



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Perfil de misión de un convertidor multinivel en un  
sistema undimotriz

presentada por

**Ing. Erick Zain Adame Najera**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestría en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica**

Director de tesis

**Dr. Luis Gerardo Vela Valdés**

Codirector de tesis

**Dr. Jesús Aguayo Alquicira**

Cuernavaca, Morelos, México. Noviembre de 2022.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, **31/octubre/2022**  
Mor., **DIE/122/2022**  
No. de Oficio: **Aceptación de documentos de**  
Asunto: **tesis**

**DR. CARLOS MANUEL ASTROGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Erick Zain Adame Nájera, con número de control M20CE010 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Perfil de Misión de un Convertidor Multinivel en un Sistema Undimotriz" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Luis Gerardo Vela Valdés  
Doctor en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica  
Cédula profesional 7980044

**CODIRECTOR DE TESIS**

Dr. Jesús Aguayo Alquicira  
Doctor en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica  
Cédula profesional 4706315

**REVISOR 1**

Dra. Susana Estefany de León Aldaco  
Doctora en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica  
Cédula profesional 10458245

**REVISOR 2**

Dr. Jarniel García Morales  
Doctor en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica  
Cédula profesional 11106825

C.p. Lic. Silvia del Carmen Ortiz Fuentes- jefa del Departamento de Servicios Escolares  
Estudiante  
HEE/mrsr



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos  
Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2225, e-mail: die@cenidet.tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



**2022 Flores**  
Año de **Magón**  
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



Cuernavaca, Mor.,  
No. De Oficio:  
Asunto:

**17/noviembre/2022**  
**SAC/162/2022**  
**Autorización de**  
**impresión de tesis**

**ERICK ZAIN ADAME NÁJERA**  
**CANDIDATA(O) AL GRADO DE MAESTRA(O) EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Perfil de Misión de un Convertidor Multinivel en un Sistema Undimotriz", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
"Educación Tecnológica al Servicio de México"

  
  
EDUCACIÓN | SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA | TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

**DR. CARLOS MANUEL ASTORZA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/CHG



# DEDICATORIA

## **A Dios**

En primer lugar, dar gracias por darme la inteligencia y sabiduría para llegar hasta un posgrado, ya que ha estado conmigo desde que tengo uso de razón, también agradecerle por llenarme de bendiciones porque tengo salud y a mi familia completa.

## **A mis padres**

Erick Adame Mejía y Elizabeth Nájera Soto

Por su apoyo incondicional, también por sus consejos que me motivaron a no decaer durante mis estudios, por motivarme a ser un hombre de bien, de igual manera enseñarme las cosas buenas que puedes obtener si eres una buena persona y por último enseñarme que teniendo a Dios cerca puedes hacer cosas inigualables.

## **A mis hermanos**

Tanya y Arlett Adame Najera

Por contagiarme siempre de su alegría y motivarme para poder tener concluir cada etapa de mi vida porque todo lo que he logrado ha sido en dedicatoria a ellas, ya que he prometido ayudarles a concluir sus estudios debido a que soy el hermano mayor, poder dar el ejemplo que con dedicación se puede llegar muy lejos.

## **A mis familiares**

Quisiera demostrar a mi familia en general que no es necesario abandonar a la familia para poder tener una vida estable porque tengo familiares que no se encuentran aquí porque lo primero que hacen es alejarse de la familia para poder tener un mejor futuro, pero no tiene la visión de ver el sufrimiento de las personas que se quedan con la esperanza de que un día puedan volver a regresar.

## AGRADECIMIENTOS

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet) y Tecnológico Nacional de México (TecNM) por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en el área de maestría en ciencias en ingeniería electrónica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por haberme brindado el apoyo económico y motivación para concluir la tesis.

Al Dr. Luis Gerardo Vela Valdés, por brindarme la oportunidad nuevamente de realizar otro proyecto de investigación, por la constancia y disciplina que me va a impulsar a ser mejor. Además, por checar cada pequeño detalle que pueda haber para obtener un buen resultado.

Al Dr. Jesús Aguayo Alquicira, por su paciencia y comprensión durante el desarrollo de la tesis. Quien me enseñó a crecer como ser humano y como investigador durante mi estancia en Cenidet, además de ser excelente persona, como doctor y como amigo. ¡Gracias Doctor!

A la vida, ya que en estos momentos existen muchas enfermedades, pero gracias a Dios sigo con mi familia completa.

A mis compañeros que me impulsa a ser mejor, ya que existe un rango de competición que me motiva a echarle más ganas.

A mis abuelos y familiares por confiar en mí desde un inicio de mi carrera.

A mis hobbies que me ayudan a darme un tiempo de relajación y concentración para seguir adelante con lo de la tesis.

# Contenido

|                   |   |           |
|-------------------|---|-----------|
| <b>Capítulo 1</b> | <b>Introducción general .....</b>                                       | <b>1</b>  |
| 1.1               | Introducción General.....   | 2         |
| 1.2               | Antecedentes.....   | 3         |
| 1.3               | Estado del arte.....  | 6         |
| 1.4               | Problemática y propuesta de solución .....                              | 15        |
| 1.5               | Objetivos.....  | 19        |
| 1.6               | Justificación .....   | 19        |
| 1.7               | Alcance.....  | 19        |
| 1.8               | Conclusiones.....   | 20        |
| <b>Capítulo 2</b> | <b>Energía undimotriz y convertidor multinivel .....</b>                | <b>21</b> |
| 2.1               | Introducción General.....   | 22        |
| 2.2               | Introducción .....  | 23        |
| 2.2.1             | Potencial de la energía de las olas .....                               | 25        |
| 2.2.2             | Tecnologías en el aprovechamiento de energía undimotriz.....            | 26        |
| 2.2.3             | Situación actual de la explotación de la energía de las olas .....      | 30        |
| 2.3               | Perfil de misión y etapa de potencia .....                              | 31        |
| 2.4               | Emuladores de olas.....   | 31        |
| 2.5               | Generadores de cd .....   | 33        |
| 2.6               | Convertidores de Potencia .....   | 34        |
| 2.7               | Inversor multinivel.....  | 35        |
| 2.7.1.1           | Los inversores multinivel se clasifican en tres topologías básicas..... | 36        |
| 2.7.2             | Inversor Multinivel con diodos de enclavamiento.....                    | 36        |
| 2.7.3             | Inversor Multinivel con capacitores flotantes .....                     | 36        |
| 2.7.4             | Inversor multinivel en cascada.....                                     | 37        |
| 2.7.4.1           | Características del inversor multinivel. ....                           | 37        |
| 2.7.5             | Convertidor multinivel simétrico en cascada.....                        | 38        |
| 2.7.6             | Convertidor multinivel asimétrico en cascada.....                       | 38        |

|                    |  |           |
|--------------------|--|-----------|
| 2.7.7              | Inversores Multinivel con puente h .....   | 39        |
| 2.8                | Conclusiones .....   | 40        |
| <b>Capítulo 3</b>  | <b>Diseño y simulación de emulador de olas .....</b>                             | <b>41</b> |
| 3.1                | Introducción General.....  | 42        |
| 3.2                | Introducción .....   | 43        |
| 3.3                | Selección de perfil de ola y potencia generada.....                              | 45        |
| 3.4                | Potencia de emuladores de olas .....   | 48        |
| 3.5                | Componentes utilizados y características .....                                   | 49        |
| 3.5.1              | Características del optoacoplador a utilizar.....                                | 51        |
| 3.5.2              | Características del inversor multinivel utilizado en este caso un puente h ..... | 52        |
| 3.6                | Funcionamiento del puente completo .....   | 53        |
| 3.7                | Calculo de componentes para entrada y salida del inversor multinivel .....       | 54        |
| 3.8                | Bus de CD.....   | 55        |
| 3.9                | Dispositivos de conmutación.....   | 55        |
| 3.10               | Carga Resistiva.....   | 55        |
| 3.11               | Cálculo de los emuladores.....   | 56        |
| 3.12               | Simulación de los perfiles de olas.....  | 57        |
| 3.13               | Simulación del inversor multinivel en cascada.....                               | 58        |
| 3.14               | Conclusiones .....   | 62        |
| <b>Capítulo 4</b>  | <b>Experimentación y resultados de emulador de olas .....</b>                    | <b>63</b> |
| 4.1                | Simulación del inversor .....  | 65        |
| 4.2                | Simulación en Matlab Simulink .....  | 68        |
| 4.3                | Resultados Físicos.....  | 69        |
| 4.4                | Conclusiones .....   | 82        |
| <b>Capítulo 5</b>  | <b>Conclusión y trabajos a futuro .....</b>                                      | <b>83</b> |
| 5.1                | Introducción general .....   | 84        |
| 5.2                | Conclusiones del trabajo .....   | 85        |
| 5.3                | Trabajos futuros.....  | 86        |
| <b>Referencias</b> | <b>.....</b>   | <b>90</b> |

## RESUMEN

*Hoy en día existen muchos métodos para el aprovechamiento de energía renovables que a través de un cierto proceso puede ser transformada en energía eléctrica. Una de las energías destacadas con más funcionalidad es la undimotriz que genera electricidad a través de las olas.*

*Los sistemas de captación de energía dependen de sistemas electromecánicos donde se toman en cuenta el desempeño que ejerce respecto a condiciones ambientales en un determinado tiempo, básicamente a eso se refiere el perfil de misión. Hoy en día los sistemas de convertidores de potencia de CD/CA son muy útiles debido a que son muy factibles en aplicaciones domésticas y también en las industrias. Dentro de las topologías existentes se encuentra la configuración multinivel la cual a diferencia de las demás tiene más ventaja y además es muy manejable respecto a los voltajes que se pueden obtener.*

*En la mayoría de trabajos utilizan voltajes bajos de lo que se pueden usar en la realidad. En este trabajo se pretende seleccionar un punto en específico en México para poder obtener esa energía a base de potencia máxima a escala reflejada en generadores lineales, ya que la potencia máxima varía debido a que se realizan pruebas durante 1 año tomando en cuenta las estaciones del año, por lo cual los valores van cambiando porque las olas tienen diferente forma y frecuencia. También para la transformación de voltajes se emplea un inversor multinivel en cascada, además utilizar voltajes cercanos en la realidad.*

## ABSTRACT

*Today there are many methods for harnessing renewable energy that through a certain process can be transformed into electrical energy. One of the outstanding energies with more functionality is the wave energy that generates electricity through waves.*

*The energy harvesting systems depend on electromechanical systems where the performance that it exerts with respect to environmental conditions in a certain time is taken into account. Basically, that is what the mission profile refers to. Nowadays DC/AC power converter systems are very useful because they are very feasible in domestic applications as well as in industries. Within the existential topologies is the multilevel configuration which, unlike the others, has more advantages and is also very manageable with respect to the voltages that can be obtained.*

*In most jobs they use lower voltages than can be used in reality. In this work it is intended to select a specific point of Mexico to be able to obtain that energy based on maximum power on a scale reflected in linear generators, since the maximum power varies due to the fact that tests are carried out for 1 year taking into account the seasons of the year for which the values are changing because the waves have different shapes and frequencies. A multilevel cascade inverter is also used for voltage transformation, in addition to using voltages close to reality.*

## LISTA DE ACRÓNIMOS

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>EMEC</b>                | Centro Europeo de Energía Marina               |
| <b>CENACE</b>              | Centro Nacional de Control de Energía          |
| <b>SENER</b>               | Secretaria de Energía                          |
| <b>CA</b>                  | Corriente alterna                              |
| <b>kWm</b>                 | Kilowatts metro                                |
| <b>CD</b>                  | Corriente Directa                              |
| <b>Rpm</b>                 | Revoluciones por minuto                        |
| <b>A, I</b>                | Corriente                                      |
| <b>N. m.</b>               | Newton metro                                   |
| <b><math>\Omega</math></b> | Ohms   |
| <b>V</b>                   | Voltaje  |
| <b>P</b>                   | Potencia                                       |
| <b>R</b>                   | Resistencia                                    |
| <b>Hz</b>                  | Hertz  |
| <b>kHz</b>                 | Kilo-Hertz                                     |
| <b>Vdc</b>                 | Voltaje Directo                                |
| <b>TW</b>                  | Tera-Watts                                     |
| <b>TWh</b>                 | Tera-Watts-hora                                |
| <b>E</b>                   | Energía por metro frente a la ola              |
| <b>NOAA</b>                | Administración nacional atmosférica y oceánica |
| <b>In1</b>                 | Entrada 1                                      |
| <b>In2</b>                 | Entrada 2                                      |
| <b>AND</b>                 | Compuerta lógica (multiplicación)              |
| <b>IGBT</b>                | Transistor bipolar de puerta aislada           |
| <b>Rc</b>                  | Carga resistiva                                |
| <b>PLD</b>                 | Dispositivo lógico programable                 |
| <b>PCB's</b>               | Placa de circuito impreso                      |
| <b>THD</b>                 | Distorsión total de armónicos.                 |
| <b>WEC</b>                 | Convertidores de energía de las olas           |
| <b>HP</b>                  | Caballos de fuerza                             |

## NOMENCLATURA

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Pgen</b>                      | Potencia generada  |
| <b><math>\dot{\omega}</math></b> | Velocidad en Rpm   |
| <b><math>\tau</math></b>         | Torque entregado por el motor                            |
| <b>E</b>                         | Energía por metro frente a la ola                        |
| <b>D</b>                         | Densidad de la masa del agua de mar                      |
| <b>Kg. m<sup>3</sup></b>         | Kilogramo por metro cubico                               |
| <b>g</b>                         | Aceleración de la gravedad                               |
| <b>Hs</b>                        | Altura significativa de la ola                           |
| <b>Cg(f)</b>                     | Velocidad del grupo de olas                              |
| <b>S(f)</b>                      | Espectro de ola sin tener en cuenta su dirección de olas |
| <b>f</b>                         | frecuencias de onda que contribuyen a la energía         |
| <b><math>\pi</math></b>          | Pi   |
| <b>Te</b>                        | Periodo de energía                                       |
| <b>Pmax</b>                      | Potencia máxima  |
| <b>WEC</b>                       | Convertidores de energía de las olas                     |
| <b>FCMLI</b>                     | Inversor con condensadores flotantes                     |
| <b>CMLI</b>                      | Inversor en cascada                                      |
| <b>(N)</b>                       | Niveles generados en la tensión                          |
| <b>(H)</b>                       | Numero de células  |
| <b>PWM</b>                       | Modulación de ancho de pulso                             |
| <b>Vrms</b>                      | Voltaje eficaz   |
| <b>P</b>                         | Potencia motora, en W.                                   |
| <b>T</b>                         | Par del motor, en N. m.                                  |
| <b>N</b>                         | Revoluciones por minuto giro del motor (rpm)             |
| <b>mm</b>                        | Milímetros   |
| <b>pF</b>                        | Pico-faradios  |
| <b>ENA</b>                       | Habilitador A  |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.0.1</b> Potencia total en el año 2013(A), potencia total en el año 2019(B) (GARCÍA SANTIAGO, 2019).....                                    | 6  |
| <b>Figura 1.0.2</b> Potencia máxima en el año 2018-2019.....   | 7  |
| <b>Figura 1.0.3</b> Porcentaje de potencia total en las estaciones del año (2018-2019) .....   | 8  |
| <b>Figura 1.0.4</b> Promedio estacional del nivel de potencia de las olas (kW/m) en las áreas de estudio;.....   | 8  |
| <b>Figura 1.0.5</b> Promedio mensual de potencia de las olas (kW/m) para las zonas del Océano Pacífico y Golfo de México. ....                         | 9  |
| <b>Figura 1.0.6</b> Diseño de Sistema de polea, utilizado para el aprovechamiento de las corrientes marinas (Cortes Ríos & Guzmán Chacón,, 2015). .... | 9  |
| <b>Figura 1.0.7</b> Especificaciones técnicas del motor.....   | 11 |
| <b>Figura 1.0.8</b> Montaje eléctrico propuesto del sistema de aprovechamiento Mareomotriz .....   | 11 |
| <b>Figura 1.0.9</b> Control del inversor por medio de optoacopladores.....   | 13 |
| <b>Figura 1.0.10</b> Estructura del inversor multinivel a utilizar.....  | 13 |
| <b>Figura 1.0.11</b> Inversor multinivel monofásico en cascada .....   | 14 |
| <b>Figura 2.1</b> Estructura de olas .....   | 24 |
| <b>Figura 2.2</b> Movimiento de olas respecto a su ubicación. ....   | 26 |
| <b>Figura 2.3</b> Atenuador .....  | 27 |
| <b>Figura 2.4</b> Absorbedor Puntual .....   | 28 |
| <b>Figura 2.5</b> Brazo mecánico.....  | 29 |
| <b>Figura 2.6</b> Columna de agua oscilante .....  | 29 |
| <b>Figura 2.7</b> Ángulos de la formación de olas.....   | 32 |
| <b>Figura 2.8</b> Estructura del torque (Fuente: Potencia electromecánica funcionamiento de un motor).....   | 32 |
| <b>Figura 2.9</b> Convertidores de potencia.....   | 34 |
| <b>Figura 2.10</b> Clasificación de inversores .....   | 35 |
| <b>Figura 2.11</b> Inversor multinivel de 5 niveles.....   | 35 |
| <b>Figura 2.12</b> Células de convertidor multinivel .....   | 37 |
| <b>Figura 3.1</b> Potencia anual frente a la ola Barra de Potosí .....   | 47 |
| <b>Figura 3.2</b> Potencia anual frente a la ola Llano Real.....   | 47 |
| <b>Figura 3.3</b> Potencia anual frente a la ola Cópala .....  | 47 |
| <b>Figura 3.4</b> Características del motor reductor (emulador de olas) .....  | 50 |
| <b>Figura 3.5</b> Características del Generador .....  | 50 |
| <b>Figura 3.6</b> Datasheet de optoacoplador .....   | 51 |
| <b>Figura 3.7</b> Datasheet del puente L298n .....   | 52 |
| <b>Figura 3.8</b> Dispositivo L298n .....  | 52 |
| <b>Figura 3.9</b> Estructura del puente H L298n.....   | 53 |
| <b>Figura 3.10</b> Conmutación de transistores con giro hacia la derecha.....  | 53 |
| <b>Figura 3.11</b> Conmutación de transistores con giro hacia la izquierda .....   | 54 |
| <b>Figura 3.12</b> Control de emuladores .....   | 57 |
| <b>Figura 3.13</b> Simulación en proteus de los emuladores de olas .....   | 58 |
| <b>Figura 3.14</b> Salida de modulación de pulsos para el inversor multinivel.....   | 58 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 3.15</b> | Simulación en proteus del inversor de 7 niveles en cascada.....          | 59 |
| <b>Figura 3.16</b> | Estructura de optoacopladores .....                                      | 60 |
| <b>Figura 3.17</b> | Datasheet del puente H I298n.....  | 61 |
| <b>Figura 4.1</b>  | Simulación en Psim (inversor multinivel en cascada) .....                | 65 |
| <b>Figura 4.2</b>  | Simulación en Psim (Conmutación del inversor).....                       | 66 |
| <b>Figura 4.3</b>  | Conmutación físico del inversor .....                                    | 66 |
| <b>Figura 4.4</b>  | Potencia de salida del inversor multinivel (Simulación) .....            | 67 |
| <b>Figura 4.5</b>  | Corriente del inversor multinivel (Simulación) .....                     | 67 |
| <b>Figura 4.6</b>  | Simulación de inversor multinivel(matlab) .....                          | 68 |
| <b>Figura 4.7</b>  | Simulación del inversor multinivel(matlab).....                          | 68 |
| <b>Figura 4.8</b>  | Maqueta física para la emulación de los generadores.....                 | 69 |
| <b>Figura 4.9</b>  | Salida de los generadores respecto a los emuladores de olas. ....        | 71 |
| <b>Figura 4.10</b> | Estructura física del inversor de 7 niveles en cascada .....             | 72 |
| <b>Figura 4.11</b> | Salida del inversor 3 niveles.....                                       | 74 |
| <b>Figura 4.12</b> | Inversor 5 niveles .....   | 75 |
| <b>Figura 4.13</b> | Salida del inversor de 5 niveles .....                                   | 75 |
| <b>Figura 4.14</b> | Salida del inversor de 7 niveles en cascada en el osciloscopio .....     | 76 |
| <b>Figura 4.15</b> | Adquisición de datos para el cálculo de la THD.....                      | 76 |
| <b>Figura 4.16</b> | Adquisición de datos para el porcentaje de THD.....                      | 77 |
| <b>Figura 4.17</b> | Señal senoidal de los datos del osciloscopio en el programa Pspice ..... | 78 |
| <b>Figura 4.18</b> | FFT (transformada rápida de Fourier) .....                               | 78 |
| <b>Figura 4.19</b> | Porcentaje de THD obtenido .....   | 79 |
| <b>Figura 4.20</b> | THD de 24.25 %, Moeed Amjad, A., & Ahmed Saif, A. (2014).....            | 80 |
| <b>Figura 4.21</b> | THD de 16.5%, Chabni, F., & Rachib, T. (2016).....                       | 80 |
| <b>Figura 4.22</b> | THD de 11.9%,Salida del Sistema obtenido.....                            | 81 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1 Características del sistema de poleas.....   | 10 |
| Tabla 1.2 Características del inversor multinivel .....                                      | 12 |
| Tabla 1.3 Porcentaje de niveles en inversores multinivel.....                                | 14 |
| Tabla 1.4 Comparación de entre un sistema mareomotriz y undimotriz .....                     | 18 |
| Tabla 3.1 Características de datos de perfil de olas.....                                    | 45 |
| Tabla 3.2 Selección de mayor potencial obtenido.....   | 46 |
| Tabla 3.3 Datos del perfil de olas.....  | 48 |
| Tabla 3.4 Características del motorreductor .....  | 49 |
| Tabla 3.5 Tabla 6. Características del inversor multinivel.....                              | 54 |
| Tabla 3.6 Conversión para la obtención del torque. ....                                      | 56 |
| Tabla 3.7 Ángulos de conmutación para el inversor multinivel.....                            | 59 |
| Tabla 4.1 Porcentaje a escala de la salida de generadores sustituida por fuentes de CD ..... | 71 |

---

# ***Capítulo 1***

---

## ***Introducción general***

## **1.1 Introducción General**

Existen diferentes energías respecto al aprovechamiento de las olas, como por ejemplo la energía de las mareas o mareomotriz, energía de las corrientes, energía maremotérmica, energías de las olas o undimotriz y la energía osmótica, (Dolgo. V., 2015), (Rodríguez Santos & Chimbo Campuzano, 2017).

Se realiza un estudio en México para obtener energía a base de potencia máxima que es aprovechada por el movimiento de olas a cierta escala que es reflejada en generadores lineales (González-Ramírez, Hernández-Robles, & Barrios-Piña, 2017), ya que la potencia máxima varía debido a que se realizan pruebas durante 1 año tomando en cuenta las estaciones del año, por lo cual los valores van cambiando porque las olas tienen diferente forma y frecuencia.

La mayoría de sistemas de captación de energía dependen de un sistema electromecánico donde se toman en cuenta su estructura para la obtención de energía eléctrica, como lo es absorbedor puntual (Díaz Toril, de la Villa Jaén, & Montoya Andrade, 2015) brazo mecánico (CORREA HERNÁNDEZ, 2016), atenuadores (Pire Cortés, 2018) y la columna de agua oscilante (Lekube , Garillo, Garillo , & otaola, 2018)

Actualmente, existen varios proyectos relacionados con la estructuración de emuladores donde se relacionan con la obtención de la energía undimotriz pudiéndola transformar a energía eléctrica como lo son; (BRAVO MOYA, 2008), (Cortes Ríos & Guzmán Chacón,, 2015), (GARCÍA SANTIAGO, 2019), respecto al perfil de misión se toma cuenta la siguiente metodología que es (De León Aldaco , Aguayo Alquicira, & Calleja Gjumlich, 2014).

El convertidor en cascada es uno de los más utilizados, ya que cuenta con numerables ventajas y en este caso no es la excepción para este proyecto a desarrollar los más destacables (BÁRCENAS BÁRCENAS , 2002), (E. Montalvo, A. Domínguez, F. Escalante, & Rodríguez-Cortes, 2013), (Chavero Ramírez, López Tapia , & Vázquez Nava, 2018), (Araque, Díaz Rodríguez, & Sallyth Guerrero, 2016), (Nuñez Sampers Muñoz, 2017), (Pabón-Fernández, Díaz-Rodríguez, & Pardo-García, 2016), (Pabón Fernández & Diaz Rodriguez, 2017), (Muñoz-Galeano, López-Lezama, & Villada-Duque, 2018)

El objetivo principal es poder evaluar el desempeño de un convertidor multinivel con un perfil de misión que desempeña un perfil de olas. Tomando en cuenta que se pueda diseñar un emulador de un sistema undimotriz con finalidad conmutar con dispositivos adecuados relacionados con la electrónica de potencia que ayuden a generar energía eléctrica útil.

## **1.2 Antecedentes**

En el desarrollo de este trabajo se encontraron los conceptos básicos de generación eléctrica a partir de los movimientos naturales presentes en el océano. Respecto a eso, se menciona un análisis detallado de algunas técnicas de aprovechamiento energético que se utilizan para la obtención de energía presente en los océanos, mareas y olas. Una vez teniendo claro la fuente renovable a usar y la selección de un cierto perfil de estudio acerca del movimiento del mar, se pretende utilizar lo que viene siendo el perfil de misión.

Existen más de 600 patentes para aprovechar la fuerza del oleaje a fin de generar energía eléctrica, el funcionamiento de los sistemas undimotrices depende del movimiento que se quiere aprovechar del oleaje. Hoy en día se tiene un enorme interés en el desarrollo de la energía undimotriz, de acuerdo con el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) actualmente existen 226 desarrolladores enfocados en la energía undimotriz a nivel mundial. Entre los principales proyectos de desarrollo undimotriz se encuentra EE.UU., el Reino Unido y Australia (EMEC, 2016).

La meta del gobierno federal es alcanzar una participación del 35% en la generación total de electricidad con tecnologías sustentables para el año 2024 (SENER, 2012). El Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), en su propuesta del Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Mayorista 2015-2029 (CENACE, 2015).

Los sistemas electromecánicos son muy utilizados en la mayoría de sistemas de captación de energía debido a la facilidad de transformar energía cinética y potencial en energía eléctrica, donde la mayoría de estos sistemas tienden a producir una corriente eléctrica porque la mayoría obtienen una salida de CA.

En México hasta el año 2012 se empezó a tocar este tipo de temas en el aprovechamiento de la energía de las olas, hasta ese instante solo se conocían informes globales por medio de modelación satelital, en donde los datos eran en su mayoría extrapolados de otros países porque México no contaba con ningún estudio específico en el tema. En ese mismo año, entraría en marcha un proyecto Undimotriz en el estado de Baja California por una compañía finlandesa (AW- Energy Wave Roller); el cual no se llevó a cabo por discrepancias con el gobierno Federal.

El perfil de misión puede definirse como una representación simplificada de las condiciones a las que un componente o ensamble electrónico que estará expuesto a lo largo de un ciclo de vida. En este caso se pretende utilizar esta metodología en un sistema de conversión mecánica eléctrica, ya que la obtención de electricidad en este tipo de energías renovables depende de sistemas electromecánicos.

## **El futuro de la energía undimotriz en México**

Existen algunas propuestas para la implementación de prototipos de energía undimotriz e incluso plantas eléctricas en México, no se han realizado avances importantes pues el potencial undimotriz en México no ha sido estudiado correctamente, por lo que no existen datos confiables y verdaderamente ciertos que puedan ser utilizados dentro del diseño, simulaciones y pruebas de los dispositivos.

Sin embargo, el Gobierno de México publicó, en 2017, un documento sobre la energía del océano elaborado por el Instituto Mexicano del Petróleo, en donde se establecen las necesidades tecnológicas de cada una de las energías renovables correspondientes a la energía del océano.

