluidos los análisis por separado de ambos casos de estudio, se procede a realizar una comparativa entre las distintas situaciones planteadas. La Figura 6-16 resume y detalla en forma de tabla los datos más relevantes de los resultados obtenidos en las secciones 6.2.3 y 6.3.3, para el ítem del análisis por índices de optimización.

Posteriormente en el capítulo 6.4.2 se llevará a cabo las comparaciones para los casos del análisis por periodo de tiempo, tanto para la localidad de Valparaíso como la de San Antonio por separado.

A partir de estos ya se puede empezar a formar una idea respecto a que tan viable económicamente puede ser la implementación de la energía undimotriz en la quinta región de Chile.

6.4.1 Análisis por índice de optimización

A continuación, la Figura 6-16 toma los datos más relevantes de los reportes (principalmente de la Tabla 6-2 y la Tabla 6-4) y los muestra a través de un cuadro comparativo, facilitando de esta manera la comparación entre ambas ciudades y ordenado de acuerdo al criterio de optimización seleccionado

Índice F.O.	Ciudad	USD/kWh	VAN (Tasa al 10%)	PayBack (años)	TIR (%)	Codificación [U; L; G; I; R; C]
USD/kWh	Valparaíso	0.2969	80.021	3.23	44.78	[3 ; 5.00 ; 4 ; 12 ; 2 ; 3]
	San Antonio	0.1900	114.646	2.43	70	[3 ; 2.19 ; 4 ; 12 ; 1 ; 3]
VAN	Valparaíso	0.3726	97.748	3.80	35.62	[3 ; 5.00 ; 5 ; 10 ; 2 ; 3]
	San Antonio	0.2048	231.352	2.54	64.93	[3 ; 5.00 ; 5 ; 10 ; 2 ; 3]
Payback	Valparaíso	0.2969	79.950	3.23	44.77	[3 ; 4.99 ; 4 ; 12 ; 2 ; 3]
	San Antonio	0.1900	114.646	2.43	70	[3 ; 2.19 ; 4 ; 12 ; 1 ; 3]

Figura 6-16: Cuadro comparativo de casos de análisis por índice de optimización.

Si se observan detenidamente los resultados, se puede notar que las configuraciones que se obtuvieron para la optimización mediante la relación de dólares por energía, fue la misma que cuando se deseó obtener el menor tiempo de retorno de la inversión (payback). Así como de igual forma llama la atención que para el caso en que se quiso encontrar el mayor Valor Actual Neto, ambas regiones convergieron a la una configuración idéntica.

A primeras luces ya se puede ver una cierta ventaja de una localidad por sobre la otra, esto será abordado con mayor profundidad en las conclusiones.

Para los análisis comparativos que se realizaron a posteriormente se consideró solamente el índice de optimización del cociente dólares/energía, esto debido a que los otros restantes, al ser de índole financieros, necesitan de flujos de caja para llegar a valores dignos de análisis.

6.4.2 Análisis por periodos de tiempo

Dentro del cuadro comparativo, junto con incluir los resultados arrojados por el algoritmo, se realizaron las proyecciones de las configuraciones que entregó el software, dando de esa manera un mejor entendimiento de las ventajas de realizar el análisis en diferentes escenarios.

Para la Figura 6-17 y Figura 6-18 el recuadro rojo indica los valores obtenidos cuando se optimizo para ese periodo de tiempo (1 día, 1 semana, 1 mes, 1 año) y hacía la derecha de los cuadros se encuentran las proyecciones realizadas bajo la configuración otorgada por el recuadro rojo.

Comparativa temporal para Valparaíso

		Proyección				
		1 día	1 semana	1 mes	1 año	
Configuración Optimizada	1 día (5 kW)	[3; 1.44; 4; 12; 1; 3] US\$ 20.379	212 [kwh] 95,920 [US\$/kwh]	1.299 [kwh] 15,691 [US\$/kwh]	4048 [kwh] 5,034 [US\$/kwh]	41.225 [kwh] 0,494 [US\$/kwh]
	1 semana (5 kW)	[3; 3.69; 4; 12; 1; 3] US\$ 25.442	359 [kwh] 70,704 [US\$/kwh]	2.021 [kwh] 12,588 [US\$/kwh]	7.379 [kwh] 3,449 [US\$/kwh]	82.357 [kwh] 0,309 [US\$/kwh]
	1 mes (5 kW)	[3; 4.76; 4; 12; 1; 3] US\$ 27.849	360 [kwh] 77,358 [US\$/kwh]	2.181 [kwh] 12,770 [US\$/kwh]	8.267 [kwh] 3,369 [US\$/kwh]	93.711 [kwh] 0,297 [US\$/kwh]
	1 año (5 kW)	[3; 5.00; 4; 12; 2; 3] US\$ 28.434	360 [kwh] 78,983 [US\$/kwh]	2.208 [kwh] 12,880 [US\$/kwh]	8.420 [kwh] 3,377 [US\$/kwh]	95.783 [kwh] 0.296 [US\$/kwh]

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-17: Comparación de los resultados obtenidos por el algoritmo para Valparaíso.

Comparativa temporal para San Antonio

		Proyección				
		1 día	1 semana	1 mes	1 año	
Configuración Optimizada	1 día (5 kW)	[3; 1.44; 4; 12; 1; 3] US\$ 21.429	356 [kwh] 60,152 [US\$/kwh]	2.314 [kwh] 9,260 [US\$/kwh]	9.474 [kwh] 2,262 [US\$/kwh]	105.938 [kwh] 0,202 [US\$/kwh]
	1 semana (5 kW)	[3; 1.64; 4; 12; 1; 3] US\$ 21.879	360 [kwh] 60,784 [US\$/kwh]	2.373 [kwh] 9,220 [US\$/kwh]	9.809 [kwh] 2,231 [US\$/kwh]	111.918 [kwh] 0,195 [US\$/kwh]
	1 mes (5 kW)	[3; 1.91; 4; 12; 1; 3] US\$ 22.487	360 [kwh] 62,463 [US\$/kwh]	2.423 [kwh] 9,279 [US\$/kwh]	10.144 [kwh] 2,217 [US\$/kwh]	117.673 [kwh] 0,191 [US\$/kwh]
	1 año (5 kW)	[3; 2.20; 4; 12; 2; 3] US\$ 23.184	360 [kwh] 64,400 [US\$/kwh]	2.455 [kwh] 9,443 [US\$/kwh]	10.396 [kwh] 2,230 [US\$/kwh]	121.784 [kwh] 0,190 [US\$/kwh]

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-18: Comparación de los resultados obtenidos por el algoritmo para San Antonio.

Discusión y conclusiones

La principal problemática que se busca resolver en esta investigación es la realización de estudios de diseño del sistema eléctrico de un generador undimotriz, el cual permitiera el correcto funcionamiento para la obtención de energía de manera óptima dentro de las condiciones particulares de la quinta región. Este se logró y se potenció planteando la idea de integración a la matriz energética chilena a través de las nuevas legislaciones que han crecido en Chile, punto sumamente importante debido a la creciente demanda energética mundial y la cada vez más intensa necesidad de nutrir dicha demanda con energías limpias, es decir, con energías renovables no convencionales (ERNC).

Este trabajo además demostró que, a diferencia de cómo la mayor cantidad de la población piensa, cuando se habla de ERNC no solo existen la eólica y solar, gracias al mar, se puede tener una fuente constante de energía limpia, solo se debe saber aprovechar esta con la ayuda de herramientas de ingeniería.

En lo que respecta a las tecnologías existentes a nivel mundial, se posee una inmensa gama de opciones, para las distintas dificultades que se puedan enfrentar en zonas en particular, y eso queda respaldado al ver como equipos de chilenos ya muestran interés por el desarrollo de estas.

Se logró desarrollar un diseño eléctrico para que la obtención de la energía undimotriz no sea limitada por su intermitencia, eso en conjunto con la optimización de sus componentes para de esta manera aumentar el nivel de seguridad, la confiabilidad y el mayor beneficio para la sociedad.

Considerando las dos localidades planteadas para realizar los estudios, si bien en primera instancia resulta muy arriesgado optar por alguna de ellas, debido a que aún falta recolectar más datos y más importante aún, contar con parámetros más actualizados del océano en ambas zonas. Esto sin contar con la factibilidad geográfica para la implementación de un proyecto en una de estas locaciones, sin embargo, a priori el puerto de San Antonio se presenta como una alternativa más viable, debido que posee una mayor tasa de altura significativa de olas, lo que se traduce automáticamente en una mayor potencia disponible para su extracción, tomando en cuenta que los periodos de las olas en ambos casos, son de muy similares magnitudes.

Luego de ejecutar el Algoritmo de Optimización, se van despejando incertidumbres y a la vez permite que la decisión para considerar una alternativa por sobre la otra sea más clara. Esta va a depender del criterio que se desee utilizar para optimizar.

Cuando se incline por optimizar acorde al menor tiempo de retorno de la inversión (payback), la configuración del generador undimotriz obtenida será la misma, o muy similar, a la que se utilizaría si lo que se quiere es la menor relación entre costo de inversión versus energía generada.

Si la opción deseada es realizar una optimización que sea determinada por el Valor Actual Neto (VAN), la configuración obtenida tanto para Valparaíso como para San Antonio será la misma, la cual, además, es la de mayor potencia obtenida en todos los resultados, siendo la única que alcanza los 10 kW por cada generador.

Ahora, si se observan las comparaciones temporales, en los distintos periodos de tiempo que se consideraron, se puede apreciar que para ambas localidades la relación de costo de inversión versus energía generada va disminuyendo a medida que la cantidad de datos ingresados aumenta, es decir, esto demuestra que mientras mayor sea el universo de datos donde trabaja, el algoritmo más certero será este al momento de buscar la solución. No obstante, se debe levantar la observación de que las diferencias presentadas entre el resultado obtenido con los datos de un mes y con los de un año son muy pequeñas. Por lo que, si se quiere llevar a cabo un proyecto de esta índole, probablemente el resultado no se vea afectado si se considera un periodo comprendido entre el mes y el año de recolección de datos.

Adicionalmente, con los resultados obtenidos, se valida la efectividad del algoritmo de optimización a la hora de recorrer los cuatro escenarios en busca de la mejor alternativa.

Respecto a la mirada que se puede dar a futuro para la continuidad de esta investigación, sería trabajar en más detalles técnicos y prácticos, tales como la consideración de un embriague mecánico de frenado, el cual esté capacitado para disminuir las revoluciones por minuto que el dispositivo pueda presentar producto de un oleaje muy intenso o marejadas, evitando de esta manera daños en el generador o cualquier otro componente del sistema. En la parte comercial se deberían ajustar los precios y potencias a los valores actuales al momento de ejecutar el algoritmo.

