

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Aprovechamiento de Energía Undimotriz en una
piscina para Suministro de Energía Renovable**

TESIS

**Que para obtener el GRADO de
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD**

Presenta:

Elizabeth Camacho Valdez

Director de Tesis:

Dr. Luis Velázquez Contreras

HERMOSILLO, SONORA

Febrero 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

CARTA DE APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL JURADO

RESUMEN

La utilización de energía renovable en edificios ha ayudado a la reducción del consumo de energías de fuentes convencionales y la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, en los últimos años diferentes estrategias y enfoques para aprovechar fuentes de energía sustentables han surgido, quizás una de las más interesantes es la utilización de la energía de los seres humanos para producir energía eléctrica.

En esta investigación se presenta una nueva forma de recuperación y aprovechamiento de energía de las olas producida por nadadores en una piscina. Tomando como base las tecnologías de energía undimotriz se construyó un dispositivo que se encarga de recuperar la energía dejada por usuarios durante actividades recreativas en una piscina, aprovechándola como la energía cinética contenida en el desplazamiento del agua para posteriormente aprovecharla con un Mecanismo de Toma de Poder (PTO) y usarla como energía mecánica en el accionamiento del rotor de un generador eléctrico, dando como resultado la producción de energía eléctrica.

El estudio, diseño, y experimentación de un prototipo de Columna de Agua Oscilante (OWC) dentro de la piscina son presentados. En la etapa experimental se realizaron 22 pruebas sobre el desempeño de producción de energía del Convertidor de Energía Undimotriz (WEC) propuesto, los resultados demuestran que el dispositivo tiene la capacidad teórica de cubrir el 0.03% de la demanda actual de energía destinada a la iluminación del área.

ABSTRACT

The use of renewable energy in buildings has reduced the consumption of conventional energy sources and diminished the emission of greenhouse gases, recently different strategies and approaches to harness sustainable energy sources have emerged, perhaps one of the most interesting is the use of human power to produce electricity.

In this research, a new way to recovery and use of energy of the waves produced by users of a pool is proposed. Based on the technologies of wave power, we present a device that is responsible for recovering the energy produced by users during recreational activities in a pool. Taking advantage of the kinetic energy contained in the movement of water to later seize a mechanism power take off, and use it as mechanical energy to drive the rotor of an electric generator, all this resulting in the production of electricity.

The study, design, and testing of a prototype of the Oscillating Water Column (OWC) inside the swimming pool are presented.

In the pilot phase 22 tests on the performance of energy production of the Wave Energy Converter (WEC) are presented, the results show that the device has the theoretical capacity to cover 0.03% of the current energy demand for facility lighting.

ÍNDICE

Índice de Contenido.

<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
<u>I. Introducción</u>	1
<u>II. Objetivo General</u>	2
<u>III. Objetivos Específicos</u>	2
<u>IV. Análisis Literario</u>	3
<u>4.1 Necesidad de energía renovable en piscinas</u>	3
<u>4.2 Integración de las energías renovables a edificios</u>	4
<u>4.3 Opciones de Microgeneración en piscinas</u>	5
<u>4.4 Energía undimotriz y su utilización a pequeña escala</u>	6
<u>4.5 Optimización de la OWC para su aplicación a piscinas</u>	9
<u>V. Metodología</u>	11
<u>5.1 Tipo de estudio</u>	11
<u>5.2 Diseño Metodológico</u>	11
<u>5.3 Alcance</u>	13
<u>5.4 Preguntas de investigación</u>	13
<u>5.5 Objeto de estudio</u>	13
<u>5.6 Instrumentos de recolección y manejo de datos.</u>	13
<u>VI. Resultados</u>	14
<u>6.1 Descripción del área de estudio</u>	14
<u>6.1.1 Cálculo de la demanda de energía</u>	15
<u>6.1.2 Descripción del Ambiente</u>	16
<u>6.2 Diseño del Sistema de Producción de Energía Sustentable</u>	17
<u>6.2.1 Convertidor de energía undimotriz</u>	18
<u>6.2.1.1 Cabina</u>	19
<u>6.2.1.2 Mecanismo de toma de poder</u>	23
<u>6.2.1.2.1 Simulación Computacional del PTO</u>	25
<u>6.2.1.3 Soportes</u>	27
<u>6.2.2 Generador</u>	28
<u>6.3 Experimentación</u>	30
<u>6.3.1 Resultados Experimentales</u>	30
<u>6.4 Análisis de la eficiencia de Producción de energía</u>	34
<u>6.5 Costos de construcción del WEC</u>	35

<u>VII. Discusión</u>	37
<u>VIII. Conclusiones</u>	40
<u>IX. Recomendaciones</u>	42
<u>X. Referencias</u>	43

Índice de Tablas

<u>Tabla</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	<u>Propiedades de las instalaciones de la piscina</u>	14
2	<u>Clasificación de actividades</u>	30
3	<u>Pruebas de producción de energía con el WEC</u>	31
4	<u>Promedio de producción de energía por actividad</u>	33
5	<u>Gastos de construcción del WEC</u>	36

Índice de Figuras

<u>Figura</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	<u>Ilustración de la operación del mecanismo de toma de agua</u>	8
2	<u>Diagrama de flujo del sistema de adquisición de datos</u>	12
3	<u>Corte longitudinal de la piscina</u>	14
4	<u>Comportamiento de la demanda de energía</u>	15
5	<u>Medidor de olas</u>	16
6	<u>Caracterización del oleaje</u>	17
7	<u>Esquema del sistema de Generación de Energía Undimotriz en la piscina</u>	18
8	<u>Primera cabina utilizada para la OWC</u>	19
9	<u>Diseño preliminar de la cabina utilizada para la OWC</u>	20
10	<u>Posición de la OWC dentro de la piscina</u>	21
11	<u>OWC con ducto de forma U</u>	22
12	<u>OWC con extension en la pared frontal</u>	22
13	<u>PTO del sistema productor de energía renovable</u>	23
14	<u>Diseño 3D de la turbina de impulso</u>	24
15	<u>Medidas de la turbina de impulso</u>	24
16	<u>Perfil del rotor y álabes guías</u>	25
17	<u>Simulación de flujo de aire para la turbina</u>	26