Es importante mencionar que las necesidades tecnológicas antes mencionadas tienen un tiempo estimado de desarrollo diferente entre sí, pues algunas de éstas están previstas para un año después de la publicación del documento, mientras que algunas prevén utilizarlas a partir de año 2020 en adelante.

Toda la información acerca de los planes de la Secretaría de Energía para el aprovechamiento de las energías renovables hasta el 2030, incluyendo toda la información necesaria sobre energías del océano se encuentra disponible en el sitio web del Gobierno de México.

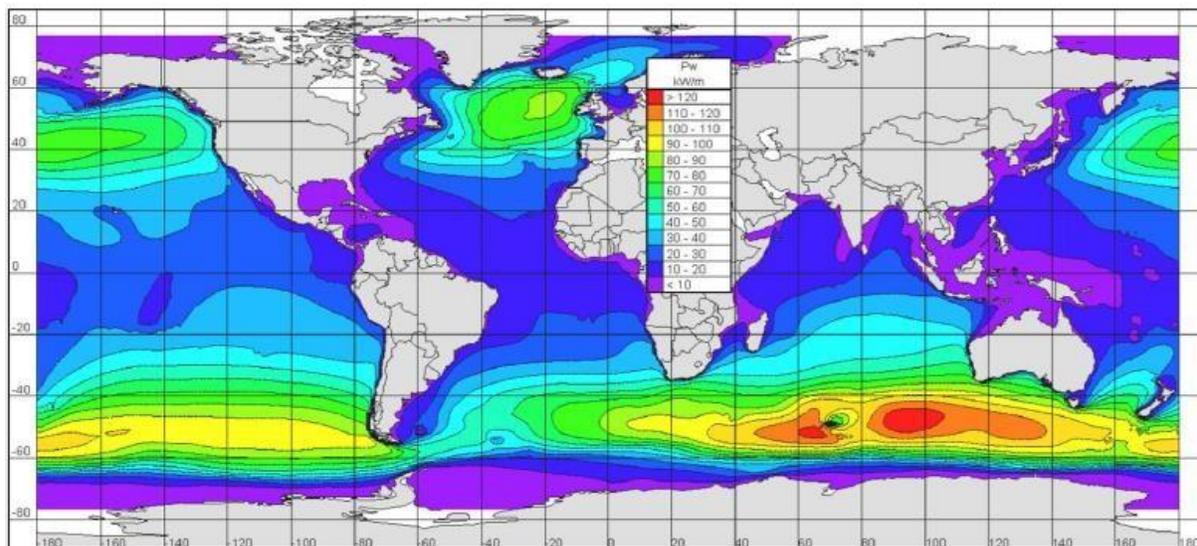
También existe una clasificación de dos tipos de oleaje se conocen como **Sea** y **Swell**, consta mucho del sitio donde es observado, también cuenta mucho el viento que lo genera, (dentro del fetch) o fuera de la zona de generación.

## SEAS

El oleaje depende mucho del viento en la zona de generación que se efectúa, los periodos se encuentran entre un rango de 3 y 25 segundos. La apariencia de la superficie puede ser tempestuosa, respecto al oleaje irregular de crestas cortas.

## SWELL

También es conocido como mar de fondo, se ha desplazado fuera de su zona de generación, el cual puede presentar periodos un poco más largos mayores a 10 segundos. Este tipo de oleaje esta formado por crestas regulares bien definidas y de periodo largo, con una apariencia del mar en un estado ordenado, a continuación, se muestra el potencial de olas anual.



*Figura 1 Estimación anual del potencial undimtriz global en un periodo de 10 años*

### 1.3 Estado del arte

La revisión del estado del arte se genera un panorama general de los avances en el área sobre el conocimiento que se relaciona con la presente tesis. Seleccionar un perfil de olas que determine el desempeño de un sistema de captación respecto al oleaje electo conforme a un perfil de misión.

A través de sistemas electromecánicos se puede obtener un potencial eléctrico, por medio de un inversor multinivel se puede aprovechar su funcionamiento para incrementar el potencial obtenido y sumarlo por cada sistema que se tenga y formar una salida senoidal escalonada. Se constituye por Selección de perfil de olas, emulador de olas, generadores de potencia en CD e inversor multinivel.

#### Selección de perfil de olas

En las costas mexicanas se calculó el potencial que existente en el año 2013 así como se expresa en la figura 1.1 A en comparación del porcentaje más actual que fue en el año 2018 – 2019 que se muestra en la figura 1.1 B.

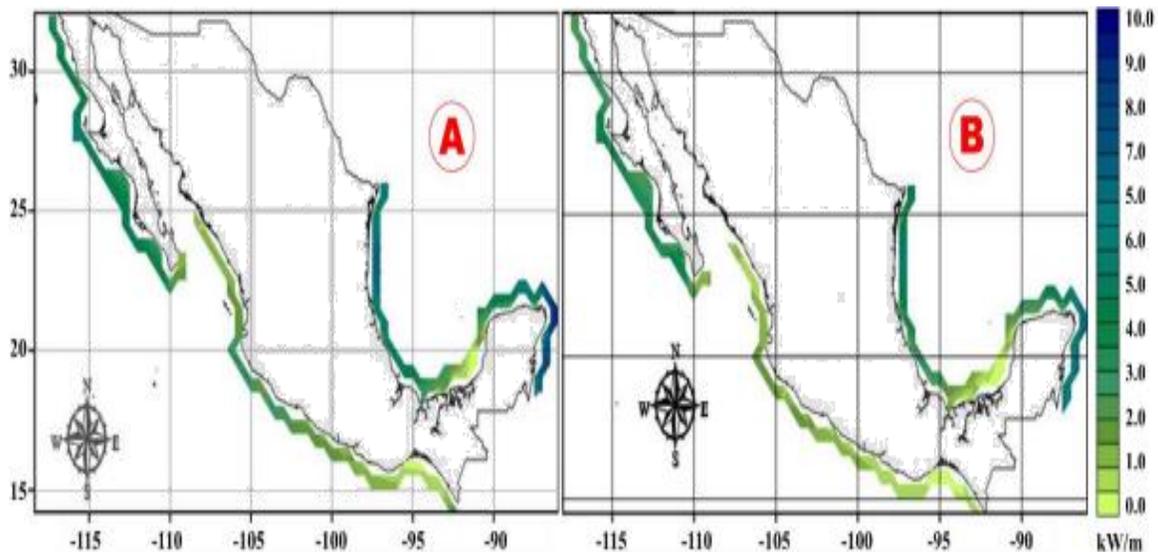


Figura 1.1 Potencia total en el año 2013(A), potencia total en el año 2019(B) (GARCÍA SANTIAGO, 2019)

Respecto al potencial obtenido en año 2019, Se toman en cuenta los estados con mayores dispositivos, para ver el porcentaje total de kW/m que se ejercen en cada uno de los mecanismos de captación de energía.

Como por ejemplo en la figura 1.2 se muestran algunos sitios de mayor potencial explotable, que se agrupan en 4 zonas:

Océano Pacífico

Zona 1 (Península de Baja California) con una potencia entre 8 y 14 kW/m,

Zona 2 (Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco) con un rango de 6 a 11 kW/m, en el mar Caribe y Golfo de México,

Zona 3 (Península de Yucatán) con un rango de 3 a 6 kW/m y Zona

4 (Tamaulipas) con 2 a 5 kW/m los datos estadísticos que se muestran son tomados de **(ATLOOM) Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano**.



Figura 1.2 Potencia máxima en el año 2018-2019.

La selección de un punto específico tomando en cuenta las zonas que se muestran en la figura 1.3 se opta por hacer una comparativa de los estados con más potencial ejercido por las olas.

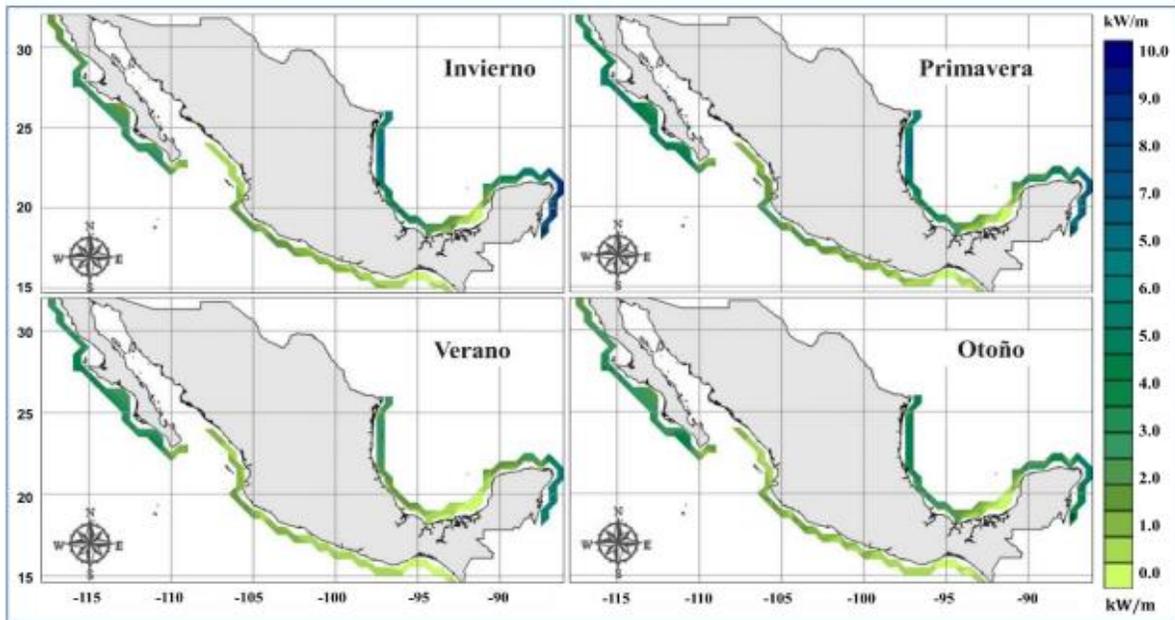


Figura 1.3 Porcentaje de potencia total en las estaciones del año (2018-2019)

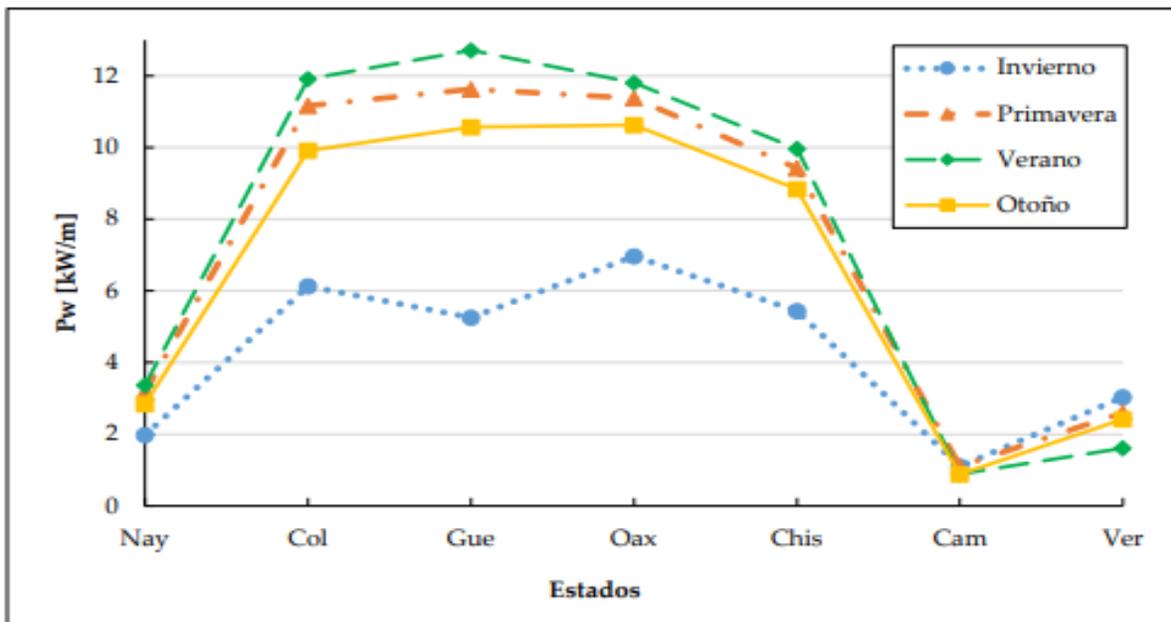


Figura 1.4 Promedio estacional del nivel de potencia de las olas (kW/m) en las áreas de estudio;

Realizando una comparativa del porqué seleccionar el potencial de olas en el océano pacífico en lugar del golfo de México. Se adquiere un estudio en el año 2018-2019 a lo largo de las 4 estaciones del año, de tal manera que se obtiene el porcentaje de potencia dado en kW/m como se muestra en la figura 1.5.

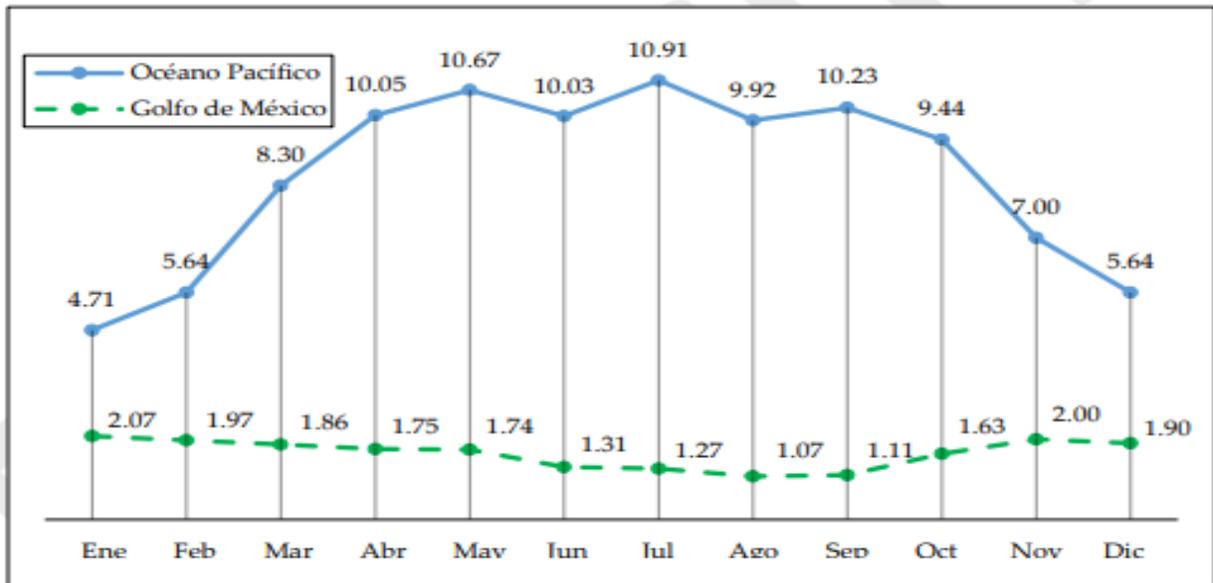


Figura 1.5 Promedio mensual de potencia de las olas (kW/m) para las zonas del Océano Pacífico y Golfo de México.

### Emuladores de olas

Para la parte de la selección de un sistema, en el año 2015 se fabricó una maqueta que emula la oscilación de olas y ese movimiento se transforma a energía eléctrica a base de una polea que se sincroniza con un generador de CD, como se muestra en la figura 1.6.

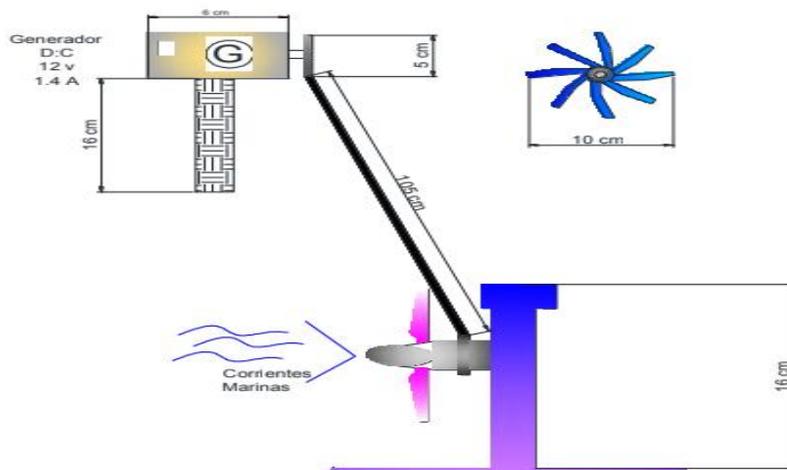


Figura 1.6 Diseño de Sistema de polea, utilizado para el aprovechamiento de las corrientes marinas (Cortes Ríos & Guzmán Chacón., 2015).

Tabla 1 1 Características del sistema de poleas

| <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>  |
|---|---|
| Se puede emular el movimiento de las olas a base de mini turbinas simétricas que obtienen una cierta corriente por medio de generadores de CD                     | La simulación de los movimientos existentes en el océano, presentan gran dificultad en el diseño.   |
| Los materiales a usar tienen un bajo costo, debido a que pueden ser reciclables, excepto el generador.  | El problema del material a utilizar posee una baja resistencia al agua y tiende a degradarse muy rápido debido a que tiene un mayor porcentaje de acrílico. |
| Esta tecnología aprovecha la energía cinética que se presenta en el mar, la cual es más fácil de asimilar mediante prototipos más sencillos.                      | No se permite saber cómo tal el porcentaje de pérdida de potencia que pueda obtener el sistema.   |
| Presenta un aprovechamiento favorable con respecto a las otras dos técnicas, por qué explota el constante movimiento de las mareas durante el transcurso del día. |   |

Este sistema está compuesto de un elemento importante, el cual permite aprovechar las corrientes marinas, se optó por un tipo de turbina emulando aerogeneradores.

Respecto a las turbinas este tipo “Extremos de pala variable”, es lo que da a las hojas el ángulo de ataque óptimo, de modo que la turbina pueda recoger la máxima cantidad de energía.

## Generador

Este funciona acoplado a un eje que transmite el movimiento a una polea simétrica, y esta a su vez se comunica con el generador.

En la figura 1.7 se muestran las características del motor, tanto el dato de voltaje que trabaja, los rpm que se ejecutan dependen de la cantidad de amperaje que se tiene y el potencial que se obtiene a la salida del generador.

Los datos que utiliza ese sistema son los siguientes:

| MODEL          | VOLTAGE         |              | NO LOAD |         | AT MAXIMUM EFFICIENCY |         |        |      | STALL  |        |      |         |
|----------------|-----------------|--------------|---------|---------|-----------------------|---------|--------|------|--------|--------|------|---------|
|                | OPERATING RANGE | NOMINAL      | SPEED   | CURRENT | SPEED                 | CURRENT | TORQUE |      | OUTPUT | TORQUE |      | CURRENT |
|                |                 |              | r/min   | A       | r/min                 | A       | mN-m   | g-cm | W      | mN-m   | g-cm | A       |
| RF-370CA-15370 | 3 - 12          | 12V CONSTANT | 5600    | 0.026   | 4840                  | 0.17    | 2.48   | 25.3 | 1.25   | 18.3   | 187  | 1.06    |

Figura 1.7 Especificaciones técnicas del motor

Para generar la potencia de un dispositivo de mareomotriz se deben garantizar los siguientes datos en la ecuación 1.

$$P_{gen} = \frac{\dot{\omega} * \tau}{60/2\pi} \quad (1)$$

Donde  $\dot{\omega}$  es la velocidad en RPM y  $\tau$  es el torque entregado por el motor, para obtener una potencia promedio de 6 W, relacionando con las especificaciones del motor (Figura 8) y la curva característica del motor, se debe tener una velocidad de 3500 RPM y un torque de 1.8 mN\*m,  $P_{gen} = \omega * \tau / 94.247 = 3500 \text{ RPM} * (1.8 * 10^{-3}) / 94.24 = 0.668 \text{ W}$

Tomando como ejemplo una potencia generada de 6 W, y una resistencia en un rango de 20  $\Omega$  a 25  $\Omega$  se obtendría el voltaje resultante de:

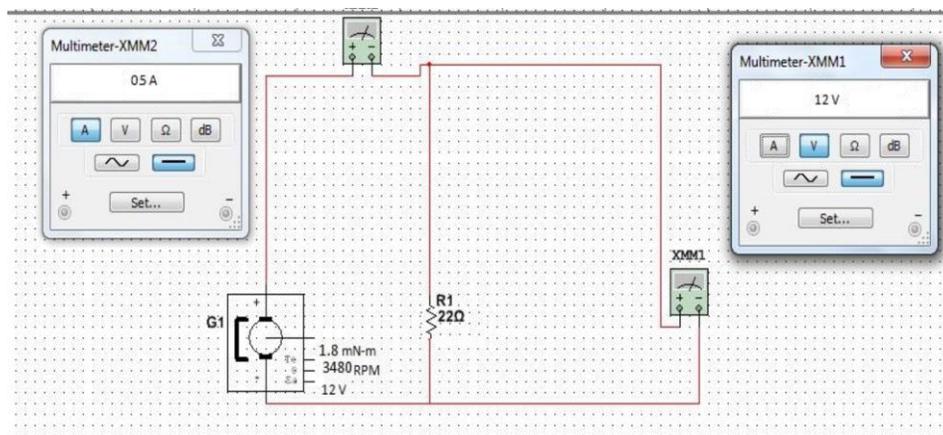


Figura 1.8 Montaje eléctrico propuesto del sistema de aprovechamiento Mareomotriz

$$V=\sqrt{P*R}$$

$$V=\sqrt{(6.3*20)}=11.224 \text{ V}$$

$$V=\sqrt{(4.8*25)}=12.549 \text{ V}$$

Luego de realizar las operaciones anteriores, se obtiene un voltaje entre los 12 V y 13 V, las resistencias se calculan conforme a la corriente máxima que brinda motor.

### **Inversor multinivel**

Respecto a la potencia, existen proyectos que ayudarían a facilitar la obtención de una salida de CA, en este caso el recurso más viable es utilizar un inversor multinivel en cascada que tendrá la capacidad de unir los voltajes obtenidos de los generadores para formar una salida de CA escalonada.

Por ejemplo, en el año 2011 se realizó un proyecto de un convertidor multinivel con un emulador de fallas, donde su principal objetivo es diseñar y construir un inversor multinivel simétrico monofásico de 7 niveles, que tenga la característica de emular fallas en los interruptores de cada celda que componen al inversor.

Las condiciones experimentales utilizadas para poner en operación al inversor multinivel monofásico como se muestra en la tabla 1.2.

*Tabla 1.2 Características del inversor multinivel*

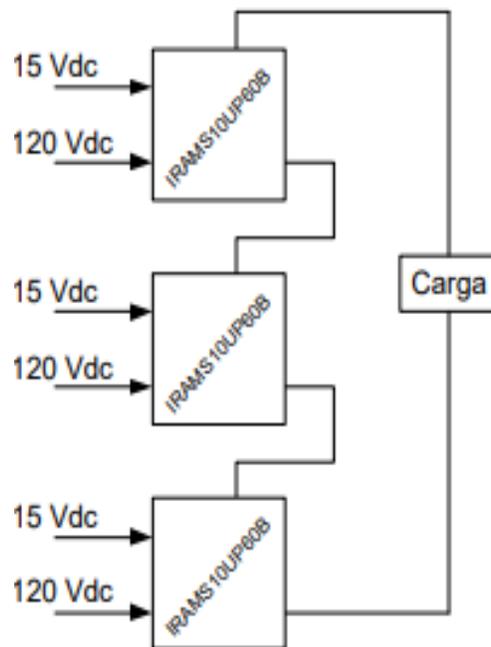
| Parámetro                        | Valor     |
|----------------------------------|-----------|
| Voltaje de fuentes separados, DC | 118V      |
| Carga                            | Resistiva |
| Frecuencia de moduladora         | 60 Hz     |
| Frecuencia de portadora          | 3.6 kHz   |
| Índice de modulación             | 0.85      |

Una de las principales características de este trabajo a utilizar son el manejo de optoacopladores, los cuales llevan el control para la modulación del inversor multinivel, así como se muestra en la siguiente figura.



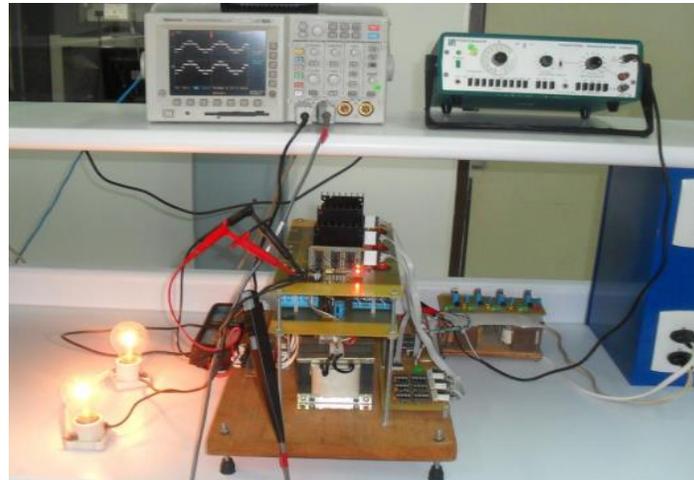
*Figura 1.9 Control del inversor por medio de optoacopladores*

En la parte del inversor multinivel monofásico se utilizaron 2 fuentes de alimentación por cada célula (módulo IRAMS10UP60B), una fuente que alimente al bus de CD y otra para alimentar al módulo de potencia, así como se muestra en la siguiente imagen.



*Figura 1.10 Estructura del inversor multinivel a utilizar*

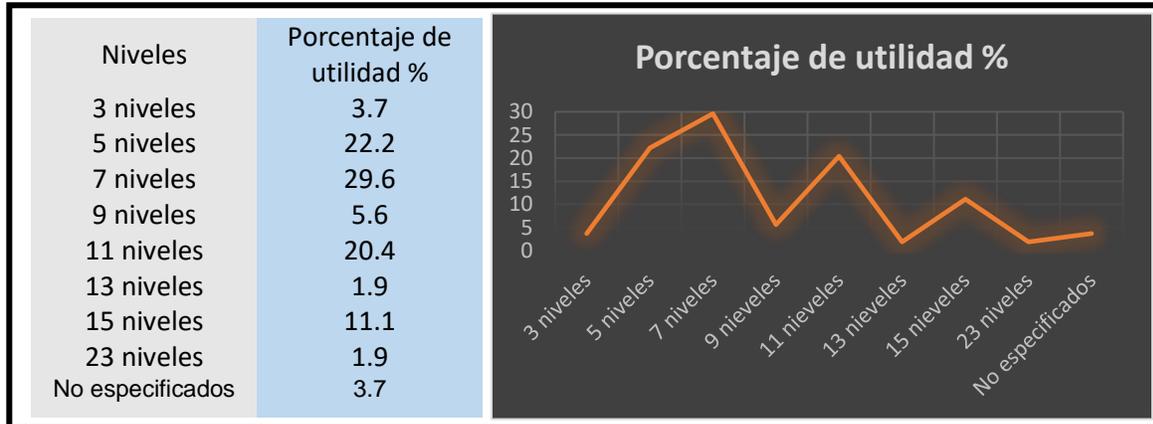
Por último, en la salida se implementa el encendido de 2 focos incandescentes conectados en serie en 100 Watts y 125 V cada uno como se muestra en la figura 1.11.



**Figura 1.11** Inversor multinivel monofásico en cascada

En la tabla 1.3 se muestra el porcentaje de utilidad de los niveles utilizados en los inversores multinivel.

*Tabla 1.3* Porcentaje de niveles en inversores multinivel



#### **1.4 Problemática y propuesta de solución**

La mayor parte de estudios realizados acerca del aprovechamiento de energía aplicado en las energías renovables con relación a la ingeniería electrónica, consta de un gran estudio debido a la gran mayoría de proyectos relacionados tanto en energías renovables y la electrónica de potencia.