Bibliografía

- [1] J. Viqueira, «Redes Eléctricas, Tomo I,» UNAM, México, 2004.
- [2] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, Colombia: Mc Graw Hill, 2000.
- [3] A. Hasankhani, «Virtual Power Plant Management in Presence of Renewable Energy Resources,» Amirkabir University of Technology, Tehran, 2016.
- [4] CNE, «Norma técnica de conexión y operación de pmgd en instalaciones de media tensión,» Gobierno de Chile, Santiago, 2016.
- [5] S. M. G., «Recursos Renovables como Generación Distribuida en los Sistemas Eléctricos,» PUC, Santiago, 2005.
- [6] P. Haim, «Energía Undimotriz,» Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, 2010.
- [7] L. P. Cortes, «Tipos de generación de energía eléctrica usando las olas como fuente de energía primaria aplicación sistema undimotriz en Chile,» PUCV, Valparaíso, 2013.
- [8] N. B. Moya, «Sistema de conversión mecánica eléctrica para un generador undimotriz,» U. de Chile, Santiago, 2008.
- [9] B. C. d. Olmo, «Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores,» España, 2007.
- [10] P. I. Ereño, «Energías de las olas: Energías de las olas: Situación y Futuro,» Universidad de Coruña, Coruña, 2010.
- [11] ENDESA EDUCA, «Centrales eléctricas,» ENDESA EDUCA, [En línea]. Available: <http://www.endesaeduca.com/>. [Último acceso: 26 octubre 2016].

-
- [12] W. Jara, «Introducción a las ERNC,» ENDESA, Santiago, 2006.
- [13] R. Palma Behnke, «Las Energías Renovables No Convencionales en el Mercado Eléctrico Chileno,» CNE/GTZ, Santiago, 2009.
- [14] Comisión Nacional de Energía, «Reporte Sector Energético ERNC Julio,» Santiago, 2017.
- [15] Comisión Nacional de Energía, «Reporte sector energético Julio,» Santiago, 2017.
- [16] Ministerio de Energía, «Agenda de Energía. Un desafío país, progreso para todos,» Gobierno de Chile, Santiago, 2014.
- [17] J. Yadaicela, «Estudio técnico - económico sobre la implementación de generación distribuida en el sistema eléctrico ecuatoriano.,» Escuela politécnica nacional, Quito, 2011.
- [18] B. Herrera, «Pago por potencia firme a centrales de generación eólica,» Universidad de Chile, Santiago, 2006.
- [19] Ministerio de Energía, «DS N°101, que aprueba reglamento para medios de generación no convencionales y pequeñoó medios de generacion establecidos en la ley general de servicios eléctricos,» Gobierno de Chile, Santiago, 2015.
- [20] E. Morales, «Análisis De Un Dispositivo Oscilante Como Medio De Captación De Energía Undimotriz,» Universidad de Chile, Santiago, 2016.
- [21] S. Medel, «Estudio De Implantación De Tecnologías Mareomotrices Y Undimotrices Como Pequeños Medios De Generación Distribuida,» Universidad de Chile, Santiago, 2010.
- [22] CETO Wave, «CETO Wave Energy,» . [En línea]. Available: <http://www.ceto.com.au..> [Último acceso: 2016].
- [23] N. Bravo, «Sistema de conversión mecánica eléctrica para un generador undimotriz,» Universidad de Chile, Santiago, 2008.
- [24] P. Ibañez Ereño, «Energías de las olas: situación y futuro,» Tecnalia, Coruña, 2008.
- [25] Union Europea, «Ocean Energy: State of the Art,» SI Ocean, 2013.
- [26] Wave Energy AS, «Wave Energy,» [En línea]. Available: <http://www.waveenergy.no>.
- [27] Fundacion Chile, «Energía Undimotriz,» FCH, . [En línea]. Available: <http://aprendeconenergia.educarchile.cl>. [Último acceso: Diciembre 2016].

-
- [28] M. Previsic, «Offshore wave Energy Conversion Device,» Electricity Innovation Institut, , 2004.
- [29] Waves4Power, «Waves4Power,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.waves4power.com/>.
- [30] R. B. I. o. M. Enginners, «Offshore Wave Energy,» , , .
- [31] Enermark Ltda., «Análisis técnico de la tecnología de producción S.D.E. LTD (Israel) localización, perfil y términos de referencia para los estudios de prospección y obras.,» , Santiago, 2007.
- [32] A. Gomez, «Energías Marinas en Chile,» ADEMAR, , 2014.
- [33] ASME, «Evaluation Of The Potential Of Wave Energy In Chile,» , Estoril, 2008.
- [34] Fundación Chile, «Energías Marinas,» FCH, 2014.
- [35] M. Mañana, «Convertidores electrónicos de potencia,» Universidad de Cantabria.
- [36] D. Ruiz, «Introducción electrónica de potencia,» , Valparaíso, 2015.
- [37] J. Pérez, «Contribución a los métodos de optimización basados en procesos naturales y su aplicación a la medida de antenas en campo próximo,» Universidad de Cantabria, Santander, 2005.
- [38] V. Torrez, «Algoritmos Genéticos».
- [39] J. Calle, «Diseño de un Algoritmo para Evolucionar Redes Neuronales Artificiales mediante Algoritmos Genéticos,» UCSM, Arequipa, 2014.
- [40] Ministerio de Energía, «Explorador Marino,» [En línea]. Available: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [41] CIFES, «Reporte CIFES,» Gobierno de Chile, Santiago, 2016.
- [42] A. T. Council, Earthquake damage evaluation data for California. Technical report, Seismic Safety Commission, Applied Technology Council (ATC), California, 1995.
- [43] S. Fingerhuth, «Integridad académica,» Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Julio 2014. [En línea]. Available: <http://integridadacademica.cl/>. [Último acceso: 20 10 2015].
- [44] E. P. Wigner, «Theory of traveling wave optical laser,» *Phys. Rev.*, vol. 134, pp. A635-A646, 1965.

-
- [45] E. T. J. van Weert and R. K. Munro, «Informatics and the Digital Society: Social, ethical and cognitive issues: IFIP TC3/WG3.1&3.2 Open Conference on Social,» de *Ethical and Cognitive Issues of Informatics and ICT*, Dortmund, Germany, 2003.
- [46] M. Shell, «Preparation of papers for IEEE TRANSACTION and JOURNALS,» May 2007.
- [47] A. G. Tsipkin, V. Vodnev, G. G. Tsipkin y A. I. Samojv, *Fórmulas matemáticas: álgebra, geometría, análisis matemático.*, Mir, 1998.
- [48] C. K. Alexander y M. Sadiku, *Circuits, Fundamentals of Electric*, McGraw-Hill College, 2003.
- [49] Oficina Internacional de Pesas y Medidas, «El Sistema Internacional de Unidades SI,» 2006. [En línea]. Available: http://www2.cem.es:8081/cem/es_ES/documentacion/generales/SIU8edes.pdf. [Último acceso: 2 January 2015].
- [50] R. P. Behnke, «Las Energías Renovables No Convencionales en el Mercado Eléctrico Chileno,» CNE, Santiago, 2009.
- [51] CNE, «Reporte mensual sector energético, octubre,» CNE, Santiago, 2016.
- [52] J. Bustos, «Evolución de las ERNC en el mercado eléctrico Chileno,» Ministerio de Energía, Santiago, 2016.
- [53] J. Gonzalez, «Energías Renovables,» Reverté, Madrid, 2012.
- [54] Uninon Europea, «Ocean Energy: State of the Art,» SI Ocean, , 2013.
- [55] Ministerio de Energía, «Explorador Marino,» . [En línea]. Available: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/>. [Último acceso: Diciembre 2016].

A Reportes optimización Valparaíso

A.1 Por criterio de relación USD/kWh

08-08-17 08:10 PM MATLAB Command Window

1 of 5

```
Diagnostic information.
  Fitness function = @Undi_rela
  Number of variables = 6
  0 Inequality constraints
  0 Equality constraints
  0 Total number of linear constraints

Modified options:
  options.PopulationSize = 100
  options.Generations = 200
  options.TolFun = 1e-12
  options.TolCon = 1e-09
  options.PlotInterval = 5
  options.Display = 'diagnose'
  options.PlotFcns = { @gaplotbestf @gaplotstopping }
End of diagnostic information.
```

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
1	200	0.3873	8.9e+11	0
2	300	0.3873	8.8e+11	1
3	400	0.3777	8.5e+11	0
4	500	0.3777	8.7e+11	1
5	600	0.3777	8.9e+11	2
6	700	0.3777	9.4e+11	3
7	800	0.373	9.3e+11	0
8	900	0.3493	9.3e+11	0
9	1000	0.3185	8.7e+11	0
10	1100	0.3185	9.1e+11	1
11	1200	0.3185	9.3e+11	2
12	1300	0.3185	8.7e+11	3
13	1400	0.3185	9.1e+11	4
14	1500	0.2991	8.9e+11	0
15	1600	0.2991	8.7e+11	1
16	1700	0.2991	9.3e+11	2
17	1800	0.2991	8.8e+11	3
18	1900	0.2988	8.5e+11	0
19	2000	0.2988	9e+11	1
20	2100	0.2988	9.4e+11	2
21	2200	0.2988	9.2e+11	3
22	2300	0.2988	8.7e+11	4
23	2400	0.2985	8.5e+11	0
24	2500	0.2985	8.8e+11	1
25	2600	0.2985	9.4e+11	2
26	2700	0.2985	9.1e+11	3
27	2800	0.2985	9e+11	4
28	2900	0.2985	8.5e+11	5
29	3000	0.2985	8.8e+11	6

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
30	3100	0.2985	8.5e+11	7
31	3200	0.2985	8.5e+11	8
32	3300	0.2985	8.6e+11	9
33	3400	0.2985	8.8e+11	10
34	3500	0.2985	8.9e+11	11
35	3600	0.2985	8.9e+11	12

