

Emulación de un convertidor multinivel aplicado a un sistema undimotriz

Emulation of a multilevel converter applied to a wave-driven system

Adame Nájera, E. Z.^{1*}, Aguayo Alquicira, J.¹ , Vela Valdés, L.¹, De León Aldaco, S. E.¹ , Valdez Martínez, J. S.²
(*d20ce010@cenidet.tecnm.mx)

Recibido: 12 de diciembre de 2023 Aceptado: 6 de enero de 2024

RESUMEN

La energía undimotriz es la producción de electricidad a través del movimiento de las olas. Actualmente existen diferentes sistemas electromecánicos con distintas estructuras que facilitan y aprovechan el movimiento de las olas para posteriormente transformarlo en energía eléctrica. La energía undimotriz generada puede ser transmitida en grandes cantidades a subestaciones eléctricas donde la energía es distribuida a la población usuaria. Este trabajo trata sobre la generación de energía undimotriz, donde se propone seleccionar un punto de estudio con sus respectivas mediciones teniendo en cuenta las 4 estaciones del año para seleccionar un

sistema que emule tanto el movimiento de las olas como la generación de energía eléctrica. Los perfiles de las olas pueden ser utilizados por generadores lineales o turbinas de corriente continua que emulan el funcionamiento electromecánico de los dispositivos convertidores de olas (OWC) y obtener una tensión alterna mediante tensiones de corriente continua de forma escalonada obtenidas mediante generadores que emulan el potencial contenido en las ondas.

Palabras clave: Energía undimotriz, emuladores de olas, sistema electromecánico, y convertidor multinivel en cascada

ABSTRACT

Wave energy is the production of electricity through the movement of waves. Currently, there are diffe-

rent electromechanical systems with various structures that facilitate and take advantage of the mo-

¹Departamento de Ingeniería Electrónica, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor.

²Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, Av. Universidad Tecnológica No.1, C.P. 62765.



vement of waves to later transform it into electrical energy. The wave energy generated can be transmitted in large quantities to electrical substations where the energy is distributed to the user population. This work deals with the generation of wave energy, where it is proposed to select a study point with its respective measurements considering the 4 seasons of the year to select a system that emulates both the movement of the waves and the generation of electrical energy. The wave profiles can be used

by linear generators or direct current turbines that emulate the electromechanical functioning of wave converter devices (OWC) and obtain an alternating voltage through stepped direct current voltages obtained by generators that emulate the potential contained in the waves.

Keywords: *Keywords: Wave energy, wave emulators, electromechanical system, and*

INTRODUCCIÓN

Entre los primeros registros que documentan la utilización de la energía undimotriz, se destaca un ejemplo en China durante el siglo XIII, donde se implementaron molinos impulsados por las olas. El aprovechamiento de diversas formas de energía ha sido objeto de atención, centrándose especialmente en la explotación de la energía generada por las olas. Estas formas comprenden la energía de corrientes, la energía de las mareas, la energía de las olas y, finalmente, la energía concentrada en la sal del agua marina [1].

En el contexto de México, actualmente se está llevando a cabo un estudio exhaustivo con el objetivo de determinar la máxima potencia que las olas pueden generar a una escala específica. Este enfoque se materializa a través de la implementación de generadores lineales [2]. Debido a que estos sistemas contienen una potencia máxima pueden experimentar diversas variaciones, las cuales se van generando por distintas pruebas que se realizan a lo largo de un año, considerando las 4 estaciones del año. Esto implica que los datos y valores pueden mostrar fluctuaciones, ya que tanto la estructura como la frecuencia no permanecen constantes en los sistemas mecánicos que transforman el movimiento de las olas en energía eléctrica, donde su estructura define la cantidad de generación de energía eléctrica que produce cada sistema. Entre estos componentes se encuentran el punto de absorción [3], el brazo mecánico [4], los atenuadores [5] y la columna de agua oscilante [6].

En la actualidad, se están desarrollando diversos proyectos relacionados con la estructuración que tienen como objetivo la captación de energía undimotriz y su conversión en energía eléctrica, como se evidencia en los casos [7], [8] y [9]. En cuanto a la implementación del convertidor multinivel en cascada, se considera uno de los que posee numerosas ventajas y tiene una mayor adaptación a sistemas de energías renovables [10], [11], [12] y [13].

CASO DE ESTUDIO: APROVECHAMIENTO DEL MOVIMIENTO DE LAS OLAS

Las tecnologías para aprovechar la energía oceánica son las olas, las mareas, el gradiente salino y el gradiente térmico. La energía es obtenida tanto por el movimiento de las olas, las mareas y corrientes marinas. Se han vuelto tendencia que la cantidad de energía eléctrica que producen es cercana a los 50kW por cada sistema independiente.

En relación con la Agencia Internacional de la Energía (AIE) se realizó un estudio en un período comprendido entre 2020 y 2050, lo cual arrojó que tienen la intención de implementar y generar más de 300 GW de capacidad instalada en el ámbito de la energía oceánica a nivel mundial. Este enfoque no sólo promete un suministro robusto de electricidad, sino que también contempla beneficios adicionales, como la posibilidad de contribuir a las necesidades de refrigeración, calefacción y producción de agua potable para las comunidades costeras. Además, se proyecta la generación de un total de 680,000 empleos y un ahorro estimado de 500 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera.

También es necesario estimar los costos implicados, para lo que se propone una evaluación económica preliminar. Entre los principales costos a considerar en un proyecto de energía undimotriz se encuentran: costos de inversión en equipos, instalación de equipos, instalación, conexión y transmisión de energía. Por último, la realización de diversas pruebas con dispositivos a pequeña escala ayuda a considerar un cierto porcentaje de funcionamiento y rendimiento en futuros sistemas que permitan seguir generando más energía eléctrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Uno de los objetivos fundamentales consiste en evaluar un convertidor multinivel en cascada, teniendo en cuenta el rendimiento de un perfil de olas específico. Se planea llevar a cabo una emulación de un sistema undimotriz con el propósito de alternar diversos dispositivos interconectados mediante electrónica de potencia, con el fin de generar energía eléctrica utilizable.

Lo que se propone es hacer un estudio de los diferentes dispositivos, tanto receptores como emisores, ya que un dispositivo será el encargado de generar la emulación del movimiento ondulatorio que generan las olas, y por otra parte, transmitir un porcentaje de la potencia generada a un generador de corriente continua que ayudará al convertidor multinivel a generar una salida de corriente alterna (CA), así como se ilustra en la Figura 1. En el primer proceso se utilizan diferentes tipos de simulación en Matlab, Pspice, Proteus y Arduino para obtener la salida del sistema.