Hoy en día existen diferentes proyectos con distintos diseños que se acoplan dependiendo de la profundidad y del movimiento que generan las olas respecto a su frecuencia, Entre mayor sea la profundidad puede subir el costo del dispositivo y también el mantenimiento que se le aplica en el transcurso de su funcionamiento.

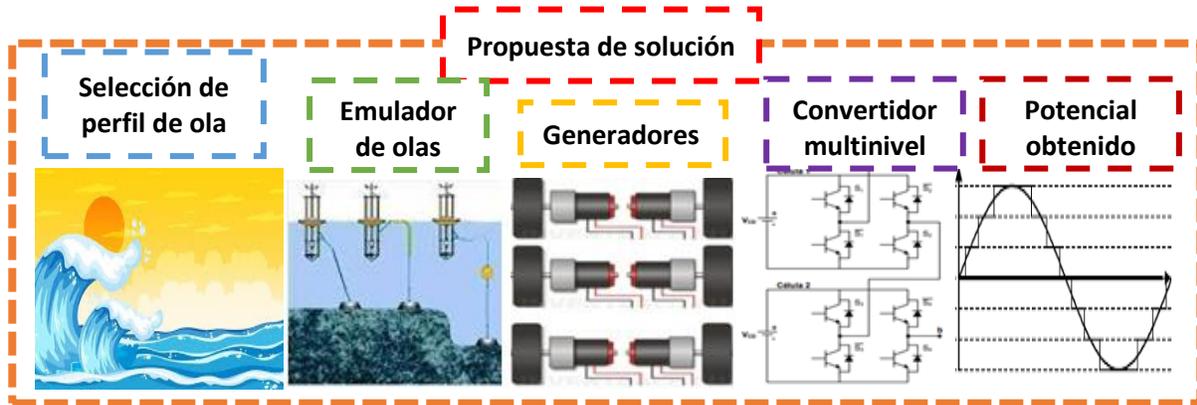
El funcionamiento de un sistema depende del comportamiento de las olas, los sistemas de captación de olas se adaptan al movimiento horizontalmente y vertical de las olas, una vez que se obtenga la cantidad de energía, se transformé en electricidad.

El potencial de las olas se transforma a potencia eléctrica por medio de dispositivos mecánicos que se sincronizan con convertidores de potencia para obtener una salida de CA a mayor escala.

En la parte de la problemática su objetivo es obtener una corriente eléctrica, una opción es hacer una maqueta que emule el comportamiento de un sistema real., donde se pretenden abordar el estudio de generadores eléctricos de CD, que dependerán de un perfil de las olas seleccionado a lo largo de un periodo de tiempo.

Una de las cuestiones más emblemáticas del sistema es el tipo de operación que va a ejercer en los generadores debido a la resistencia que tienen respecto a su desempeño generado.

Sé abordar el estudio de convertidores de potencia con sus respectivas especificaciones, por ejemplo, el utilizar un convertidor multinivel, ya que es el medio que tiene más relación con los generadores de CD, donde su característica principal es obtener una salida CA a base de niveles de CD.



La parte de la solución del problema se divide en 5 partes importantes

- 1.- La primera parte de selección del perfil se pretende buscar una base de datos donde proporcione un cierto porcentaje de potencial que sea considerable respecto a otros puntos comparativos.
- 2.- El segundo apartado se buscan los materiales adecuados que emulen el movimiento de las olas para poder transformar ese movimiento en una potencia a través de generadores de CD.
- 3.- En la tercera parte se expresa que una de las ventajas de poder utilizar generadores de CD, es omitir componentes de potencia como, por ejemplo: un rectificador si se llegase a utilizar un alternador para poder obtener una salida de CD que ayuden al inversor multinivel a cumplir con su funcionalidad.
- 4.- En la cuarta parte se pretende obtener una salida de CA por medio de un inversor multinivel en cascada, el cual cumple la función de obtener una salida de CA a través de fuentes de CD de manera escalonada.

Se recomienda poder utilizar una salida de 7 niveles debido a que las olas completas están compuestas por 2 crestas y 1 valle, El usar 3 sistemas de captación de energía aplicado a un inversor multinivel da como resultado a la salida 7 niveles de igual la salida obtenida tendría más acercamiento a la normativa de la IEEE.

Si se usan 2 sistema la salida da 5 niveles en el inversor, lo cual es muy difícil cumplir cierta normativa y si fuese lo contrario afectaría más en la parte de su control, ya que su THD sería muy elevada y no se tendría un control en el sistema conforme a la relación del movimiento de olas.

**5.-** En la fase final se busca obtener una salida que tenga un cierto acercamiento a la normativa de los sistemas de 7 niveles y poder hacer una comparación con otros sistemas para ver las comparativas que existen entre cada uno de ellos.

Tabla 1.4 Comparación de entre un sistema mareomotriz y undimotriz

| <b>Sistema construido para el aprovechamiento Mareomotriz</b>  | <b>Sistema construido para el aprovechamiento Undimotriz</b>   |
|--|--|
| El sistema de aprovechamiento mareomotriz presentó mayor dificultad debido a que en el diseño y construcción, se tuvo que tener un sistema auxiliar de acoplamiento de poleas para evitar el uso de un generador sumergible. | Respecto al sistema undimotriz también tiene un porcentaje de complejidad al realizar la conmutación del inversor multinivel, pero tiene menor dificultad, ya que en la simulación se simplifica y facilita las interconexiones del sistema, debido a que los materiales a utilizar aparte de que tienen un bajo costo también cuentan con su manual de funcionalidad (Datasheet). |
| El sistema de aprovechamiento mareomotriz tiene muy poca afectación visual en el paisaje, pero debido a que se instala a profundidad puede llegar a afectar la fauna y flora del sitio de instalación.                       | Conforme al sistema de aprovechamiento, no tiene alguna implicación o afectación en su instalación, debido a que solo se necesita obtener la ubicación y porcentaje de potencia kWm que se genera en un determinado tiempo.  |
| El artefacto diseñado y construido de Aprovechamiento mareomotriz genera una tensión de 12 VDC.  | Para este sistema diseñado puede emular un sistema de igual manera de 12VDC, pero también puede generar 36 VCA utilizando el inversor multinivel en cascada.   |
| Existen dispositivos que con la carga propuesta de 22 $\Omega$ genera un promedio de 7 W, tomando valores de torque 0 a 2 Newton metro.  | Para el sistema undimotriz respecto a las cargas de 22 $\Omega$ de igual manera genera 7W, pero aumentando la corriente máxima del sistema seleccionado puede aumentar hasta 24W por cada sistema independiente.   |
| Este dispositivo puede generar un máximo de 144 W DC si se instala una carga de 1 $\Omega$ que disipe esta potencia en el caso que la potencia fuera de 6 Watts.   | Respecto a este sistema puede generar un máximo de 210 W CA debido a que cada sistema puede soportar un voltaje de 35 V y 2 amp.   |
| Este artefacto construido gira con un torque de 1.8 m*Nm y con una velocidad de 3500 RPM, aunque el valor de salida es pequeño debido a que se está trabajando con valores menores.  | Este artefacto construido gira con un torque de 0.657 N.m y con una velocidad de 200 RPM.  |
| Con el diseño de este método de aprovechamiento energético se debe transmitir el movimiento hasta la superficie, para facilitar el transporte de la energía eléctrica generada.  | Una de las características que puede satisfacer este método a utilizar es que puede aplicarse en cualquier sistema de captación de energía que tengan turbina como fuesen los generadores como por ejemplo las columnas de aguas oscilantes, los brazos mecánicos etc.   |
| Este el sistema de aprovechamiento Undimotriz genera mayor potencia, sin embargo, este consume una potencia mayor para su sistema de simulación.   | Este sistema consume menos potencia para su artefacto de simulación, pero a su vez genera menor potencia.  |

## **1.5 Objetivos**

### Objetivo General

Evaluar el desempeño de un convertidor multinivel con un perfil de misión que desempeña un perfil de olas.

### Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar unos emuladores de un sistema undimotriz.
- Evaluar el desempeño de un convertidor multinivel que tiene como finalidad conmutar con dispositivos adecuados que ayuden a generar energía eléctrica útil.

## **1.6 Justificación**

Se pretende utilizar este proyecto debido a que las olas son un recurso que siempre se está generando las 24 horas del día, además esa energía renovable no emite contaminación y es una energía limpia.

Este proyecto nos va a ayudar a emular un sistema de captación de olas donde conmute con varios dispositivos de electrónica de potencia que nos permitan aprovechar la energía de olas y obtener la generación de electricidad.

## **1.7 Alcance**

El proyecto pretende llegar a la generación e implementación de una maqueta a base de emuladores, se selecciona un punto específico que estudia el comportamiento de las olas en un determinado periodo, donde a través de dispositivos de electrónica de potencia se pueda emular todo un sistema de la captación de la energía de olas.

## **1.8 Conclusiones**

Para la parte medular de los trabajos que se han realizado en torno a la energía undimotriz donde existe una relación con la electrónica de potencia.

Este tipo de proyectos pueden ser de gran ayuda para poner a prueba la funcionalidad de algunos sistemas a mayor escala y respecto a la electrónica de potencia es de gran ayuda poder ver el funcionamiento en específico con los inversores multinivel con circuitos I298n el cual tiene diferentes usos múltiples.

---

# ***Capítulo 2***

---

***Energía undimotriz y  
convertidor  
multinivel***

## **2.1 *Introducción General***

La mayor parte de los estudios encontrados son acerca de las energías renovables y su utilidad en dispositivos para ver la eficiencia que tienen para la generación de electricidad, esto consta de un gran estudio debido a que la mayoría de proyectos tienden a ser muy gigantescos, también depende de un gran costo económico porque la gran infraestructura que se necesita para sacar un buen provecho de las energías renovables, debido a que tiene una gran variabilidad respecto a factores externos que cambian su funcionalidad conforme su ubicación y la estación del año en la que esté.

La energía undimotriz es una de las fuentes de energía renovables más importantes, ya que la durabilidad de movimiento ejercido es de 24 horas, aunque tiene un gran desequilibrio debió a los ciclos lunares, la rotación de la tierra, tormentas, tsunamis etc.

Hoy en día existen diferentes proyectos con diferentes diseños que se acoplan dependiendo la profundidad y el movimiento que generan las olas respecto a su frecuencia, entre mayor sea la profundidad aumenta tanto el costo del dispositivo y también el mantenimiento que se le aplica respecto al transcurso de su funcionamiento.

## **2.2 Introducción**

En el desarrollo de este trabajo existen conceptos básicos de generación eléctrica a partir de los movimientos naturales presentes en el océano. Las olas se originan dentro de los mares, son una manifestación de energía que se generan en los grandes océanos del planeta, ya que buscan técnicas capaces de aprovechar tanto la energía cinética y potencial que contienen las olas, también muestran distintas expresiones como el oleaje, las mareas, las corrientes marinas, la energía eólica fuera de las costas, los gradientes tanto salinos y térmicos.

Respecto a eso, se menciona un análisis detallado de algunas técnicas de aprovechamiento energético que se usa para la obtención de energía presentes en los océanos, mareas y olas. Una vez que se tiene claro la fuente renovable a usar y la selección de un cierto perfil de estudio acerca del movimiento del mar, se pretende utilizar lo que un perfil de misión.

El perfil de misión se define como una representación simplificada de las condiciones a las que un componente o ensamble electrónico que estará expuesto a lo largo de un ciclo de vida. En este caso se utiliza la metodología del perfil de misión en un sistema de conversión mecánica a eléctrica a nivel escala.

En la parte de la selección del sistema electromecánico su objetivo es desempeñar un perfil de misión respecto a un perfil de olas, que se obtienen de un punto específico en el océano de tal manera que la variable que desempeña dicho perfil de misión va a ser la potencia generada en un lapso de tiempo respecto a las estaciones del año, para poder ver los sucesos potenciales sometidos a un sistema, se debe obtener una corriente en la salida de cada generador a base de motores de corriente continua.

Se obtiene una salida de CD a través de un comportamiento que es ejercido por los emuladores que son generados por medio de perfiles de olas donde se emite esa corriente a un inversor multinivel.

El convertidor multinivel se compone de un arreglo que conlleva dispositivos de conmutación en configuración de un puente H y también contiene su fuente de alimentación de DC. En las etapas se pueden conectar ya sea en serie o cascada para obtener una forma de onda con salida de múltiples niveles a partir de la selección apropiada del ángulo de disparo de cada transistor.

Cuando las fuentes de alimentación tienen el mismo valor se le denomina inversor multinivel en cascada simétrico.

A continuación, se muestra la formación de olas.

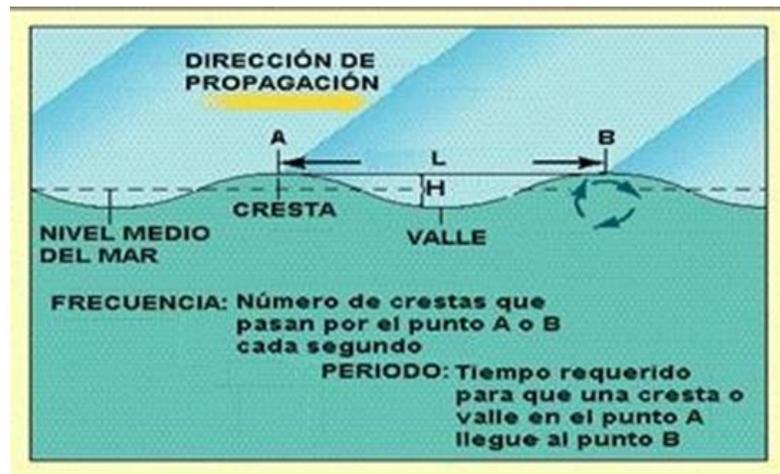


Figura 2.1 Estructura de olas

Se clasifican los tipos de ondas que se pueden presentar sobre la superficie libre del mar, de acuerdo a su periodo ( $T=1/\text{frecuencia}$ ) y que se definen como:

**Ondas capilares:** tipo de onda cuyo periodo es menor a 0.1 s, y la fuerza que las genera proviene del viento.

**Ondas de Ultra-gravedad:** ondas con periodos que van de 0.1 s a 1 s, la fuerza que las genera es el viento.

**Ondas de gravedad:** ondas con periodos que van de 1 s a 30 s y son producidas por la acción del viento.

**Ondas de Infra-gravedad:** tipo de onda cuyos periodos van de los 30 s a 5 minutos, la fuerza que las genera puede ser el viento, o bien, sismos o tormentas.

**Ondas de largo periodo:** ondas con periodos que van de los 5 minutos a 24 horas, la fuerza que las genera es totalmente debida a la ocurrencia de sismos, tormentas o a la atracción de los astros.

### 2.2.1 Potencial de la energía de las olas

Al igual que la mayoría de energías renovables, la energía undimotriz se distribuye de manera desigual dependiendo la zona geográfica, los lugares con mayor actividad se encuentran entre 30° y 60° de latitud, en ambos hemisferios, el cual predominan los vientos del oeste, esto es gran parte de Europa, del sur de Chile, Estados Unidos y Australia.

La mayor parte de energías oceánicas son enormes e incluso explotables, es muy grande la comparación con el consumo actual de electricidad en el mundo. Las olas dependen tanto de la intensidad del viento que sopla sobre la superficie del océano, de la frecuencia en la cual está interactuando el viento y su alcance.

Respecto a “la potencia mundial explotable presente en las olas oceánicas” es de aproximadamente 2 TW y la energía anual generable de 17.500 TWh/año.

En la teoría lineal, la energía que transporta la ola, por metro de frente de ola, es la suma de las energías cinética y potencial como se muestra a continuación.

$$E = \frac{p * g * H^2}{8} \quad (2)$$

Así mismo, la potencia por unidad de frente de ola se expresa en la siguiente ecuación:

$$E = Cg * \frac{p * g * H^2}{8} \quad (3)$$

Para una ola de mar real, el nivel de potencia puede expresarse en términos del espectro de ondas como, por ejemplo:

$$Pw = pg \int Cg(f)S(f)df = \frac{pg^2TeHs^2}{64\pi} \quad (4)$$

Potencia máxima por un cuerpo asimétrico como se muestra a continuación:

$$Pmax = \frac{\lambda}{2\pi} Pw \quad (5)$$

- Donde  $\rho$  es la densidad de la masa del agua de mar (1025 kg/m<sup>3</sup>).
- $g$  es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- $H_s$  es la altura significativa de la ola.
- $T_e$  es el periodo de energía.
- $S(f)$  es el espectro de olas sin tener en cuenta su dirección de las olas.
- $C_g(f)$  es la celeridad de grupo indicando la velocidad del grupo de olas.

## 2.2.2 Tecnologías en el aprovechamiento de energía undimotriz

Las olas pueden disminuir su velocidad de avance debido a que cuando van llegando a las playas con menor frecuencia y menor longitud de onda, también si la altura se va haciendo más grande la velocidad puede aumentar y las de las partículas de agua hasta que la ola se hace inestable y se rompe.

Existen diferentes tipos de tecnologías que tienen la capacidad de aprovechar la energía undimotriz conforme a las siguientes variables: ubicación, tamaño y orientación, extracción de energía y principio de captación.

### 2.2.2.1 Según su ubicación

Onshore: Dispositivos en costa. Este tipo de dispositivos suelen encontrarse en nodos costeros con profundidades no mayores a 10 metros así como se muestra en la figura 2.2.

Nearshore: Dispositivos cercanos a la costa. Distancias de algunos cientos de metros y profundidades de hasta 25 metros.

Offshore: Dispositivos de altamar. En este tipo de dispositivos suelen existir grandes ventajas sobre los demás.



Figura 2.2 Movimiento de olas respecto a su ubicación.

El movimiento de las olas se puede transformar en energía mecánica, para luego ser transformada en energía eléctrica por medio de diferentes sistemas. Los convertidores de energía undimotriz en la literatura se expresan como dispositivos WEC que es el acrónimo de Wave Energy Converter.

La selección de tecnologías se determina según la topografía de la zona, Existe una gran variedad de diseños y se pueden agrupar en la siguiente categoría:

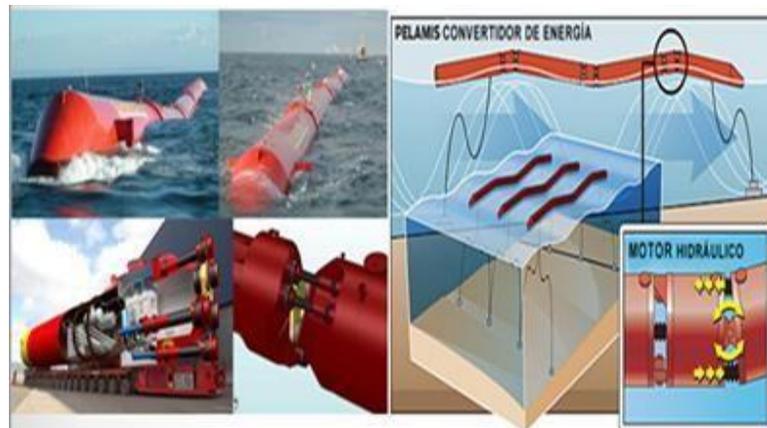
- **Sistema atenuador.**
- **Absorbedores puntual.**
- **Brazo mecánico.**
- **Columna de agua oscilante**

### **2.2.2.2 Atenuador**

Descripción: Un atenuador es un dispositivo flotante el cual tiene la capacidad de operar de forma paralela en la dirección del oleaje y adecuarse de forma efectiva a él.

Estos dispositivos capturan la energía a partir de movimientos relativos ejecutados en las estructuras mecánicas unidas.

También consta de una estructura articulada que entre sus nodos de unión existe un sistema hidráulico que funciona respecto a un generador eléctrico. Los cilindros hidráulicos bombean aceite a alta presión a través de motores hidráulicos, los motores hidráulicos impulsan los generadores eléctricos para producir electricidad como se muestra en la siguiente figura.



*Figura 2.3 Atenuador*

### **2.2.2.3 Boyas**

Descripción: Las boyas obtienen energía a partir del movimiento ascendente y descendente de las olas de mar.

Este sistema está compuesto por una denominada boya de superficie y una boya de volumen variable sumergida. El movimiento ascendente y descendente de la boya, es transmitido a un pistón que acciona un generador y produce electricidad como se muestra en la figura 2.4.



*Figura 2.4 Absorbedor Puntual*

### **2.2.2.4 Brazo mecánico**

Descripción: es un brazo de aproximadamente 22 metros que aprovecha el movimiento vertical de las olas efectuada por una bomba de un circuito de agua cerrado.

Estos dispositivos tienen la particularidad de tener un extremo fijado a una estructura, mientras que el otro extremo es libre de moverse como un péndulo montado en una articulación que pivotea en respuesta al movimiento del oleaje, siendo por lo regular flotadores, aletas o membranas.

Las olas que suben y bajan, hacen mover el brazo para así accionar la bomba, la bomba inyecta agua almacenada para poder estimular un acumulador de presión hidroneumático y la cámara hiperbárica así como se muestra en la figura 2.5.

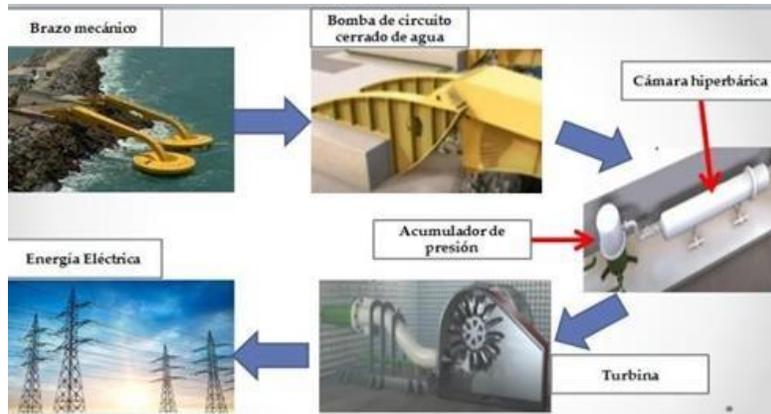


Figura 2.5 Brazo mecánico

### 2.2.2.5 Columna de agua oscilante

Descripción: aprovecha el recurso energético de las olas mediante la oscilación del agua en el interior de una cámara.

Los sistemas OWC es uno de los convertidores de energía de olas con mayor utilidad en la actualidad, debido a que puede capturar la energía que es entregada por ola, la cual es transferida a una turbina Wells (permiten ser accionadas por un flujo bidireccional), que, acoplada a un generador, la inyecta a la red. Consiste en una estructura hueca, semi sumergida y ubicada tanto en la costa como en alta mar; debido a la oscilación del oleaje, se producen cambios en la presión del aire en el interior de la cámara. A causa de esto, el aire, que es el fluido de trabajo, se comprime y produce el movimiento de la turbina como se muestra en la figura 2.6.

En la estructura contiene un tubo Venturi, a manera que la parte entra en contacto con el agua, también cuenta con un gran diámetro comparado con la parte que aloja a la turbina, para amplificar las velocidades bajas del oleaje lo suficiente para que la turbina alimente a un generador eléctrico.

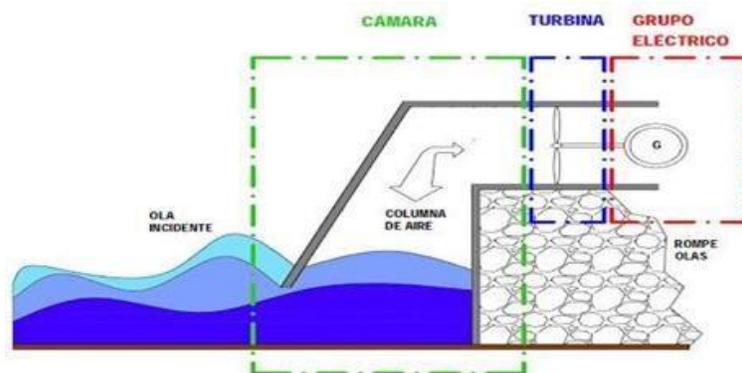


Figura 2.6 Columna de agua oscilante

### **2.2.3 Situación actual de la explotación de la energía de las olas**

En la actualidad existen alrededor de dieciséis captadores de energía que aprovechan el movimiento de olas que se han instalado en el mundo. Se necesitan más aparatos desarrollados en el área que se acoplen en condiciones extremas de olas con frecuencias variables.

Los países de Europa son los más involucrados en la explotación de la energía undimotriz, este tipo de fuente energética se puede encontrar en: Dinamarca, Irlanda, Noruega, Reino Unido, Portugal y Suecia. Sin embargo, países tales como Países Bajos, España, Bélgica, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia y Italia.

Algunos países como Australia, Canadá, China, India, Indonesia, Irán, Israel, Japón, Corea, México, Rusia, SriLanka, Estados Unidos y algunos otros, se encuentran llevando a cabo investigaciones y desarrollos en la energía de las olas, tratando de realizar nuevos desarrollos significativos en el uso de esta fuente renovable.

El aprovechamiento de las olas del mar es menor, si se toma una potencia aislada debido a que reduce diversas plantas piloto que pueden situarse en pocos países. En los inicios se realizaron varios intentos del aprovechamiento de la energía del oleaje se remontan a fechas similares a otras energías renovables.

La energía de las olas puede encontrarse en un momento divergente tecnológicamente debido a que existen varias ideas, pero como tal ninguna ha demostrado su liderazgo tecnológico, ya que todavía requieren de un considerable esfuerzo de investigación y desarrollo.

### **2.3 Perfil de misión y etapa de potencia**

El perfil de misión define la función requerida y las condiciones ambientales como una función del tiempo. Un sistema con una función variable se puede denominar sistema de misión por fases, este mismo también puede definirse como una representación simplificada de las condiciones a las que un componente o ensamble electrónico estará expuesto a lo largo de todo su ciclo de vida.

En la parte de la electrónica de potencia existen 2 tipos de dispositivos que se sincronizan uno del otro, que en este caso uno de ellos es el rectificador y, por otra parte, está el inversor.

Para regularizar una cierta cantidad de energía entregada al sistema, se hace por medio de rectificadores trifásicos que tienen la finalidad de convertir corriente alterna en corriente continua para poder tener mayor estabilidad en el sistema y volver a convertir en corriente alterna ahora por medio de un inversor, existen varios tipos de rectificadores como lo son rectificador media onda y rectificador, onda completa.

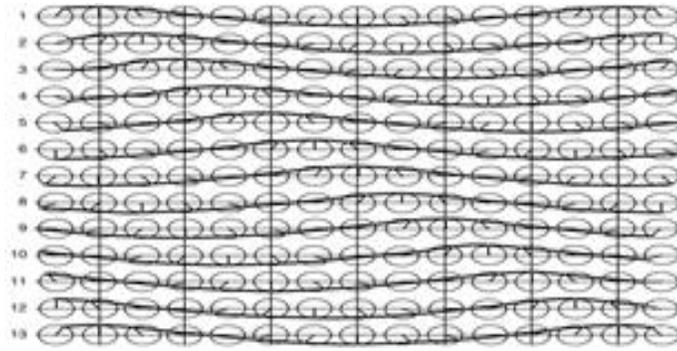
### **2.4 Emuladores de olas**

Las partículas de agua se mueven verticalmente a medida que las olas avanzan en un determinado tiempo. Si se observa de manera detallada un objeto flotante no muy grande, se puede percibir que el agua se mueve hacia atrás y hacia delante; avanza en la cresta y retrocede al llegar al seno.

Si el agua es demasiado profunda en comparación con la longitud de onda, el desplazamiento es aproximado e igual de grandes tanto en el plano horizontal y como el vertical.

De cierto modo, durante el ciclo de una ola simple o durante su período, las partículas describen un círculo en un plano vertical. Donde cierto plano vertical es la sección transversal.