36	3700	0.2984	8.9e+11	0
37	3800	0.2984	8.8e+11	1
38	3900	0.2982	8.6e+11	0
39	4000	0.2982	8.3e+11	1
40	4100	0.2982	8.4e+11	2
41	4200	0.2973	8.4e+11	0
42	4300	0.2973	7.7e+11	1
43	4400	0.2973	8.6e+11	2
44	4500	0.2973	8.8e+11	3
45	4600	0.2973	8.9e+11	4
46	4700	0.2972	8.6e+11	0
47	4800	0.2972	8.7e+11	1
48	4900	0.2972	8.8e+11	2
49	5000	0.2972	8.5e+11	0
50	5100	0.2972	8.8e+11	1
51	5200	0.2972	9e+11	2
52	5300	0.2972	9.2e+11	3
53	5400	0.2972	9.1e+11	4
54	5500	0.2972	9.2e+11	5
55	5600	0.2972	9.4e+11	6
56	5700	0.2972	8.5e+11	7
57	5800	0.2972	8.5e+11	8
58	5900	0.2972	9.3e+11	9
59	6000	0.2972	9.2e+11	10
		Best	Mean	Stall
Generation	f-count	Penalty	Penalty	Generations
60	6100	0.2972	9.3e+11	11
61	6200	0.2972	8.8e+11	12
62	6300	0.2972	9.1e+11	13
63	6400	0.2972	8.5e+11	14
64	6500	0.2972	9.2e+11	15
65	6600	0.2972	9.2e+11	16
66	6700	0.2972	9.2e+11	17
67	6800	0.2972	8.8e+11	0
68	6900	0.2972	8.4e+11	1
69	7000	0.2972	9e+11	2
70	7100	0.2971	8.8e+11	0
71	7200	0.2971	8.9e+11	1
72	7300	0.2971	8.7e+11	2
73	7400	0.2971	8.8e+11	3
74	7500	0.2971	8.5e+11	4
75	7600	0.2971	8.6e+11	5
76	7700	0.2971	8.6e+11	6
77	7800	0.2971	8.9e+11	7
78	7900	0.2971	8.7e+11	8
79	8000	0.2971	8.6e+11	0
80	8100	0.2971	8.8e+11	1
81	8200	0.297	8.5e+11	0
82	8300	0.297	9.1e+11	1
83	8400	0.297	8e+11	2
84	8500	0.297	8.5e+11	3
85	8600	0.297	8.5e+11	4
86	8700	0.297	8.6e+11	5
87	8800	0.297	8.7e+11	6
88	8900	0.297	9e+11	7
89	9000	0.297	8.3e+11	8

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
90	9100	0.297	8.9e+11	9
91	9200	0.297	9e+11	10
92	9300	0.297	9.2e+11	11
93	9400	0.297	9.4e+11	12
94	9500	0.297	8.9e+11	13
95	9600	0.297	9e+11	14
96	9700	0.297	9e+11	15
97	9800	0.297	9.2e+11	16
98	9900	0.297	9.3e+11	17
99	10000	0.297	9.5e+11	18
100	10100	0.297	9.1e+11	0
101	10200	0.297	9.2e+11	1
102	10300	0.297	8.9e+11	2
103	10400	0.297	8.5e+11	3
104	10500	0.297	8.6e+11	4
105	10600	0.2969	8.9e+11	0
106	10700	0.2969	8.7e+11	1
107	10800	0.2969	9e+11	2
108	10900	0.2969	8.8e+11	3
109	11000	0.2969	8.9e+11	4
110	11100	0.2969	8.7e+11	5
111	11200	0.2969	8.7e+11	6
112	11300	0.2969	9.1e+11	7
113	11400	0.2969	9.2e+11	8
114	11500	0.2969	8.5e+11	9
115	11600	0.2969	9.1e+11	10
116	11700	0.2969	8.9e+11	11
117	11800	0.2969	8.8e+11	12
118	11900	0.2969	8.7e+11	13
119	12000	0.2969	8.8e+11	14

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
120	12100	0.2969	8.7e+11	15
121	12200	0.2969	9.3e+11	16
122	12300	0.2969	9e+11	17
123	12400	0.2969	9.1e+11	18
124	12500	0.2969	9.4e+11	0
125	12600	0.2969	9.4e+11	1
126	12700	0.2969	8.8e+11	2
127	12800	0.2969	8.9e+11	3
128	12900	0.2969	8.4e+11	4
129	13000	0.2969	8.5e+11	5
130	13100	0.2969	8.9e+11	6
131	13200	0.2969	8.5e+11	7
132	13300	0.2969	8.6e+11	8
133	13400	0.2969	8.9e+11	9
134	13500	0.2969	8.7e+11	10
135	13600	0.2969	8.8e+11	11
136	13700	0.2969	9.1e+11	12
137	13800	0.2969	9.2e+11	13
138	13900	0.2969	8.7e+11	0
139	14000	0.2969	9.1e+11	1
140	14100	0.2969	8.9e+11	2
141	14200	0.2969	8.9e+11	3
142	14300	0.2969	8.6e+11	4

08-08-17 08:10 PM MATLAB Command Window

4 of 5

143	14400	0.2969	8.7e+11	0
144	14500	0.2969	8.3e+11	1
145	14600	0.2969	8.7e+11	2
146	14700	0.2969	8.6e+11	3
147	14800	0.2969	9e+11	4
148	14900	0.2969	9.1e+11	5
149	15000	0.2969	8.7e+11	6

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
150	15100	0.2969	9e+11	7
151	15200	0.2969	9e+11	8
152	15300	0.2969	8.9e+11	9
153	15400	0.2969	8.4e+11	10
154	15500	0.2969	8.9e+11	11
155	15600	0.2969	8.4e+11	12
156	15700	0.2969	8.5e+11	13
157	15800	0.2969	9.1e+11	14
158	15900	0.2969	8.9e+11	15
159	16000	0.2969	9e+11	16
160	16100	0.2969	8.8e+11	17
161	16200	0.2969	9.4e+11	18
162	16300	0.2969	8.8e+11	19
163	16400	0.2969	8.6e+11	20
164	16500	0.2969	8.8e+11	21
165	16600	0.2969	9.1e+11	22
166	16700	0.2969	8.4e+11	23
167	16800	0.2969	9e+11	24
168	16900	0.2969	8.8e+11	25
169	17000	0.2969	8.4e+11	26
170	17100	0.2969	8.4e+11	27
171	17200	0.2969	7.8e+11	28
172	17300	0.2969	8.7e+11	29
173	17400	0.2969	8e+11	30
174	17500	0.2969	9e+11	31
175	17600	0.2969	8.7e+11	32
176	17700	0.2969	8.4e+11	33
177	17800	0.2969	8.9e+11	34
178	17900	0.2969	8.4e+11	35
179	18000	0.2969	8.8e+11	36

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
180	18100	0.2969	8.4e+11	37
181	18200	0.2969	8.7e+11	38
182	18300	0.2969	9.1e+11	39
183	18400	0.2969	9e+11	40
184	18500	0.2969	9e+11	41
185	18600	0.2969	9.2e+11	42
186	18700	0.2969	9e+11	43
187	18800	0.2969	9.4e+11	44
188	18900	0.2969	9.1e+11	45
189	19000	0.2969	9e+11	46
190	19100	0.2969	9.3e+11	47
191	19200	0.2969	8.9e+11	48
192	19300	0.2969	8.9e+11	49
193	19400	0.2969	8.7e+11	50

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.

FunctionTolerance
and constraint violation is less than options.ConstraintTolerance.

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:	3
Longitud del convertidor (mt):	5.00
El Generador número:	4
El Rectificador número:	2
El Capacitor número:	3
El Inversor número:	12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC

La energía generada es de: 95782.82 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [3] módulo(s).
Alcanzada en [1203] hora(s):
[281 284 287 290 293 296 299 302 311 314 320 326 329 332 335]

El costo total de la inversión es de:
US\$ 28434.00
La relación de dólares por kilowatt-hora
es: 0.2969 [US\$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de 44.78 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US\$ 80021.27
El Período de recuperación es de:
3.23 años (3 años, 2 meses, 23 días)

Se analizó un total de: 8760 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 2301.852 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 193

>>

A.2 Por criterio de VAN

08-08-17 09:32 PM MATLAB Command Window

1 of 4

```

Diagnostic information.
  Fitness function = @Undi_van
  Number of variables = 6
  0 Inequality constraints
  0 Equality constraints
  0 Total number of linear constraints

Modified options:
  options.PopulationSize = 100
  options.Generations = 200
  options.TolFun = 1e-12
  options.TolCon = 1e-09
  options.PlotInterval = 5
  options.Display = 'diagnose'
  options.PlotFcns = { @gaplotbestf @gaplotstopping }
End of diagnostic information.

```

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
1	200	-7.586e+04	9.3e+11	0
2	300	-7.586e+04	8.9e+11	1
3	400	-7.676e+04	9e+11	0
4	500	-7.676e+04	9.1e+11	1
5	600	-7.676e+04	8.7e+11	2
6	700	-7.676e+04	8.9e+11	3
7	800	-7.676e+04	9.3e+11	4
8	900	-7.676e+04	9.6e+11	5
9	1000	-7.676e+04	9.3e+11	6
10	1100	-7.676e+04	8.1e+11	7
11	1200	-7.676e+04	8.7e+11	8
12	1300	-7.676e+04	9.3e+11	9
13	1400	-7.676e+04	8.9e+11	10
14	1500	-7.676e+04	8.6e+11	11
15	1600	-7.676e+04	8.6e+11	12
16	1700	-7.676e+04	9e+11	13
17	1800	-7.676e+04	8.8e+11	14
18	1900	-7.676e+04	8.9e+11	15
19	2000	-7.676e+04	9.7e+11	16
20	2100	-8.8e+04	9.1e+11	0
21	2200	-8.8e+04	9.2e+11	1
22	2300	-8.8e+04	8.9e+11	2
23	2400	-8.8e+04	8.9e+11	3
24	2500	-8.8e+04	8.2e+11	4
25	2600	-8.8e+04	8.1e+11	5
26	2700	-8.8e+04	7.5e+11	6
27	2800	-8.862e+04	7.9e+11	0
28	2900	-8.862e+04	8.4e+11	1
29	3000	-8.882e+04	8.4e+11	0

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
30	3100	-8.882e+04	8.7e+11	1
31	3200	-8.882e+04	8.3e+11	2
32	3300	-8.882e+04	8.8e+11	3
33	3400	-9.005e+04	7.6e+11	0
34	3500	-9.005e+04	7.9e+11	1
35	3600	-9.025e+04	8.3e+11	0