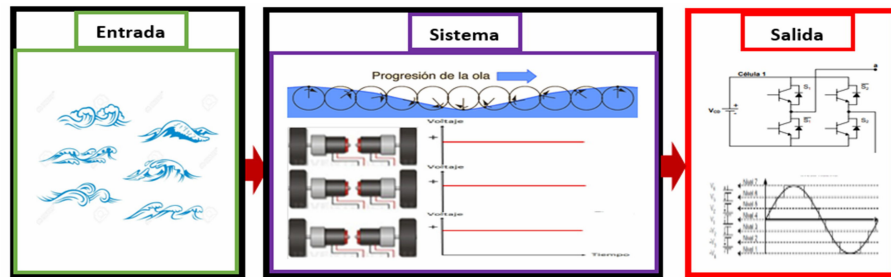


FIGURA 1. *Propuesta de solución*

SELECCIÓN DE PERFIL DE OLAS

Para seleccionar un perfil de olas, hay que comparar los océanos existentes con datos y valores obtención de energía eléctrica basada en el movimiento de las olas, como se observa en la Figura 2.

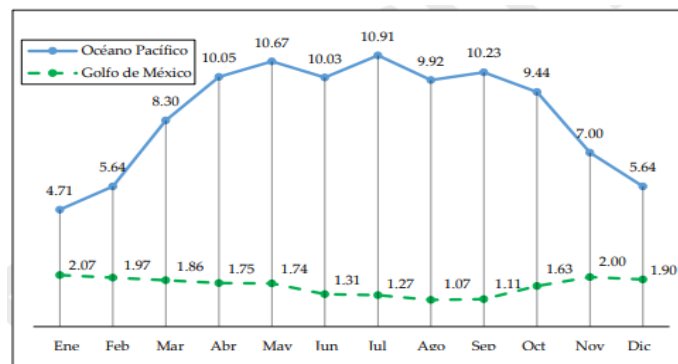


FIGURA 2. *Niveles de potencia en las olas (kW/m) en las diversas áreas de estudio.*

Se elige el Océano Pacífico como ubicación preferida para la generación de electricidad a partir de las olas, ya que presenta una producción superior en comparación con otros océanos. Esta superioridad se atribuye a la combinación de una mayor frecuencia de olas y una profundidad significativamente mayor. Estas características ofrecen a los sistemas undimotrices la capacidad de extraer más potencia, aprovechando así estas ventajas naturales para optimizar la eficiencia en la generación de energía eléctrica a partir de las olas (Figura 3).

Respecto a la selección del perfil de las olas (Tabla 1), el primer punto importante que debe tomar en cuenta es la ubicación del lugar en el que se están realizando las pruebas de adquisición de datos sobre la base de un sistema OWC con la finalidad de seleccionar el lugar con mayor potencial de energía durante un periodo determinado.

El potencial de generación de energía a partir de las olas puede evaluarse mensualmente mediante diversos factores, los cuales contribuyen a la variabilidad en la captación de energía eléctrica por parte

de los sistemas undimotrices. Esta variabilidad impulsa la necesidad de identificar un punto de estudio que maximice la captación de energía. En las Figura 4, Figura 5 y Figura 6 se ilustra el potencial máximo en tres ubicaciones distintas, buscando así identificar los lugares más propicios para la obtención de la mayor cantidad de energía.

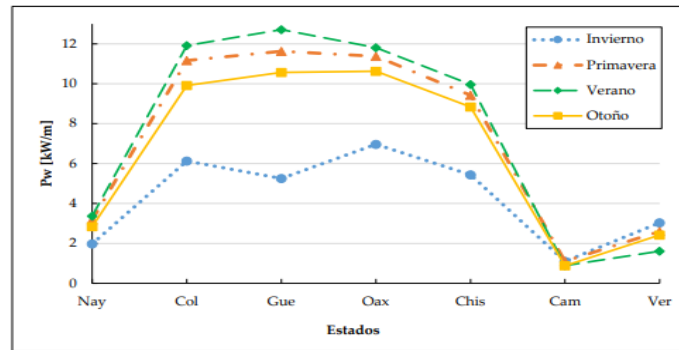


FIGURA 3. Potencia de las olas (kW/m) del Océano Pacífico y también del Golfo de México.

Tabla 1. Datos de selección de perfil de olas, Guerrero (Fuente: Programa de Batimetría de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)).

Municipio/ Ref. cercano	Lat.	Long.	Distancia a la costa (Km)	Profundidad del mar (m)	Total de datos	Datos correctos
Barra de potosí	17°30' N	101°30' O	7	85	143,000	142,152
Llano real	17° N	100°30' O	10	295	143,055	141,633
Cópala	16°30' N	99° O	8	130	143,055	141,630

La Figura 6 presenta la gráfica del Llano Real, destacando un notable porcentaje de potencia adquirida, alcanzando aproximadamente 10 kW en relación con la onda. Este hallazgo sugiere que el comportamiento del sistema undimotriz se ve fuertemente influenciado por la estructura y frecuencia de la onda en este lugar, en comparación con otras ubicaciones que exhiben porcentajes de potencia más bajos, como se detalla en la Tabla 2. Este análisis resalta la importancia de comprender la relación entre la topografía marina y el rendimiento del sistema undimotriz.

En la Tabla 2 se establece el perfil de ola a manejar, se toman en cuenta varios parámetros factibles para poder obtener un potencial máximo a base de las olas, que se basan en el acoplamiento de motores y generadores que obtendrán un porcentaje escalado de la potencia frente a la ola.

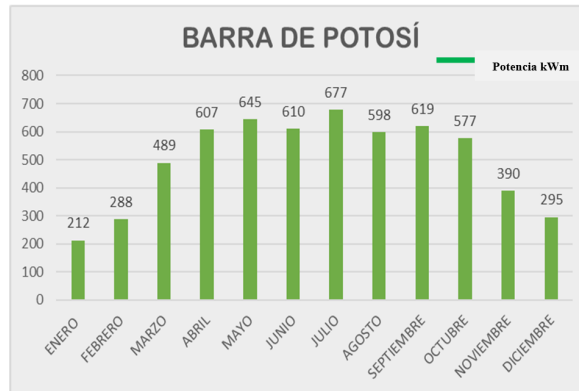


FIGURA 4. *Potencia anual frente a la ola Barra de Potosí*

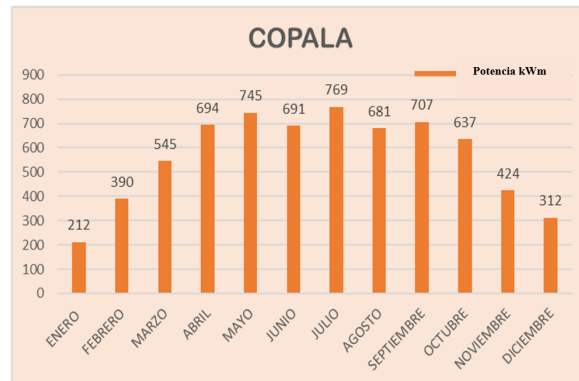


FIGURA 5. *Potencia anual frente a la ola Cópala.*



FIGURA 6. *Potencia anual frente a la ola Llano Real.*

Tabla 2. Datos del perfil a generar.

Punto	Altura(m)	Frecuencia(Hz)	Nodos	Potencia frente a la ola	Potencia máxima anual	Porcentaje de obtención
Llano real	[0.5 - 3]	78.06 %	5-7	10kWh	947 kWh	5 %

Emulador de olas

El movimiento de las olas generalmente involucra partículas que se desplazan tanto horizontal como verticalmente. Además, pequeños objetos suelen ser desplazados hacia adelante y hacia atrás, avanzando hacia la cresta de la ola y retrocediendo hacia el seno. En relación con la profundidad y al compararla con la longitud de onda, se observan grandes desplazamientos en ambos planos: horizontal, manifestándose en oscilaciones completas, y vertical, representado por movimientos rotativos.