18	<u>Campo de velocidades de Simulación de flujo</u>	26
19	<u>Diseño 3D de soporte inferior del PTO</u>	27
20	<u>Diseño 3D de soporte superior del PTO</u>	28
21	<u>Generador de 12V</u>	29
22	<u>Generador del sistema de producción de energía</u>	29
23	<u>Promedios de producción de energía en las pruebas</u>	32
24	<u>Comparativa de los promedios de producción de energía por actividad</u>	33
25	<u>Ejemplo de lectura de producción de energía con el sistema de adquisición de datos.</u>	34

Índice de Anexos

<u>Anexo</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	<u>3D de las instalaciones de la piscina</u>	47
2	<u>Código para la lectura de datos en Matlab</u>	48

I. INTRODUCCIÓN

Diversas investigaciones se han llevado a cabo en busca de soluciones tecnológicas que permitan la producción de energía a partir de fuentes sustentables inmediatamente disponibles para el sector de los edificios (Yuan, Wang y Zuo, 2013). Recientemente se han desarrollado numerosos dispositivos con el propósito de aprovechar energía renovable a nivel local y a pequeña escala, llevando la producción de energía directamente al lugar donde esta se necesita (Chauhan, et al., 2014), la investigación de este tipo de tecnologías como soluciones significa un gran beneficio en cuanto a la reducción de la dependencia de fuentes fósiles de energía, además del aumento de las opciones disponibles de suministro de energía a partir de fuentes más limpias (Zou, et al., 2012).

El presente trabajo toma como base gran disponibilidad de energía humana producida en centros deportivos como una oportunidad para el aprovechamiento de una nueva fuente de energía renovable, mediante el desarrollo de un sistema de recuperación de energía. Se presenta el estudio, desarrollo, simulación dinámica e implementación de un innovador dispositivo Convertidor de Energía Undimotriz (WEC) encargado de aprovechar la energía del oleaje causada por actividades de los usuarios dentro de dicha piscina, con el propósito utilizarla para complementar la demanda energética del centro deportivo “Pichy Sport” ubicado en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

En el siguiente apartado se explican el objetivo general y los específicos de esta investigación, posteriormente se presenta un análisis literario sobre las tecnologías actuales y en desarrollo de energía undimotriz. En la sección 5 se explica la metodología utilizada para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos planteados; en la sección 6 se especifican y dimensionan los dispositivos elementales para llevar a cabo la conversión de energía, características de su funcionamiento, montaje experimental y resultados sobre el desempeño del dispositivo. Por último se discuten los resultados obtenidos mediante la aplicación del sistema de producción sustentable y se resumen las principales conclusiones.

II. OBJETIVO ESTRATÉGICO

Contribuir al desarrollo de las energías renovables mediante un convertidor de energía undimotriz (WEC) en una piscina, utilizado para complementación de requerimientos energéticos de un complejo deportivo de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis literario en cuanto al estado del arte de las tecnologías de energía undimotriz.
- Diseñar un sistema de aprovechamiento de la energía undimotriz, que permita la obtención de electricidad a partir de las olas generadas por usuarios en una piscina.
- Implementar el sistema innovador de conversión de energía undimotriz.
- Evaluar la eficiencia del funcionamiento del convertidor como alternativa sustentable para complementar los requerimientos de consumo energía eléctrica del complejo deportivo.

IV. ANÁLISIS LITERARIO

4.1 Necesidad de energía renovable en piscinas

Las piscinas se encuentran dentro de uno de los sectores de mayor consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero (EIA, 2013); de acuerdo con las estadísticas del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2014), el sector de los edificios representa alrededor del 30% del consumo total de energía en todo el mundo, 19% de las emisiones relacionadas con la energía. Dicha situación se ha dado debido a que la dependencia de la tecnología en los países desarrollados y el aumento en la calidad de vida han provocado que la demanda energética crezca más rápidamente que la población humana, a pesar de los avances en la eficiencia de su utilización (Pelc y Fujita, 2002).

Las piscinas son el segundo tipo de instalación deportiva más popular (Triantistourna, et al., 1998) y han tenido una creciente afluencia en las últimas 3 décadas (Florentin, Hautemanière y Hartemann, 2011). Estas atraen una particular atención en cuanto a requerimientos energéticos ya que consumen más energía por unidad de área que otros tipos de edificios (GB y BPP, 1997).

Aunado a que para su funcionamiento es necesario el control de varios factores que requieren una gran cantidad de energía, como la temperatura del agua en la piscina y el ambiente, la humedad y el bombeo de agua, entre otros (Sun, et al., 2011); la falta de sistemas inteligentes de gestión de energía y confort térmico, propician que las demandas energéticas de estas instalaciones tiendan a experimentar aumentos en el tiempo, haciendo más compleja su gestión eficiente (Yuce, et al., 2014).

Ante la creciente necesidad de satisfacer los requerimientos energéticos en las piscinas y al mismo tiempo limitar la producción de gases de efecto invernadero, existen diversas propuestas; Echevarria y Xiu (2014) señalan que la utilización de mecanismos para la captura de dióxido de carbono en edificios donde se liberan sustanciales cantidades de estos gases podría ser la solución, mientras que Sims (2004) sostiene que un cambio hacia una mayor generación y utilización energías renovables limitaría las emisiones a la atmósfera. Por otra parte existe la posibilidad de la combinación de medidas que permitan tener una mayor eficiencia en el consumo de energía mediante la integración de nuevas tecnologías y el aprovechamiento de fuentes de energía renovables disponibles (Visa, et al., 2014).