En aguas poco profundas, el movimiento describe una elipse. Se ilustra ese movimiento de una partícula para una ola sinusoidal simple en aguas profundas. En la siguiente figura se puede apreciar el movimiento de las olas, se generan a partir de un determinado posicionamiento de ángulos con base a las manecillas del reloj como se muestra en la figura 2.7.



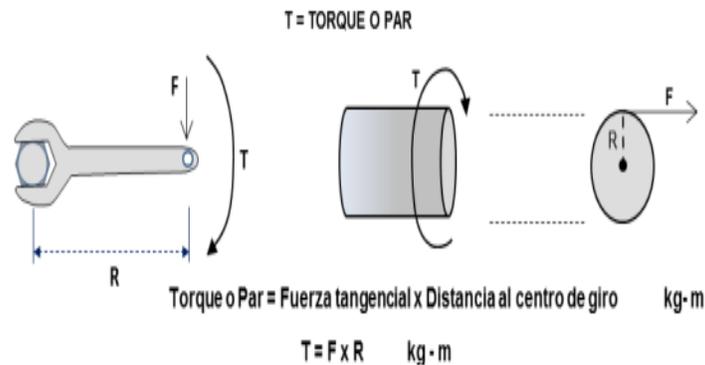
**Figura 2.7** Ángulos de la formación de olas.

Los ángulos se pueden generar a través de movimientos ondulatorios y ser transformados en potencia sin importar el dispositivo de captación de olas, ya sea por medio de boyas o generadores lineales.

Los motorreductores de velocidad se pueden encontrar entre los inventos más antiguos, por otra parte, se siguen utilizando prácticamente en sistemas industriales, sin embargo, el reductor o motorreductor más pequeño puede ser capaz de cambiar y combinar velocidades de giro en un reloj de pulsera (Sanchez Martinez & Luzón Narro, 2018).

También son una buena opción para la obtención de energía eléctrica conforme al movimiento de las olas que se pueden representar con los rpm del motor, porque que se puede ir formando la estructura de la ola y obtener una corriente al acoplarlo con un generador de corriente directa.

Al torque se le conoce como la fuerza de giro de la flecha de salida del motorreductor, y también como la fuerza de giro en la flecha de un motor. Simplemente es una fuerza expresada ya sea en libras, onzas, kilogramos y Newton, ni tampoco es una potencia en HP o en Kilowatts.



**Figura 2.8** Estructura del torque (Fuente: Potencia electromecánica funcionamiento de un motor)

## **2.5 Generadores de cd**

El funcionamiento de los generadores de cd es muy parecido a los generadores de ca. La armadura que contienen los generadores de cd gira entre dos polos de campo fijos, también la corriente que conlleva la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución, y en la otra dirección durante la otra mitad.

Para poder generar un flujo constante de corriente en una dirección continua o en un aparato determinado, es indispensable disponer de un medio para que se pueda invertir un flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución.

Los generadores de cd normalmente funcionan a voltajes bastante bajos, para así evitar las chispas que se generan entre las escobillas y el conmutador a voltajes altos. El potencial más alto que se ha desarrollado para este tipo de generadores puede ser aproximadamente de 1500 V.

También los generadores de corriente continua se clasifican dependiendo del método que usan para proporcionar corriente de campo que excite los imanes del mismo. Los generadores que llegan a excitarse en serie, tienen su campo en serie respecto a la armadura.

Un generador se excita en derivación, está conectado en su campo de manera paralela a la armadura. La mayoría de estas máquinas están diseñadas para trabajar entre un 50% y 100% alcanzando su máximo nivel de eficiencia en rangos entre 75 y 100 % de carga. Motores sub - cargados (bajo 50 %) presentan eficiencias muy bajas y altas pérdidas dependiendo de la capacidad de potencia de la máquina y de la calidad de fabricación (Sanchez Martinez & Luzón Narro, 2018)

## 2.6 Convertidores de Potencia

En los inicios de la Electrónica de Potencia, la conversión de energía se hacía por medio de los convertidores electromecánicos y especialmente por diversas máquinas giratorias. Hoy en día, estas técnicas no son de mucha utilidad, debido a que comenzaron a surgir los convertidores estáticos que son los que obtienen un desempeño más adecuado en todos los sentidos.

Los convertidores estáticos de potencia se conforman en dos tipos:

**Interruptores estáticos:** Son elementos semiconductores de potencia que funcionan como si fueran interruptores y se les conoce como elementos no lineales.

**Elementos reactivos:** Son transformadores, interruptores y condensadores responsables por el aislamiento y almacenamiento (esto se puede dar en el caso de los transformadores) de la energía, filtrado de las tensiones y corrientes.

Los convertidores son los principales responsables debido a que se involucran diferentes variables de peso, volumen y presupuestos de los equipos. Los diferentes tipos de conversión que se estudian en las diferentes áreas son: la corriente alterna CA para corriente continua, CC (fija o variable), CA (frecuencia fija) para CA (frecuencia variable), CC para CA (con tensión y frecuencia variable) y CC (fija) para CC (variable).

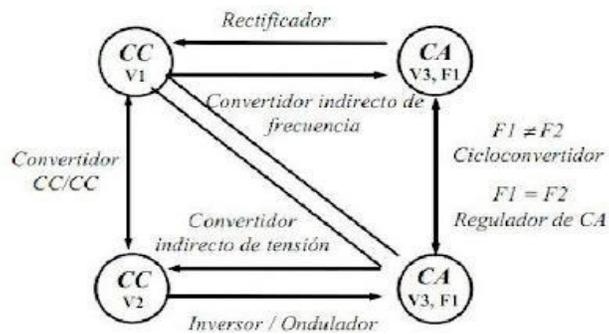


Figura 2.9 Convertidores de potencia

Existen principalmente 4 tipos de convertidores como se muestra en la figura 2.9.

- Convertidor de corriente alterna – corriente directa (CA-CD)
- Convertidor de corriente alterna – corriente alterna (CA-CA)
- Convertidor de corriente directa – corriente directa (CD-CD)
- Convertidor de corriente directa – corriente alterna (CD-CA)

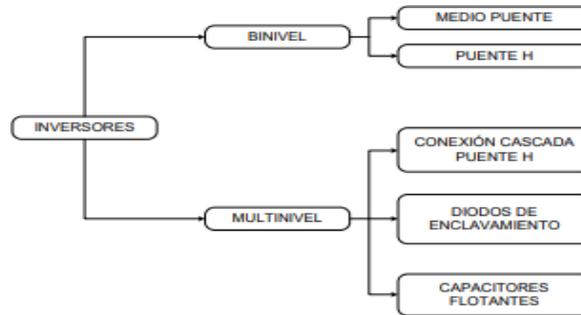


Figura 2.10 Clasificación de inversores

## 2.7 Inversor multinivel

Los inversores multinivel han surgido como una tecnología alternativa hacia los convertidores tradicionales de dos niveles. Este tipo de sistemas permiten transformar la energía eléctrica que se proporciona por fuentes de corriente directa, tales como, una corriente alterna idealmente sinusoidal, baterías o bancos de paneles solares.

De manera general los inversores pueden involucrar un mayor número de conmutadores que se basan en semiconductores de potencia que desarrollan la conversión en pasos muy pequeños, logrando así una forma de onda a la salida con un bajo contenido armónico.

Los convertidores multinivel contienen ventajas mayores a modo que generan ondas de salida con tensiones superiores a la capacidad de bloqueo de los transistores, a medida que no tengan necesidad de recurrir a transformadores para aumentar los niveles de tensión, básicamente los inversores multinivel pueden sintetizar una onda de tensión en varios niveles de CD de manera escalonada, de ese modo se logra una reducción de armónicos en su salida de voltaje.

El número de interruptores que se utilizan pueden determinar la cantidad de niveles de tensión de CD en la onda de salida del inversor multinivel, entre mayor sea la cantidad de interruptores, el voltaje y la distorsión armónica total en la señal de salida serán menores, donde los semiconductores de potencia se representan por interruptores ideales con varias posiciones como se muestra en la figura 2.11.

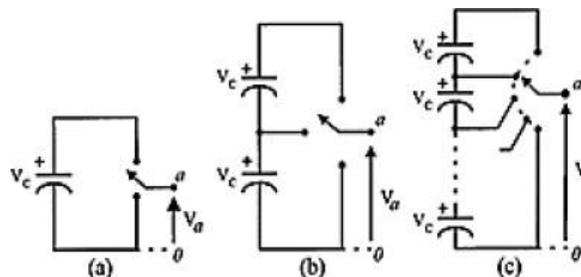


Figura 2.11 Inversor multinivel de 5 niveles

Para determinar la calidad de la energía eléctrica que se genera en el circuito del inversor suele emplearse lo que es la THD que significa distorsión armónica total, el cual corresponde a una medida del contenido armónico de la forma de onda de salida.

Entre menor sea el porcentaje de la THD, la calidad de la señal es más buena. Ya que en la mayoría de los circuitos inversores su forma de onda a la salida se genera por medio de conmutaciones de dispositivos semiconductores, también es de suma importancia encontrar los tiempos de disparo eficientes que permitan reducir la THD.

### **2.7.1.1 Los inversores multinivel se clasifican en tres topologías básicas**

- Inversor con diodos de enclavamiento DCMLI (Diode Clamped Multilevel Inverter)
- Inversor con condensadores flotantes FCMLI (Flying Capacitor Multilevel Inverter)
- Inversor en cascada CMLI (Cascade Multilevel Inverter)

### **2.7.2 Inversor Multinivel con diodos de enclavamiento**

DCMLI por medio de varios niveles de tensión pueden generar una onda senoidal, obtenida de capacitores que funcionan como fuentes de CD.

Este tipo de inversor utiliza capacitores y diodos que contienen características similares conectados en serie para dividir la tensión, para que así los dispositivos de potencia puedan operar con una tensión menor entre sus terminales.

Los niveles se pueden definir como el número de valores de potencial posibles a la salida del convertidor referido a un punto de referencia común.

### **2.7.3 Inversor Multinivel con capacitores flotantes**

FCMLI tienen una estructura escalonada de capacitores debido a que la salida puede expresarse como posibles combinaciones de conexión entre los capacitores de los que se compone.

Entre más estados de conmutación contenga esta topología, puede ser usado para mantener balanceada la carga de los capacitores. No necesita de diodos extra para proporcionar los niveles de tensión.

### 2.7.4 Inversor multinivel en cascada

Los inversores multinivel en cascada pueden clasificarse en simétrico y asimétrico, esto de acuerdo al nivel de voltaje en la alimentación del bus de cada célula como se muestra en la siguiente figura.

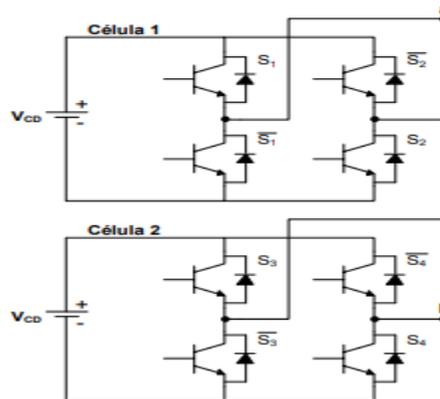


Figura 2.12 Células de convertidor multinivel

#### 2.7.4.1 Características del inversor multinivel.

- No utiliza diodos de enclavamiento o condensadores para la alimentación del bus de CD, por lo que se evitan problemas de desbalance en estas tensiones.
- La proporción del inversor es la suma de las tensiones de salida de los inversores puente completo individuales.
- El inversor presenta un contenido armónico menor que el obtenido en un inversor convencional equivalente.
- Entre mayor sea el número de niveles, la tensión tiene la capacidad de soportar varios dispositivos semiconductores, debido a que cada inversor maneja solo la tensión presente en su fuente de alimentación.
- Cuando se implementa un inversor con más de 7 niveles, la complejidad del control tiende a aumentar.
- Para poder aumentar el número de niveles, es necesario agregar inversores sin tener que rediseñar la etapa de potencia.
- La suma de las tensiones de salida de los inversores se le conoce como tensión de fase o como puente completo individuales.

### **2.7.5 Convertidor multinivel simétrico en cascada**

La topología puente completo conectado en cascada; lo que permite dividir la tensión total del sistema en cada uno de los inversores o células.

El número de niveles (N) generados en la tensión de salida depende del número de células (H) de acuerdo a la ecuación 5, donde todas las células tienen la misma tensión de entrada como se muestra en la ecuación 6.

$$N = 2H + 1 \quad (6)$$

#### **Ventajas**

- Se puede usar cualquier técnica PWM (Pulse Width Modulation) basada en multi-portadoras o espacios vectoriales.
- La reconfiguración de la modulación permite modificar adecuadamente los estados de conmutación para compensar la falla.
- Se puede aprovechar en la reestructuración del sistema para tolerar fallas.

#### **Desventajas.**

- Necesita fuentes de CD aisladas que alimenten el bus de CD, lo que se ve reflejado en el alto costo que podría generar un transformador de entrada.

### **2.7.6 Convertidor multinivel asimétrico en cascada**

Para cada célula del inversor son de valores diferentes. Se clasifican de acuerdo a la relación que guardan entre sí las fuentes de CD para cada célula; esto es, en potencias de 2 (Vcd, 2Vcd, 4Vcd, 8Vcd, etc.) o en potencias de 3 (Vcd, 3Vcd, 9Vcd, 27Vcd, etc.).

El número máximo de niveles para un inversor asimétrico de potencia 3 se calcula mediante la ecuación 7.

$$N = 3H \quad (7)$$

Mientras que para un inversor asimétrico de potencia 2, el número máximo de niveles en la tensión de salida se determina con base en la ecuación 8.

$$N = 2H+1 \quad (8)$$

Donde:

N= número de niveles en el voltaje de salida.

H= número de células del inversor.

Las ventajas y desventajas del inversor multinivel en cascada asimétrico son las siguientes:

**Ventajas:**

- Se obtiene un número de niveles de voltaje de salida mayor que las que se obtienen con un inversor multinivel en cascada simétrico, teniendo el mismo número de células.

**Desventajas:**

- Su principal desventaja es que necesita fuentes de CD aisladas para cada célula, lo que se ve reflejado en el alto costo que podría generar un transformador de entrada
- La célula que maneje el voltaje mayor será más vulnerable a fallas.

**2.7.7 Inversores Multinivel con puente h**

Los inversores con puente h se dividen en 2 tipos de generación como lo es la generación de nivel y polaridad. Pueden utilizar una combinación de interruptores para generar los niveles de voltaje y también una combinación para generar el signo de salida.

Una de las principales características de los puentes h, es que los dispositivos semiconductores se deben de elegir de tal forma que soporten mayores niveles de tensión para tener una buena eficiencia.

Cabe mencionar que no todos los diagramas de conexión muestran las topologías generalizadas ni tampoco las tablas correspondientes. Solo se pueden mostrar las conexiones para un determinado número de fuentes.

## **2.8 Conclusiones**

La ejecución de este tipo de proyectos es de gran ayuda porque a lo largo del tiempo se ha buscado implementar grandes sistemas de captación de energía eficientes con la finalidad de tomar todas las medidas necesarias evitando fallas que puedan perjudicar al sistema, esto implica mucho en lo que es el perfil de misión y también evita tener pérdidas monetarias, ya que los sistemas a grande escala son muy costosos en su reparación.

Los estudios basados en los inversores multinivel aplicados en otros proyectos ayudan a solventar más la estructuración de este tipo de proyectos en relación con el medio ambiente, porque a pesar de que existen prototipos pequeños, pero de gran costo, al utilizar estos inversores se pueden reducir costos, ya que existen circuitos que integran el funcionamiento de un inversor y te ayuda a manejar una suma de voltajes para poder obtener algo parecido a los resultados que se implementan en algunos prototipos.

---

# ***Capítulo 3***

---

## ***Diseño y simulación de emulador de olas***

### **3.1 *Introducción General***

Cuando se habla de la estructuración de un proyecto en el área de electrónica de potencia o de algún proyecto en general, se implementan varias preguntas, por ejemplo, él ¿cómo? Y ¿por qué? Debido a que todo debe llevar una secuencia a base de parámetros que serán de buena ayuda para minimizar los problemas que se puedan presentar, más que nada porque se maneja el tema de perfil de misión y eso implica seleccionar el material adecuado para que cuando se encuentre en funcionamiento evite tener el menor porcentaje de errores posible.

Para la ejecución del circuito eléctrico con sus respectivos parámetros se toma en cuenta la implementación de una simulación con la cual se puedan adquirir los resultados que sean lo más allegado a los objetivos esperados.

Independientemente de que la simulación tenga los resultados bien implementados y definidos, se debe tomar en cuenta que puede existir una pérdida en los circuitos al estar conmutados uno con otros, por eso se deben manipular todos los parámetros en valores rms debido a que ya está contemplada esa pérdida y evita tener un exceso de carga en alguno de los circuitos.

### **3.2 Introducción**

La selección del perfil de ola depende de un estudio realizado respecto a un determinado tiempo, en el cual se pueda observar el comportamiento de las olas en las estaciones del año, en este caso se selecciona un punto de estudio donde se toma de referencia la potencia que se ha estado obteniendo con un sistema de lineal.

Depende de las perturbaciones que van siendo efectuadas por las olas y ver las variaciones en potencial que van cambiando en cada dato que se va adquiriendo en diferentes ocasiones y de esa manera obtener la suma de potencia total, ya que de esa manera se pudiera escolarizar, para poder implementarlo en los emuladores.

El inversor multinivel monofásico tiene como finalidad facilitar el manejo de potencia reflejado en los perfiles de olas con los cuales se obtendrá un cierto potencial que es útil para satisfacer al inversor y poder sumar cada una de las fuentes de CD que se van a transformar en una salida de CA con un mayor potencial.

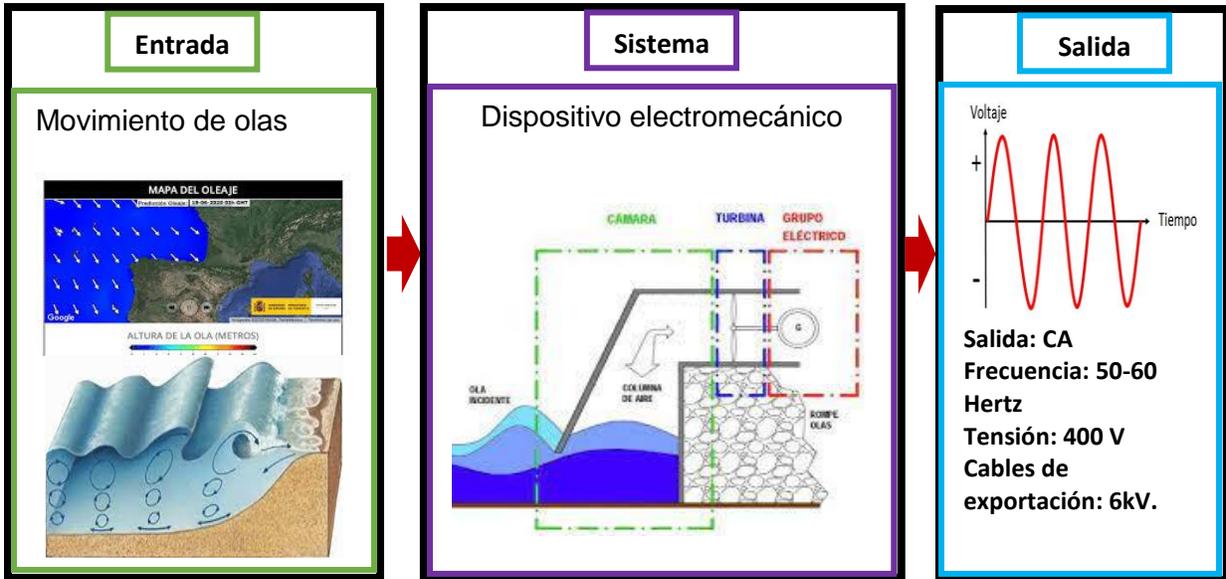
Los materiales a utilizar son seleccionados tomando en cuenta la facilidad de adquisición, también el bajo costo que puedan obtenerse de cada uno de ellos debido a que basado en el estado del arte contienen un menor costo a diferencia de algunos prototipos similares.

Para determinar los niveles de voltaje y corriente que manejan los dispositivos de conmutación se utiliza una carga monofásica en el inversor de 7 niveles, y sus respectivas características.

Las olas son ocasionadas por la irregularidad del viento y el movimiento de la tierra, se excluyen efectos por: la luna, tsunamis, tormentas, el sol y huracanes.

Los factores naturales pueden intervenir ya sea en la generación como en la restauración de las ondas son diversos y de ellos dependen características tales como el periodo T y la cantidad de energía que transporten.

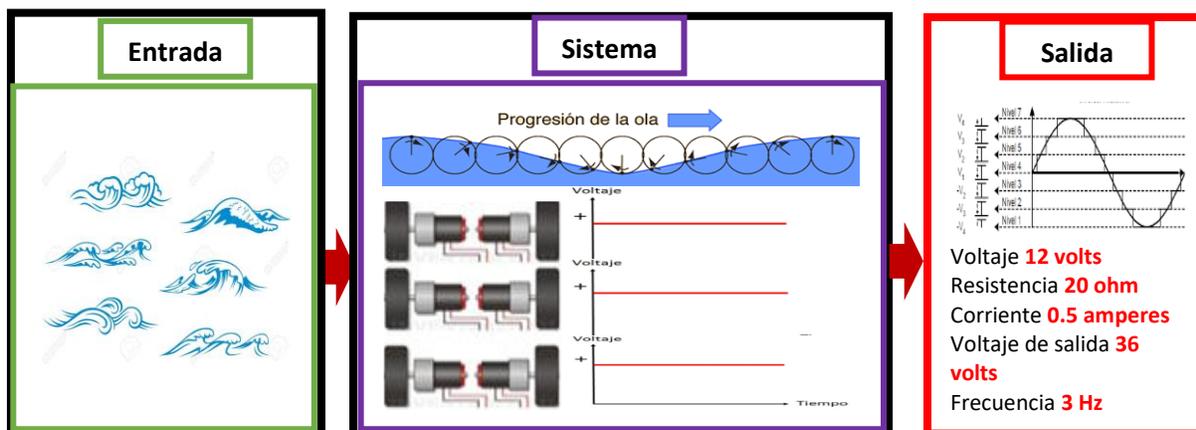
### Sistema real



El principal funcionamiento del sistema es hacer una conversión de energía mecánica que es generada por las olas del mar, mediante un elemento motriz (que tiene un movimiento rotativo) en energía eléctrica, acoplándolo directamente a un generador de corriente (alternador), cuyo inducido u oscilador, tiene también un movimiento de tipo giratorio.

Para la parte de la salida de ca se obtiene a partir de convertidores que conllevan alternadores a grandes escalas para obtener una salida de eléctrica que pueda abastecer energía eléctrica a subestaciones para distribuir esa energía a lo hogares más cercanos.

## Emuladores



### 3.3 Selección de perfil de ola y potencia generada

En la información geográfica tomada de se indica a que Estado pertenece, municipio o localidad cercana, sus coordenadas geográficas (latitud, longitud), la distancia a la costa y la profundidad del mar, estos dos últimos parámetros son considerados importantes para la instalación de los dispositivos convertidores de energía undimotriz.

Los datos de distancia a la costa y la profundidad del mar (batimetría) se tomaron con ayuda del programa de Batimetría de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Usualmente en el estado de guerrero tiende a ver un perfil de olas muy interesante debido a que no es tan predecible el comportamiento de las ya que tiene diferentes cofactores que alteran el comportamiento de las mismas por lo cual se recurre a seleccionar 3 lugares donde cada uno tiene diferente ubicación tanto en latitud y longitud de esa manera se pueden adquirir una serie de datos que será factible para la obtención de potencia máxima a lo largo de un año con base a la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características de datos de perfil de olas

| Información geográfica |          |                        |           |           |                      |                     | Depuración de datos |                 |                   |            |
|------------------------|----------|------------------------|-----------|-----------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-------------------|------------|
| #                      | Estado   | Municipio/Ref. cercano | Ubicación |           | Distancia a la costa | Profundidad del mar | Total, de datos     | Datos correctos | Datos incorrectos | % Aceptado |
|                        |          |                        | Lat.      | Long.     |                      |                     |                     |                 |                   |            |
| 1                      | Guerrero | Barra de potosí        | 17°30' N  | 101°30' O | 7                    | 85                  | 143,559             | 142,152         | 1407              | 99.02 %    |
| 2                      |          | Llano real             | 17°N      | 100°30' O | 10                   | 295                 | 143 055             | 141 633         | 1 422             | 99.01%     |
| 3                      |          | Cópala                 | 16°30' N  | 99° O     | 8                    | 130                 | 143 055             | 141 630         | 1 425             | 99.00%     |

Tomando en cuenta los sucesos ocurridos respecto a las estaciones del año, se puede evaluar el potencial mes con mes debido a que van sujetos al aprovechamiento de energía de las olas, de tal forma que se pueda seleccionar 1 solo punto de estudio que obtenga la mayor captación de energía para el aprovechamiento del sistema que se va a evaluar respecto al perfil de misión.

En las áreas del pacífico los niveles de potencia por frente de ola con mayor intensidad se presentan a mediados y finalizando la primavera (Marzo - Mayo), los valores más altos se presentan durante el verano (Junio - Agosto) con su mayor pico en Julio, y se mantiene hasta el Otoño (Septiembre - Noviembre) pero en noviembre disminuye y sigue bajo durante todo el invierno (Diciembre - Febrero).

Se realiza un estudio la potencia máxima que absorbe un cuerpo asimétrico para 3 diferentes grupos de movimientos:

- I) Un solo grado de libertad: Heave o absorbente en el punto de elevación;
- II) Dos grados de libertad: Surge - Heave - Pitch, y/o Surge - Heave – Sway;
- III) Tres grados de libertad: Surge - Pitch, y/o Surge - Heave;

Por simplicidad, en este trabajo se ha calculado la potencia máxima absorbida por un cuerpo asimétrico en su forma más simple, es decir, para un cuerpo asimétrico de un solo grado de libertad de traslación en el eje “z” o de movimiento vertical, así como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Selección de mayor potencial obtenido

| Información geográfica |          |                        | Mes |     |     |      |      |      |      |      |      |      |     |     | Promedio anual |
|------------------------|----------|------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|----------------|
| #                      | Zona     | Municipio ref. cercano | Ene | Feb | Mar | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov | Dic |                |
| 1                      |          | Barra de potosí        | 217 | 288 | 489 | 608  | 645  | 610  | 677  | 598  | 619  | 577  | 390 | 295 | 501            |
| 2                      | Guerrero | Llano real             | 408 | 537 | 919 | 1151 | 1230 | 1163 | 1284 | 1137 | 1175 | 1093 | 722 | 547 | 947            |
| 3                      |          | Cópala                 | 212 | 300 | 545 | 694  | 735  | 691  | 769  | 681  | 707  | 637  | 424 | 312 | 559            |

Como se puede ver en los datos obtenidos sacando el promedio anual, el Llano real es quien posee un gran porcentaje máximo el cual genera una suma de un poco de 10Kwm, frente a la ola, eso quiere decir que el desempeño del sistema lineal respecto a la estructura de la ola y de su frecuencia contiene en cada medida de dato requerido en un determinado tiempo.

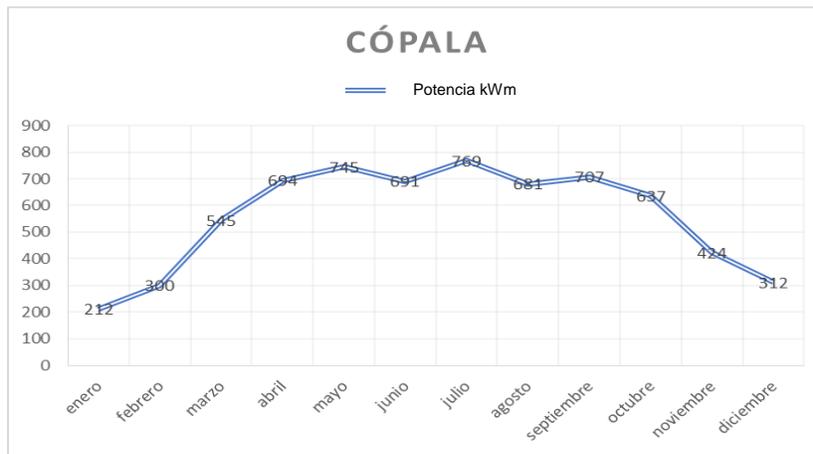
La figura 3.1, 3.2 y 3.3 muestran el potencial del oleaje en el punto seleccionado.