De cierto modo también se generan movimientos de manera circular rotativa que contienen un ángulo de posicionamiento que va cambiando respecto al movimiento oscilatorio de las olas que se basan en las agujas de un reloj. Los ángulos pueden originarse a través del movimiento de las olas y convertirse en energía, independientemente del dispositivo de captación utilizado, ya sea mediante boyas o generadores lineales, como se ilustra en la Figura 7.

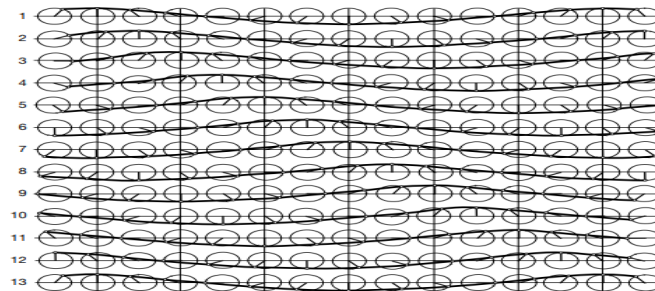


FIGURA 7. Ángulos de la formación de olas.

Los motorreductores, a pesar de ser inventos antiguos, siguen desempeñando un papel crucial en sistemas industriales contemporáneos, incluso los motorreductores más pequeños muestran una notable capacidad para alterar y sincronizar velocidades de rotación, como se evidencia en los relojes de pulsera. Estos dispositivos también se destacan como una opción sobresaliente para la generación de energía eléctrica a partir del movimiento de las olas, ya que el número de revoluciones del motor puede reflejar la estructura de las ondas. Al conectarlo a un generador de corriente continua, se puede aprovechar de

manera eficaz esta estructura ondulatoria para obtener corriente eléctrica.

El par se refiere a la fuerza de giro aplicada al eje de salida de un motorreductor y también a la fuerza rotativa en el eje de un motor. No se trata simplemente de una fuerza expresada en kilogramos, libras, onzas o newtons, ni tampoco de una potencia medida en HP o kilovatios. Más bien, es exclusivamente una fuerza rotativa cuyas unidades se expresan en kilogramo-metro, libra-pie, libra-pulgada o newton-metro. Para poder abordar la parte del emulador de olas se considera utilizar un motorreductor o dínamo de corriente directa (CD) como se muestra en la Tabla 3 y la Figura 8, el cual es fundamental para poder emular el potencial de olas que se está generando en el punto seleccionado. Cabe mencionar que este dínamo emula el comportamiento de una turbina de un sistema de boyas o también en un sistema de columna de agua oscilante.

Tabla 3. Características del motorreductor, sin carga.

Velocidad (RPM)	Corriente (mA)	Torque [KG, CM]
15	25	49
30	40	8.1
59	-----	-----
100	22	6.7
200	65	6.1

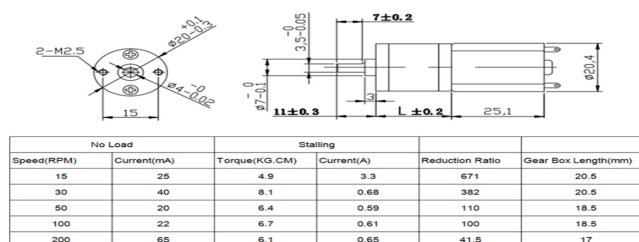


FIGURA 8. Estructura del Motorreductor de CD a utilizar.

Generadores de CD

Los generadores de CD son muy similares a los de CA, funcionan a tensiones bastante bajas para evitar que se produzcan chispas entre las escobillas y el conmutador a altas tensiones. El potencial máximo alcanzado por este tipo de generadores suele situarse en torno a los 1,500 V, además, se clasifican según el método empleado para suministrar corriente al campo magnético, excitando así los imanes del campo. La mayoría de estas máquinas trabajan entre el 50 % y el 100 % y su nivel máximo de eficiencia puede estar entre el 75 y el 100 % de los rangos de carga.

Los motores poco cargados (por debajo del 50 %) pueden tener eficiencias demasiado bajas y pérdidas elevadas, ya que depende de la capacidad de potencia de la máquina y también de la calidad de fabricación. El utilizar un generador de manera receptora es poder obtener o generar una corriente de salida de CD controlada, esto se obtiene por un acoplamiento entre el emulador de olas y el generador realizando un acoplamiento entre ambos ejes, así como se muestra en la Figura 9, una vez generada la potencia de CD por medio del perfil de olas seleccionado el siguiente paso es conmutar con un inversor multinivel con la finalidad de poder obtener una salida de CA escalonada.

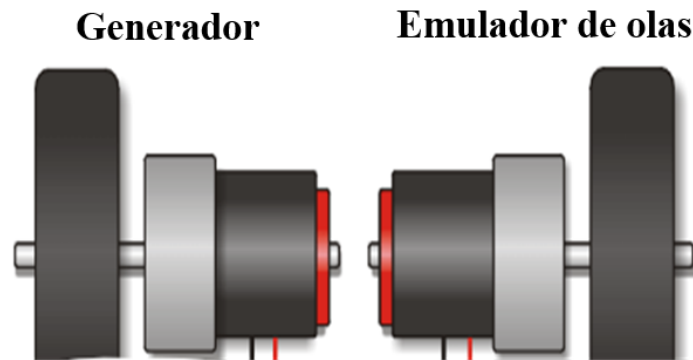


FIGURA 9. *Acoplamiento del emulador y generador de CD.*

La ventaja de utilizar un generador es que como el potencial de olas a utilizar es bajo y el emulador es a baja potencia se puede utilizar un generador simple, en la Figura 10 se muestra el generador a utilizar y sus características como se muestra en la Tabla 4.



FIGURA 10. *Estructura física del Generador.*

Convertidor multinivel

Los convertidores multinivel son dispositivos electrónicos utilizados en sistemas de conversión de energía eléctrica. Su función principal es convertir la energía eléctrica de una forma a otra, generalmente

cambiando la magnitud y la frecuencia de la CA.

En general, los inversores multinivel se clasifican en tres topologías básicas:

- CMLI (inversor multinivel en cascada) inversor en cascada.
- DCMLI (inversor multinivel con acoplamiento de diodos)
- Inversor con condensadores flotantes FCMLI (Flying Capacitor Multilevel Inverter).

Los convertidores multinivel incluyen una matriz de interruptores de potencia y condensadores como fuentes de tensión para obtener una salida de CA.

Los niveles de tensión de CD en la forma de onda de salida vienen determinados por el número de conmutadores utilizados; cuanto mayor sea el número de conmutadores, menor será la tensión y la distorsión armónica total en la señal de salida.

Tabla 4. Características del generador.