Las energías renovables podrían ser la solución a la necesidad de alternativas más sustentables al suministro de energía (Panwar, Kaushik y Kothari 2011) mediante las

opciones tecnológicas disponibles que pueden basarse en diferentes fuentes de energía locales, por ejemplo, la cogeneración con fuentes de bioenergía, energía solar, energía eólica, entre otras (IEA, 2009).

Las piscinas representan un importante potencial de reducción de emisiones a la atmósfera (Metz, et al., 2007), brindando la posibilidad de poder ser utilizadas como plataformas para la integración de energías renovables (Meador, 1981). La implementación de dichos tipos de energía traería como beneficio la reducción de los impactos negativos del sistema centralizado de energía eléctrica actual (Negro, Alkemade y Hekkert, 2012), además de la capacidad de aumentar la diversidad de opciones de suministro energético disponibles (Charters, 2001).

4.2 Integración de las energías renovables a edificios

Según Lund (2012), la integración de energía renovable a gran escala en las zonas urbanas, significa una importante opción energética sustentable a futuro, sin embargo, esto ha sido discutido por diferentes autores. La limitada gestionabilidad de éstas fuentes de energía (Skoglund, et al., 2010) así como la necesidad de diversas medidas tanto de optimización como de reconstrucción necesarias para su adaptación a los sistemas de transmisión actuales, podrían convertirse en obstáculos para su incorporación al sistema convencional de distribución centralizado (Brouwer, et al., 2014).

Dicha aseveración parte del hecho de que algunas fuentes de energías renovables no pueden ofrecer un suministro de energía constante, es decir, son intermitentes por naturaleza (Heide, et al., 2010); sin embargo, existe la probabilidad de la utilización de las energías no intermitentes que tiene la característica de poder proporcionar estabilidad a la red eléctrica y su potencia de entrada es controlable ya que pueden producir energía cuando se necesita (Skoglund, et al., 2010).

Las fuentes de energía no intermitentes que pueden proporcionar electricidad de carga base son la hidráulica, la biomasa y la geotérmica, estas presentan menor potencial de generación energética (Moriarty, y Honnery, 2007) en contraste con las fuentes intermitentes como la eólica, la solar y la undimotriz, las cuales gozan de una enorme disponibilidad y ofrecen mayor capacidad para proveer la suficiente cantidad de energía demandada en la actualidad (Muller-steinhagen y Nitsch, 2005).

A pesar del gran potencial de utilización estas fuentes intermitentes, existen todavía muchos desafíos para su integración a gran escala a la red de energía actual; entre ellos los relacionados con el grado de variabilidad y las significativas oscilaciones en la cantidad de

electricidad que alimentan a los proveedores de la red (Dincer, 1999). Adicionalmente Ipakchi y Albuyen (2009) mencionan que los sitios óptimos para la captación de esta energía renovable, por ejemplo para las plantas eólicas o solares a gran escala podrían estar situados en zonas alejadas de las líneas de transmisión existentes, por lo cual, la planificación y construcción de nuevas infraestructuras de transmisión que puedan acceder a dichas zonas podría tomar muchos años y altos costos.

En este contexto, surge la necesidad de una forma de generación de energía renovable más viable y con mejor capacidad de integración eficiente a los sistemas eléctricos (Wolfe, 2008); que al mismo tiempo mejore al medio ambiente y la economía pública local, así como trayendo efectos directamente beneficiosos para los ciudadanos (Fiaschi, Bandinelli y Conti, 2012).

4.3 Opciones de Microgeneración en piscinas

En contraste con el esquema tradicional del suministro centralizado de energía, la microgeneración trae la conversión de energía al lugar donde es requerida (Peacock, et al., 2008). Las características de estas tecnologías las hacen la mejor opción para abastecer de a zonas remotas que no tienen acceso a redes de distribución centralizadas (Akiku, et al., 2013), sin embargo, su principal aprovechamiento se ha dado en zonas urbanas, como suministro de pequeñas empresas, edificios públicos, instalaciones domésticas e instalaciones de la comunidad como piscinas; satisfaciendo una parte o toda la demanda de un edificio o grupo de edificios (ECI, 2009), tal es el caso de una micro turbina eólica instalada e en una piscina municipal en Portugal, la cual en condiciones normales de funcionamiento aporta 60kW y permanece conectado a la red pública de baja tensión durante los períodos de baja carga, suministrando la energía requerida por las instalaciones de piscina y exportando la energía restante a la red de baja tensión (Melo, et al., 2009).

Otros ejemplos de propuestas de utilización de microgeneradores en instalaciones de piscinas son estudiadas en la literatura, como la utilización la recuperación de energía como principio de funcionamiento de un sistema abierto de absorción, para tomar el calor latente del aire húmedo del ambiente dentro de las instalaciones de la piscina y posteriormente utilizarlo para calentar el agua de la piscina (Johansson y Westerlund, 2001). Sun, et al. (2011) estudiaron la posibilidad de usar un sistema mucho más eficiente por medio de un deshumidificador con una bomba de calor en una piscina cubierta, el cual toma el calor latente del aire húmedo del ambiente interior y también absorbe el calor del exterior para usarlo en la calefacción de las instalaciones y del agua de la piscina.