36	3700	-9.025e+04	8e+11	1
37	3800	-9.025e+04	7.6e+11	2
38	3900	-9.025e+04	7.8e+11	3
39	4000	-9.025e+04	7.8e+11	4
40	4100	-9.025e+04	8.8e+11	5
41	4200	-9.025e+04	8.3e+11	6
42	4300	-9.025e+04	8.1e+11	7
43	4400	-9.025e+04	8.1e+11	8
44	4500	-9.025e+04	8.1e+11	9
45	4600	-9.184e+04	8.7e+11	0
46	4700	-9.719e+04	7.9e+11	0
47	4800	-9.719e+04	8.1e+11	1
48	4900	-9.719e+04	8.4e+11	2
49	5000	-9.719e+04	8.4e+11	3
50	5100	-9.719e+04	8.5e+11	4
51	5200	-9.719e+04	8.4e+11	5
52	5300	-9.719e+04	8.6e+11	6
53	5400	-9.719e+04	7.8e+11	7
54	5500	-9.719e+04	8.5e+11	8
55	5600	-9.738e+04	8.1e+11	0
56	5700	-9.738e+04	8.7e+11	1
57	5800	-9.756e+04	8.6e+11	0
58	5900	-9.756e+04	9.1e+11	1
59	6000	-9.756e+04	8.4e+11	2
		Best	Mean	Stall
Generation	f-count	Penalty	Penalty	Generations
60	6100	-9.756e+04	8.3e+11	3
61	6200	-9.756e+04	8.3e+11	4
62	6300	-9.756e+04	8.6e+11	5
63	6400	-9.775e+04	8.1e+11	0
64	6500	-9.775e+04	8.3e+11	1
65	6600	-9.775e+04	8.4e+11	2
66	6700	-9.775e+04	8.5e+11	3
67	6800	-9.775e+04	8.8e+11	4
68	6900	-9.775e+04	8.7e+11	5
69	7000	-9.775e+04	9.2e+11	6
70	7100	-9.775e+04	8.9e+11	7
71	7200	-9.775e+04	9.1e+11	8
72	7300	-9.775e+04	8.7e+11	9
73	7400	-9.775e+04	8.4e+11	10
74	7500	-9.775e+04	8.7e+11	11
75	7600	-9.775e+04	8.8e+11	12
76	7700	-9.775e+04	9.1e+11	13
77	7800	-9.775e+04	8.7e+11	14
78	7900	-9.775e+04	8.7e+11	15
79	8000	-9.775e+04	8.8e+11	16
80	8100	-9.775e+04	8.7e+11	17
81	8200	-9.775e+04	8.8e+11	18
82	8300	-9.775e+04	8.2e+11	19
83	8400	-9.775e+04	8.8e+11	20
84	8500	-9.775e+04	9.3e+11	21
85	8600	-9.775e+04	9.1e+11	22
86	8700	-9.775e+04	9.1e+11	23
87	8800	-9.775e+04	9e+11	24
88	8900	-9.775e+04	8.8e+11	25
89	9000	-9.775e+04	8.5e+11	26

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
90	9100	-9.775e+04	8.2e+11	27
91	9200	-9.775e+04	8.3e+11	28
92	9300	-9.775e+04	8.5e+11	29
93	9400	-9.775e+04	8.7e+11	30
94	9500	-9.775e+04	8.7e+11	31
95	9600	-9.775e+04	8.8e+11	32
96	9700	-9.775e+04	9.2e+11	33
97	9800	-9.775e+04	8.7e+11	34
98	9900	-9.775e+04	8.5e+11	35
99	10000	-9.775e+04	8.7e+11	36
100	10100	-9.775e+04	8.9e+11	37
101	10200	-9.775e+04	8.9e+11	38
102	10300	-9.775e+04	8.4e+11	39
103	10400	-9.775e+04	8.6e+11	40
104	10500	-9.775e+04	9.3e+11	41
105	10600	-9.775e+04	8.7e+11	42
106	10700	-9.775e+04	8.5e+11	43
107	10800	-9.775e+04	8.9e+11	44
108	10900	-9.775e+04	8.8e+11	45
109	11000	-9.775e+04	8.4e+11	46
110	11100	-9.775e+04	9.6e+11	47
111	11200	-9.775e+04	8.9e+11	48
112	11300	-9.775e+04	8.5e+11	49
113	11400	-9.775e+04	9.4e+11	50

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.
FunctionTolerance

and constraint violation is less than options.ConstraintTolerance.

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:	3
Longitud del convertidor (mt):	5.00
El Generador número:	5
El Rectificador número:	2
El Capacitor número:	3
El Inversor número:	10

Conectados de forma independiente

Con llegada a tierra por CC

La energía generada es de: 128665.69 [kWh]

La potencia máxima generada es: 30.00 [kW]

En su(s) [3] módulo(s).

Alcanzada en [417] hora(s):

[449 452 455 458 461 464 467 470 473 476 479 482 485 488 491]

El costo total de la inversión es de:

US\$ 47940.00

La relacion de dolares por kilowatt-hora

es: 0.3726 [US\$/kWh]

La tasa interna de retorno (TIR), para

un plazo de 20 años, es de 35.62 %.

El Valor Actual Neto (VAN), considerando

una tasa de descuento del 10.00 % es de:

US\$ 97748.67

El Período de recuperación es de:

08-08-17 09:32 PM MATLAB Command Window

4 of 4

3.80 años (3 años, 9 meses, 18 días)

Se analizo un total de: 8760 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 1241.191 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 113

>>

A.3 Por criterio de Payback

08-08-17 08:50 PM MATLAB Command Window

1 of 5

Diagnostic information.

```

Fitness function = @Undi_pb
Number of variables = 6
0 Inequality constraints
0 Equality constraints
0 Total number of linear constraints

```

Modified options:

```

options.PopulationSize = 100
options.Generations = 200
options.TolFun = 1e-12
options.TolCon = 1e-09
options.PlotInterval = 5
options.Display = 'diagnose'
options.PlotFcns = { @gaplotbestf @gaplotstopping }

```

End of diagnostic information.

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
1	200	3.445	9.3e+11	0
2	300	3.445	9.4e+11	1
3	400	3.445	8.4e+11	2
4	500	3.445	8.8e+11	3
5	600	3.445	9e+11	4
6	700	3.445	8.9e+11	5
7	800	3.445	8.9e+11	6
8	900	3.445	8.3e+11	7
9	1000	3.445	8.6e+11	8
10	1100	3.391	8.9e+11	0
11	1200	3.391	8.5e+11	1
12	1300	3.391	9.2e+11	2
13	1400	3.38	8.5e+11	0
14	1500	3.38	8.9e+11	1
15	1600	3.38	9.2e+11	2
16	1700	3.38	9.1e+11	3
17	1800	3.38	8.8e+11	4
18	1900	3.38	8.6e+11	5
19	2000	3.38	8.9e+11	6
20	2100	3.38	8.8e+11	7
21	2200	3.38	9.1e+11	8
22	2300	3.38	9.2e+11	9
23	2400	3.38	8.3e+11	10
24	2500	3.38	8.9e+11	11
25	2600	3.38	8.6e+11	12
26	2700	3.312	8.8e+11	0
27	2800	3.312	8.9e+11	1
28	2900	3.312	9.2e+11	2
29	3000	3.312	8.7e+11	3

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
30	3100	3.312	8.7e+11	4
31	3200	3.312	8.7e+11	5
32	3300	3.312	8e+11	6
33	3400	3.312	8.8e+11	7
34	3500	3.312	8.6e+11	8
35	3600	3.312	8.3e+11	9

36	3700	3.312	8.6e+11	10
37	3800	3.312	8.7e+11	11
38	3900	3.312	8.8e+11	12
39	4000	3.312	8.8e+11	13
40	4100	3.312	8.7e+11	14
41	4200	3.312	8.7e+11	15
42	4300	3.312	8.6e+11	16
43	4400	3.293	8.9e+11	0
44	4500	3.285	8.8e+11	0
45	4600	3.285	8.7e+11	1
46	4700	3.269	8.9e+11	0
47	4800	3.269	8.9e+11	1
48	4900	3.269	8.9e+11	2
49	5000	3.269	9.2e+11	3
50	5100	3.268	8.7e+11	0
51	5200	3.268	9e+11	1
52	5300	3.267	8.8e+11	0
53	5400	3.267	9e+11	1
54	5500	3.267	8.7e+11	2
55	5600	3.267	9.1e+11	3
56	5700	3.267	9.2e+11	4
57	5800	3.267	9.5e+11	5
58	5900	3.266	8.8e+11	0
59	6000	3.265	8.7e+11	0
		Best	Mean	Stall
Generation	f-count	Penalty	Penalty	Generations
60	6100	3.265	8.7e+11	1
61	6200	3.265	9e+11	2
62	6300	3.265	9.1e+11	3
63	6400	3.265	9.3e+11	4
64	6500	3.265	9.3e+11	5
65	6600	3.265	9.4e+11	6
66	6700	3.264	9.3e+11	0
67	6800	3.261	9e+11	0
68	6900	3.261	9.1e+11	1
69	7000	3.261	8.8e+11	2
70	7100	3.261	9e+11	3
71	7200	3.261	9.2e+11	4
72	7300	3.236	9e+11	0
73	7400	3.236	8.7e+11	1
74	7500	3.236	8.8e+11	2
75	7600	3.236	8.6e+11	3
76	7700	3.236	9e+11	4
77	7800	3.236	8.7e+11	5
78	7900	3.236	9.1e+11	6
79	8000	3.236	9e+11	7
80	8100	3.236	8.3e+11	8
81	8200	3.236	9.1e+11	9
82	8300	3.236	9e+11	10
83	8400	3.234	8.9e+11	0
84	8500	3.233	9.2e+11	0
85	8600	3.233	9.2e+11	1
86	8700	3.233	9.1e+11	2
87	8800	3.233	9.1e+11	3
88	8900	3.233	9e+11	4
89	9000	3.233	9.3e+11	5

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
90	9100	3.233	8.9e+11	6
91	9200	3.233	8.6e+11	7
92	9300	3.233	8.8e+11	8
93	9400	3.233	8.5e+11	9
94	9500	3.233	8.7e+11	10
95	9600	3.233	8.9e+11	11
96	9700	3.233	8.8e+11	0
97	9800	3.233	9e+11	1
98	9900	3.233	8.8e+11	2
99	10000	3.233	9.1e+11	3
100	10100	3.233	9.2e+11	4
101	10200	3.233	9.4e+11	5
102	10300	3.233	9e+11	6
103	10400	3.233	8.8e+11	7
104	10500	3.233	8.7e+11	8
105	10600	3.233	8.9e+11	9
106	10700	3.233	9.1e+11	10
107	10800	3.233	9.2e+11	11
108	10900	3.233	8.9e+11	12
109	11000	3.233	9.1e+11	13
110	11100	3.233	9.1e+11	14
111	11200	3.233	8.5e+11	15
112	11300	3.233	8.8e+11	16
113	11400	3.233	8.2e+11	17
114	11500	3.233	8.9e+11	18
115	11600	3.233	8.8e+11	19
116	11700	3.233	8.6e+11	20
117	11800	3.233	9e+11	21
118	11900	3.233	8.7e+11	22
119	12000	3.233	8.6e+11	23