Característica	Valor
Medidas	57x35.8 mm
Peso	150 gr
Tensión Nominal	7.2V DC
Tensión Operativa	6-12V DC
Velocidad sin carga	20400 rpm
Consumo sin carga	1.8 amperes
Consumo a Max	4.7 amperes
Diámetro del eje	3.2 mm

Convertidor multinivel en cascada

Existen 2 tipos de convertidores multinivel en cascada uno es el simétrico y otro asimétrico.

Las ventajas de poder utilizar un inversor multinivel en cascada son las siguientes:

El inversor exhibe un contenido armónico reducido en comparación con un inversor convencional equivalente

La proporción del inversor se define como la suma de las tensiones de salida de los inversores de puente completo individuales

A medida que se incrementa el número de niveles, la tensión puede soportar múltiples dispositivos semiconductores, ya que cada inversor maneja únicamente la tensión de su fuente de alimentación

La complejidad del control tiende a aumentar al implementar un inversor con más de 7 niveles

Para incrementar el número de niveles, es posible agregar inversores sin necesidad de rediseñar la etapa de potencia

La suma de las tensiones de salida de los inversores se le denomina como tensión de fase o puente completo individual

El inversor multinivel en cascada contiene un mayor porcentaje de utilidad debido a que tiene mucha relación con las energías renovables ya que puede conmutar con un número menor de componentes respecto a los demás convertidores, eso reduce el costo y el tiempo de implementación.

Por otra parte, conforme al convertidor en cascada es poder seleccionar la cantidad de niveles a utilizar, para esto se toman en cuenta diferentes variables que pueden estar tanto a favor o en contra del convertidor, como por ejemplo, si la entrada que en este caso es la salida de los generados, es variable o constante, para determinar si el inversor es simétrico quiere decir que posee el mismo voltaje constante, o por otra parte, si es asimétrico de lo contrario el voltaje puede variar.

Otro punto importante es el control del sistema ya que entre más niveles existan el control tiene un mayor grado de complejidad debido a que no puede cumplir con las normativas que se apegan a la THD que es reflejado en la eficiencia de la salida generada por el convertidor.

Para seleccionar la cantidad de niveles del inversor se hace un estudio considerando los diversos factores mencionado los cuales son arrojados en la Figura 11.

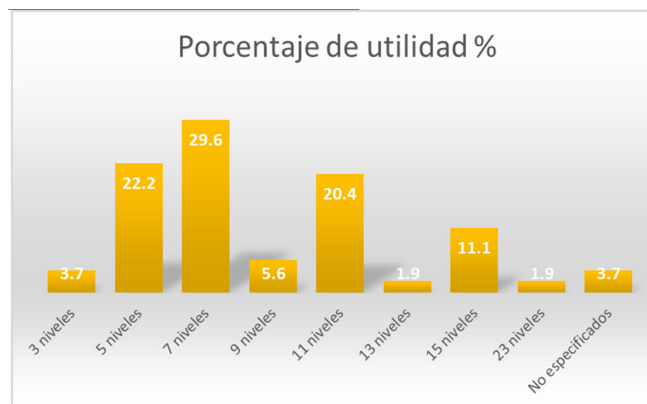


FIGURA 11. *Porcentaje de utilidad de los niveles utilizados en los inversores multinivel.*

Control del Sistema

Para la parte del control del sistema se contempla un elemento fundamental llamado puente H 1298 mostrado en la Figura 12 el cual ayuda a la configuración del funcionamiento en el emulador para la

generación del perfil de olas seleccionado y también se implementa en el convertidor multinivel.

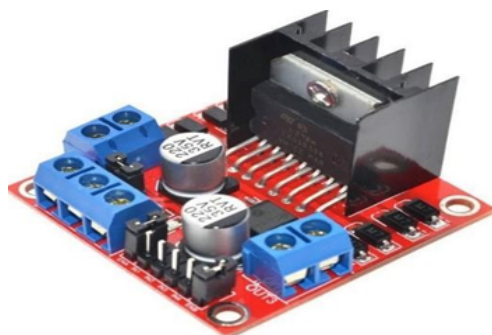


FIGURA 12. *Estructura física de puente H.*

- Chip: L298N.
- Canales: 2 (soporta 2 motores DC).
- Voltaje lógico: 5V.
- Voltaje de Operación: 5V-35V.
- Capacidad de corriente: 2A (picos de hasta 3A).
- Potencia máxima: 25W.

La Figura 13 muestra el Datasheet del puente H que tiene la característica de soportar 2 motorreductores para que cada uno represente un sistema undimotriz el cual para la generación de los 7 niveles establecidos se necesitan de 3 sistemas undimotrices, aunque bastaría con utilizar 2 puentes H para cumplir con el funcionamiento de los 3 sistemas requeridos.

La función de un puente completo se compone de varias entradas de habilitación, siendo una de ellas la (ENA), que conecta dos ramas. Además, existen otras dos entradas independientes (IN1 e IN2). Su propósito es proporcionar una habilitación programable para dirigir el movimiento del motor, encargado de emular el movimiento de las olas conforme al perfil de ola seleccionado, como se ilustra en la Figura 14.

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). Se tienen 2 entradas IN1 y IN2 las cuales están interconectadas a las compuertas A y D, en este caso estas dos compuertas son las que realizan el sentido de giro en sentido de las manecillas del reloj, así

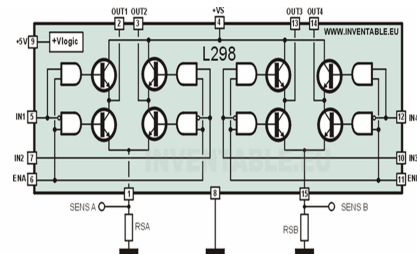


FIGURA 13. *Datasheet del Puente H l298n.*

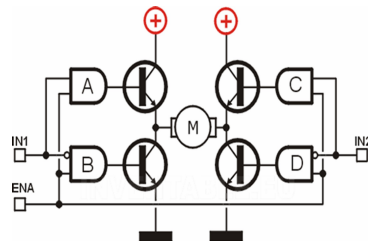


FIGURA 14. *Estructura del puente H L298n.*

como se muestra en la Figura 15. Cuando la entrada IN1 se energiza, la compuerta A y la compuerta D se mantiene en 0 volts, de igual manera existe la compuerta B y C las cuales se mantienen inhabilitadas debido a que si estuvieran activadas no existiría el movimiento de giro del motor, de lo contrario la entrada IN1 se mantiene a 0.

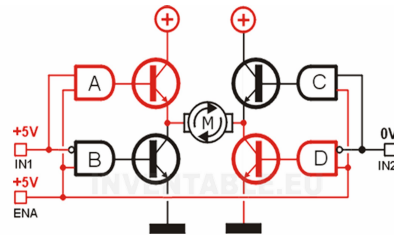


FIGURA 15. *Conmutación de transistores con giro hacia la derecha.*

Para el caso contrario del sentido de giro para sentido antihorario de las manecillas del reloj, como se muestra en la Figura 16, ahora se energiza la entrada IN2 y la IN1 se mantiene en 0 volts, donde ahora la compuerta A y D se mantienen deshabilitadas y se utilizan las compuertas B y C de manera cruzada.