**Figura 3.1** Potencia anual frente a la ola Barra de Potosí



**Figura 3.2** Potencia anual frente a la ola Llano Real



**Figura 3.3** Potencia anual frente a la ola Cópala

Tabla 3.3 Datos del perfil de olas

| Punto      | Dirección de oleaje | Altura(m) | Frecuencia (Hz) | nodos | Potencia frente a la ola | Potencia máxima anual | Porcentaje de obtención |
|------------|---------------------|-----------|-----------------|-------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Llano real | [205 - 215]         | [0.5 - 3] | 78.06 %         | 5-7   | 10kWm                    | 947 kWm               | 5%                      |

Una vez obtenido el perfil de la ola que se va a manejar, se contemplan varios parámetros factibles para los emuladores de olas a base de un acoplamiento de motores y generadores que obtendrán un porcentaje escalado de la potencia frente a la ola.

Respecto a la salida del potencial obtenido que se extraen de las olas, se implementa el perfil de misión debido a que los emuladores tienen una cierta pérdida respecto a su funcionamiento en un determinado tiempo.

La salida que se pretende obtener entre un 3% al 5% del potencial que se encuentra en un rango entre 30 y 50 W debido a que solo se emula un pequeño potencial del total que en este caso equivale a 10,000 W tomando el porcentaje escala 1 de 1000 respecto al punto seleccionado.

### 3.4 Potencia de emuladores de olas

Al introducir un voltaje inducido puede generar un flujo de corriente hacia la misma dirección del voltaje inducción, entonces existe una potencia eléctrica generada que es proporcional al voltaje inducido por la corriente. Esta potencia puede ser consumida por una carga, un ejemplo claro puede ser un motor eléctrico.

Si el voltaje externo causa un flujo de corriente en dirección opuesta al voltaje inducido, entonces la potencia eléctrica fluirá en las bobinas, debido a que es proporcional al voltaje externo por medio de la corriente. Este efecto puede causar una fuerza electromagnética que proviene de un movimiento mecánico en un elemento motriz.

La potencia eléctrica se define como la capacidad de generar cierto trabajo en un tiempo determinado y se mide en watts (W). La potencia(P) que se desarrolla por el par motor(T) es expresada de la siguiente manera:

$$P = T \cdot \omega \quad (9)$$

Donde ( $\omega$ ) es la velocidad angular de giro que está dada en (*rad/s*) del eje de transmisión. La potencia generada del motor se mide según el Sistema Internacional de Unidades (W).

Es interesante saber la potencia en función de las revoluciones por minutos que se le conoce como (rpm) a la que gira el motor en vez de la velocidad angular. Si (n) son las revoluciones por minuto a la que gira el motor, entonces la potencia (P) se expresa de la siguiente manera,

$$P = T * \omega = \frac{T*n}{60/2\pi} \quad (10)$$

que aproximadamente resulta:

$$P = \frac{T*n}{9.55} \quad (11)$$

donde,

P= es la potencia motora, en W;

T= es el par motor, en N·m;

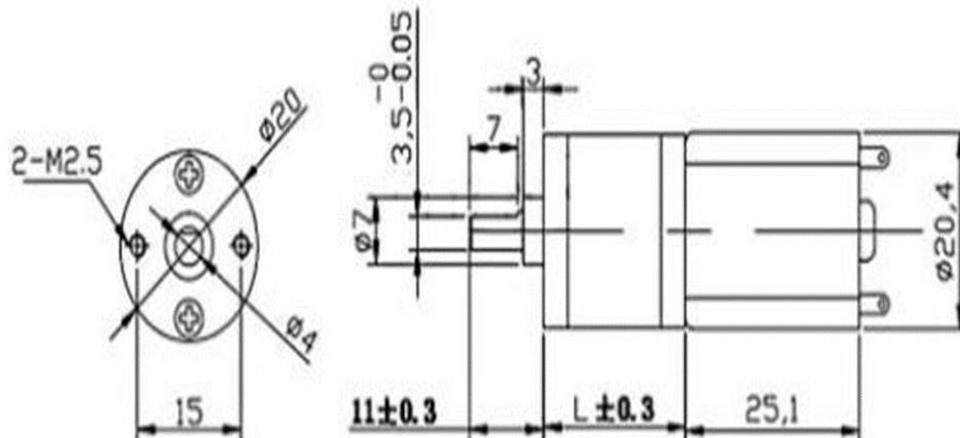
n = son las revoluciones por minuto de giro del motor (r.p.m.)

### 3.5 Componentes utilizados y características

Tabla 3.4 Características del motorreductor

| Sin carga       |                | Estacionamiento |              | Relación de reducción | Longitud de la caja de cambios[mm] |
|-----------------|----------------|-----------------|--------------|-----------------------|------------------------------------|
| Velocidad (RPM) | Corriente (mA) | Torque [KG,CM]  | Corriente[A] |                       |                                    |
| 15              | 25             | 49              | 3.3          | 671                   | 20.5                               |
| 30              | 40             | 8.1             | 0.68         | 382                   | 20.5                               |
| 59              | -----          | -----           | -----        | -----                 | -----                              |
| 100             | 22             | 6.7             | 0.61         | 100                   | 18.5                               |
| 200             | 65             | 6.1             | 0.65         | 41                    | 17                                 |

Medidas del motor reductor de engranajes que se utiliza para la emulación de los perfiles de las olas las cuales cuentan con las siguientes características que se muestran en la figura 3.4 y 3.5.



*Figura 3.4 Características del motor reductor (emulador de olas)*



*Figura 3.5 Características del Generador*

- Tensión Nominal: 7.2V Dc
- Tensión Operativa: 6-12V DC
- Velocidad sin carga: 20400 rpm
- Consumo sin carga: 1. 8 amperes
- Velocidad a Max. Eficiencia: 1950 rpm
- Consumo a Max. Eficiencia: 4.7 amperes
- Par: 261gr/cm
- Diámetro del eje: 3.2mm
- Medidas: 57x35.8mm de diámetro
- Peso: 150gr

### 3.5.1 Características del optoacoplador a utilizar

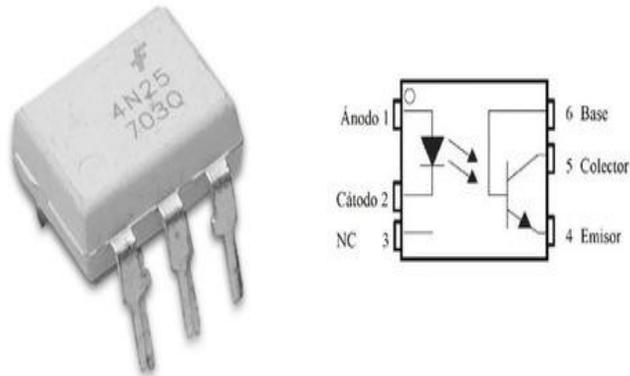


Figura 3.6 Datasheet de optoacoplador

- Voltaje de pruebas de aislamiento de 5000 VRMS
- Reguladores de fuente de alimentación
- Entradas lógicas digitales
- Conmutación más rápida de los acopladores estándar
- Capacidad de acoplamiento de entrada-salida menor o igual a 0.5pF
- Interfaces con todas las familias lógicas
- Aplicaciones: Procesado de señal, administración de potencia, comunicaciones y red
- Tipo salida del optoacoplador: Phototransistor
- Número de canales: 1
- Voltaje de colector-emisor  $V_{(br)ceo}$ : 30 V
- Voltaje de aislamiento: 5 kV
- Corriente directa  $I_f$  máxima  $I_f$ : 60 mA
- CTR mínimo: 20 %
- Número de pines: 6

### 3.5.2 Características del inversor multinivel utilizado en este caso un puente h

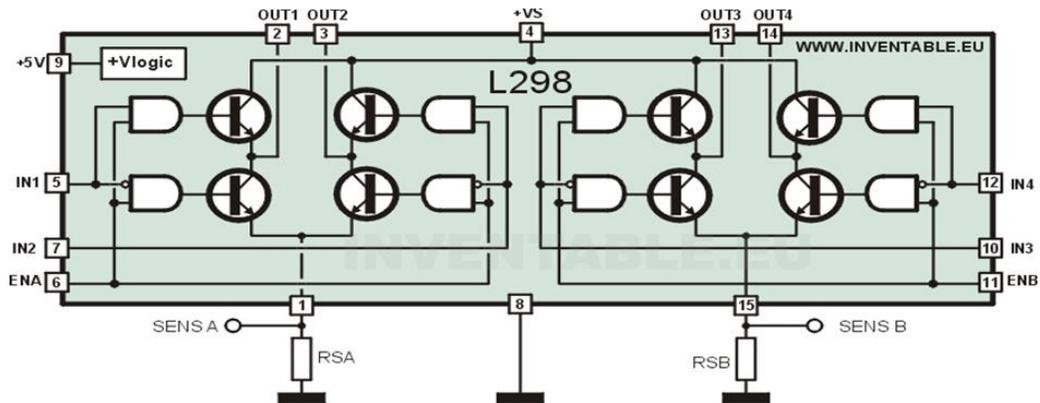


Figura 3.7 Datasheet del puente L298n



Figura 3.8 Dispositivo L298n

- Chip: L298N
- Canales: 2 (soporta 2 motores DC o 1 motor PAP)
- Voltaje lógico: 5V
- Voltaje de Operación: 5V-35V
- Consumo de corriente (Digital): 0 a 36mA
- Capacidad de corriente: 2A (picos de hasta 3A)
- Potencia máxima: 25W
- Peso: 30g
- Dimensiones: 43 \* 43 \* 27 mm
- Voltaje de alimentación, mínimo de 5 V. Posee dos entradas, una de 5V para controlar la parte lógica y otra para alimentar las salidas al motor, que pueden ser de 5V o más.
- Posee un regulador de voltaje de 5V 78M05, para alimentar la etapa lógica del L298N, sin embargo, cuando la alimentación supera los 12V, se recomienda, utilizar una fuente de 5V externa como fuente de alimentación.
- Admite entradas de señal PWM para el control de velocidad.
- Posee 8 diodos de protección contra corriente inversas.

### 3.6 Funcionamiento del puente completo

Se tiene un puente completo donde se puede conectar un motor el cual consta de varias entradas de habilitación, una de ellas es la (ENA) esta entrada conecta a dos ramas, por otra parte, existen otras dos entradas (In1 e In2) son independientes. El cual tiene la finalidad de realizar una habilitación programable para poder darle sentido al movimiento del motor que tiene la tarea de emular el movimiento de olas respecto al perfil de ola seleccionado con base a la figura 3.9.

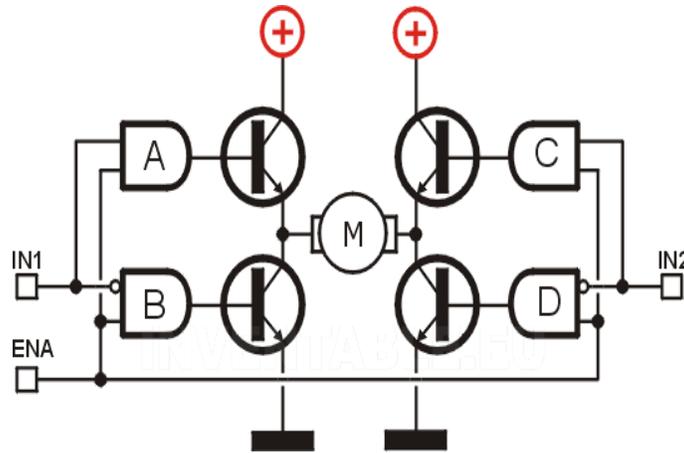


Figura 3.9 Estructura del puente H L298n

Cuando ENA se encuentra a un voltaje de 0 V, las salidas de la puerta AND también se mantienen a 0 V, por lo tanto, los transistores están abiertos y el motor se encuentra no alimentado (condición de reposo).

Cuando la entrada IN1 se activa a positivo mientras la entrada IN2 se encuentra 0 V, la compuerta "A" se activa junto con la compuerta "D", por otro lado, la compuerta "B" se sincroniza con la compuerta "C" se mantienen desactivadas, el motor recibe tensión positiva desde el transistor conectado a la compuerta "A" y negativo desde el transistor conectado a la puerta "D". El motor girará en un sentido como se muestra en la figura 3.10.

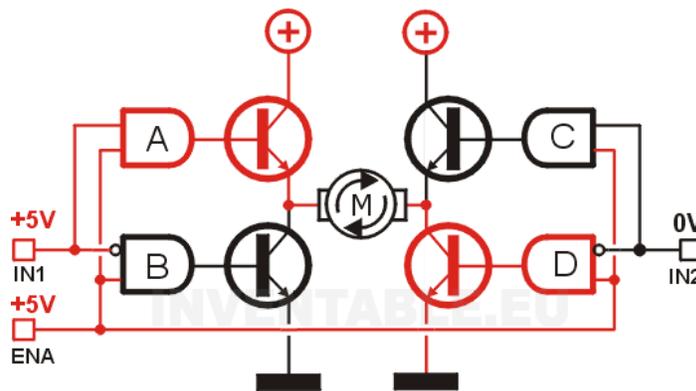


Figura 3.10 Conmutación de transistores con giro hacia la derecha

Si de lo contrario la entrada IN1 se mantiene a 0 V, respecto a la habilitación positiva ejercida en la entrada IN2, la compuerta "C" se activará junto con la compuerta "B", mientras que la compuerta "A" junto con la compuerta "D" se mantienen deshabilitadas y el motor recibirá tensión positiva desde el transistor conectado a la compuerta "C" y "B". El motor girará en sentido contrario respecto a la conmutación anterior de la habilitación "A" y "D" como se muestra en la figura 3.11.

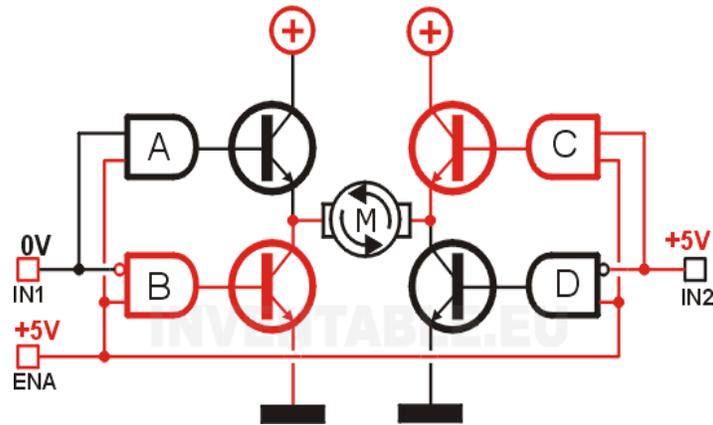


Figura 3.11 Conmutación de transistores con giro hacia la izquierda

### 3.7 **Calculo de componentes para entrada y salida del inversor multinivel**

En la tabla 3.5 se muestran las características aplicadas en el inversor multinivel

Tabla 3.5 Características del inversor multinivel

| Parámetros                        | Valores     |
|-----------------------------------|-------------|
| Voltaje de cada generador         | 12 volts    |
| Resistencia                       | 20 ohm      |
| Corriente del inversor multinivel | 0.5 amperes |
| Voltaje de salida del inversor    | 36 volts    |
| Frecuencia                        | 3 Hz        |
| Niveles del inversor              | 7           |

### **3.8 Bus de CD**

El nivel de tensión del bus de CD se determina con base en el voltaje que requiere la carga. En este caso los cálculos se realizan para un inversor monofásico.

Se tiene como objetivo sintetizar la tensión deseada con base a la suma de varios niveles de voltaje CD que pueden ser obtenidos de baterías, fuentes variables, fuentes conmutadas, celdas solares o cualquier otro tipo de fuente de CD que sean independientes.

En este la fuente de CD es adquirida a través de un generador de corriente continua, donde por medio de un movimiento mecánico ejercido por un motor reductor se obtendrá la generación de voltaje de CD dependiendo de los rpm que se estén efectuando al generador se tendrá un porcentaje en voltaje y corriente.

### **3.9 Dispositivos de conmutación**

En aplicaciones de potencia, la transferencia de energía hacia la carga generalmente se hace mediante interruptores IGBT, debido a que este tipo de dispositivos están diseñados para operar a niveles de corriente y voltaje medianos.

La estructuración de las celdas que conforman un inversor como se mencionó, se pueden utilizar lo IGBT o los MOSFET donde cada uno tiene una funcionalidad diferente debido a que cada uno tiene una manera interacción respecto a la frecuencia que ejercen. El voltaje en los puentes H es de 35 V y la corriente es de 0.5 amperes donde ya van involucradas las técnicas de conmutación en el I298n.

### **3.10 Carga Resistiva**

Para efectos de simulación, se hace necesario calcular el valor de la carga resistiva, la cual se calcula en la ecuación

$$R_c = \frac{V^2}{P} = \frac{1225}{20} = 60 \Omega \quad (12)$$

Que sirven para conectar 3 focos incandescentes menores a 30 watts de manera directa.

### 3.11 Cálculo de los emuladores

**Torque:** 6.7 Kg. Cm

En los datos que muestra la tabla 3.4 el torque está dado en Kg. Cm lo cual se debe obtener el valor en N.m para poder hacer la ecuación para la obtención del potencial que se efectúa en los generadores. Simplemente, se soluciona con una regla de como se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Conversión para la obtención del torque.

|                    |                  |
|--------------------|------------------|
| <b>10.2 Kg. Cm</b> | <b>1 N.m</b>     |
| <b>6.7 Kg. Cm</b>  | <b>0.657 N.m</b> |

Donde:

**T=** es el par motor, en N:m;

**P=** es la potencia del motor en W;

**n** = son las revoluciones por minuto de giro del motor (rpm)

**RPM o n** = 100 rpm

**Potencia:** -----  $P = T * m = \frac{T*n}{60/2\pi} \approx 7 \text{ Watts}$

**R= 20 ohm**

**I= 0.5**

**Voltaje** =  $\sqrt{(P * R)} = \sqrt{(7 * 20)} = 12 \text{ volts}$

### 3.12 Simulación de los perfiles de olas

Se muestra la simulación de los emuladores donde se especifica cada señal digital y analógica, las señales digitales son las que hacen el control para que se realice el cambio de giro del motor y las analógicas son quien determinan la velocidad de giro, la cual depende del porcentaje en volts que se le aplica un control en un rango de 0 a 255, el controlador a utilizar es de 8 bits, el amperaje depende de las especificaciones de funcionalidad del motor como se muestra en la figura 3.12.

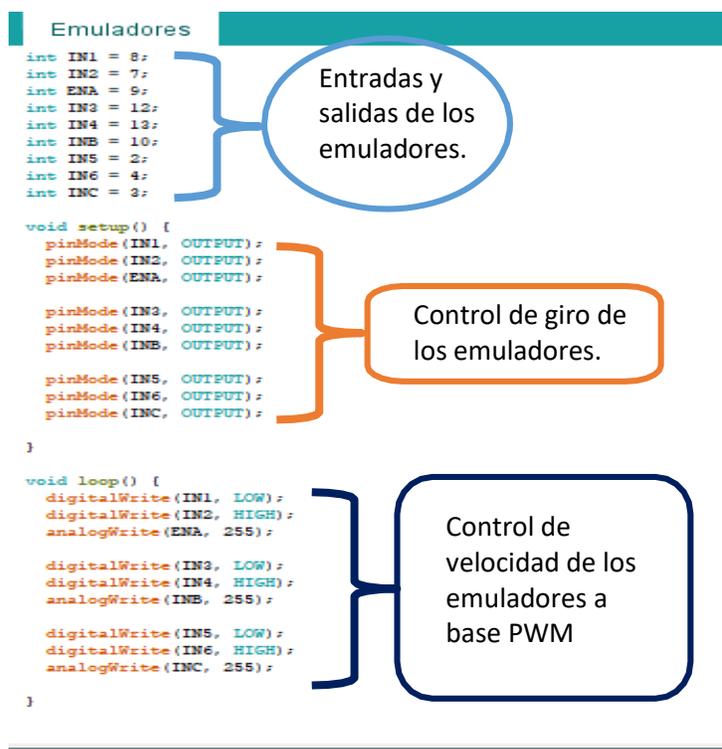


Figura 3.12 Control de emuladores

En la figura 3.13 se muestra la simulación del control de emuladores a base de motorreductores controlados con puentes H completo L298n, el cual tienen la finalidad de emular el perfil de olas seleccionado donde cada uno obtiene el mismo potencial, pero diferentes ángulos de funcionamiento.

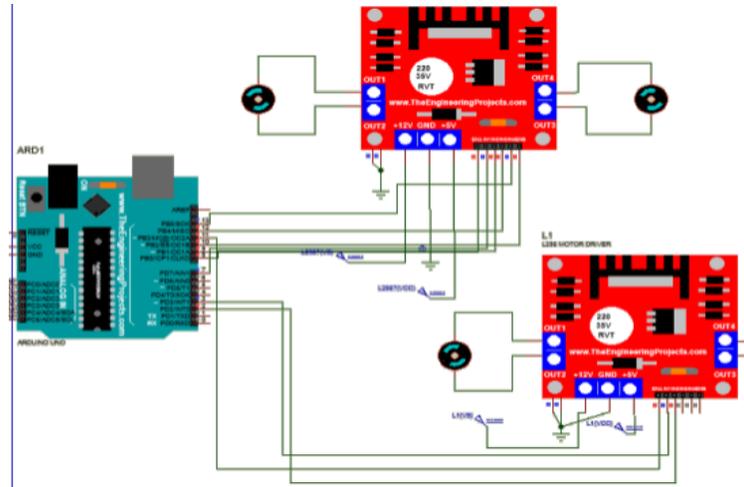


Figura 3.13 Simulación en proteus de los emuladores de olas

### 3.13 Simulación del inversor multinivel en cascada

A continuación, se muestra en la figura 3.14 una programación de pulsos para la modulación de inversor en cascada donde a base de niveles de CD poder obtener una salida de CA.

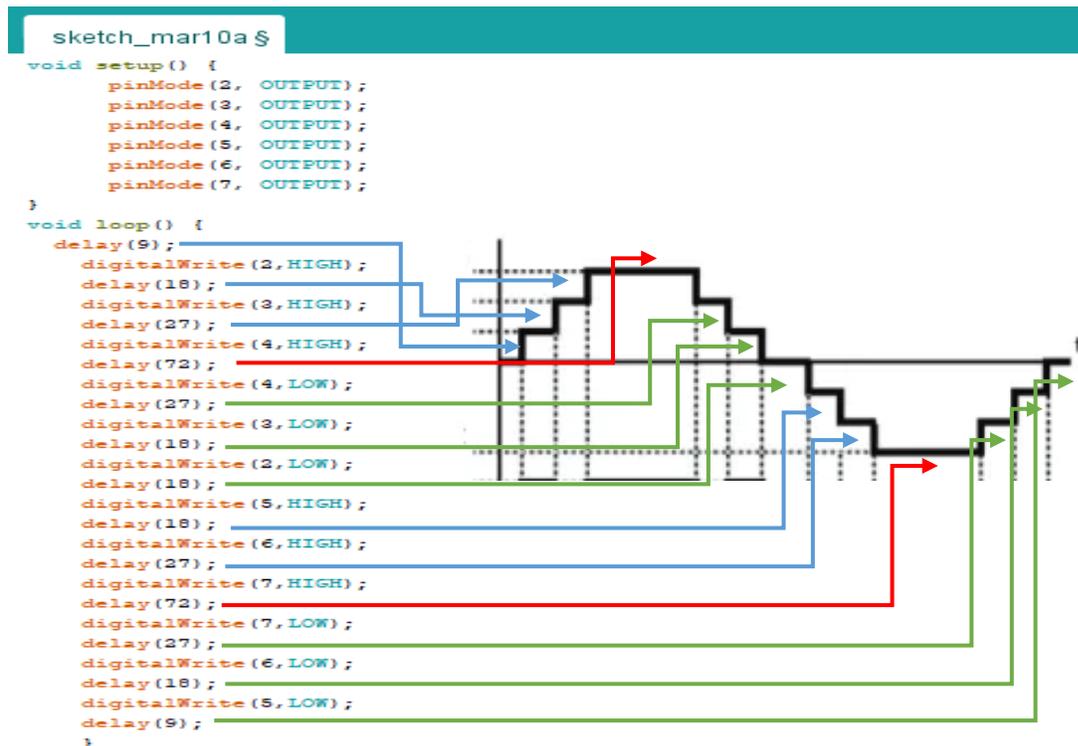


Figura 3.14 Salida de modulación de pulsos para el inversor multinivel

Tabla 3.7 Ángulos de conmutación para el inversor multinivel.

| Datos | Ángulos de conmutación | Pulsos positivos | Pulsos negativos |
|-------|------------------------|------------------|------------------|
| 1     | 9                      | ✘                |                  |
| 2     | 18                     | ✘                |                  |
| 3     | 27                     | ✘                |                  |
| 4     | $54+18=72$             | ✘                |                  |
| 5     | $72-27-18=27$          | ✘                |                  |
| 6     | $27-9=18$              | ✘                |                  |
| 7     | 18                     | -----            | -----            |
| 8     | $9+9=18$               |                  | ✘                |
| 9     | $18+9=27$              |                  | ✘                |
| 10    | $18+27+27=72$          |                  | ✘                |
| 11    | $72-27-18=27$          |                  | ✘                |
| 12    | $27-9=18$              |                  | ✘                |
| 13    | 9                      |                  | ✘                |

Los ángulos de conmutación son utilizados como salidas digitales para el funcionamiento del inversor multinivel y de ese modo obtener el ciclo de trabajo dado en Hertz, donde esos pulsos se pueden representar como 2 sumadoras donde en un cierto punto se unen las entradas positivas y negativas para que de esa manera se forme lo que viene siendo una salida de CA con base a la cantidad de voltajes de CD que se tengan.

La figura 3.15 muestra la simulación de un inversor de 7 niveles con puentes H.