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
120	12100	3.233	8.9e+11	24
121	12200	3.233	9e+11	25
122	12300	3.233	9.1e+11	26
123	12400	3.233	8.9e+11	27
124	12500	3.233	8.7e+11	28
125	12600	3.233	8.9e+11	29
126	12700	3.233	8.2e+11	30
127	12800	3.233	8.2e+11	0
128	12900	3.233	8.7e+11	1
129	13000	3.233	9e+11	2
130	13100	3.233	9.2e+11	3
131	13200	3.233	8.7e+11	4
132	13300	3.233	8.8e+11	5
133	13400	3.233	9.2e+11	6
134	13500	3.233	9.2e+11	7
135	13600	3.233	8.8e+11	8
136	13700	3.233	9.4e+11	9
137	13800	3.233	9.2e+11	10
138	13900	3.233	9.1e+11	0
139	14000	3.233	9.1e+11	1
140	14100	3.233	9.1e+11	2
141	14200	3.233	8.8e+11	3
142	14300	3.233	8.4e+11	4

143	14400	3.233	8.9e+11	5
144	14500	3.233	8.9e+11	6
145	14600	3.233	8.7e+11	7
146	14700	3.233	8.9e+11	8
147	14800	3.233	9.3e+11	9
148	14900	3.233	8.7e+11	10
149	15000	3.233	9.3e+11	11
Generation	f-count	Best	Mean	Stall
		Penalty	Penalty	Generations
150	15100	3.233	9.3e+11	12
151	15200	3.233	9.2e+11	13
152	15300	3.233	9.1e+11	14
153	15400	3.233	8.4e+11	15
154	15500	3.233	8.9e+11	16
155	15600	3.233	9.2e+11	17
156	15700	3.232	8.5e+11	0
157	15800	3.232	9e+11	1
158	15900	3.232	9e+11	2
159	16000	3.232	8.9e+11	3
160	16100	3.232	8.8e+11	4
161	16200	3.232	9.1e+11	5
162	16300	3.232	9.2e+11	6
163	16400	3.232	9e+11	7
164	16500	3.232	8.8e+11	8
165	16600	3.232	9e+11	9
166	16700	3.232	9.2e+11	10
167	16800	3.232	8.9e+11	11
168	16900	3.232	8.9e+11	12
169	17000	3.232	8.8e+11	13
170	17100	3.232	9.3e+11	14
171	17200	3.232	9.1e+11	15
172	17300	3.232	9.2e+11	16
173	17400	3.232	9.3e+11	17
174	17500	3.232	8.9e+11	18
175	17600	3.232	8.5e+11	19
176	17700	3.232	8.9e+11	20
177	17800	3.232	8.9e+11	21
178	17900	3.232	9e+11	22
179	18000	3.232	8.9e+11	23
Generation	f-count	Best	Mean	Stall
		Penalty	Penalty	Generations
180	18100	3.232	8.9e+11	24
181	18200	3.232	9.1e+11	25
182	18300	3.232	8.5e+11	26
183	18400	3.232	8.9e+11	27
184	18500	3.232	8.7e+11	28
185	18600	3.232	8.9e+11	29
186	18700	3.232	8.7e+11	30
187	18800	3.232	9e+11	31
188	18900	3.232	8.4e+11	32
189	19000	3.232	8.7e+11	33
190	19100	3.232	8.9e+11	34
191	19200	3.232	9.5e+11	35
192	19300	3.232	8.8e+11	36
193	19400	3.232	9.2e+11	37
194	19500	3.232	8.9e+11	38

195	19600	3.232	9.1e+11	39
196	19700	3.232	9.2e+11	40
197	19800	3.232	8.8e+11	0
198	19900	3.232	8.8e+11	1
199	20000	3.232	9.1e+11	2
200	20100	3.232	8.6e+11	3

Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:	3
Longitud del convertidor (mt):	4.99
El Generador número:	4
El Rectificador número:	2
El Capacitor número:	3
El Inversor número:	12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC

La energía generada es de: 95699.67 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [3] módulo(s).
Alcanzada en [1201] hora(s):
[281 284 287 290 293 296 299 302 311 314 326 329 332 335 338]

El costo total de la inversión es de:
US\$ 28411.50
La relación de dolares por kilowatt-hora
es: 0.2969 [US\$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de 44.77 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US\$ 79949.62
El Período de recuperación es de:
3.23 años (3 años, 2 meses, 23 días)

Se analizo un total de: 8760 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 2204.083 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 200

>>

B Reportes optimización San Antonio

B.1 Por criterio de relacion USD/kWh

09-08-17 01:02 AM MATLAB Command Window

1 of 4

```
Diagnostic information.  
  Fitness function = @Undi_rela  
  Number of variables = 6  
  0 Inequality constraints  
  0 Equality constraints  
  0 Total number of linear constraints  
  
Modified options:  
  options.PopulationSize = 100  
  options.Generations = 200  
  options.TolFun = 1e-12  
  options.TolCon = 1e-09  
  options.PlotInterval = 5  
  options.Display = 'diagnose'  
  options.PlotFcns = { @gaplotbestf @gaplotstopping }  
End of diagnostic information.
```

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
1	200	0.2054	9.1e+11	0
2	300	0.2054	9.2e+11	1
3	400	0.2054	9.4e+11	2
4	500	0.2054	9.4e+11	3
5	600	0.2054	9.2e+11	4
6	700	0.2054	8.8e+11	5
7	800	0.2054	9.3e+11	6
8	900	0.2052	8.9e+11	0
9	1000	0.2052	9.2e+11	1
10	1100	0.2052	8.8e+11	2
11	1200	0.2052	9.2e+11	3
12	1300	0.2052	9e+11	4
13	1400	0.2051	8.8e+11	0
14	1500	0.1911	8.7e+11	0
15	1600	0.1911	9e+11	1
16	1700	0.1911	8.1e+11	2
17	1800	0.1911	8.7e+11	3
18	1900	0.1911	9e+11	4
19	2000	0.1911	9e+11	5
20	2100	0.1911	9.3e+11	6
21	2200	0.1911	8.6e+11	7
22	2300	0.1911	8.6e+11	8
23	2400	0.1911	9.1e+11	9
24	2500	0.1903	9e+11	0
25	2600	0.1903	8.8e+11	1
26	2700	0.1903	8.9e+11	2
27	2800	0.1903	9.1e+11	3
28	2900	0.1903	8.8e+11	4
29	3000	0.1903	9.3e+11	5

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
30	3100	0.19	9e+11	0
31	3200	0.19	8.9e+11	1
32	3300	0.19	9.1e+11	2
33	3400	0.19	9e+11	3
34	3500	0.19	8.8e+11	4
35	3600	0.19	8.5e+11	5

36	3700	0.19	9e+11	6
37	3800	0.19	8.8e+11	7
38	3900	0.19	9.2e+11	8
39	4000	0.19	8.7e+11	9
40	4100	0.19	8.8e+11	0
41	4200	0.19	8.8e+11	1
42	4300	0.19	8.8e+11	2
43	4400	0.19	8.7e+11	3
44	4500	0.19	8.4e+11	4
45	4600	0.19	8.9e+11	5
46	4700	0.19	8.5e+11	6
47	4800	0.19	8.7e+11	7
48	4900	0.19	8.6e+11	8
49	5000	0.19	9e+11	9
50	5100	0.19	8.7e+11	10
51	5200	0.19	8.9e+11	11
52	5300	0.19	9.2e+11	12
53	5400	0.19	8.5e+11	13
54	5500	0.19	8.6e+11	14
55	5600	0.19	8.6e+11	15
56	5700	0.19	9e+11	16
57	5800	0.19	9.1e+11	17
58	5900	0.19	8.9e+11	18
59	6000	0.19	8.8e+11	19
		Best	Mean	Stall
Generation	f-count	Penalty	Penalty	Generations
60	6100	0.19	8.3e+11	20
61	6200	0.19	9e+11	21
62	6300	0.19	9.2e+11	22
63	6400	0.19	9e+11	23
64	6500	0.19	9.5e+11	24
65	6600	0.19	8.9e+11	25
66	6700	0.19	8.7e+11	26
67	6800	0.19	8.8e+11	27
68	6900	0.19	8.9e+11	28
69	7000	0.19	8.5e+11	29
70	7100	0.19	8.6e+11	30
71	7200	0.19	8.7e+11	31
72	7300	0.19	8.9e+11	32
73	7400	0.19	8.2e+11	33
74	7500	0.19	8.3e+11	0
75	7600	0.19	8.1e+11	1
76	7700	0.19	8.9e+11	2
77	7800	0.19	8.9e+11	3
78	7900	0.19	8.9e+11	4
79	8000	0.19	9.1e+11	5
80	8100	0.19	8.7e+11	6
81	8200	0.19	9.1e+11	7
82	8300	0.19	9.3e+11	8
83	8400	0.19	9.1e+11	9
84	8500	0.19	9.3e+11	10
85	8600	0.19	9.1e+11	11
86	8700	0.19	9.1e+11	12
87	8800	0.19	8.7e+11	13
88	8900	0.19	9.2e+11	14
89	9000	0.19	8.8e+11	15

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
90	9100	0.19	8.8e+11	16
91	9200	0.19	8.3e+11	17
92	9300	0.19	8.8e+11	18
93	9400	0.19	8.7e+11	19
94	9500	0.19	8.8e+11	20
95	9600	0.19	9e+11	21
96	9700	0.19	9.1e+11	0
97	9800	0.19	9e+11	1
98	9900	0.19	8.8e+11	2
99	10000	0.19	9.2e+11	3
100	10100	0.19	8.8e+11	4
101	10200	0.19	8.4e+11	5
102	10300	0.19	8.8e+11	6
103	10400	0.19	8.8e+11	7
104	10500	0.19	8.8e+11	8
105	10600	0.19	8.7e+11	9
106	10700	0.19	9.1e+11	10
107	10800	0.19	8.7e+11	11
108	10900	0.19	9.2e+11	12
109	11000	0.19	9.1e+11	13
110	11100	0.19	9.4e+11	14
111	11200	0.19	8.6e+11	15
112	11300	0.19	8.9e+11	16
113	11400	0.19	8.9e+11	17
114	11500	0.19	8.1e+11	18
115	11600	0.19	8.6e+11	19
116	11700	0.19	8.6e+11	20
117	11800	0.19	8.8e+11	21
118	11900	0.19	9.1e+11	22
119	12000	0.19	8.7e+11	23

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
120	12100	0.19	8.9e+11	24
121	12200	0.19	8.8e+11	25
122	12300	0.19	8.7e+11	26
123	12400	0.19	9.1e+11	27
124	12500	0.19	8.5e+11	28
125	12600	0.19	8.4e+11	29
126	12700	0.19	8.4e+11	30
127	12800	0.19	8.7e+11	31
128	12900	0.19	8.6e+11	32
129	13000	0.19	8.6e+11	33
130	13100	0.19	8.8e+11	34
131	13200	0.19	8.7e+11	35
132	13300	0.19	8.6e+11	36
133	13400	0.19	8.7e+11	37
134	13500	0.19	9.1e+11	38
135	13600	0.19	8.7e+11	39
136	13700	0.19	8.7e+11	40
137	13800	0.19	8.4e+11	41
138	13900	0.19	8.8e+11	42
139	14000	0.19	9.2e+11	43
140	14100	0.19	8.8e+11	44
141	14200	0.19	9.1e+11	45
142	14300	0.19	9.2e+11	46

143	14400	0.19	8.9e+11	47
144	14500	0.19	8.9e+11	48
145	14600	0.19	9.2e+11	49
146	14700	0.19	8.3e+11	50

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.
FunctionTolerance
and constraint violation is less than options.ConstraintTolerance.