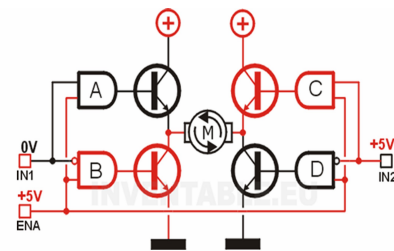


FIGURA 16. *Conmutación de transistores con giro hacia la izquierda.*

Simulación y cálculos del sistema

Para la parte de la simulación se considera buscar un dispositivo capaz de controlar los emuladores de olas, entonces se toman en cuenta diferentes factores, uno de ellos es poder realizar un control de potencia para la generación del comportamiento de olas y se decide utilizar un Arduino para el control ya que posee un rango de 0 a 255, donde la potencia será distribuida en ese rango para generar los perfiles de olas seleccionados como se observa en la Figura 17.

La Figura 18 ilustra una simulación de los emuladores de olas utilizando un arduino como controlador de los puentes H completo L298n.

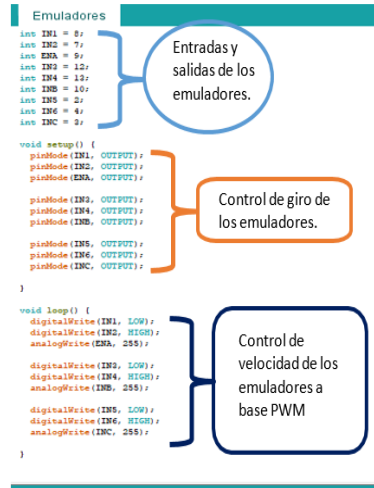


FIGURA 17. Control de emuladores.

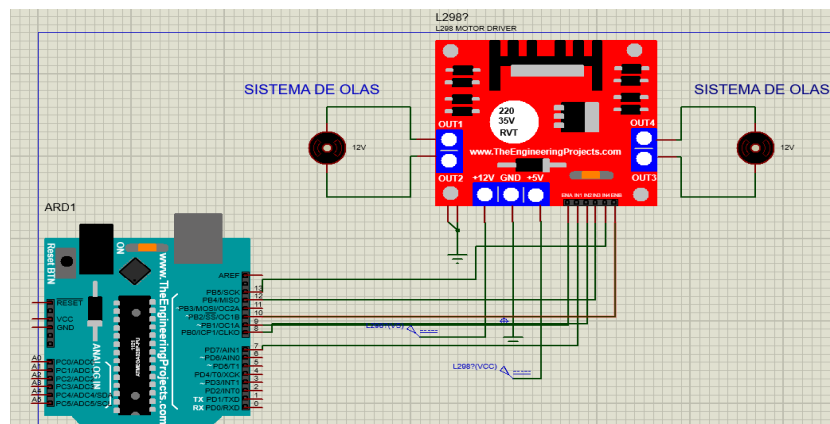


FIGURA 18. Emuladores de olas en simulación.

El arduino determina la velocidad de los emuladores y el puente determina el sentido del movimiento de olas, cabe mencionar que cada puente tiene la capacidad de poder soportar 2 emuladores de olas, en este caso como el que se va a utilizar es un inversor de 7 niveles, con 3 sistemas es más que suficiente.

Para la parte del convertidor multinivel, una vez concluido lo de los emuladores que básicamente la parte mecánica, se prosigue con la parte eléctrica que es la cantidad de energía eléctrica que producen los generadores, los cuales van a ser la entrada del inversor de 7 niveles, para esto se tienen que generar unos ángulos de conmutación los cuales generan la salida de CA de manera escalonada.

La Tabla 5 muestra dos sumadoras de pulsos tanto positivos y negativos, las cuales van a tener la finalidad de realizar un ciclo en forma de onda escalonada.

Tabla 5. Obtención de ángulos de conmutación para el inversor.

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

En la parte de la programación, se considera la declaración de salidas digitales las cuales se van a sincronizar con los optoacopladores para la generación de la salida de CA como se observa en la Figura 19.

Considerando el inversor multinivel en la parte de la simulación se divide en 3 partes las cuales determinan a la salida escalonada en cascada (ver Figura 20).

En la Tabla 5 se muestran los ángulos que generan la salida escalonada, se considera la Fase 1, más que nada son pulsos digitales PWM que se van de manera directa a la entrada de los optoacopladores.

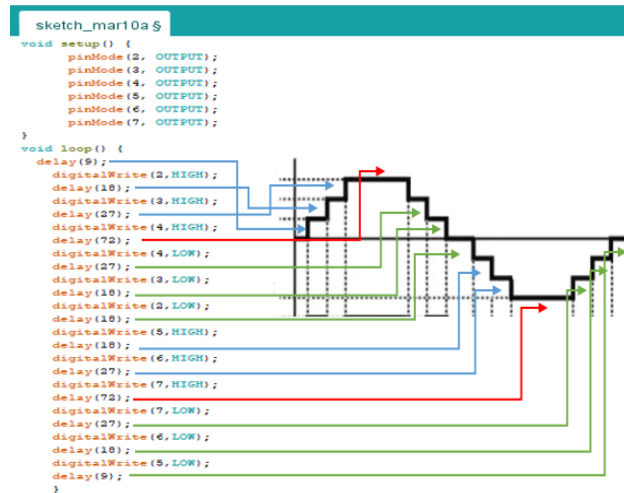


FIGURA 19. Salida de modulación de pulsos para el inversor multinivel.

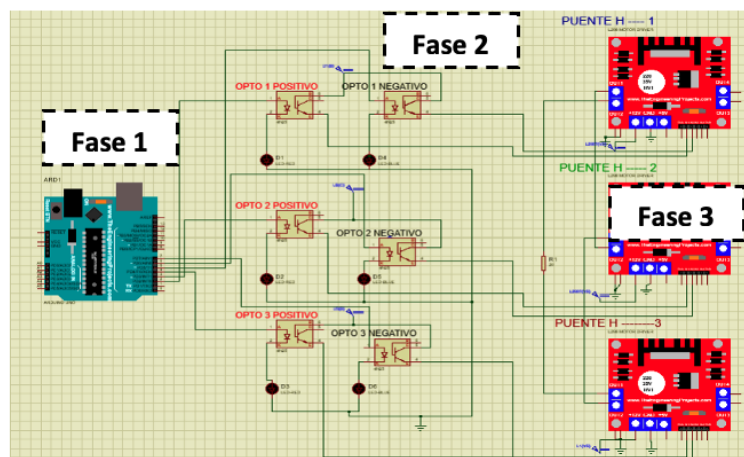


FIGURA 20. Simulación en proteus del inversor de 7 niveles en cascada.

La segunda Fase es la de los optoacopladores los cuales tienden a funcionar como un fototransistor que se activan al recibir los pulsos digitales del arduino, estos mismos mantienen un voltaje externo en el colector, el cual pasará el voltaje de colector a emisor una vez recibida la señal entre ánodo y cátodo esta misma se verá reflejada en el indicador NC del optoacoplador así como se aprecia en la Figura 21.



FIGURA 21. Estructura de optoacopladores.