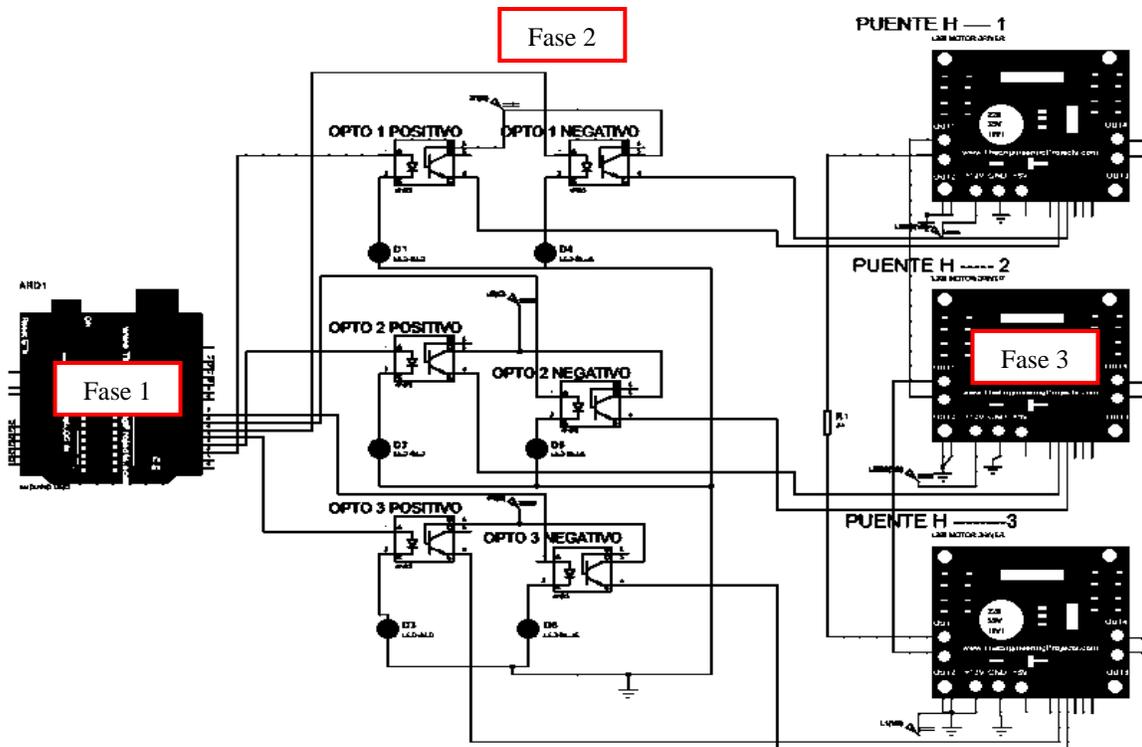
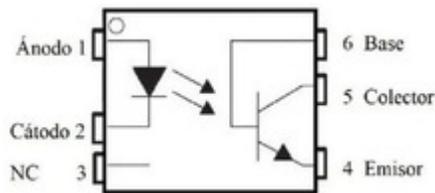


Figura 3.15 Simulación en proteus del inversor de 7 niveles en cascada

Respecto a la figura 3.15 se divide en 3 fases donde la fase 1 suministra lo que viene siendo las salidas digitales que son determinados por medio de ángulos calculados en la tabla número 3.7.

La fase número 2, corresponde al apartado de los optoacopladores que se dividen en 2 partes que son los optoacopladores de pulsos positivos y los optoacopladores de pulsos negativos, donde ambos son receptores de pulsos digitales en los estados de 0 y 1 una vez emitiendo esos pulsos los optoacopladores desempeñan la siguiente función que se muestra en la figura 3.16.



*Figura 3.16 Estructura de optoacopladores*

Los optoacopladores que se utilizan tienen la capacidad de funcionamiento como si fuesen un fototransistor que es un transistor sensible a la luz, se divide en 6 terminales donde las que se utilizan son 1,2,4 y 5, la terminal 1 y 2 son el ánodo y el cátodo unidos por medio de un diodo que es quien percibe la señal digital que proviene del dispositivo lógico programable.

También se puede colocar un led como un indicador que conformaría el paso de la señal que se envía. La terminal 5 corresponde a una señal de CD externa, la cual puede estar representada como la habilitación de la señal del puente H para el paso de potencial generado a base las olas y esta se activa una vez que la terminal 1 dejar pasar el flujo de potencia como salida en la terminal 4.

La fase 3 es la parte medular donde ocurre el proceso de formación de la salida de CA requerida. La cual se divide en 4 puntos importantes, el primer punto es el que almacena el potencial generado por las olas, donde el porcentaje de las olas obtenidas son sustituidas por fuentes de 12 volts que son emitidas por los emuladores de olas que el voltaje obtenido se establece a una mayor escala de 12 volts para el cumplimiento del inversor establecido.

El punto 2 y 3 son las entradas que habilitan el punto 1 para el paso de voltaje hacia el punto 4 que es la salida del puente H, el punto 2 está representado como Dir A1 y el punto 3 se encuentra como Dir A2 en la figura 3.17.

Su funcionamiento es que al tener un 1 o 0 se habilita el voltaje y su polaridad. Como, por ejemplo, si se tiene A1 en 1 y A2 en 0 el voltaje es positivo a la salida del puente H y de lo contrario si A1 se encuentra en 0 y A2 está en 1 el voltaje que se obtenga a la salida será negativo.

Para la parte final se encuentran los voltajes de salida en los puentes H donde se tienen 2 salidas la positiva y negativa, en este caso como se tienen 12 volts en cada salida de cada puente H las salidas se conectan en cascada para formar 1 sola salida de CA, en este caso como son 3 puentes H resultaría una salida de 36 volts de CA.

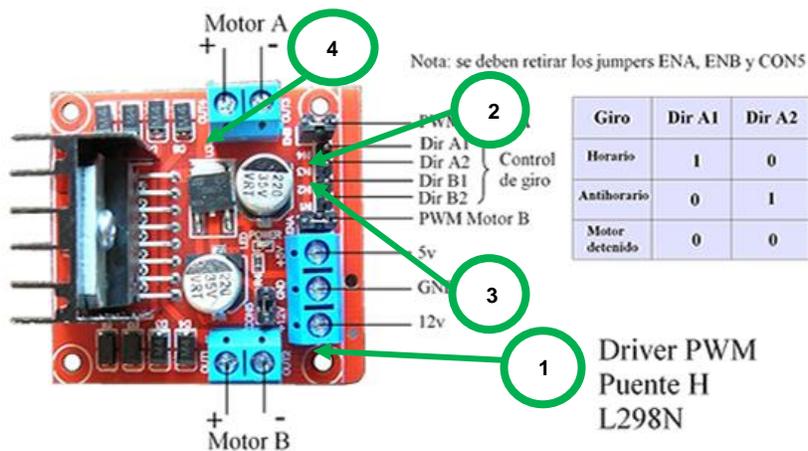


Figura 3.17 Datasheet del puente H l298n

### **3.14 Conclusiones**

Todas las características descritas de todos los sistemas que se utilizan tienen la finalidad de globalizar la terminología de perfil de misión, debido a que todos sistemas tienen una función para sincronizarse entre sí y evitar el menor fallo en cada uno de los sistemas, contengan un margen de seguridad (en el manejo de los niveles de corriente y voltaje para la selección de los dispositivos de conmutación).

Una de las características que tiene un inversor multinivel con puentes conectados en cascada, es que su diseño se reduce al de un puente completo; lo cual hace atractivo a este tipo de topologías para su uso.

Todos los materiales seleccionados tienen un bajo costo económico y un alto rendimiento al ejecutar su funcionalidad.

---

# ***Capítulo 4***

---

***Experimentación y  
resultados de  
emulador de olas***

## **Introducción**

Una de las partes importantes es realizar una simulación debido a que sustenta los resultados para hacer un acercamiento al cumplimiento de los objetivos esperados.

En la parte de la simulación se contemplan los materiales adecuados debido a que en la parte de la emulación del sistema se deben tomar los valores más parecidos a la realidad, ya que los valores deben ser obtenidos en valor rms.

En la implementación, se consideran factores como, por ejemplo: el tipo de conmutación que va a utilizar el convertidor, los valores donde que demandan los emuladores, ya sea voltaje y corriente que es moderado conforme a los perfiles de olas.

## 4.1 Simulación del inversor

Para la implementación del inversor multinivel monofásico, se realizaron estudios a nivel simulación, con el objetivo de ver el comportamiento del inversor, utilizando los parámetros en un inversor multinivel de 7 niveles como se muestra en la figura 4.1.

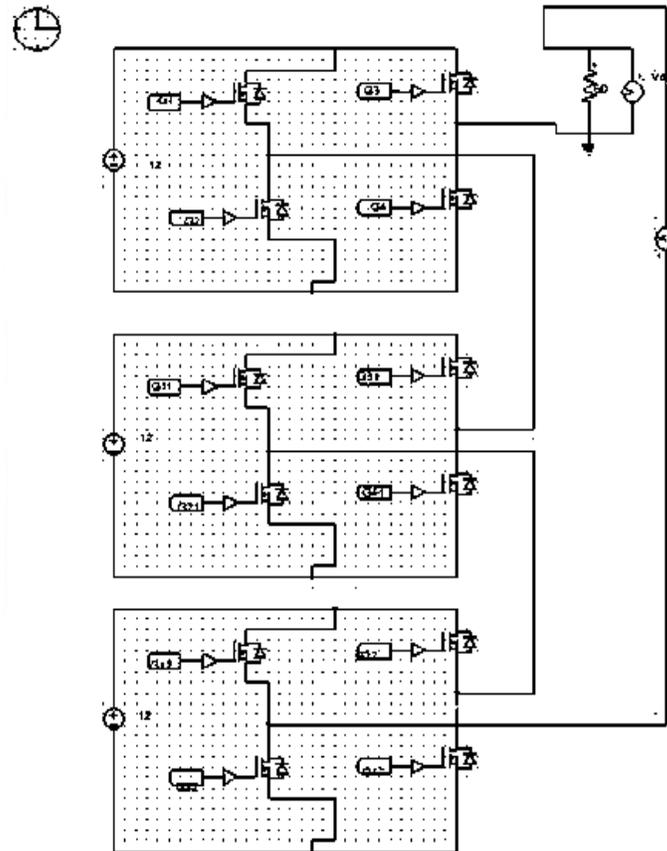


Figura 4.1 Simulación en Psim (inversor multinivel en cascada)

En la figura 4.2 se utiliza el método de conmutación para la obtención de la salida del inversor multinivel con los respectivos ángulos de conmutación que son aplicados para formar una señal senoidal a base de la suma de voltajes de CD que son introducidos a cada celda que está conectada entre sí.

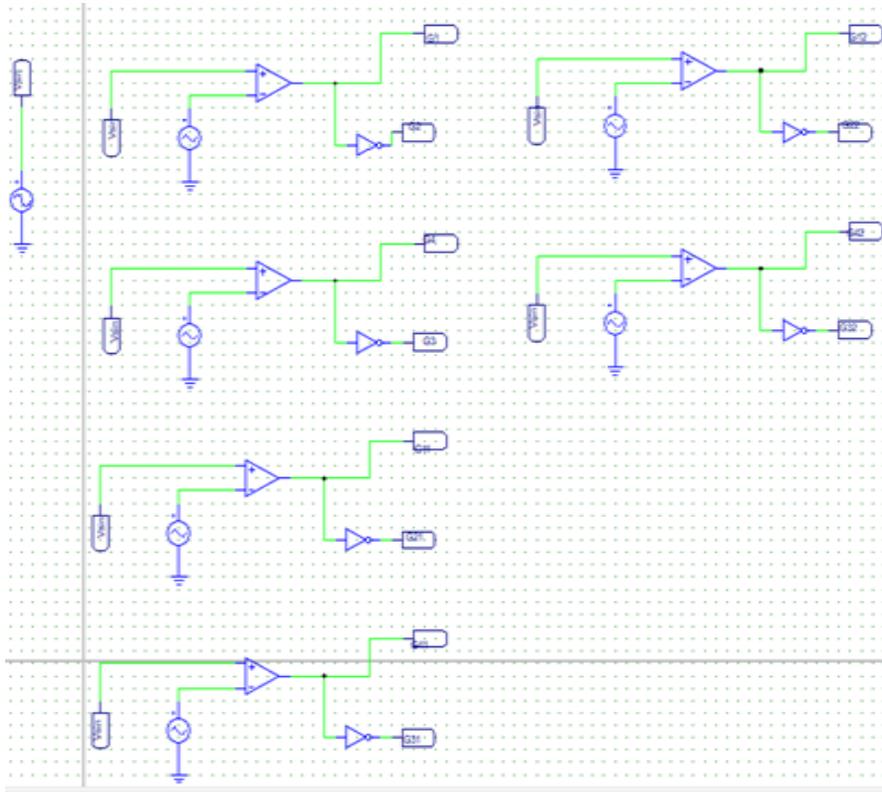


Figura 4.2 Simulación en Psim (Comutación del inversor)

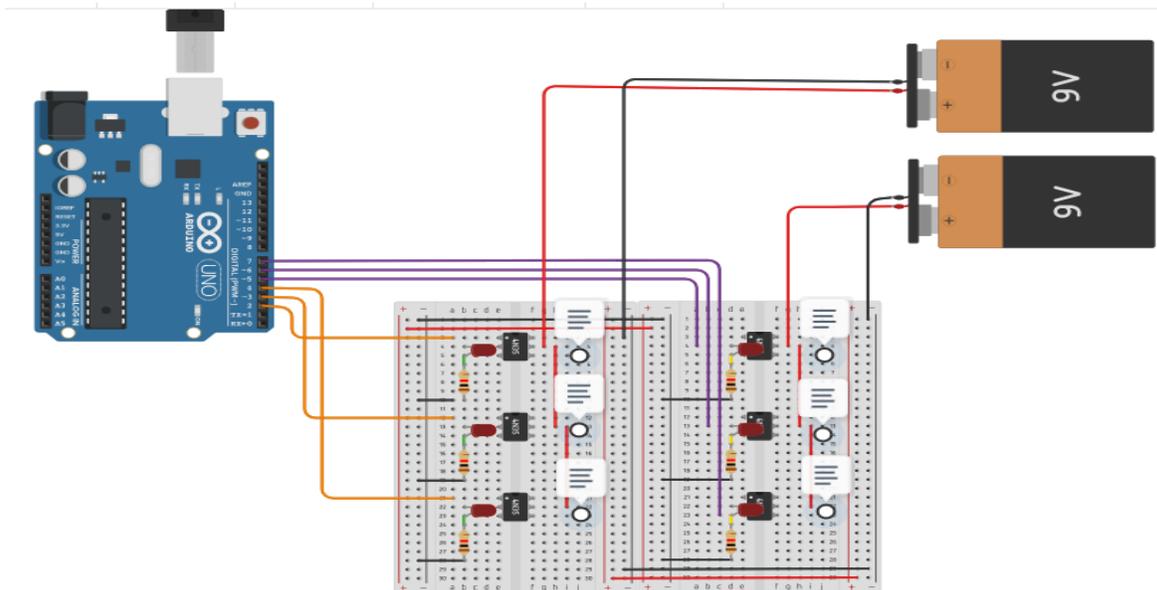


Figura 4.3 Comutación física del inversor

A continuación, se presentan los resultados de la salida de voltaje del inversor multinivel Figura 4.4.

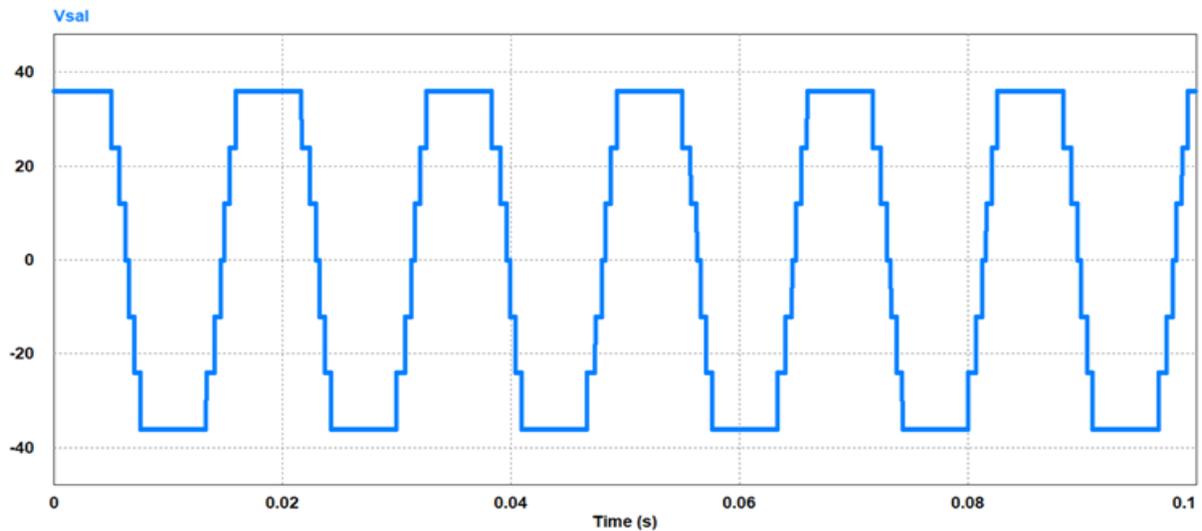


Figura 4.4 Potencia de salida del inversor multinivel (Simulación)

En la Figura 4.5 se muestra la señal de corriente donde se observa que la suma de las fuentes de tensión de cada célula independiente del inversor, ya que cada fuente de voltaje independiente es de 12 volts, que da como resultado 36 volts de salida del inversor.

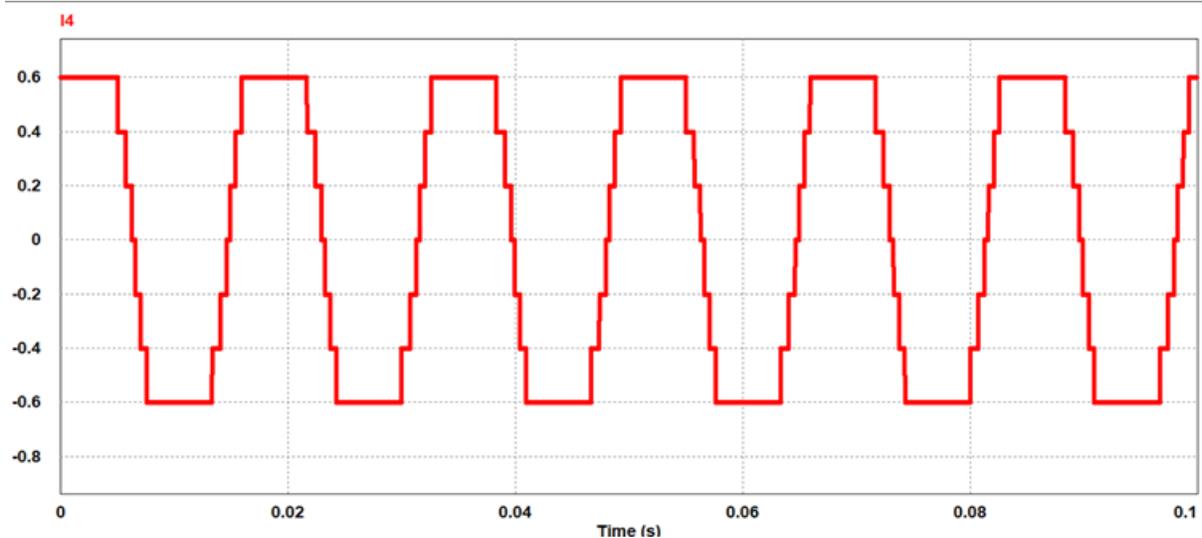


Figura 4.5 Corriente del inversor multinivel (Simulación)

## 4.2 Simulación en Matlab Simulink

Se realiza de la misma manera la simulación en Matlab para corroborar los resultados obtenidos de tal manera de obtener algo similar como de igual manera que en Psim con base a la figura 4.6.

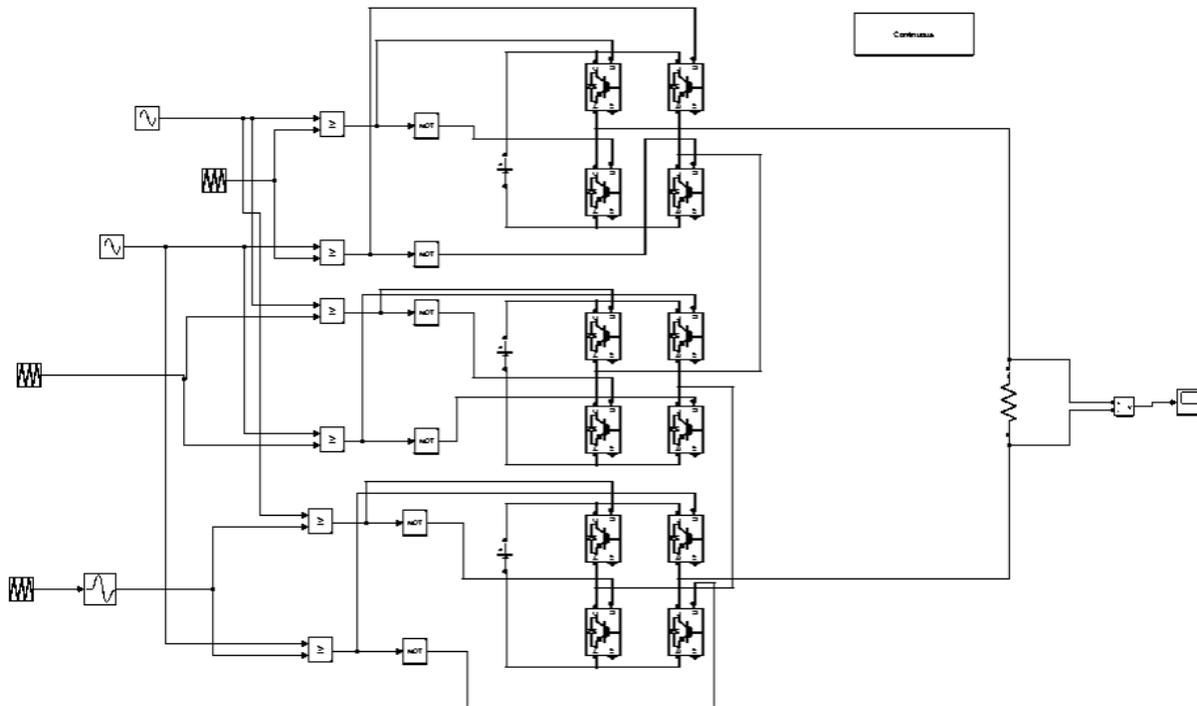


Figura 4.6 Simulación de inversor multinivel(matlab)

Como se ilustra en la imagen, se obtiene una salida de voltaje de 7 niveles cumpliendo con los datos adquiridos con respecto a las fórmulas, aunque pareciera que la imagen muestra que solo tiene 5 niveles cumple con la potencia que se estipula de la misma manera que en el programa Psim.

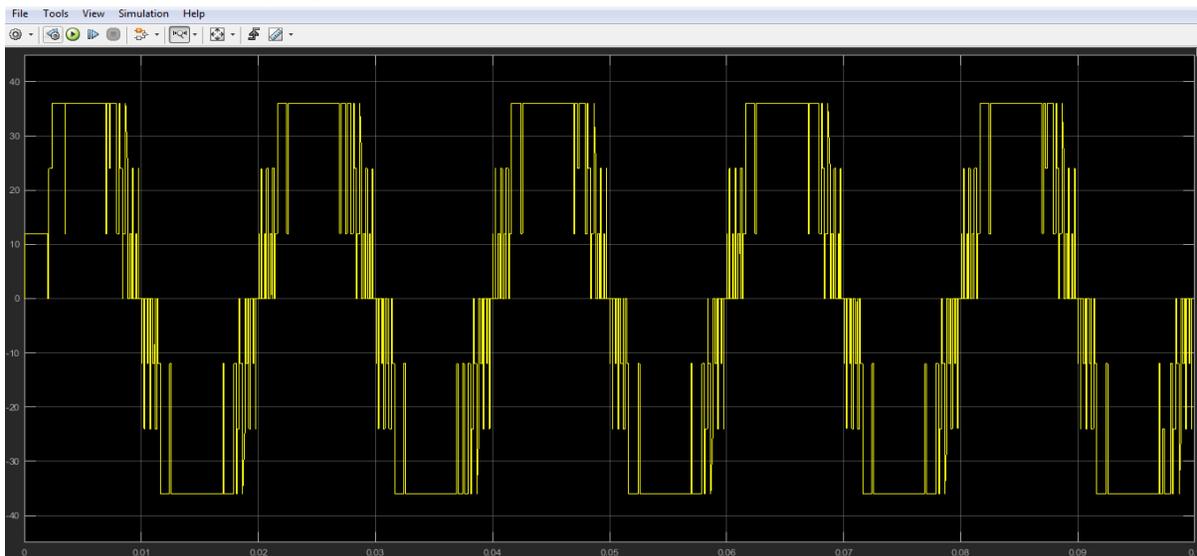
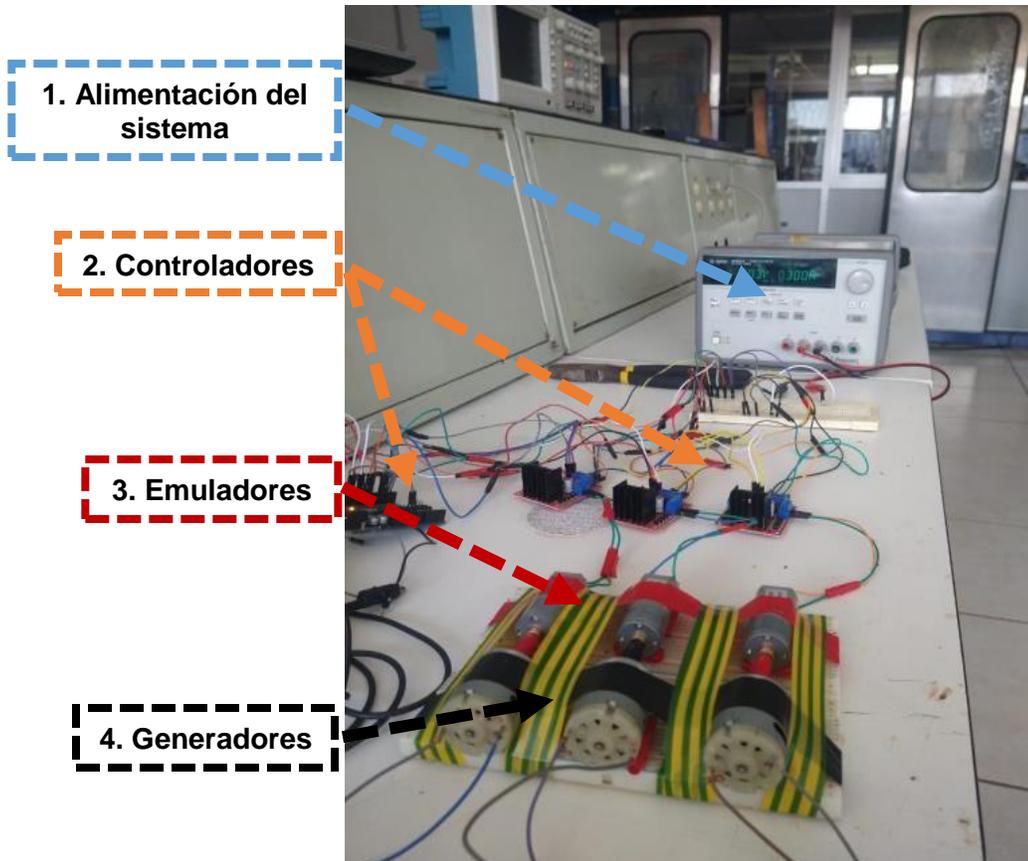


Figura 4.7 Simulación del inversor multinivel(matlab)

### 4.3 Resultados Físicos

En la siguiente imagen muestra la implementación de la maqueta propuesta de manera física.



*Figura 4.8 Maqueta física para la emulación de los generadores*

De igual manera este sistema se divide en 4 fases como se muestra en la figura 4.8.

Alimentación del sistema: se utiliza una fuente variable de CD de 50 V, la cual únicamente se van a utilizar los 35 volts, debido a que los dispositivos que controlan los emuladores solo tienen la capacidad de soportar 35 volts y 2 amperes.

Controladores: tiene la misión de ejercerle un cierto porcentaje de voltaje por medio de señales pwm que están programados conforme al perfil de olas seleccionado, con la finalidad de emular el potencial que pueda ejercer un sistema real.

Emuladores: en este caso los emuladores son receptores de las señales emitidos por los controladores, donde las especificaciones del mismo pueden soportar un voltaje entre los 12 y 40 volts.

Para poder determinar el movimiento de los emuladores se emplean ciertos límites que son determinados por el controlador, en este caso como se utiliza un arduino de 8 bits proporciona un rango de valores entre 0 y 255, el cual la cantidad de 255 es el 100% del voltaje que se tenga pensado utilizar y de ahí va decreciendo el porcentaje dependiendo de la cantidad de datos que se pretenda utilizar.

Generadores: por último, en los generadores se refleja el porcentaje total de potencia que transmiten los emuladores, lo cual es muy mínimo debido a que los generadores proporcionan muy poco potencial tanto por las especificaciones y la dispersión de energía que se genera al estar en uso.