En el caso de la utilización de energía solar para este tipo de instalaciones, Hilmer, et al. (1997) presentan un sistema fotovoltaico de bombeo utilizado para la producción de electricidad para mecanismos usados en el calentamiento de piscinas y bombas de circulación. Chow, et al. (2012), proponen la utilización de un sistema de bombeo de calor utilizada para los mismos fines energéticos, pero asistido por energía solar térmica para su funcionamiento, mientras que Tagliafico, et al. (2012) proponen este mismo tipo de sistema pero utilizando como principio de funcionamiento un proceso de ciclo inverso de refrigeración para la transferencia de calor en el cual el refrigerante es sustituido por agua. Tomando en cuenta que dentro de una piscina las olas almacenan energía potencial debido a su altura, y energía cinética resultante de los movimientos de las partículas del agua (Brooke, 2003), existe la posibilidad de su aprovechamiento y su posterior utilización para complementar requerimientos energéticos de las instalaciones (Zabihian y Fung, 2011). Para transformar la energía almacenada en las olas a una forma más útil, son utilizados dispositivos mecánicos llamados convertidores de energía undimotriz (WEC) (Orazov, O'reilly y Savaş, 2010). Fundamentalmente un dispositivo de energía en base a olas incluye un sistema de captación de energía y un sistema de toma de fuerza (Zhang, et al., 2014); el sistema de captación convierte la energía undimotriz en energía mecánica mientras que el sistema de toma de fuerza se encarga de generar electricidad a partir de ese trabajo mecánico (Dunnett y Wallace, 2009).

4.4 Energía undimotriz y su utilización a pequeña escala

La mayoría de los dispositivos de captura de energía de las olas comerciales están diseñados para producir energía superior a 1 kW y tienen diseños complicados que son poco prácticos para la reducción de escala (Scruggs y Jacob, 2009). A pesar de esto, existen sistemas disponibles de baja potencia <1 kW, como el dispositivo propuesto por Agamloh, Wallace y Von Jouanne (2008) en el cual se describe una boya pequeña con un sistema de transmisión de energía que emplea campos magnéticos para la transmisión mecánica.

Los dispositivos de energía undimotriz que han progresado comercialmente como Pelamis, Oyster, Wave Dragon, etc, han sido diseñados para la recolección de energía a gran escala (Sheng, Alcorn y Lewis, 2014). Sin embargo, las aplicaciones a pequeña escala también han sido objeto de estudio de diferentes investigaciones, tal es el caso de un dispositivo tipo boya con un sistema de accionamiento rotatorio para la conversión de energía, el cual fue diseñado para la conversión de bajo poder presentado por Symonds, Davis y Ertekin

(2010) y el desarrollo de un dispositivo de toma de poder alternativo para permitir la conversión de energía undimotriz para la práctica en el diseño WEC móviles pequeños que podrían dar corriente a los instrumentos de vigilancia o de telecomunicaciones en alta mar (Harne, et al., 2014).

Las boyas se han presentado como uno de los tipos de WEC más utilizados para sus aplicaciones a pequeña escala, como una posible alternativa a los sistemas hidráulicos mecánicamente más complejos, presentando un buen rendimiento del dispositivo y funcionamiento satisfactorio de supervivencia y fiabilidad en condiciones marinas (Rhinefrank, et al., 2006). Por otro lado las columnas de agua oscilantes (OWC) presentan en primer lugar simplicidad ya que constan solo de dos elementos la cámara y la turbina, y en segundo lugar un bajo costo de mantenimiento resultado tanto de estas características, como de la ausencia de elementos mecánicos en contacto directo con el agua (Sarmiento, 1992), además este tipo de WEC resulta el más extensamente estudiado con el mayor número de prototipos y por lo tanto una mayor flexibilidad en cuanto a adaptaciones a diferentes tamaños, mejoras y obtención de energía (Lagoun, Benalia y Benbouzid., s.f.).

Según Falcao (2010) el principio de conversión de energía es la característica principal en la cual se debe basar la el diseño de la tecnología propuesta para el desarrollo de los WEC. Aunque Clément, et al. (2012) sugieren que una de las principales características que debe ser tomada en cuenta es la profundidad del agua donde se encuentra situado, debido a que de ello depende el recurso disponible, las condiciones de funcionamiento y la arquitectura del diseño, en el caso de los dispositivos que se encuentran a menor profundidad tiene la ventaja de un mantenimiento o instalación más fácil, además estos no requerirían amarres de aguas profundas o largas longitudes de cable eléctrico submarino.

Entre los efectos relacionados a la profundidad del agua en que un dispositivo WEC se encuentra ubicado, Monarcha y Fonseca (2013) señalan que existe una reducción significativa de energía cuando la profundidad disminuye. A pesar de ello, diversos tipos de WEC han sido diseñadas para funcionar en niveles de agua menos profunda, anclados a la costa o ubicados a unos pocos cientos de metros de la orilla en profundidades moderadas (10-25m) y de tamaño reducido, utilizando diferentes técnicas de aprovechamiento de energía por medio de las cuales se amplifica la capacidad de conversión de los dispositivos (Drew, Plummer y Sahinkaya, 2009).

Una conversión eficiente de energía undimotriz requiere que el dispositivo esté diseñado para tener movimientos de gran amplitud, de tal manera que más energía cinética pueda

ser convertida en energía mecánica y así extraída por el sistema de toma de fuerza (Goggins y Finnegan, 2014), sin embargo, en muchos casos los movimientos de gran amplitud traen consigo significativas irregularidades en el sistema dinámico del convertidor (Yavuz, Mistikoğlu, y Stallard., 2011).

Para resolver este problema Olvera, Prado y Czitirom (2007) explican la utilización de un sistema de amplificación mecánica en la OWC, por medio de un proceso de resonancia paramétrica dada a partir de una implementación mecánica, la cámara de compresión principal se conecta a un volumen adyacente de aire por medio de una válvula. Sin embargo, un esquema mucho más eficiente es propuesto por Orazov, O'Reilly y Savas (2010), con la utilización de un novedoso método de excitación en una boya flotante por medio de un régimen de estabilidad ejercido con una cantidad de agua que funge como balastro del dispositivo, la diferencia es que la variación de la masa para este esquema de excitación es dependiente del estado y no es necesaria una implementación mecánica; la capacidad de recolección de energía podría aumentar entre un 25 y 65 %, un esquema es presentado en Figura 1.