En la Fase 3 es donde llega el potencial de la salida de los generadores que están acoplados a los emuladores de olas, esta parte es muy similar al proceso de las Figuras 15 y 16, en donde los optoacopladores generan 3 salidas positivas y 3 negativas, en este caso el puente H va a funcionar como celdas del inversor multinivel, como el inversor es de 7 niveles. Se van a utilizar 3 celdas, la cual en la entrada de cada celda va a estar el voltaje de los generadores en la parte de IN1 Y IN2 van llegar las salidas de optoacopladores en este caso cuando IN1 esté energizada y IN2 sea 0, se genera un escalón positivo, en el caso contrario que IN1 sea 0 y IN2 sea energizada el escalón generado sería negativo, en el caso que ambas se encuentren energizados no se genera ningún escalón y se considera el nivel en 0, en este caso se tiene 3 celdas, 3 pulsos positivos, 3 negativos y el nivel que es el valor 0, ya con eso se generan los 7 niveles del inversor.

Respecto a la implementación del sistema se debe tomar en cuenta que es una emulación y los valores deben ser de manera escalar tomando en cuenta que la potencia que emiten los sistemas reales como boyas, turbinas, atenuadores y brazos mecánicos pueden ser grandes respecto a su valor de generación de energía eléctrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Emulador de olas

Con base en la información de las características de los motorreductores para el emulador de olas, se pueden realizar los cálculos necesarios para obtener los requerimientos para el convertido multinivel. Considerando el torque más alto de 6.7 kg*cm. y los datos de la Tabla 6 se obtiene un valor de 0.657 N*m.

Tabla 6. Conversión para la obtención del torque.

1 N.m	10.2 Kg. Cm
0.657 N. m	6.7 Kg. Cm

A continuación, se procede a calcular la potencia necesaria considerando que:

T= Par motor, P= Potencia del motor, n= (RPM).

$$P = \frac{T*n}{60/2\pi} = 7 \text{ Watts}$$

Y a partir de esta potencia se determina el valor del voltaje, mediante.

$$Voltaje = \sqrt{P * R} = \sqrt{7 * 20} = 12 \text{ V}$$

Considerando una R= 20 Ohms de resistencia del sistema al que alimentará el generador. Lo que resulta en una corriente de 0.6 A. La Tabla 7 muestra las características principales con las que debe cumplir el convertidor multinivel.

En la Tabla 7 se muestran los parámetros que debe cumplir el convertidor multinivel.

Tabla 7. Parámetros del convertidor multinivel.

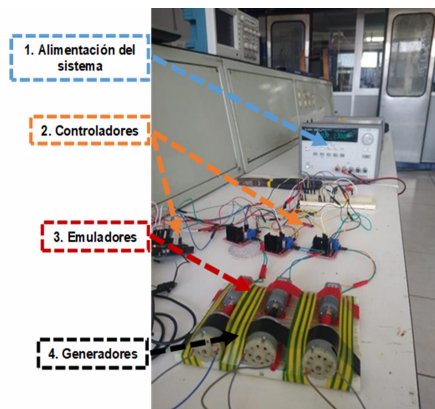
Parámetros	Valores
Salida de generador independiente	12 volts
Resistencia del sistema	20 ohm
Salida de la corriente del inversor	0.6 amperes
Salida final del inversor multinivel	36 volts
Frecuencia del sistema	3 Hz
Niveles del inversor	7

La Tabla 8 muestra 3 parámetros de la salida de los generadores, el primer parámetro es la fuente variable o el voltaje máximo que puede soportar cada celda del inversor en este caso es un valor de 35 voltios, para el segundo parámetro se toma el valor de 12 volts el cual es producto de alimentación de cada celda del inversor, y el tercer valor es de la corriente. Cabe mencionar que los valores establecidos ya son expresados en valor RMS. Entonces si se suman tanto los valores de voltaje que es de 12 por la cantidad de celdas, dan como resultado 36 volts del inversor y 0.6 en el valor de la corriente el mismo valor que se establece en las simulaciones realizadas.

Tabla 8. Porcentaje en la escala de salida de generadores reemplazados por fuentes de corriente continua (CD).

Generadores	Soporte de voltaje de puente H	Porcentaje de voltaje reflejado fuentes de CD a utilizar.	Porcentaje de corriente fuentes de CD
1	35 V	12 V	0.4 amp
2	35 V	12 V	0.4 amp
3	35 V	12 V	0.4 amp

En la Figura 22 se puede apreciar una implementación de manera física de los emuladores de olas, tanto del control, el sentido de giro, los emuladores y el acoplamiento con los generadores para la proporción de un cierto potencial.

**FIGURA 22.** Sistema físico de los emuladores de olas.

De igual manera la Figura 23 muestra físicamente la implementación del inversor multinivel, las salidas digitales distribuidas por el arduino, los optoacopladores para determinar pulsos positivos y negativos, y la conexión de las celdas en cascada para la generación de los 7 niveles del inversor.

Usualmente la mayor parte de los sistemas utilizan una frecuencia de 60 Hertz, debido a que se realiza una emulación de un sistema a nivel escala, se pretende tomar un 5 % de la frecuencia, donde la salida del sistema tiene un aproximado a los 3, considerando que esta está basada en ángulos de 360 grados;

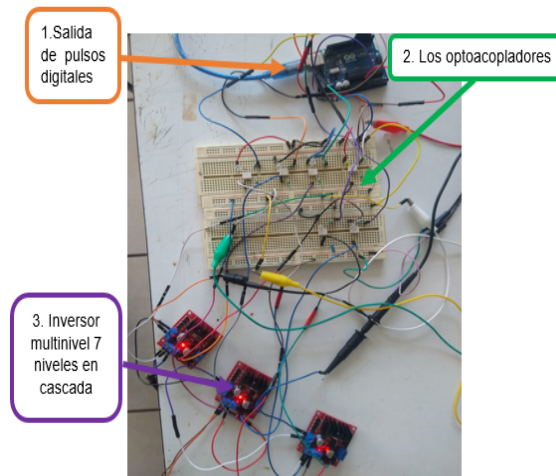


FIGURA 23. Sistema físico del inversor multinivel de 7 niveles.

para la obtención de la frecuencia que utiliza el Arduino se hace uso de la Ec. 1 que corresponden a los Hertz de la salida del arduino.

$$\frac{1}{360} \text{grados} \times 1000 = 2,8 \text{ Hz} \text{NDWI} = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}} \quad (1)$$

La Figura 24 muestra la salida de los 3 niveles del inversor multinivel utilizando un osciloscopio el cual sólo muestra la salida de una celda del inversor que contiene un escalón positivo y uno negativo. El valor 0 siempre se considera un valor como la fórmula expresada de $2(n)+1$, donde la fórmula representa la cantidad de niveles del inversor, el valor de n es la cantidad de celdas y el más 1 es el valor del nivel cero.

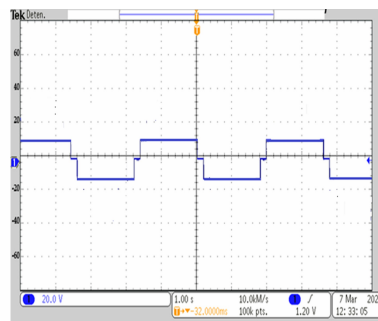


FIGURA 24. Salida del convertidor en osciloscopio 3 niveles.