Cabe mencionar que en la tabla número 4.1 se muestran las entradas de voltaje implementadas en fuentes de CD que corresponden a la salida de cada generador de manera independiente, que representa el porcentaje total de potencia que ejercen las olas respecto al perfil que se ha seleccionado, el cual se distribuye en una escala en un rango de 1 a 100, al realizarse la suma de los 3 generadores da como resultado 600 mV y la suma de las fuentes da 36 volts que es el resultado que se especifica en el inversor propuesto con sus respectivas características.

Tabla 4.1 Porcentaje a escala de la salida de generadores sustituida por fuentes de CD

| Generadores | Salida de voltaje de emuladores | Salida de corrientes | Soporte de voltaje de puente H | Porcentaje de voltaje reflejado fuentes de CD a utilizar. | Porcentaje de corriente fuentes de CD |
|-------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|
| 1           | 200 mV                          | 0.4 amp              | 35 V                           | 12 V  | 0.4 amp                               |
| 2           | 200 mV                          | 0.4 amp              |                                | 12V   | 0.4 amp                               |
| 3           | 200 mV                          | 0.4 amp              |                                | 12V   | 0.4 amp                               |

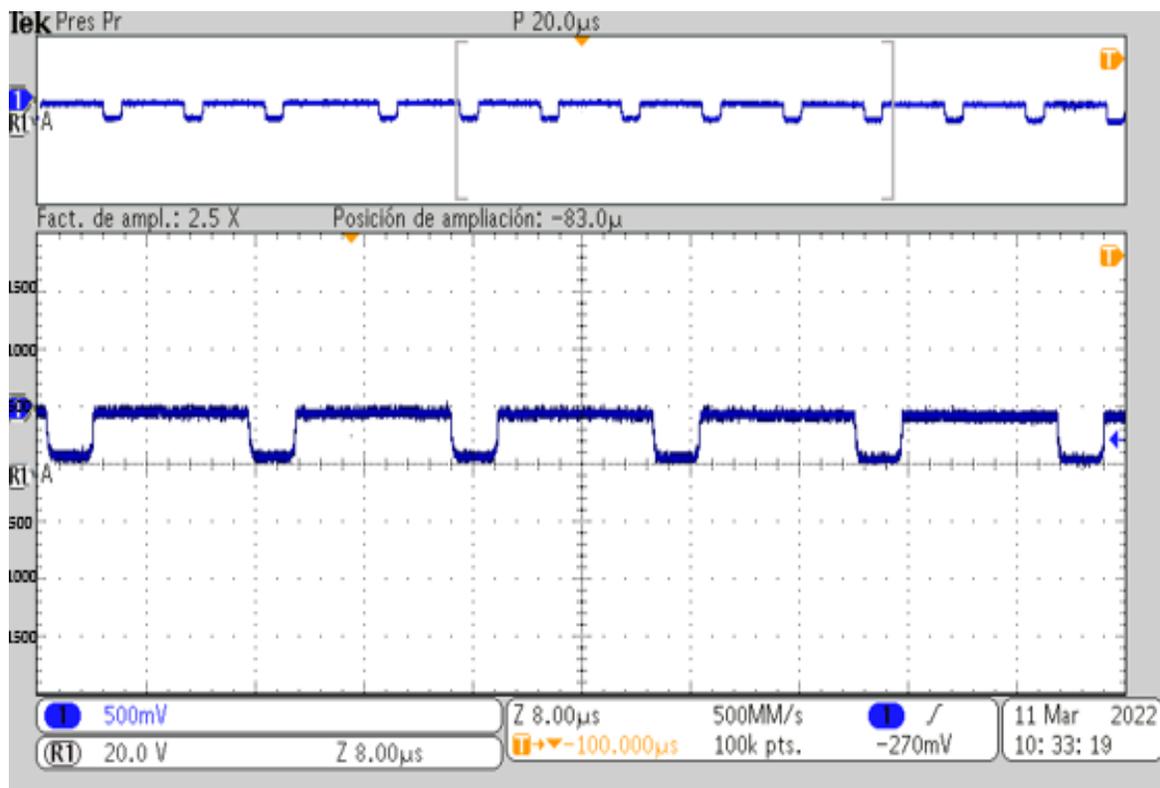
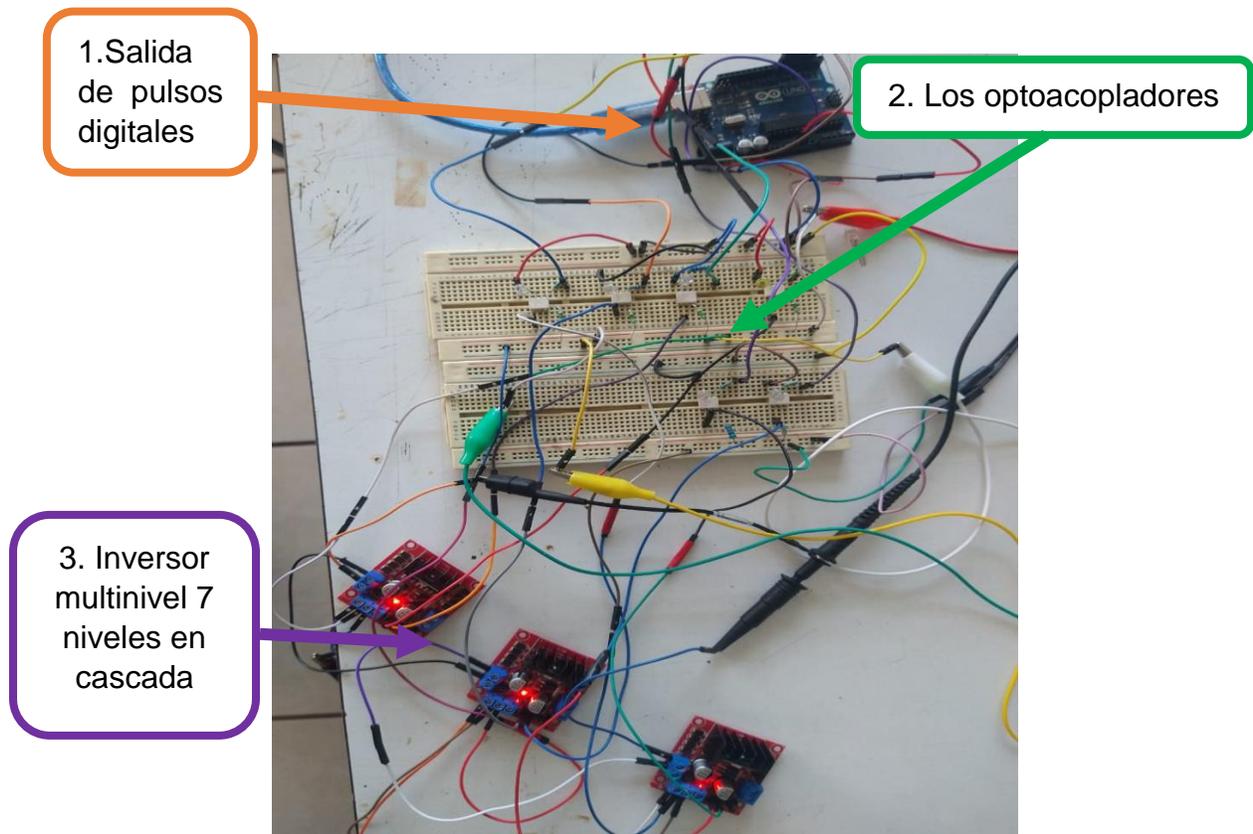


Figura 4.9 Salida de los generadores respecto a los emuladores de olas.

Para el inversor multinivel se implementa un sistema que tenga una buena conmutación para que en la salida se obtengan los 7 niveles, se emplean diferentes fases para la obtención de la salida del sistema como se muestra en la figura 4.10.

En la fase 1 el control que se ejerce es por medio de un arduino que manda las salidas digitales tomando en cuenta los ángulos que se utilizan para la modulación de 7 niveles.

En la fase 2 se muestra la parte de los optoacopladores que son quien reciben esas señales por parte del arduino y emiten otras señales externas que conmutan el inversor multinivel que está conectado en cascada para poder obtener una sola salida de CA la explicación se muestra a partir de la figura 3.16 se explica detalladamente.



*Figura 4.10 Estructura física del inversor de 7 niveles en cascada*

Para la salida del inversor multinivel en cascada se dividen en 3 partes en la salida de los pulsos digitales, los optoacopladores y en la parte final se conecta el inversor multinivel.

Los pulsos son ejercidos por un PLD (Dispositivo Lógico Programable) en cuestiones más específicas un arduino, el cual tiene la labor de mandar pulsos digitales a los optoacopladores, de ese modo los optoacopladores se activan mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente opto electrónico normalmente en forma de fototransistor o fototriac.

Para la parte de la base donde se establecen las conexiones de los optoacopladores se utiliza un acoplamiento de 2 protoboards, debido a que los materiales a utilizar se acoplan de buena manera, aparte que es mucho más económico realizarlos de esa manera que mandar hacer un circuito en PCB's.

Para la parte del foto-transistor se conecta una fuente externa que determina el valor de 0 o 1 que ayuda a cada célula del inversor multinivel a obtener tanto la salida positiva o negativa que forma los niveles escalonados de CD, para poder obtener una salida de CA.

En la imagen 4.11 se muestra la obtención de la salida del inversor en cascada en el osciloscopio donde la frecuencia que maneja es de 5% tomando en cuenta que las frecuencias más usuales están entre un rango de 50 a 60 Hertz donde la salida final es de 3 Hertz tomando en cuenta que los pulsos digitales fueron obtenidos por ángulos de conmutación de 360 grados aplicando la formula y determinar los delay del arduino la salida de la frecuencia se determina como  $\frac{1}{360 \text{ grados}} \times 1000 = 2.8 \text{ Hertz}$  que es la frecuencia en la que se están ejecutando las salidas digitales del arduino.

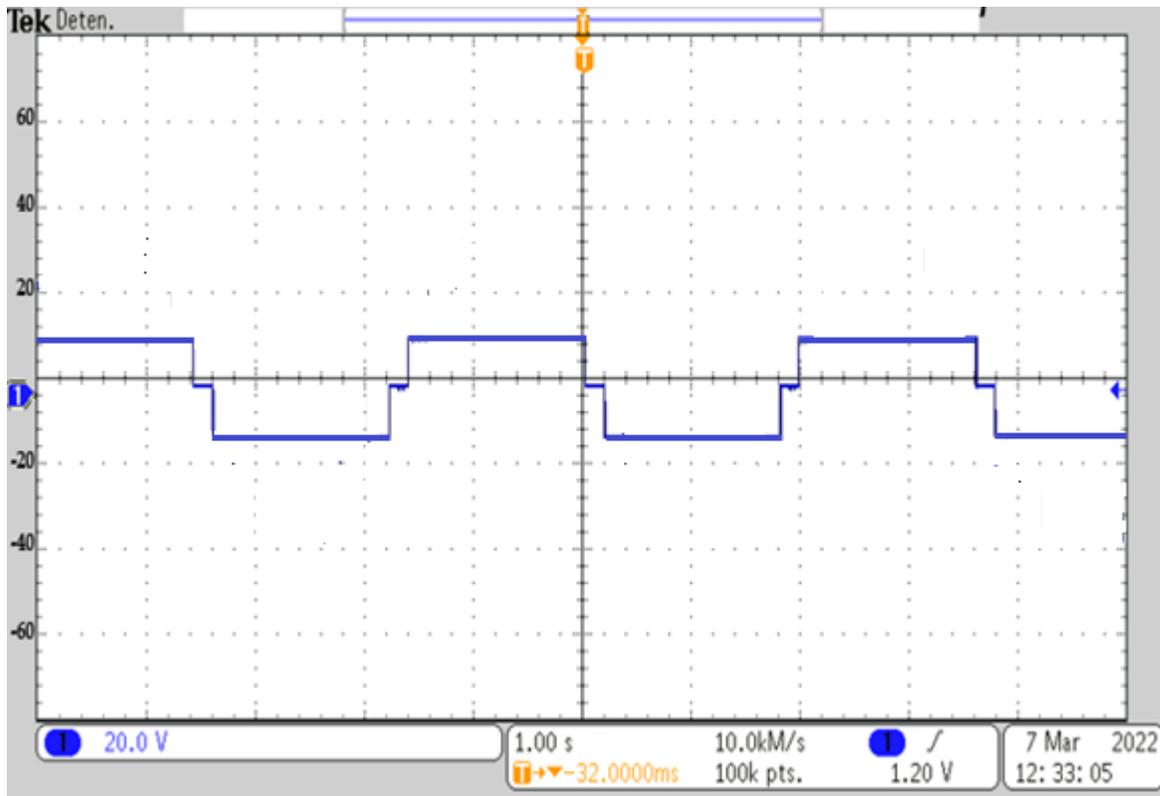


Figura 4.11 Salida del inversor 3 niveles

Para obtener la salida de la figura 4.13 se conmutan 2 células del inversor multinivel así como se muestra en la figura 4.12.

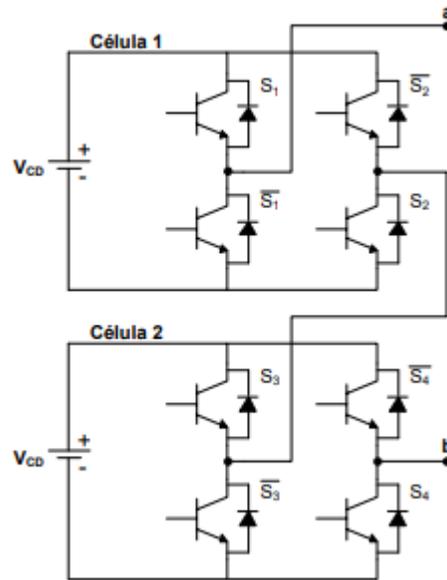


Figura 4.12 Inversor 5 niveles

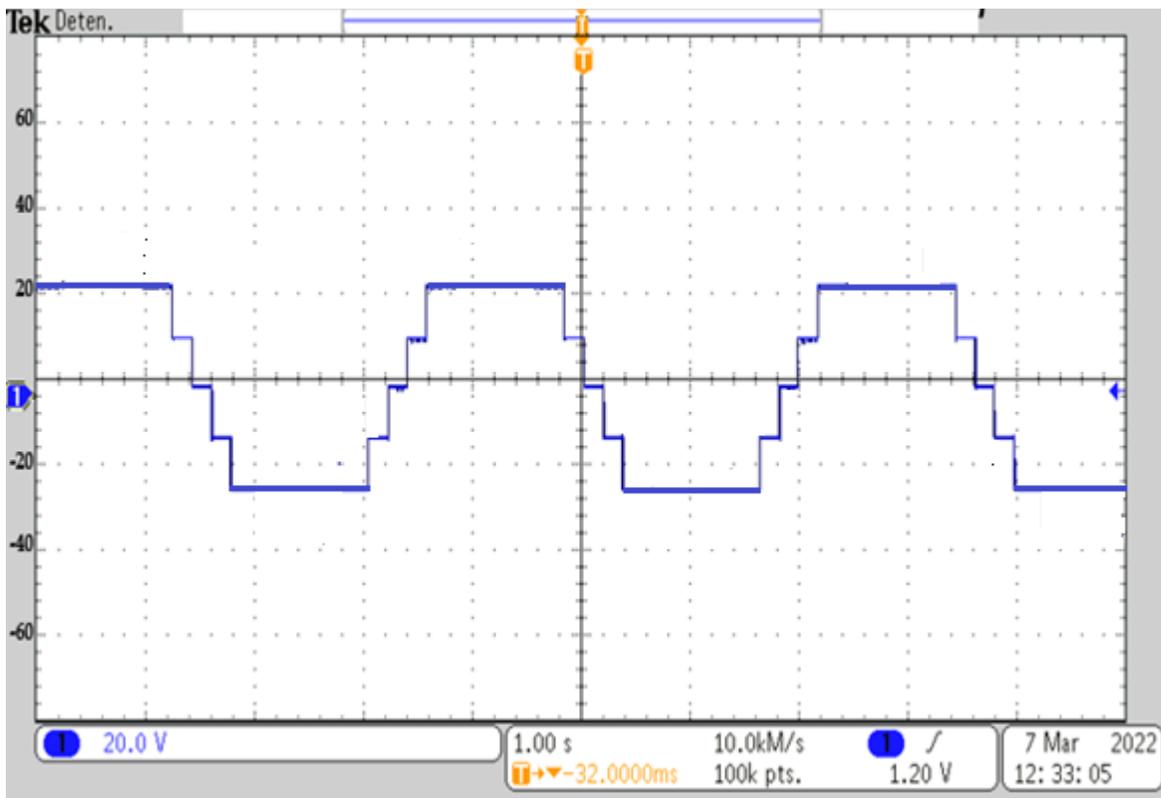


Figura 4.13 Salida del inversor de 5 niveles

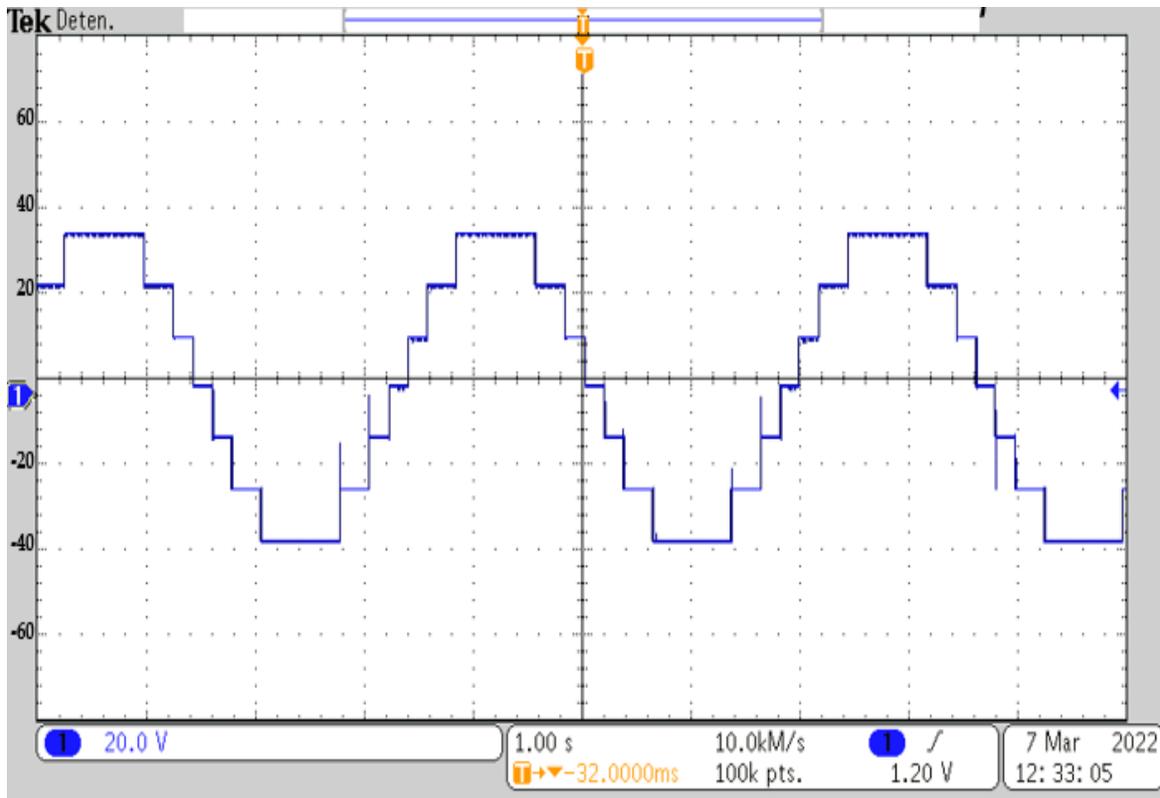


Figura 4.14 Salida del inversor de 7 niveles en cascada en el osciloscopio

También en la figura 4.14 se muestran 3 ciclos de la salida del inversor multinivel, lo que se pretende realizar a continuación es obtener la THD a base de un conjunto de datos obtenidos por medio del osciloscopio utilizado y poder seleccionar 1 solo ciclo de los 3 que se obtuvieron en la figura 4.15 para determinar el porcentaje de THD que se tiene, así como se muestra en la figura 4.16.

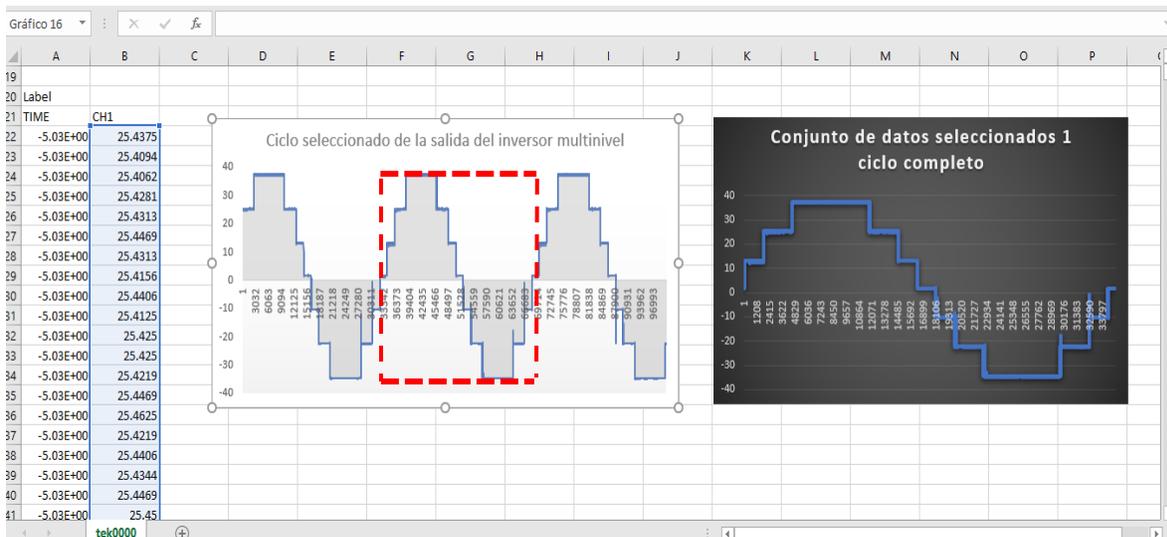
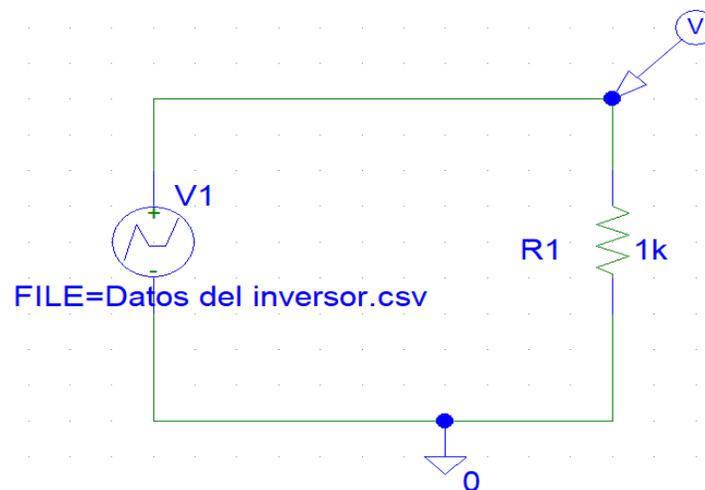


Figura 4.15 Adquisición de datos para el cálculo de la THD

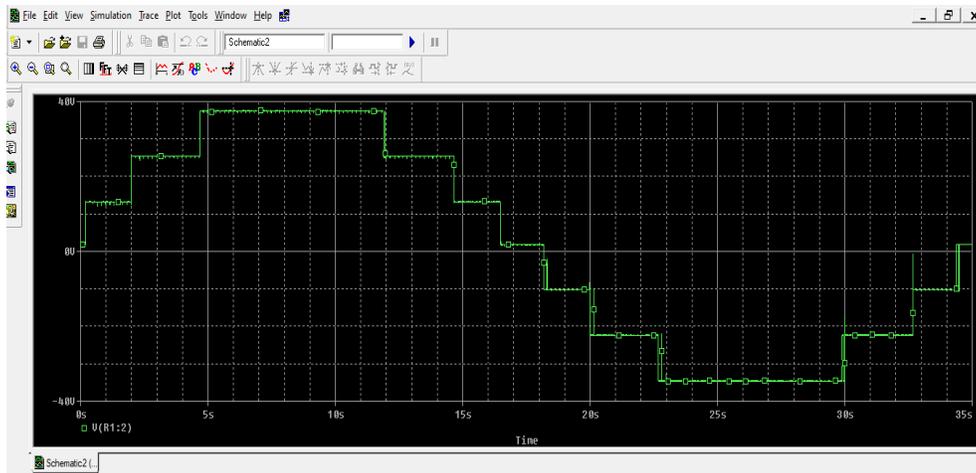
Una vez que se tiene los datos seleccionados en el programa de Excel, lo que se debe hacer es poder transformar ese programa de los datos a un formato ccv para que con ayuda del programa Pspice se obtenga el porcentaje de THD.

Ya que se tenga el archivo de los datos en ccv se debe hacer un circuito en Pspice, así como se muestra en la figura 4.16, donde el factor principal es un VFILE que tiene la capacidad de procesar los datos seleccionados y formar la onda, así como se muestra en la figura 4.17, de esa manera ya se puede obtener lo que viene siendo la fft que se encuentra en figura 4.18.

Por último, la figura 4.19 es quien determina el porcentaje de THD que obtiene a la salida del inversor, tomando en cuenta que la norma IEEE establece que los inversores multinivel se encuentran en un rango del 8 al 12 % donde también depende mucho del filtrado que se les aplique y algunos métodos de eliminación de armónicos el porcentaje que se obtiene se encuentra en el rango que se establece debido a que no se le aplica algún método de optimización.

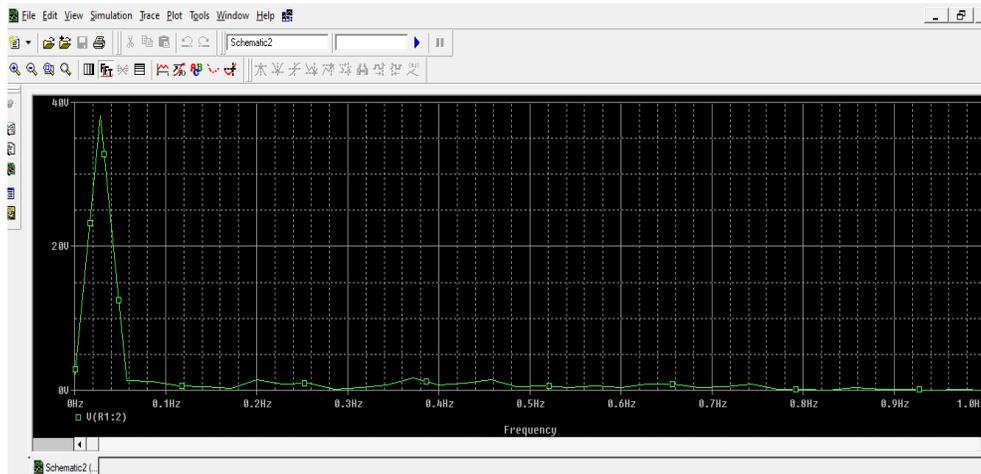


**Figura 4.16** Adquisición de datos para el porcentaje de THD



*Figura 4.17 Señal senoidal de los datos del osciloscopio en el programa Pspice*

En la figura 4.18 muestra la obtención de lo que es la FTT que es el paso de una señal sobre el dominio del tiempo, donde al inicio se percibe lo que viene siendo el armónico fundamental que es el valor de la señal senoidal, la cual con el paso de la frecuencia se van mostrando los armónicos, también se establece tomar el valor de 1Hz debido a que el dispositivo con el que se obtiene la salida del inversor trabaja a 2.8Hz se percibe mejor la distribución de los armónicos en el sistema.