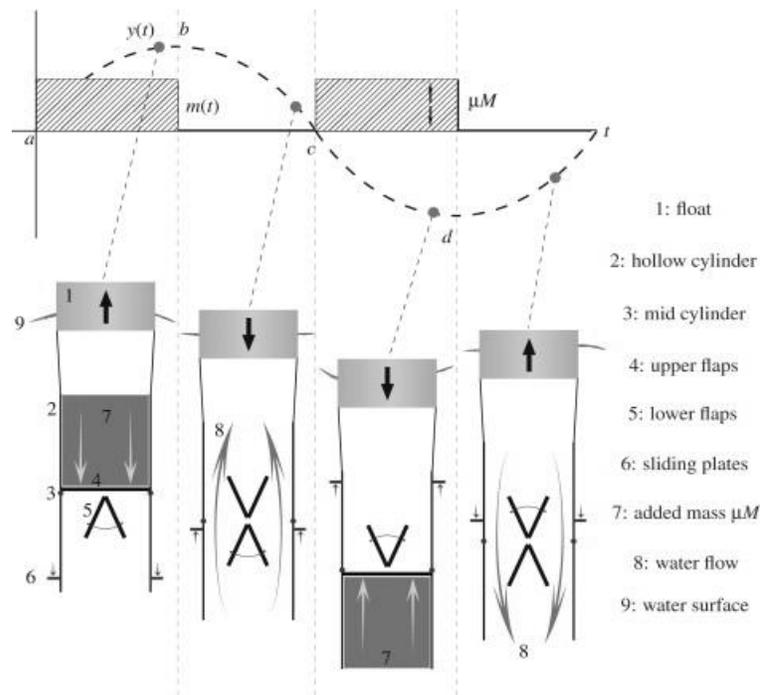


Figura 1. Ilustración de la operación del mecanismo de toma de agua.

Fuente: Orazov, O'Reilly y Savas, 2010.

4.5 Optimización de la OWC para su aplicación a piscinas

La optimización de la geometría de la OWC representa un recurso importante en la búsqueda de la mayor eficacia en obtención de poder disponible en las olas, Bouali y Larbi (2013) realizaron un estudio en el cual señalan que el rendimiento del dispositivo depende directamente de diferentes características como el tamaño de la cámara y su orientación frente a la dirección del flujo de la ola, y que en cuanto a la inmersión de la pared frontal del dispositivo, el valor óptimo está situado entre 0.38 y 0.44 veces la profundidad del agua, ante esto Şentürk y Özdamar (2012) presentan una modificación en la pared frontal donde la barrera de penetración de superficie se sustituye con una barrera completamente sumergida con una brecha, dando una alternativa a las geometrías de columna de agua oscilante anteriormente investigados en la literatura en la cual es posible la obtención eficiencia muy próxima a la máxima teórica para cualquier frecuencia de olas.

En un gran número de WEC que utilizan transmisión hidráulica para su funcionamiento, el movimiento oscilante ya sea rectilíneo o angular de un cuerpo flotante da como resultado el flujo de un líquido como agua o aceite a alta presión, dicho proceso ha sido demostrado no ser flexible cuando se opera en olas irregulares, por lo tanto es difícil obtener un alto rendimiento en la obtención de energía (López, et al., 2013). Ante esta situación, un nuevo enfoque de generación de energía basado en transmisión hidrostática en el que la electricidad se puede obtener con alta eficiencia en ambas direcciones; arriba y abajo, en las fluctuaciones de las olas irregulares ha sido propuesto por Truong y Ahn (2014).

Las OWC convierten la energía undimotriz en poder neumático de baja presión en forma de flujos de aire bi-direccionales, esto puede ser aprovechado por turbina de impulso, Setoguchi, et al. (2001) incorporaron unas aletas guía de geometría variable a este tipo de turbina, a fin de evitar las dificultades de control y reducir pérdidas de energía presentadas durante su funcionamiento, aumentando el rendimiento aerodinámico hasta un 60%, sin embargo presentaron una gran complejidad mecánica dando lugar a problemas de fiabilidad y mantenimiento. Ante esto, Falcao, Gato y Nunes (2013) presentan una alternativa de turbina de impulso de auto rectificación de flujo axial, que es mecánicamente más sencilla y fiable, en este caso, el flujo dentro y fuera del rotor es radial, el rotor está rodeado por un par de filas de aletas guiadoras, cada fila está conectada a su correspondiente entrada/salida de rotor por un conducto de simetría axial cuyas paredes son superficies de revolución, es decir, son discos planos simples.

En la mayoría de los dispositivos desarrollados o considerados hasta ahora, la energía undimotriz absorbida es suministrada en forma de energía eléctrica fluctuante a una red, perjudicando la eficiencia de la energía aprovechada y el valor del sistema de conversión en cuanto a su rendimiento en la calidad de la energía entregada (Santos, et al., 2011). Falcao (2007) presenta una propuesta de WEC en el que un sistema acumulador de gas es colocado en el circuito para producir un efecto de regulación en producción de energía eléctrica.

La existencia de diferentes ejemplos de dispositivos WEC de diseños compactos, así como la evidencia de los modelos a escala que han sido probados en tanques de olas y han mostrado eficiencia en la generación de energía, dejan en claro la que existe la posibilidad de utilizar éste tipo de tecnologías para producción a pequeña escala. La OWC es un dispositivo WEC con características que lo demuestran apto para los fines obtención de energía a partir de las olas generadas en un piscina. El sistema de excitación mecánica funge como uno de los aspectos más importantes a tomar en cuenta cuando se trata hacer funcionar el dispositivo dentro de un ambiente en el cual las olas no tendrán gran amplitud, al mismo tiempo se necesita de una capacidad de estabilidad durante las toma de energía y un nuevo esquema de transmisión que permitan la disminución de fluctuaciones de energía obtenida mediante su funcionamiento proceso.

Tomando en cuenta que la base para la conversión de energía es el aprovechamiento de la energía cinética contenida en las ondas producidas en el agua, y basándose en resultados de la investigaciones relacionadas y perspectivas de microgeneración, esta investigación desarrolla una metodología por medio de la cual se construirá un dispositivo que permita la conversión práctica de energía undimotriz para arquitecturas de convertidores que podrían ser incorporados a piscinas y satisfacer la demanda de energía eléctrica de dichas instalaciones.