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:	3
Longitud del convertidor (mt):	2.19
El Generador número:	4
El Rectificador número:	1
El Capacitor número:	3
El Inversor número:	12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC

La energía generada es de: 121665.39 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [3] módulo(s).
Alcanzada en [2127] hora(s):
[38 41 44 47 50 53 56 113 116 119 122 125 128 131 134]

El costo total de la inversión es de:
US\$ 23116.50
La relación de dolares por kilowatt-hora
es: 0.1900 [US\$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de 70.00 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US\$ 114645.71
El Período de recuperación es de:
2.43 años (2 años, 5 meses, 4 días)

Se analizo un total de: 8760 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 1639.556 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 146

>>

B.2 Por criterio de VAN

09-08-17 02:30 AM MATLAB Command Window

1 of 5

Diagnostic information.

```

Fitness function = @Undi_van
Number of variables = 6
0 Inequality constraints
0 Equality constraints
0 Total number of linear constraints

```

Modified options:

```

options.PopulationSize = 100
options.Generations = 200
options.TolFun = 1e-12
options.TolCon = 1e-09
options.PlotInterval = 5
options.Display = 'diagnose'
options.PlotFcns = { @gaplotbestf @gaplotstopping }

```

End of diagnostic information.

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
1	200	-6.125e+04	9.1e+11	0
2	300	-6.125e+04	9.1e+11	1
3	400	-9.289e+04	8.5e+11	0
4	500	-9.289e+04	9.1e+11	1
5	600	-9.289e+04	8.5e+11	2
6	700	-9.289e+04	9.1e+11	3
7	800	-9.289e+04	8.7e+11	4
8	900	-9.289e+04	8.9e+11	5
9	1000	-9.289e+04	9.3e+11	6
10	1100	-9.289e+04	9.3e+11	7
11	1200	-9.289e+04	8.5e+11	8
12	1300	-1.048e+05	8.8e+11	0
13	1400	-1.162e+05	8.5e+11	0
14	1500	-1.162e+05	8.7e+11	1
15	1600	-1.162e+05	8.5e+11	2
16	1700	-1.162e+05	9.4e+11	3
17	1800	-1.184e+05	8.8e+11	0
18	1900	-1.184e+05	9.4e+11	1
19	2000	-1.184e+05	8.8e+11	2
20	2100	-1.184e+05	9.1e+11	3
21	2200	-1.184e+05	9.1e+11	4
22	2300	-1.184e+05	9.2e+11	5
23	2400	-1.184e+05	9.1e+11	6
24	2500	-1.186e+05	8.7e+11	0
25	2600	-1.186e+05	8.9e+11	1
26	2700	-1.186e+05	8.8e+11	2
27	2800	-1.186e+05	9.1e+11	3
28	2900	-1.187e+05	8.7e+11	0
29	3000	-1.187e+05	9.1e+11	1

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
30	3100	-1.187e+05	8.6e+11	2
31	3200	-1.201e+05	8.6e+11	0
32	3300	-1.201e+05	9.3e+11	1
33	3400	-1.201e+05	9.2e+11	2
34	3500	-1.201e+05	9.1e+11	3
35	3600	-1.201e+05	8.7e+11	4

36	3700	-1.805e+05	8.5e+11	0
37	3800	-1.805e+05	9e+11	1
38	3900	-1.805e+05	8.8e+11	2
39	4000	-1.805e+05	8.9e+11	3
40	4100	-1.805e+05	9e+11	4
41	4200	-1.805e+05	8.9e+11	5
42	4300	-1.805e+05	9e+11	6
43	4400	-1.805e+05	9.2e+11	7
44	4500	-1.805e+05	8.3e+11	8
45	4600	-1.805e+05	8.4e+11	9
46	4700	-1.805e+05	8.5e+11	10
47	4800	-1.805e+05	8.9e+11	11
48	4900	-1.805e+05	9.2e+11	12
49	5000	-1.81e+05	8.8e+11	0
50	5100	-1.81e+05	8.5e+11	1
51	5200	-2.031e+05	8.6e+11	0
52	5300	-2.031e+05	8.6e+11	1
53	5400	-2.031e+05	8.7e+11	2
54	5500	-2.214e+05	8.4e+11	0
55	5600	-2.214e+05	8.8e+11	1
56	5700	-2.288e+05	8.4e+11	0
57	5800	-2.288e+05	9.1e+11	1
58	5900	-2.288e+05	9.2e+11	2
59	6000	-2.288e+05	9.3e+11	3
		Best	Mean	Stall
Generation	f-count	Penalty	Penalty	Generations
60	6100	-2.288e+05	9e+11	4
61	6200	-2.288e+05	9.2e+11	5
62	6300	-2.288e+05	9.2e+11	6
63	6400	-2.288e+05	9e+11	0
64	6500	-2.288e+05	8.5e+11	1
65	6600	-2.288e+05	8.7e+11	2
66	6700	-2.288e+05	8.6e+11	3
67	6800	-2.289e+05	8.5e+11	0
68	6900	-2.29e+05	7.9e+11	0
69	7000	-2.29e+05	8.9e+11	1
70	7100	-2.29e+05	9.1e+11	2
71	7200	-2.29e+05	9.2e+11	3
72	7300	-2.29e+05	9.3e+11	4
73	7400	-2.29e+05	8.8e+11	5
74	7500	-2.29e+05	8.4e+11	6
75	7600	-2.29e+05	8.5e+11	7
76	7700	-2.29e+05	8.1e+11	8
77	7800	-2.29e+05	8.2e+11	9
78	7900	-2.29e+05	8e+11	10
79	8000	-2.29e+05	8.9e+11	11
80	8100	-2.29e+05	8.4e+11	12
81	8200	-2.29e+05	8.9e+11	13
82	8300	-2.29e+05	8.8e+11	14
83	8400	-2.29e+05	8.9e+11	15
84	8500	-2.29e+05	8.9e+11	16
85	8600	-2.29e+05	9.1e+11	17
86	8700	-2.29e+05	8.8e+11	18
87	8800	-2.29e+05	8.2e+11	19
88	8900	-2.29e+05	8.7e+11	0
89	9000	-2.29e+05	8.9e+11	1

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
90	9100	-2.29e+05	8.9e+11	2
91	9200	-2.29e+05	9e+11	3
92	9300	-2.29e+05	8.8e+11	4
93	9400	-2.291e+05	8.4e+11	0
94	9500	-2.291e+05	8.3e+11	1
95	9600	-2.291e+05	8.9e+11	2
96	9700	-2.291e+05	8.2e+11	3
97	9800	-2.291e+05	8.8e+11	4
98	9900	-2.291e+05	8.6e+11	5
99	10000	-2.291e+05	8.6e+11	6
100	10100	-2.291e+05	9e+11	7
101	10200	-2.291e+05	8.3e+11	8
102	10300	-2.291e+05	8.6e+11	9
103	10400	-2.291e+05	8.8e+11	10
104	10500	-2.291e+05	8.5e+11	11
105	10600	-2.291e+05	8.6e+11	12
106	10700	-2.291e+05	8e+11	13
107	10800	-2.291e+05	7.9e+11	14
108	10900	-2.291e+05	8.4e+11	15
109	11000	-2.291e+05	8.4e+11	16
110	11100	-2.291e+05	8.4e+11	17
111	11200	-2.291e+05	8.5e+11	18
112	11300	-2.299e+05	7.7e+11	0
113	11400	-2.299e+05	8.1e+11	1
114	11500	-2.299e+05	8e+11	2
115	11600	-2.299e+05	8.2e+11	3
116	11700	-2.299e+05	8.1e+11	4
117	11800	-2.299e+05	8.3e+11	5
118	11900	-2.299e+05	9.1e+11	6
119	12000	-2.299e+05	9.2e+11	7

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
120	12100	-2.299e+05	8.9e+11	8
121	12200	-2.299e+05	8.6e+11	9
122	12300	-2.299e+05	8.4e+11	10
123	12400	-2.299e+05	8.6e+11	11
124	12500	-2.299e+05	8.1e+11	12
125	12600	-2.3e+05	8.7e+11	0
126	12700	-2.3e+05	9e+11	1
127	12800	-2.3e+05	8.3e+11	2
128	12900	-2.3e+05	8.8e+11	0
129	13000	-2.3e+05	8.9e+11	1
130	13100	-2.3e+05	8.3e+11	2
131	13200	-2.3e+05	8.9e+11	3
132	13300	-2.3e+05	9e+11	4
133	13400	-2.3e+05	9.1e+11	5
134	13500	-2.312e+05	8.9e+11	0
135	13600	-2.312e+05	8.4e+11	1
136	13700	-2.312e+05	9e+11	2
137	13800	-2.312e+05	8.5e+11	3
138	13900	-2.312e+05	8.9e+11	4
139	14000	-2.312e+05	8.9e+11	5
140	14100	-2.312e+05	8.7e+11	6
141	14200	-2.312e+05	8.8e+11	7
142	14300	-2.312e+05	9.1e+11	8

143	14400	-2.312e+05	8.3e+11	9
144	14500	-2.312e+05	8.9e+11	10
145	14600	-2.312e+05	8.3e+11	11
146	14700	-2.312e+05	8.1e+11	12
147	14800	-2.312e+05	8.7e+11	13
148	14900	-2.312e+05	9.2e+11	14
149	15000	-2.312e+05	9.2e+11	15