*Figura 4.18 FFT (transformada rápida de Fourier)*

En la figura 4.19 se muestra el porcentaje final de la THD del sistema, donde se muestra una tabla obtenida de la FTT que muestra el valor de los armónicos que encuentran en la señal senoidal, cabe mencionar que se toman los vales hasta el numero 50 debido a que la norma establecida en la IEEE numero 519 establece que la medida mas relevante para la obtención del porcentaje THD es hasta el armónico 50 ya que a partir de ese numero el valor de los armónicos se va manteniendo y no cambia su valor aunque se tomen los valores infinitamente.

| HARMONIC NO | FREQUENCY (HZ) | FOURIER COMPONENT | NORMALIZED COMPONENT | PHASE (DEG) | NORMALIZED PHASE (DEG) |
|-------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------|------------------------|
| 1           | 2.823E-02      | 3.799E+01         | 1.000E+00            | 5.961E+00   | 0.000E+00              |
| 2           | 5.645E-02      | 4.561E-01         | 1.200E-02            | -3.934E+00  | -1.586E+01             |
| 3           | 8.468E-02      | 8.686E-01         | 2.286E-02            | 3.946E+00   | -1.394E+01             |
| 4           | 1.129E-01      | 1.586E-01         | 4.174E-03            | -2.455E+01  | -4.840E+01             |
| 5           | 1.411E-01      | 2.807E-01         | 7.389E-03            | -2.147E+01  | -5.128E+01             |
| 6           | 1.694E-01      | 4.492E-01         | 1.182E-02            | 1.358E+02   | 1.000E+02              |
| 7           | 1.976E-01      | 1.347E+00         | 3.546E-02            | 3.808E+01   | -3.650E+00             |
| 8           | 2.258E-01      | 3.819E-01         | 1.005E-02            | 1.228E+02   | 7.513E+01              |
| 9           | 2.540E-01      | 1.062E+00         | 2.795E-02            | -1.210E+02  | -1.747E+02             |
| 10          | 2.823E-01      | 2.638E-01         | 6.942E-03            | 6.942E-03   | -7.602E+01             |
| 11          | 3.105E-01      | 3.095E-01         | 8.146E-03            | -1.057E+02  | -1.713E+02             |
| 12          | 3.387E-01      | 4.104E-01         | 1.080E-02            | -8.309E+01  | -1.546E+02             |
| 13          | 3.669E-01      | 2.000E+00         | 5.264E-02            | 8.224E+01   | 4.748E+00              |
| 14          | 3.952E-01      | 1.235E-01         | 3.250E-03            | 9.906E+01   | 1.560E+01              |
| 15          | 4.234E-01      | 7.884E-01         | 2.075E-02            | 1.018E+02   | 1.240E+01              |
| 16          | 4.516E-01      | 4.643E-01         | 1.222E-02            | 6.762E+01   | -2.776E+01             |
| 17          | 4.798E-01      | 1.274E+00         | 3.354E-02            | -7.582E+01  | -1.752E+02             |
| 18          | 5.081E-01      | 4.491E-02         | 1.182E-03            | 5.745E+01   | -4.985E+01             |
| 19          | 5.363E-01      | 8.780E-01         | 2.311E-02            | -6.426E+01  | -1.775E+02             |
| 20          | 5.645E-01      | 4.698E-01         | 1.236E-02            | -1.450E+02  | -2.642E+02             |
| 21          | 5.927E-01      | 8.015E-01         | 2.109E-02            | -6.811E+01  | -1.933E+02             |
| 22          | 6.210E-01      | 2.333E-01         | 6.140E-03            | -1.580E+02  | -2.891E+02             |
| 23          | 6.492E-01      | 1.514E+00         | 3.984E-02            | -5.001E+01  | -1.871E+02             |
| 24          | 6.774E-01      | 3.749E-01         | 9.867E-03            | 9.415E+00   | -1.336E+02             |
| 25          | 7.057E-01      | 7.064E-01         | 1.859E-02            | -4.175E+01  | -1.908E+02             |
| 26          | 7.339E-01      | 3.718E-01         | 9.787E-03            | -1.020E+01  | -1.652E+02             |
| 27          | 7.621E-01      | 5.756E-01         | 1.515E-02            | -1.630E+02  | -3.239E+02             |
| 28          | 7.903E-01      | 2.239E-01         | 5.893E-03            | 1.582E+02   | -8.665E+00             |
| 29          | 8.186E-01      | 3.203E-01         | 8.431E-03            | -5.908E+01  | -2.319E+02             |
| 30          | 8.468E-01      | 4.686E-01         | 1.233E-02            | 1.437E+02   | -3.515E+01             |
| 31          | 8.750E-01      | 7.569E-01         | 1.992E-02            | 1.388E+01   | -1.709E+02             |
| 32          | 9.032E-01      | 3.705E-02         | 9.750E-04            | -3.544E+01  | -2.262E+02             |
| 33          | 9.315E-01      | 3.007E-01         | 7.915E-03            | 3.730E+01   | -1.594E+02             |
| 34          | 9.597E-01      | 4.665E-01         | 1.228E-02            | -6.469E+01  | -2.674E+02             |
| 35          | 9.879E-01      | 4.068E-01         | 1.071E-02            | 2.968E+00   | -2.057E+02             |
| 36          | 1.016E+00      | 1.113E-01         | 2.928E-03            | -8.960E+01  | -3.042E+02             |
| 37          | 1.044E+00      | 5.808E-01         | 1.529E-02            | 3.548E+01   | -1.851E+02             |
| 38          | 1.073E+00      | 4.404E-01         | 1.159E-02            | 8.265E+01   | -1.439E+02             |
| 39          | 1.101E+00      | 2.719E-01         | 7.157E-03            | -1.268E+02  | -3.593E+02             |
| 40          | 1.129E+00      | 2.961E-01         | 7.793E-03            | 7.298E+01   | -1.655E+02             |
| 41          | 1.157E+00      | 8.015E-01         | 2.110E-02            | -1.038E+02  | -3.482E+02             |
| 42          | 1.185E+00      | 3.340E-01         | 8.790E-03            | -1.231E+02  | -3.734E+02             |
| 43          | 1.214E+00      | 3.365E-01         | 8.855E-03            | -1.158E+02  | -3.721E+02             |
| 44          | 1.242E+00      | 4.289E-01         | 1.129E-02            | -1.379E+02  | -4.002E+02             |
| 45          | 1.270E+00      | 6.264E-01         | 1.649E-02            | -1.585E+02  | -4.268E+02             |
| 46          | 1.298E+00      | 1.690E-01         | 4.449E-03            | 2.870E+01   | -2.455E+02             |
| 47          | 1.327E+00      | 6.129E-01         | 1.613E-02            | -1.205E+02  | -4.007E+02             |
| 48          | 1.355E+00      | 4.834E-01         | 1.272E-02            | 1.365E+01   | -2.725E+02             |
| 49          | 1.383E+00      | 1.212E-01         | 3.189E-03            | -6.774E+01  | -3.598E+02             |
| 50          | 1.411E+00      | 6.521E-02         | 1.716E-03            | 9.000E+01   | -2.000E+02             |

**TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.191222E+01 PERCENT**

Figura 4.19 Porcentaje de THD obtenido

En la parte de los resultados de la obtención del porcentaje de la THD, se realiza una comparativa con 3 sistema donde se utiliza de igual manera lo que viene siendo un inversor multinivel en cascada, uno a que trabaja a alta potencia que muestra en la figura 4.20, una a mediana potencia que es la figura 4.21 y por último una a baja potencia que es el convertidor con el que se está trabajando.

El convertidor que trabaja a alta potencia trabaja con método de modulación de ancho de pulso y eliminación armónica (SHE-PWM), se ha aplicado ampliamente a multinivel Inversor de fuente de voltaje (MVSII) para eliminar los armónicos de baja frecuencia de su voltaje de salida. Donde la parte fundamental es poder disminuir la THD por medio de eliminación de armónicos, ya que se realiza una comparación de un sistema de 5 niveles en el sistema el cual cuenta con un porcentaje de 24.25% de THD y una vez aumentado a 7 niveles junto con la eliminación de armónicos el THD baja hasta un 13.21%.

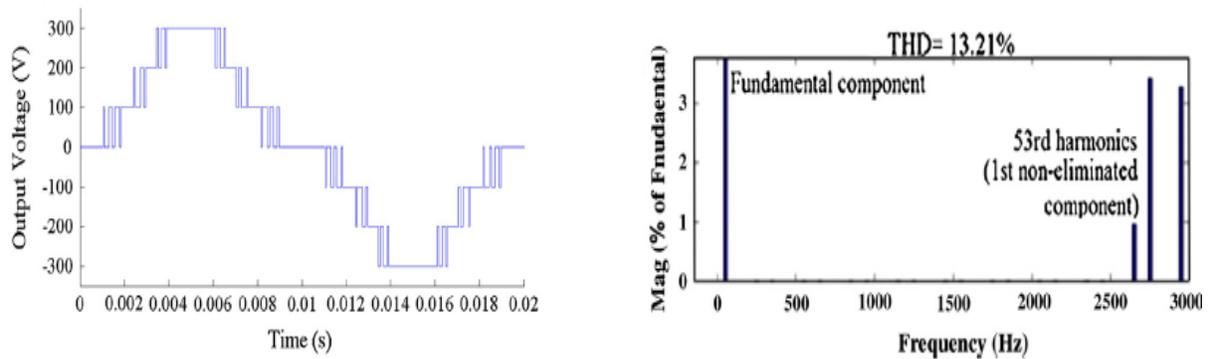


Figura 4.20 THD de 13.21 %, Moeed Amjad, A., & Ahmed Saif, A. (2014).

En el inversor multinivel a potencia media ubicado en la figura 4.21 se pone a prueba de igual manera un inversor de 7 niveles a diferencia del inversor de alta potencia este implementalo que viene siendo la evolución diferencial (DE) que funciona como herramienta para la optimización implementando una modulación ancha de pulso y eliminación armónica (SHEPWM), el cual consta de eliminar el armónico 3 y 5 para la reducción de la THD a un 15.85%.

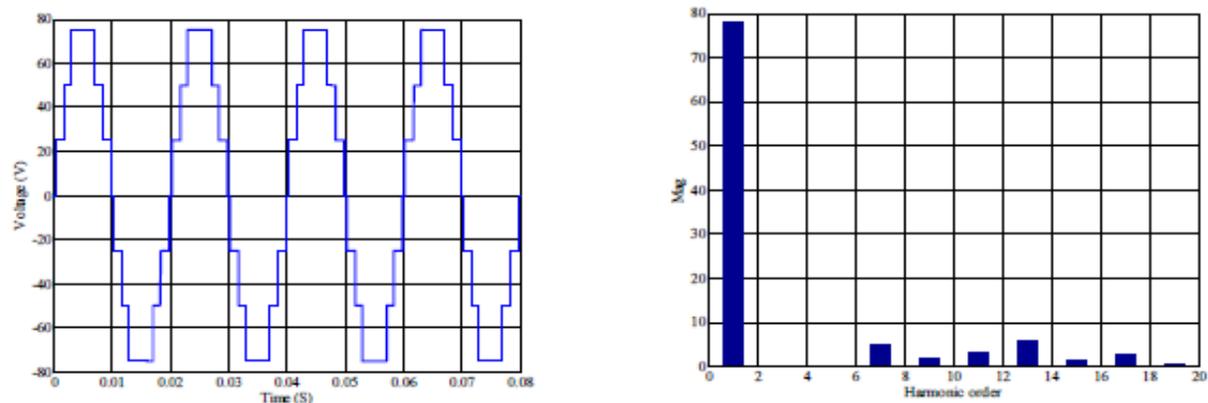


Figura 4.21 THD de 15.85%, Chabni, F., & Rachib, T. (2016).

El convertidor de baja potencia, es el que se obtuvo a través de los puentes H no se utiliza ninguna técnica de modulación para la optimización de la salida del inversor de 7 niveles y ni tampoco se utiliza la eliminación de armónicos, en esta parte lo que se realiza es que a base de los puentes H I298n se configuran por medio de señales digitales que son emitidas por un arduino que trabaja con una frecuencia de 2.8 Hertz, a diferencia de los demás la salida de THD del sistema de 11.9% el cual si fuera el caso de hacer una eliminación de armónicos podría reducir un poco más, pero como no se esta utilizando una modulación solo es una emulación, solo se requiere que se apegue lo mejor posible a la norma IEEE, que especifica un porcentaje ideal para la THD de un sistema de 7 niveles puede estar en una rango de 8 a 12%.

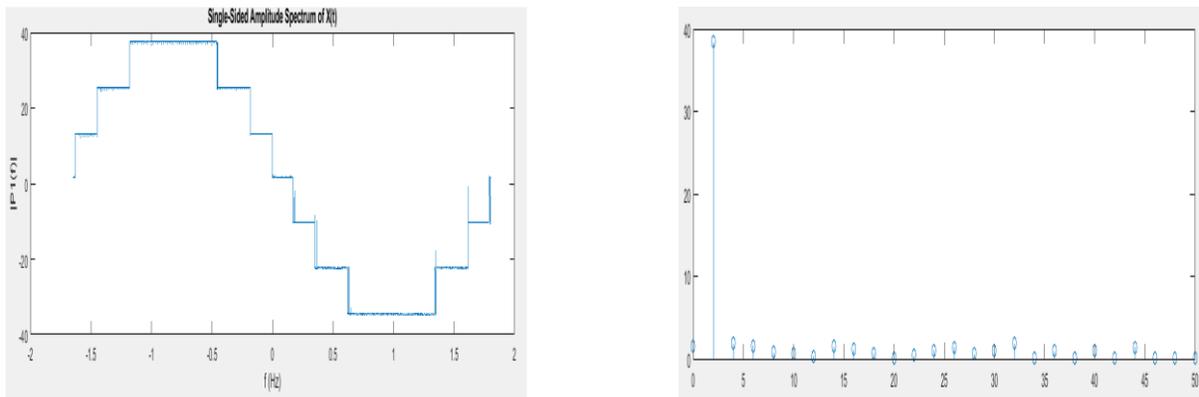


Figura 4.22 THD de 11.9%, Salida del Sistema obtenido

#### **4.4 Conclusiones**

Las condiciones de operación del inversor multinivel en simulación y en la experimentación son diferentes; no obstante, con base en los resultados obtenidos se concluye que los niveles de voltaje medidos, en la parte de experimentación fueron acertados los resultados conforme a los calculados en el diseño y a los obtenidos en simulación.

Sin embargo, las condiciones de los materiales son de gran ayuda debido a que en cada secuencia existe una pérdida de energía, tiene que efectuarse y checarsse en su debido tiempo para poder evitar el mayor número de fallos posibles.

---

# ***Capítulo 5***

---

## ***Conclusión y trabajos a futuro***

## **5.1 Introducción general**

*En este trabajo se construyó un emulador de olas controlado con PWM con la finalidad de poder obtener una corriente de CD que ayude a conmutar un inversor multinivel reconstruido con la finalidad de poder obtener una salida de CA y ver qué tan versátil puede ser el uso de este tipo de sistemas, obviamente que como es a menor escala este proyecto se pretende obtener el mayor potencial posible. Con este trabajo se logra un gran avance en cuanto a los inversores multinivel reconstruidos en cénit, debido a que las características de los niveles de corriente y voltaje que maneja son más reales y los elementos integrados que conllevan estos dispositivos con una amplia accesibilidad.*

El objetivo principal de esta tesis es el diseño y construcción de un inversor multinivel simétrico monofásico de 7 niveles a nivel emulación, con la característica de acoplamiento a emuladores de olas que se basan en sistemas reales, que ayuden al inversor multinivel a cumplir con su funcionamiento. De acuerdo a los resultados obtenidos experimentalmente, puede afirmarse que el objetivo se cumple satisfactoriamente de hecho se puede aumentar el porcentaje de la salida del inversor que se emula, debido a que los materiales seleccionados pueden soportar hasta 35 V por célula que viene siendo 2 veces más de los valores que se especificaron. A continuación, se muestran las conclusiones y trabajos futuros relacionados con los resultados obtenidos.

## **5.2 Conclusiones del trabajo**

A continuación, se muestran las conclusiones del trabajo de tesis:

- ❖ El uso de motorreductores como emuladores de olas ayuda a ver cómo podría estar funcionando un sistema real debido a que la mayoría de sistemas utilizan turbinas para la obtención de corriente que ayuda a los convertidores de potencia proporcionar energía eléctrica a las subestaciones que proporcionan esa misma energía a las viviendas más cercanas de este tipo de sistemas.
- ❖ Cabe mencionar que el generador a utilizar proporciona un voltaje muy pequeño, debido a que la potencia de salida que ofrecen las máquinas eléctricas rotativas es menor que la potencia de alimentación que se les suministra, llamada potencia suministrada. La diferencia entre la potencia de salida y la suministrada son las pérdidas.
- ❖ Utilizar los Puentes H que son circuitos electrónicos que son de gran utilidad, ya que es la primera vez que se le puede dar una buena relación con lo que viene siendo la electrónica de potencia, en este están aplicados a un convertidor multinivel, que su principal objetivo es obtener una salida de CA a base de voltajes de CD de una manera escalonada.
- ❖ Los porcentajes de voltaje y corriente que se obtiene son muy asemejados a los que se establecieron en Psim en el valor RMS, la ventaja de un puente construido ha reconstruido, es el tiempo que conlleva al seleccionar los dispositivos debido a que tiene un menor volumen y tiene tanto la función de manejar los emuladores de ola y poder funcionar como inversor multinivel.

### **5.3 Trabajos futuros**

En este trabajo se concluye la construcción de lo que viene siendo un emulador de olas que conlleva la generación de las olas, el generador que obtiene el porcentaje en potencia reflejado por el movimiento de las olas y por último el inversor multinivel en cascada de 7 niveles, sin embargo, durante este proceso surgieron nuevas ideas y posibles variaciones de diseño para ser modificado o ampliado en el futuro, por lo que este trabajo forma parte fundamental en estudios posteriores relacionados con sistemas a mayor escala, donde permitan ejercer un máximo potencial conforme a los parámetros que conllevan el sistema.

Como trabajos a futuro se plantean lo siguiente:

Construir un prototipo con emuladores a mayor escala, en lugar de utilizar fuentes variables, poder obtener el potencial del sistema en pleno funcionamiento.

Poder armar bases resistentes que permitan acoplar a cada fase correspondiente una estabilidad, debido a que el movimiento de esos sistemas genera muchas vibraciones, pueden transformarse en pérdidas, lo cual eso puede perjudicar la salida de los generadores quienes son los reflectores del movimiento de las olas.

En la parte del inversor multinivel poder ver lo que viene siendo su comportamiento de cada celda independiente, ya que cada sistema por separado tiene la capacidad de soportar 35 volts y 2 amperes, poder poner a prueba los puentes H y relacionarlo con el perfil de misión que depende de su funcionamiento ejercido en un determinado tiempo.

Por último, poder obtener un porcentaje de THD que entre en el rango que determina el IEEE donde la salida que se obtenga se ponga a prueba con algún método de optimización para reducir el porcentaje de armónicos.

## Anexo A programación emuladores de olas (Arduino)

```
int IN1 = 8;
int IN2 = 7;
int ENA = 9;
int IN3 = 12;
int IN4 = 13;
int ENB = 10;
int IN11 = 2;
int IN22 = 4;
int ENAB = 3;

void setup() {
  pinMode(IN1, OUTPUT);
  pinMode(IN2, OUTPUT);
  pinMode(ENA, OUTPUT);

  pinMode(IN3, OUTPUT);
  pinMode(IN4, OUTPUT);
  pinMode(ENB, OUTPUT);

  pinMode(IN11, OUTPUT);
  pinMode(IN22, OUTPUT);
  pinMode(ENAB, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(IN1, LOW);
  digitalWrite(IN2, HIGH);
  analogWrite(ENA, 255);

  digitalWrite(IN3, LOW);
  digitalWrite(IN4, HIGH);
  analogWrite(ENB, 255);

  digitalWrite(IN11, LOW);
  digitalWrite(IN22, HIGH);
  analogWrite(ENAB, 255);
}
```

## Anexo B Programación de pulsos digitales para la conmutación del inversor

```
void setup() {  
    pinMode(2, OUTPUT);  
    pinMode(3, OUTPUT);  
    pinMode(4, OUTPUT);  
    pinMode(5, OUTPUT);  
    pinMode(6, OUTPUT);  
    pinMode(7, OUTPUT);  
}
```

```
void loop() {  
    delay(9);  
    digitalWrite(2,HIGH);  
    delay(18);  
    digitalWrite(3,HIGH);  
    delay(27);  
    digitalWrite(4,HIGH);  
    delay(72);  
    digitalWrite(4,LOW);  
    delay(27);  
    digitalWrite(3,LOW);  
    delay(18);  
    digitalWrite(2,LOW);  
    delay(18);  
    digitalWrite(5,HIGH);  
    delay(18);  
    digitalWrite(6,HIGH);  
    delay(27);  
    digitalWrite(7,HIGH);  
    delay(72);  
    digitalWrite(7,LOW);  
    delay(27);  
    digitalWrite(6,LOW);  
    delay(18);  
    digitalWrite(5,LOW);  
    delay(9);  
}
```

## Anexo c Programación de la obtención de THD del sistema(MATLAB)

```
clc

plot(t,v)

Fs=2*34552;

Ts=1/Fs;

L=34552;

Y = fft(v);

P2 = abs(Y/L);

P1 = P2(1:L/2+1);

P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

f = Fs*(0:(L/2))/L;

subplot(2,1,1)

stem(f,P1)

xlim([0 50])

ylim([0 40])

subplot(2,1,2)

plot(t,v)

title('Single-Sided Amplitude Spectrum of X(t)')

xlabel('f (Hz)')

ylabel('|P1(f)|')
```

## **Referencias**

- Aguayo Alquicira, J., Claudio Sánchez, A., Vela Valdés, L. G., Antonio Rodríguez, M., & Vargas Méndez, R. A. (2011). Análisis de un inversor multinivel en cascada con tolerancia a fallas. *scielo*, 66 - 78.
- Araque, J., Díaz Rodríguez, J., & Sallyth Guerrero, A. (2016). OPTIMIZACIÓN POR RECOCIDO SIMULADO DE UN CONVERTIDOR MULTINIVEL MONOFÁSICO CON MODULACIÓN PWM SINUSOIDAL DE MÚLTIPLE PORTADORA. *RCTA*, 92 - 97.
- BÁRCENAS BÁRCENAS, E. (2002). ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN INVERSOR. *Revista politecnica*.
- Beloqui Larumbe, M. (2013). APLICACIÓN DE UN ALGORITMO EVOLUTIVO DIFERENCIAL MULTIOBJETIVO PARA EL DISEÑO DE UN ABOSORBEDOR DE ENERGÍA DE LAS OLAS. *Ciemat, Centro de investigaciones Medio Ambientales y Tecnológicas*.
- BRAVO MOYA, N. (2008). SISTEMA DE CONVERSIÓN MECÁNICA ELÉCTRICA. *FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS*, 45 -65.
- Chavero Ramírez, F., López Tapia, H., & Vázquez Nava, N. (2018). Estrategia de Control para Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes. *Pistas Educativas*, 18 - 35.
- CORREA HERNÁNDEZ, D. (2016). ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN MECANISMO DE BOYAS PARA OBTENER ENERGÍA UNDIMOTRIZ. *Cupdf*, 19 - 29.
- Cortes Ríos, C., & Guzmán Chacón, S. (2015). Diseño, construcción y comparación de dos prototipos de generación eléctrica: mareomotriz y undimotriz. *Bogotá DC*, 60 - 73.
- De León Aldaco, S., Aguayo Alquicira, J., & Calleja Gjumlich, J. (2014). Reliability and Mission Profiles of Photovoltaic Systems: A FIDES Approach. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*. doi:10.1109/TPEL.2014.2356434
- Díaz Toril, F., de la Villa Jaén, A., & Montoya Andrade, A. (2015). Generación undimotriz mediante absorbedores. *e - REDING*.
- Dolgo, V., V. (2015). Estudio de la energía del mar y posibles aplicaciones en las costas Españolas Universidad Politécnica de Catalunya. España, catalunya: UPCommons.
- E. Montalvo, E., A. Domínguez, M., F. Escalante, M., & Rodríguez-Cortes, H. (2014). Control Simplificado de un Rectificador Activo de 3 Niveles. *amca*.
- Fabrés Pinar, A. (2013). Diseño Preliminar de una Aeronave en Régimen Subsónico Alto, de corto alcance y un solo pasillo. *UPCommons*.
- GARCÍA SANTIAGO, E. (2019). Energía undimotriz y su posible desarrollo en México, Facultad de Ingeniería-Ingeniería Ambiental. *UNICACH*, 23 - 51.
- González-Carrillo, A., Ruiz-Cabrera, R., & Hernández-Escobedo, Q. (2019). Potencial de energía de las olas en la costa del estado de Veracruz. *IEEE International Fall Meeting on Communications and Computing (ROC & C)*, 40 - 44. doi:10.1109 /ROCC.2019.8873534

- González-Ramírez, X., Hernández-Robles, I., & Barrios-Piña, H. (2017). *Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México Parte 1: estimación energética*. Mexico: IMTA. doi:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-01>
- Lekube, J., Garillo, A., Garillo, I., & Otaola, E. (2018). Mejora de la potencia obtenida en plantas de generación undimotriz basadas en columna de agua oscilante. *Poli(Papers)*. doi:<https://doi.org/10.4995/riai.2017.8831>
- Lifschitz, A., & Tomazín, N. (2019). Energía undimotriz: evaluación de zonas de interés para captación de energía de las olas. *Revista Tecnología y Ciencia*, 37 - 53. doi:<https://doi.org/10.33414/rtyc.34.37-53.2019>
- Mendoza, E., & Silva, R. (2015). GENERACIÓN DE ENERGÍA CON DOS TIPOS DE WEC'S EN MEXICO: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y AVANCES EN SU IMPLEMENTACION. *ResearchGate*.
- Muñoz-Galeano, N., López-Lezama, J., & Villada-Duque, F. (2018). Deducción de los estados de conmutación para los inversores multinivel VSC-MMC descripción orientada a la enseñanza en ingeniería Formación universitaria. *SciELO*, 115 - 126.
- Núñez Sampers Muñoz, M. (2017). Modelado de un convertidor undimotriz del tipo absorbedor puntual en un microprocesador. *archivo Digital UPM*, 1 - 90.
- Pabón Fernández, L., & Díaz Rodríguez, J. (2014). *Motor de inducción alimentado con inversor multinivel*. España: Vol. 8.
- Pabón-Fernández, L., Díaz-Rodríguez, J., & Pardo-García, A. (2016). Simulación del inversor multinivel de fuente común como variador de frecuencia para motores de inducción. *RIDI (Revista de Investigación)*, 91 - 97.
- Palissero, M., A. Haim, P., Olivetto, G., Galia, F., & Tula, R. (2014). *Aprovechamiento de Energía Undimotriz*. Argentina: Humadoc.
- Pire Cortés, P. (2018). Aprovechamiento de la energía undimotriz en la Costa Asturiana. *RUO*, 18 - 26.
- Rodríguez Santos, R., & Chimbo Campuzano, M. (2017). *Aprovechamiento de la Energía Undimotriz en el Ecuador*. Ecuador: Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, núm. 17, pp. 23-28, 2017. doi:[10.17163/ings.n17.2017.03](https://doi.org/10.17163/ings.n17.2017.03)
- Sanchez Martínez, D., & Luzón Narro, B. (2018). Diseño y cálculo de un reductor de velocidad para una cinta transportadora. *RiuNet*, 1 - 22.
- Urtaran Lavin, E. (2019). Nuevo dispositivo de captación de energía undimotriz. *archivo digital docencia investigación (addi)*, 20 - 48.