V. METODOLOGÍA

5.1 Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo ya que, de acuerdo a los objetivos planteados se llevará a cabo la validación de la eficiencia del funcionamiento del sistema como alternativa sustentable para complementar los requerimientos de consumo energía eléctrica del complejo deportivo, para lograr eso se tomarán mediciones que resulten de la experimentación directa y con ellas llevar a cabo el análisis de energía obtenida con el dispositivo.

5.2 Diseño Metodológico

El diseño de este proyecto es de carácter experimental, se llevará a cabo e implementará un modelo de utilidad basado en el Convertidor de Energía Undimotriz (WEC) de tipo Columna de Agua Oscilante (OWC) que lleva el nombre de la investigación del inventor Yoshio Masuda (Zhongxian, et. al., 2013), para aprovechar la energía de las olas generadas por usuarios y convertirlas en electricidad utilizada para alimentar las lámparas utilizadas en el área de la piscina del centro deportivo. Con el propósito de innovar el sistema se aplicarán las siguientes etapas:

5.2.1 Recopilación de datos. Recolección y evaluación de mediciones del área a iluminar así a partir de los datos arrojados, se establecerá la carga eléctrica necesitada y el tamaño y características del dispositivo para poder obtener dicha carga, de esta manera se podrán determinar los elementos del diseño.

5.2.2 Cálculos. Se definen las características del sistema mediante diferentes cálculos, basados en los resultados de la demanda eléctrica de las instalaciones de la piscina.

5.2.3 Diseño. Se llevará a cabo el diseño en el que se expliquen las características geométricas y físicas del dispositivo, así como sus componentes y la selección de materiales con los que será construido. En esta fase se realizará la innovación del dispositivo OWC el cual será adaptado y optimizado en términos de su configuración, disposición y estructura de tal manera que presente funciones distintas respecto a las partes que lo integran, aportando ventajas en su utilidad dentro de una piscina.

5.2.4 Modelación y simulación. Se llevará a cabo mediante un software la simulación del funcionamiento del dispositivo bajo condiciones preestablecidas, esto con el objeto de predecir su comportamiento.

5.2.5 Experimentación. Esta etapa permite poner a prueba el sistema que se sometió a modelación con la exposición a condiciones reales, de las cuales se espera surjan concordancias y resultados positivos.

Para llevar a cabo las mediciones de la producción de energía se utilizó un sistema de adquisición de datos. El diagrama de flujo del sistema propuesto es presentado en la Figura 2, se toma como entrada la lectura analógica en el microcontrolador Arduino de la medición de tensión producida por el generador eléctrico durante el funcionamiento del dispositivo; en el sistema este es presentado como la entrada en el paso 1. Durante el paso 2 la información de entrada recibida por el microprocesador es enviada al software Matlab, en esta etapa del segundo paso el código de programación utilizado en Matlab da la orden de crear las rutas para las carpetas y archivos que posteriormente serán utilizados para el almacenaje de los datos. Se definen los parámetros de la prueba; el tiempo de duración, incrementos de variable de control y la variable para presentar la gráfica en tiempo real de las mediciones de tensión en una interfaz gráfica de usuario (GUI).

Por último en el paso 3, al término de la prueba, el software Matlab genera un archivo .txt y un archivo .xls con los datos obtenidos llevando a cabo así el almacenamiento de datos.

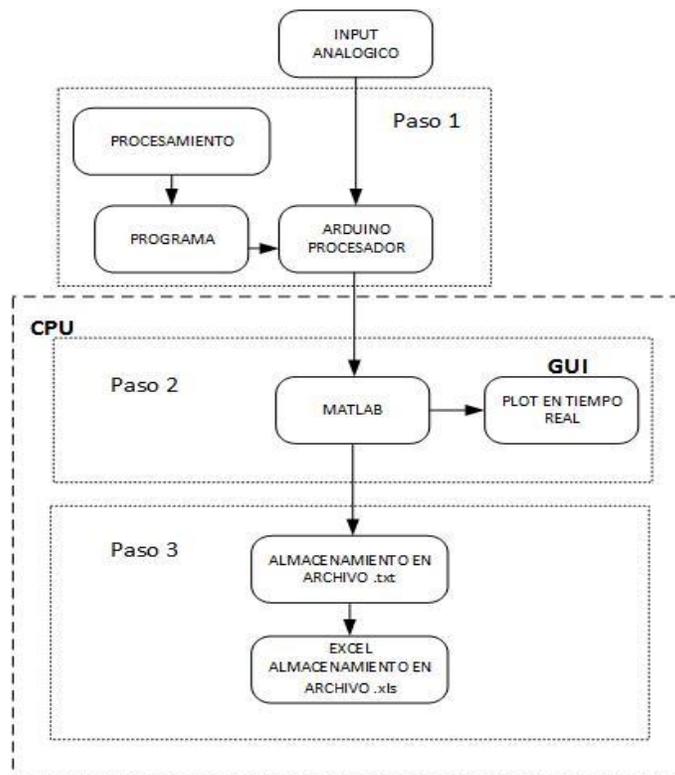


Figura 2. Diagrama de flujo del sistema de adquisición de datos.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.6 Evaluación. A partir de los valores obtenidos mediante la implementación del sistema, se comprobará si los resultados cumplen con las preguntas de investigación planteadas.

5.3 Alcance

El desarrollo del proyecto se llevará a cabo en el complejo deportivo “PichySport”, en el periodo de octubre del 2014 a diciembre del 2015. Los límites del sistema comprenden desde el aprovechamiento de la energía generada en la piscina para su posterior conversión, transporte, almacenamiento y distribución hasta la alimentación de las lámparas necesarias para iluminación en las instalaciones.