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
150	15100	-2.312e+05	8.5e+11	16
151	15200	-2.313e+05	9.2e+11	0
152	15300	-2.313e+05	9.1e+11	1
153	15400	-2.313e+05	9.5e+11	2
154	15500	-2.313e+05	9e+11	3
155	15600	-2.313e+05	9e+11	4
156	15700	-2.314e+05	9.2e+11	0
157	15800	-2.314e+05	9.6e+11	1
158	15900	-2.314e+05	9.1e+11	2
159	16000	-2.314e+05	9.2e+11	3
160	16100	-2.314e+05	9e+11	4
161	16200	-2.314e+05	8.7e+11	5
162	16300	-2.314e+05	8.3e+11	6
163	16400	-2.314e+05	8.9e+11	7
164	16500	-2.314e+05	9e+11	8
165	16600	-2.314e+05	9e+11	9
166	16700	-2.314e+05	9e+11	10
167	16800	-2.314e+05	8.7e+11	11
168	16900	-2.314e+05	8.6e+11	12
169	17000	-2.314e+05	9e+11	13
170	17100	-2.314e+05	9.1e+11	14
171	17200	-2.314e+05	9.6e+11	15
172	17300	-2.314e+05	9.1e+11	16
173	17400	-2.314e+05	8.8e+11	17
174	17500	-2.314e+05	9.2e+11	18
175	17600	-2.314e+05	8.9e+11	19
176	17700	-2.314e+05	9.1e+11	20
177	17800	-2.314e+05	9e+11	21
178	17900	-2.314e+05	8.8e+11	22
179	18000	-2.314e+05	8.8e+11	23

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
180	18100	-2.314e+05	8.8e+11	24
181	18200	-2.314e+05	8.7e+11	25
182	18300	-2.314e+05	8.5e+11	26
183	18400	-2.314e+05	9e+11	27
184	18500	-2.314e+05	8.8e+11	28
185	18600	-2.314e+05	8.9e+11	29
186	18700	-2.314e+05	9.1e+11	30
187	18800	-2.314e+05	8.9e+11	31
188	18900	-2.314e+05	8.3e+11	32
189	19000	-2.314e+05	7.9e+11	33
190	19100	-2.314e+05	8.1e+11	34
191	19200	-2.314e+05	8.5e+11	35
192	19300	-2.314e+05	8.5e+11	36
193	19400	-2.314e+05	8.9e+11	37
194	19500	-2.314e+05	9e+11	38

195	19600	-2.314e+05	8.8e+11	39
196	19700	-2.314e+05	8.7e+11	40
197	19800	-2.314e+05	8.2e+11	41
198	19900	-2.314e+05	8.7e+11	42
199	20000	-2.314e+05	8.3e+11	43
200	20100	-2.314e+05	8.7e+11	44

Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:	3
Longitud del convertidor (mt):	5.00
El Generador número:	5
El Rectificador número:	2
El Capacitor número:	3
El Inversor número:	10

Conectados de forma independiente
Con llegada a tierra por CC

La energía generada es de: 249440.12 [kWh]
La potencia máxima generada es: 30.00 [kW]
En su(s) [3] módulo(s).
Alcanzada en [2332] hora(s):
[32 35 38 41 44 47 50 53 56 59 110 113 116 119 122]

El costo total de la inversión es de:
US\$ 51090.00
La relación de dolares por kilowatt-hora
es: 0.2048 [US\$/kwh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de 64.93 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US\$ 231352.04
El Período de recuperación es de:
2.54 años (2 años, 6 meses, 14 días)

Se analizo un total de: 8760 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 2186.891 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 200

>>

B.3 Por criterio de Payback

09-08-17 12:31 AM MATLAB Command Window

1 of 3

Diagnostic information.

```
Fitness function = @Undi_pb
Number of variables = 6
0 Inequality constraints
0 Equality constraints
0 Total number of linear constraints
```

Modified options:

```
options.PopulationSize = 100
options.Generations = 200
options.TolFun = 1e-12
options.TolCon = 1e-09
options.PlotInterval = 5
options.Display = 'diagnose'
options.PlotFcns = { @gaplotbestf @gaplotstopping }
```

End of diagnostic information.

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
1	200	2.862	9.2e+11	0
2	300	2.862	9e+11	1
3	400	2.547	8.9e+11	0
4	500	2.547	8.8e+11	1
5	600	2.547	8.8e+11	2
6	700	2.547	9.1e+11	3
7	800	2.547	9.1e+11	4
8	900	2.547	9.3e+11	5
9	1000	2.547	8.8e+11	6
10	1100	2.547	8.7e+11	7
11	1200	2.547	8.9e+11	8
12	1300	2.547	9e+11	9
13	1400	2.547	9e+11	10
14	1500	2.547	9e+11	11
15	1600	2.547	8.9e+11	12
16	1700	2.547	8.9e+11	13
17	1800	2.461	8.7e+11	0
18	1900	2.461	9e+11	1
19	2000	2.461	8.7e+11	2
20	2100	2.461	8.9e+11	3
21	2200	2.461	8.9e+11	4
22	2300	2.461	8.8e+11	5
23	2400	2.461	8.8e+11	6
24	2500	2.461	9e+11	7
25	2600	2.461	9.1e+11	8
26	2700	2.461	8.9e+11	9
27	2800	2.461	8.6e+11	10
28	2900	2.461	8.7e+11	11
29	3000	2.461	8.4e+11	12

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
30	3100	2.461	8.9e+11	13
31	3200	2.431	8.6e+11	0
32	3300	2.431	9.2e+11	1
33	3400	2.431	8.9e+11	2
34	3500	2.431	8.8e+11	3
35	3600	2.431	9.3e+11	4

36	3700	2.431	9.1e+11	5
37	3800	2.431	8.8e+11	6
38	3900	2.431	9.2e+11	7
39	4000	2.429	8.5e+11	0
40	4100	2.429	8.6e+11	0
41	4200	2.429	9e+11	1
42	4300	2.429	8.9e+11	2
43	4400	2.429	8.5e+11	3
44	4500	2.429	8.5e+11	4
45	4600	2.429	8.4e+11	5
46	4700	2.429	8.7e+11	6
47	4800	2.429	8.8e+11	7
48	4900	2.429	8.9e+11	8
49	5000	2.429	8.6e+11	9
50	5100	2.429	8.6e+11	10
51	5200	2.429	8.5e+11	11
52	5300	2.429	8.4e+11	12
53	5400	2.429	8.8e+11	13
54	5500	2.429	8.6e+11	14
55	5600	2.429	8.7e+11	15
56	5700	2.429	9.1e+11	16
57	5800	2.429	9.1e+11	17
58	5900	2.429	9e+11	18
59	6000	2.429	9.1e+11	19
		Best	Mean	Stall
Generation	f-count	Penalty	Penalty	Generations
60	6100	2.429	8.5e+11	20
61	6200	2.429	9.2e+11	21
62	6300	2.429	8.8e+11	22
63	6400	2.429	8.8e+11	23
64	6500	2.429	8.4e+11	24
65	6600	2.429	8.3e+11	25
66	6700	2.429	8.7e+11	26
67	6800	2.429	8.7e+11	27
68	6900	2.429	8.4e+11	28
69	7000	2.429	8.7e+11	29
70	7100	2.429	9e+11	30
71	7200	2.429	8.7e+11	31
72	7300	2.429	8.4e+11	32
73	7400	2.429	9.4e+11	33
74	7500	2.429	9.3e+11	34
75	7600	2.429	9.2e+11	35
76	7700	2.429	8.8e+11	36
77	7800	2.429	9.1e+11	37
78	7900	2.429	8.4e+11	38
79	8000	2.429	9.1e+11	39
80	8100	2.429	8.7e+11	40
81	8200	2.429	8.9e+11	41
82	8300	2.429	8.8e+11	42
83	8400	2.429	8.3e+11	43
84	8500	2.429	8.8e+11	44
85	8600	2.429	8.7e+11	45
86	8700	2.429	8.9e+11	46
87	8800	2.429	9e+11	47
88	8900	2.429	9.2e+11	48
89	9000	2.429	8.6e+11	49

Generation	f-count	Best Penalty	Mean Penalty	Stall Generations
90	9100	2.429	8.9e+11	50

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.FunctionTolerance
and constraint violation is less than options.ConstraintTolerance.

La configuración recomendada es la siguiente:

Cantidad de unidades generadoras:	3
Longitud del convertidor (mt):	2.19
El Generador número:	4
El Rectificador número:	1
El Capacitor número:	3
El Inversor número:	12

Conectados a través de un enlace DC
Con llegada a tierra por CC

La energía generada es de: 121665.39 [kWh]
La potencia máxima generada es: 15.00 [kW]
En su(s) [3] módulo(s).
Alcanzada en [2127] hora(s):
[38 41 44 47 50 53 56 113 116 119 122 125 128 131 134]

El costo total de la inversión es de:
US\$ 23116.50
La relación de dólares por kilowatt-hora
es: 0.1900 [US\$/kWh]
La tasa interna de retorno (TIR), para
un plazo de 20 años, es de 70.00 %.
El Valor Actual Neto (VAN), considerando
una tasa de descuento del 10.00 % es de:
US\$ 114645.71
El Período de recuperación es de:
2.43 años (2 años, 5 meses, 4 días)