La Figura 25 muestra la salida del inversor en el osciloscopio de 5 niveles, considerando la activación de 2 celdas la cual da como resultado $2(2) + 1 = 5$ niveles.

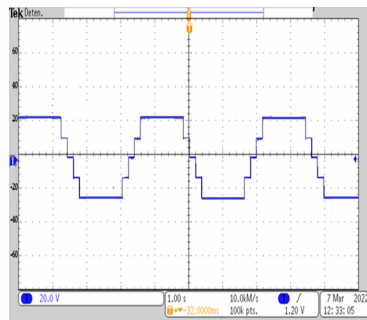


FIGURA 25. Salida del convertidor en osciloscopio 5 niveles.

La Figura 26 muestra la salida final del inversor de 7 niveles contemplado en el osciloscopio, la cual da como resultado $2(3) + 1 = 7$ niveles.

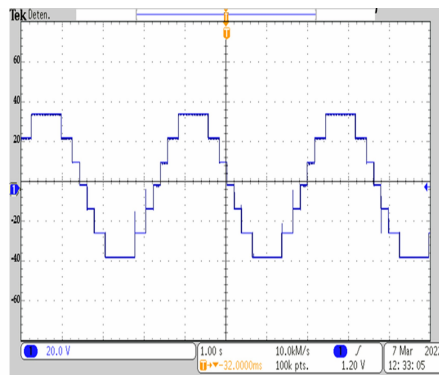


FIGURA 26. Salida del convertidor en osciloscopio 7 niveles.

Una vez que se generan los 7 niveles en el osciloscopio, se realiza una adquisición de datos tanto del voltaje y del tiempo. En la Figura 27 se muestran 3 ondas senoidales de manera escalonada que se tomaron del inversor, del cual toma un ciclo completo para poder obtener el cálculo de la THD.

Después de que se selecciona un ciclo se utiliza el programa Pspice para obtener la THD y ver si cumple con el rango que se especifica con los inversores de 7 niveles, se toman los datos de Excel al

capturarlos se deben guardar en un formato csv, de otro modo se generara un error de formato, después se ingresa en una herramienta que se encuentra en Pspice llamado VFile como se observa en la Figura 28.

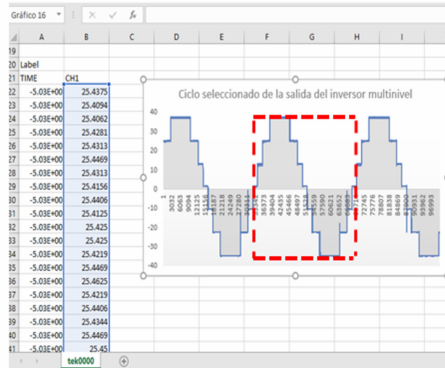


FIGURA 27. Cálculo de THD por medio de la base de datos obtenida en el osciloscopio Excel.

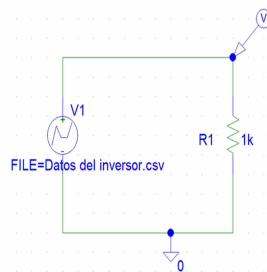


FIGURA 28. Adquisición de la THD en el programa Pspice.

Cabe mencionar que la herramienta Pspice también puede realizar la generación de la onda escalonada, conforme a los datos obtenidos del inversor, así como se muestra en la Figura 29 y de igual manera la FFT para ver los armónicos y la distribución de la señal del sistema) Figura 30).

En la etapa final, se capturan datos del osciloscopio correspondientes al inversor de 7 niveles. El objetivo es determinar la Distorsión Total de Armónicos (THD). Este proceso se lleva a cabo utilizando el software PSpice, que calcula el porcentaje de THD en la salida del inversor. Esta medida es crucial para evaluar la pureza y calidad de la señal en comparación con las especificaciones de la norma IEEE

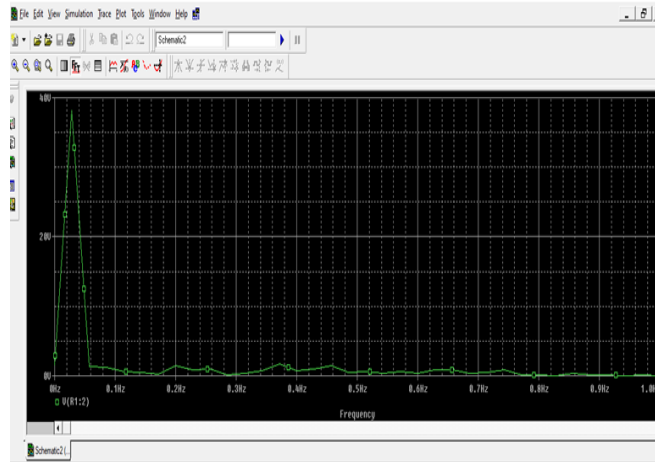


FIGURA 29. Obtención de la FFT en el programa Pspice.

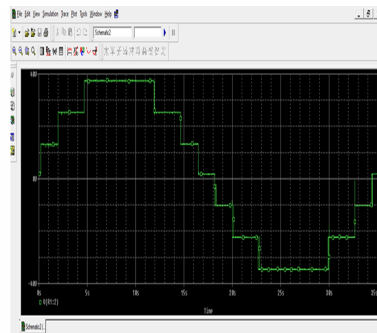


FIGURA 30. Salida senoidal obtenida de los datos del inversor multinivel captado por el osciloscopio.

519. Según esta norma, se recomienda calcular la THD hasta el armónico número 50 para obtener una estimación precisa. Por ello, en la Figura 31 se muestra el armónico número 50 y el porcentaje de THD con una distorsión armónica total en este caso del 11.9 % lo cual es aceptable para este tipo de aplicación.

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 31. THD obtenido en Pspice.

Para la parte del THD se realiza una comparación con diferentes sistemas de inversores multinivel con diferente potencia para ver si se encuentra en un cercano con los que se comparan en las Figuras 32, 33 y 34.