5.4 Preguntas de investigación

P1. ¿Es el sistema implementado capaz de producir electricidad a partir del aprovechamiento de la energía contenida en las olas producidas por usuarios dentro de la piscina?

P2. ¿Es el sistema capaz de complementar los requerimientos energéticos del complejo deportivo funcionando bajo los principios de sustentabilidad?

5.5 Objeto de estudio

El objeto de estudio es un dispositivo que aproveche la energía generada dentro de una piscina para poder ser utilizada como electricidad, complementando así las necesidades energéticas de las instalaciones, con el fin de evitar el uso de combustibles fósiles los cuales ocasionan impactos negativos en el medio ambiente.

5.6 Instrumentos de recolección y manejo de datos

- Para las mediciones se utilizarán: Sistema de adquisición de datos propuesto.
- Para el manejo de dichos datos serán utilizados algunos software como: ReluxPro, SolidWorks, Excel, CorelDRAW, Arduino, Matlab, Sketchup.

VI. RESULTADOS

6.1 Descripción del área de estudio

Para la incorporación de un sistema de recuperación de energía de los usuarios dentro de la piscina es importante conocer las medidas y características del área donde se implementará el dispositivo que se pretende utilizar, esto da una noción del tamaño y características geométricas que el sistema debería presentar con respecto a el área bajo investigación. Los estudios experimentales fueron llevados a cabo en una piscina exterior que se encuentra en el patio dentro del complejo deportivo. Los detalles específicos de las instalaciones son dados en la Tabla 1 y Figura 3.

Tabla 1. Propiedades de las instalaciones de la piscina.

Propiedades	Instalaciones de la Piscina
Ancho de la instalación de prueba (m)	5.60
Longitud de la instalación de prueba (m)	8.40
Profundidad (m)	3.50
Nivel de agua en reposo (m)	3.30
Material de las instalaciones	Concreto
Generación de olas	Actividades de usuarios dentro de piscina

Fuente: Elaboración propia.

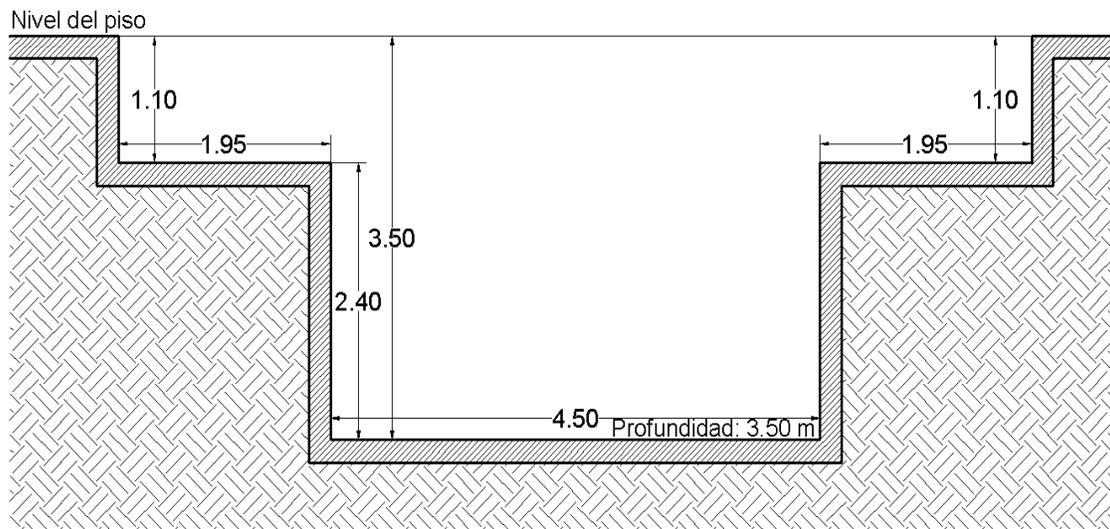


Figura 3. Corte longitudinal de la piscina.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.1 Cálculo de la demanda de energía

El objetivo de la implementación del sistema de producción de energía renovable es complementar la energía destinada a la iluminación del área de las instalaciones de la piscina, para ello es necesario conocer las características de la demanda actual de energía. Debido a que se trata de una piscina exterior en el patio dentro del complejo deportivo (ver en Anexo 1 un 3D de las instalaciones de la piscina), la luz solar es aprovechada para el desarrollo de actividades durante el día, los requerimientos de energía eléctrica se dan durante las horas en las que hay actividades en ausencia de luz solar. La Figura 4 muestra una gráfica de la demanda de energía, t_1 representa el inicio a las 5 pm y t_2 el límite a las 9 pm, en total 4 horas de consumo. Las lámparas que actualmente son utilizadas para iluminación de área del patio son dos de tipo fluorescentes de 18W, con un flujo luminoso de 1080 lm cada una.

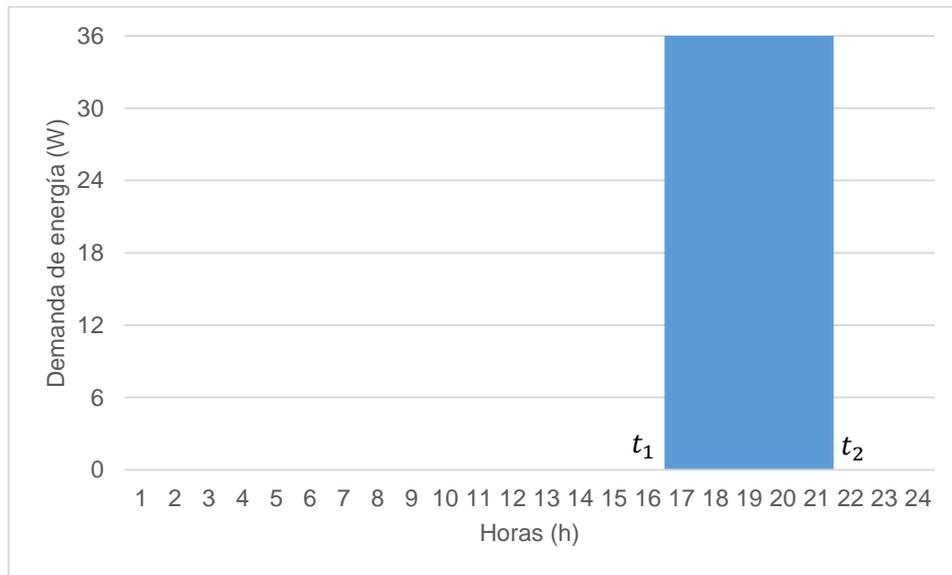


Figura 4. Comportamiento de la demanda de energía.