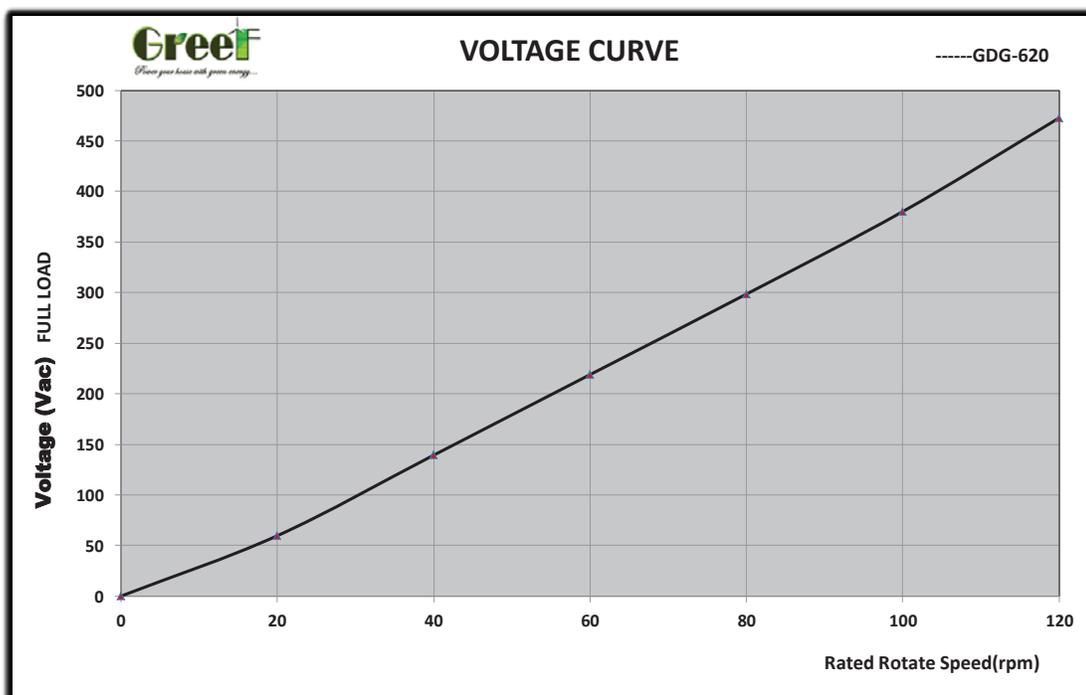
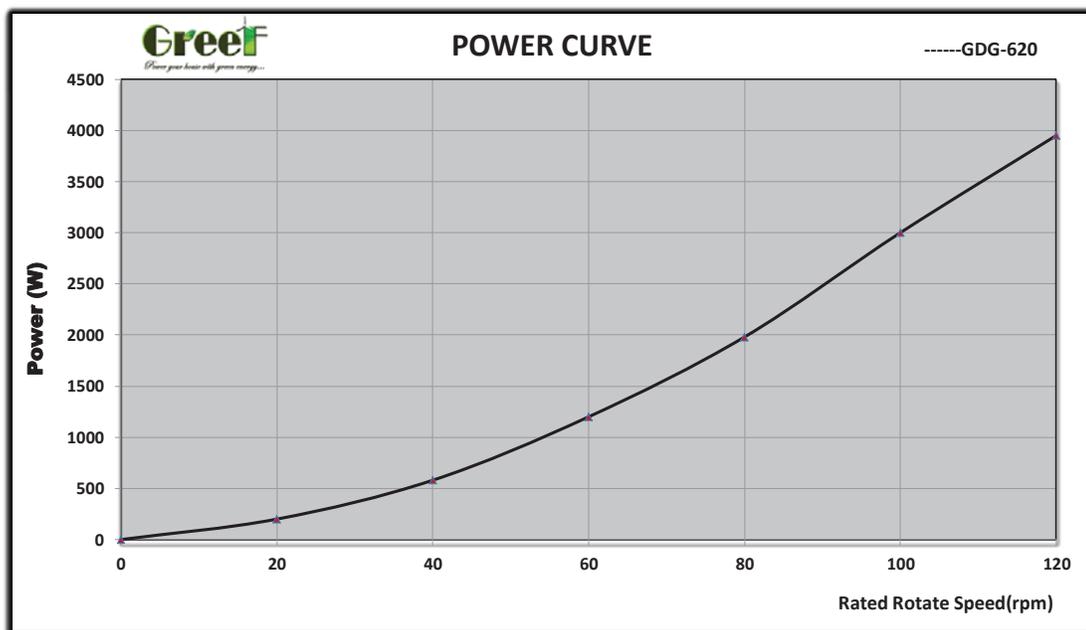
Se analizaron un total de: 8760 datos (horas)
El tiempo de simulación fue: 1005.765 segundos.
Las iteraciones (o generaciones): 90

>>

C Generadores

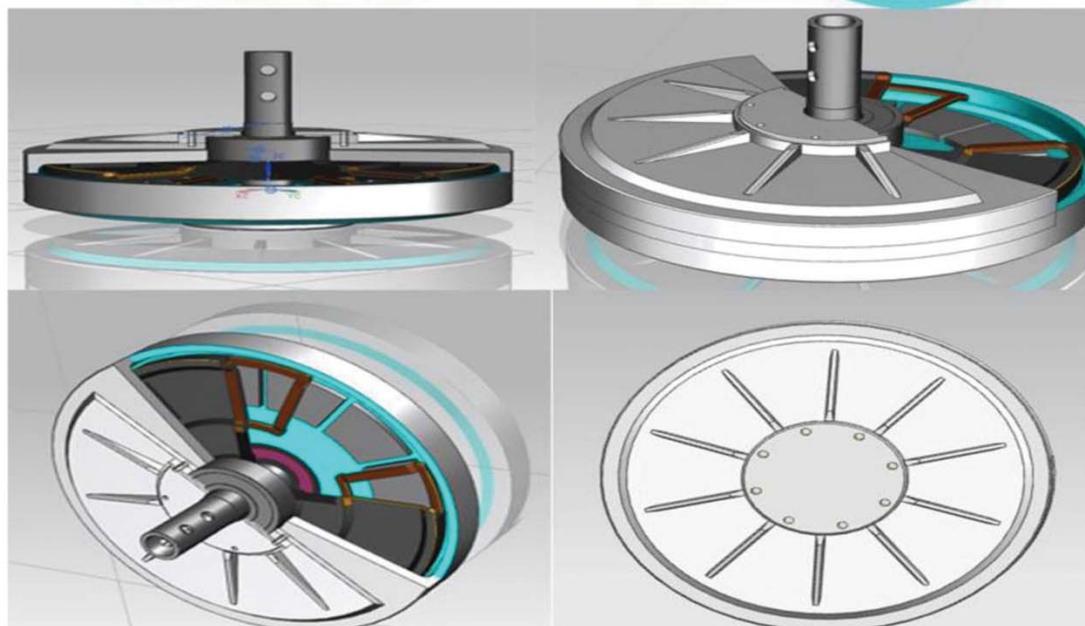
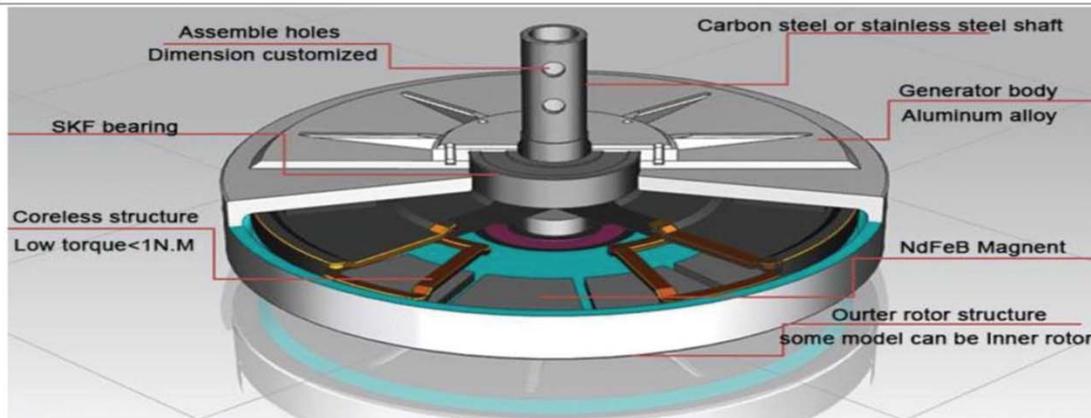
C.1 Generador Axial 3 KW – 100 RPM

		AXIAL FLUX CORELESS GENERATOR QUOTATION SHEET	
Pictures	Model	GDG-620	Unit Price
	Rated Power	3KW	\$3,465
	Rated Rotate Speed	100RPM	
	Rated Voltage	110-400VAC	
	Efficiency	>88%	
	Wending Method	Y	
	Insulating Resistance	100Mohm Min(500V DC)	
	Leakage Level	<5 ma	
	Start Torque	<1 N/M	
	Rated Torque	350N/M	
	Phase Type	3 Phase	
	Structure	Out rotor	
	Stator	Coreless wire coil	
	Rotor	Rare Earth Permanent Magnet	
	Generator Shell Diameter	620mm	
	Generator Shell Length	431mm	
	Weight	110kg	
Shaft diameter	80mm		
Generator shell material	Aluminum alloy		
Shaft material	Carbon steel		
Bearing	NSK Deep groove ball bearing		
Total Price		FOB QINGDAO	\$3,465
Advantage :	<p>(1) Torque Patent Technology: use newest "Precise Coil" technology. No hysteresis and gear notches effect make the start torque very low <1N.M</p> <p>(2) Original Structure: use disc coreless motor to take place traditional motor makes it less volume and weight.</p> <p>(3) Higher Utilization: use special coreless motor technology to eliminate the use bottlenecks of lower speed wind energy.</p> <p>(4) Higher Reliability: special structure make it bigger ratio of power to volume, power to weight and have long life of 8 times longer than traditional motor.</p> <p>(5) Gearless, direct drive, low RPM generator.</p> <p>(6) High standard, quality components for use in harsh and extreme environments for wind turbines</p> <p>(7) High efficiency and Low mechanical resistance energy loss</p> <p>(8) Excellent heat dissipation due to the Aluminum alloy outer frame and special internal structure.</p>		
Remark: 1.MOQ:sample order is available 2.Payment:T/T 100% in advance 3.Delivery date : 20 working days upon deposit arriving 4.Packing Info:Plywooden Case 5.Quotation Vality date: 2017-02-30 6.Gurantee: 3 years for free			





AXIAL FLUX CORELESS GENERATOR PICTURES





QINGDAO GREEF NEW ENERGY EQUIPMENT CO.,LTD

C.2 Generator Axial 5 KW – 100 RPM

 AXIAL FLUX CORELESS GENERATOR QUOTATION SHEET			
Pictures	Model	GDG-700	Unit Price
	Rated Power	5KW	\$4,098
	Rated Rotate Speed	100RPM	
	Rated Voltage	220-400VAC	
	Efficiency	>92%	
	Wending Method	Y	
	Insulating Resistance	100Mohm Min(500V DC)	
	Leakage Level	<5 ma	
	Start Torque	<1 N/M	
	Rated Torque	530N.M	
	Phase Type	3 Phase	
	Structure	Out rotor	
	Stator	Coreless wire coil	
	Rotor	Rare Earth Permanent Magnet	
	Generator Shell Diameter	700mm	
	Generator Shell Length	366mm	
	Weight	125kg	
	Shaft diameter	85mm	
Generator shell material	Aluminum alloy		
Shaft material	Carbon steel		
Bearing	NSK Deep groove ball bearing		
Total Price		FOB QINGDAO	\$4,098
Advantage :	<p>(1) Torque Patent Technology: use newest "Precise Coil" technology. No hysteresis and gear notches effect make the start torque very low <1N.M</p> <p>(2) Original Structure: use disc coreless motor to take place traditional motor makes it less volume and weight.</p> <p>(3) Higher Utilization: use special coreless motor technology to eliminate the use bottlenecks of lower speed wind energy.</p> <p>(4) Higher Reliability: special structure make it bigger ratio of power to volume, power to weight and have long life of 8 times longer than traditional motor.</p> <p>(5) Gearless, direct drive, low RPM generator.</p> <p>(6) High standard, quality components for use in harsh and extreme environments for wind turbines</p> <p>(7) High efficiency and Low mechanical resistance energy loss</p> <p>(8) Excellent heat dissipation due to the Aluminum alloy outer frame and special internal structure.</p>		
Remark: 1.MOQ: sample order is available 2.Payment: T/T 100% in advance 3.Delivery date : 25 working days upon deposit arriving 4.Packing Info:Plywooden Case 5.Quotation Vality date: 2017-02-30 6.Guarantee: 3 years for free			