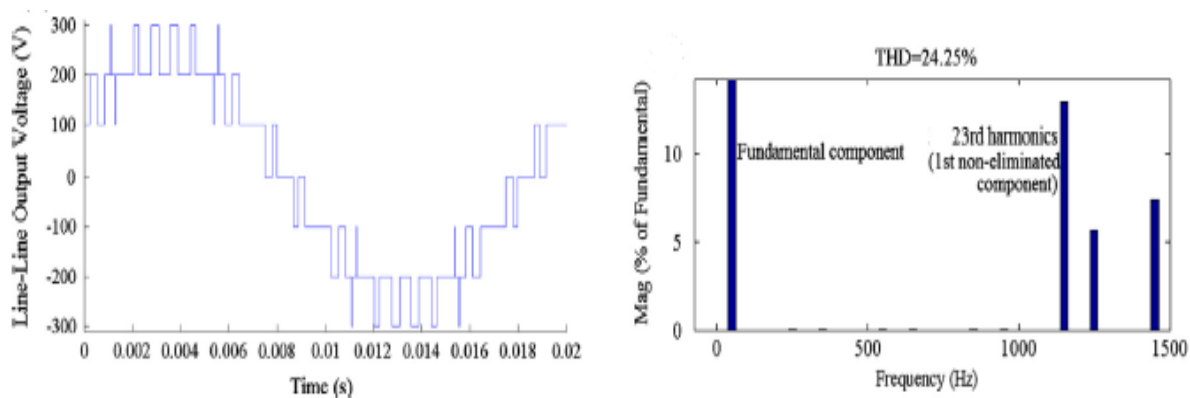


FIGURA 32. THD de 24.25 %.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS ABIERTAS

El estudio aborda la generación de energía undimotriz, que consiste en convertir el movimiento de las olas en electricidad. Se destaca la existencia de diversos sistemas electromecánicos diseñados para aprovechar este movimiento, transmitiendo la energía generada a subestaciones eléctricas para su distribución. La propuesta central del trabajo radica en la selección de un punto de estudio, considerando mediciones a lo largo de las cuatro estaciones del año. El objetivo es emular tanto el movimiento de las olas como la generación eléctrica mediante generadores lineales o turbinas de corriente continua. Estos dispositivos imitan el funcionamiento electromecánico de convertidores de olas, como los OWC, para obtener una tensión alterna a partir de tensiones de corriente continua las cuales van entrar en sincronismo con los

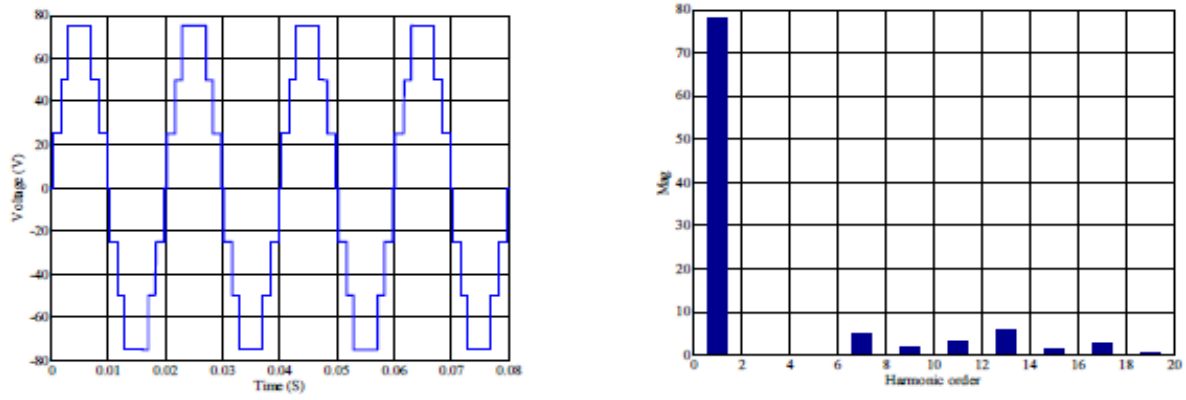


FIGURA 33. THD de 16.5 %.

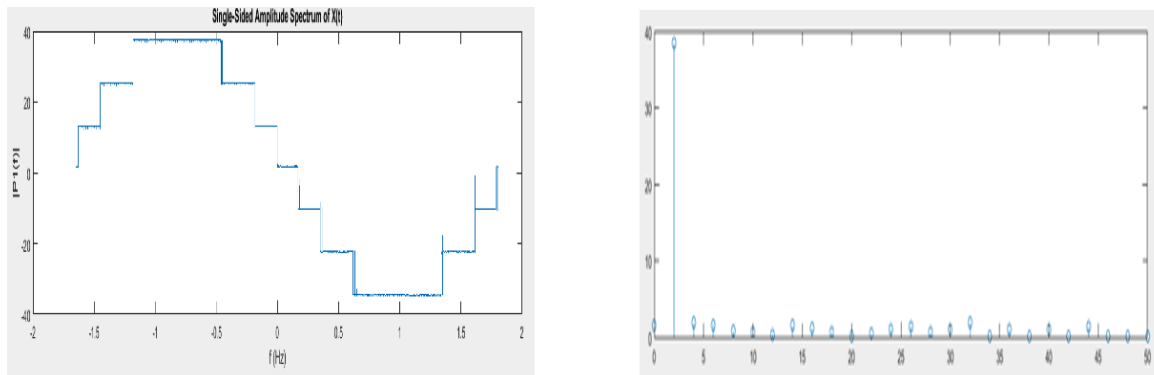


FIGURA 34. THD de 11.9 %, salida del sistema obtenido.

inversores multinivel de los cuales su principal objetivo es generar una salida de CA mediante tensiones escalonadas de CD provocadas por los generadores que aprovechan así el potencial contenido en las olas de manera eficiente.

REFERENCIAS

- [1] V., Dolgo., and V., “Estudio de la energía del mar y posibles aplicaciones en las costas españolas universidad politécnica de catalunya,” *UPCommons*, p. 79 83, Catalunya2015.
- [2] X. and González-Ramírez, “I. a.” *Hernández-Robles y H. A. Barrios-Piña*, 2017.
- [3] F., J., Chavero, and Ramírez, “H.” *J. C. López Tapia y N. Vázquez Nava*, pp. 18 – 35, 2018.
- [4] D., P., Correa, and Hernández, ““. estudio del comportamiento de un mecanismo de boyas para obtener energía undimotriz,çupdf,” pp. 19 – 29, 2016.
- [5] P., Pire, and Cortés, “Aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa asturiana, ruo,” pp. 18 – 26, 2018.
- [6] J. and Lekube, “A. j. garillo,” *I. Garillo y E. otaola*, 2018.
- [7] M., Beloqui, and Larumbe, “Aplicación de un algoritmo evolutivo diferencial multiobjetivo para el diseño de un absorbedor de energía de las olas, ciemat,” *Centro de Investigaciones Medioambientales y Tecnológicas*, 2013.
- [8] M., Nuñez, Sampers, and Muñoz, “Modelado de un convertidor undimotriz del tipo absorbedor puntual en un microprocesador, archivo digital upm,” pp. 1 – 90, 2017.
- [9] S., E., De, León, and Aldaco, “J. aguayo alquicira y j. h. calleja gjumlich,” *Reliability and Mission Profiles of Photovoltaic Systems: A FIDES Approach, IEEE Transactions On Power Electronics*, 2014.
- [10] N., A., Bravo, and Moya, “Sistema de conversión mecánica eléctrica, facultad de ciencias físicas y matemáticas,” pp. 45–65, 2008.
- [11] E., E., and Montalvo, “M. a. domínguez,” *M. F. Escalante y H. Rodríguez-Cortes*, 2013.
- [12] L., D., Pabón, Fernández, y, J., L., Diaz, and Rodriguez, “Motor de inducción alimentado con inversor multinivel, españa: Vol. 8,” 2017.
- [13] J., Aguayo, and Alquicira, “A. claudio sánchez,” *L. G. Vela Valdés*, pp. 66 – 78, 2011.