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la demanda de energía se realiza lo siguiente:

$$E = \int_0^{24} P(t)dt = \int_0^{t_1} 0dt + \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt + \int_{t_2}^{24} 0dt \quad (1)$$

$$E = 0(t_1 - 0) + P_{lum}(t_2 - t_1) + 0(24 - t_2) = P_{lum}t_{tot} \quad (2)$$

$$P_{lum}t_{tot} = 36 \text{ Watts (4 hr)} = \boxed{E = 144 \text{ W} \cdot h} \quad (3)$$

$$P_{media} = \frac{P_{lum}t_{tot}}{24} = P_{min} = \frac{E}{24} = \boxed{6W} \quad (4)$$

Donde P_{lum} representa el consumo de luminarias encendidas, P_{media} la potencia mínima que debe abastecer el generador y E la energía que se debería acumular.

La energía acumulada debería ser $144 \text{ W} \cdot h$ si se quisiera cubrir la demanda completa, y con una producción media de $6W$ podría abastecerse. El gasto por hora si se utilizan las dos lámparas es de 36 W , con un flujo luminoso total de 2160 lm .

6.1.2 Descripción del Ambiente

Para tener un conocimiento previo del ambiente en el cual donde trabajó el dispositivo WEC, fue construido un dispositivo para descripción del oleaje (Figura 5). El dispositivo es diseñado para trabajar dentro de una piscina, con el objetivo de mostrar el comportamiento del desplazamiento del agua causado por los usuarios en la piscina. Consiste en un sensor para la descripción del ambiente mediante un potenciómetro estratégicamente integrado con un flotador. El sensor de posición angular es útil para detectar los recorridos o posiciones angulares del flotador, éste utiliza como principio de medición la equivalencia existente entre la longitud de una resistencia alámbrica y su valor óhmico. Su estructura sencilla permite su adaptación electrónica a la placa microcontrolador que a su vez se encarga de realizar la presentación de datos leídos en forma de gráficas así como archivar automáticamente los mismos. El dispositivo es pequeño, robusto y adecuado para experimentación a corto plazo en ambientes no hostiles. El sensor de posición angular es alimentado por $5V$, que proporciona una resistencia variable en respuesta al cambio de posición del flotador por el movimiento del agua, lo cual es leído en la placa microcontrolador como un valor analógico.



Figura 5. Medidor de Olas.

Fuente: Elaboración propia.

La medición aplicada mediante el medidor de olas tuvo una duración de 5 minutos, tiempo durante el cual se estaba llevando a cabo dentro de la piscina una actividad de gimnasia acuática con 6 personas. Las mediciones arrojaron datos en términos de voltaje y se tomó el 2.3 como medida de referencia ó 0 ya que aquí es donde el flotador se encontraba en el nivel de agua en reposo de la piscina. Los resultados arrojados por la medición de olas mostrados en la Figura 6.

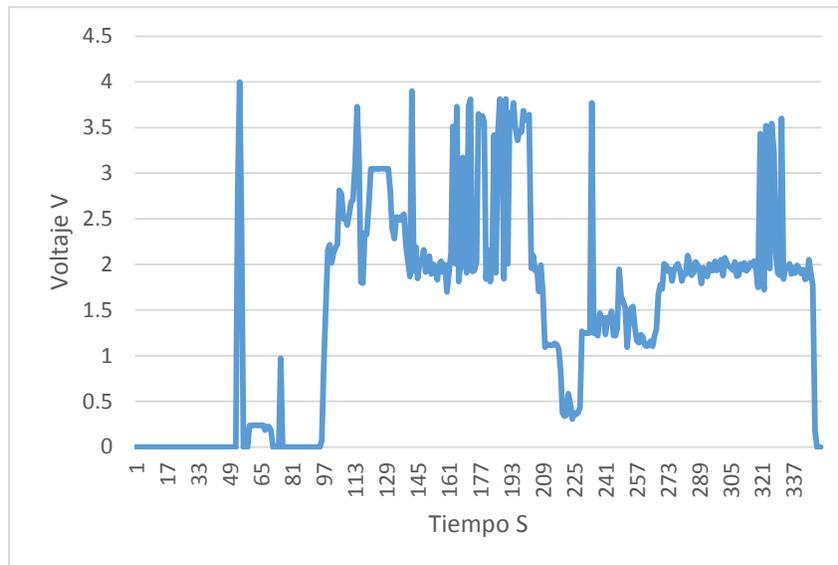


Figura 6. Caracterización del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

6.2 Diseño del Sistema de Producción de Energía Sustentable

El sistema de producción de energía undimotriz es explicado en la Figura 7, la energía cinética y potencial contenida en el oleaje provocado por la actividad física de usuarios de la piscina, es aprovechada como energía renovable por un dispositivo Convertidor de Energía Undimotriz (WEC) propuesto. Posteriormente la energía mecánica generada por el WEC es utilizada para accionar el rotor del generador para la producción de energía eléctrica. Debido a la naturaleza incierta de la disponibilidad del recurso renovable, es incorporado un sistema de almacenamiento mediante baterías recargables, de esta manera la energía se guarda en los capacitores cuando se genere electricidad y suministra a las cargas cuando existe una demanda.

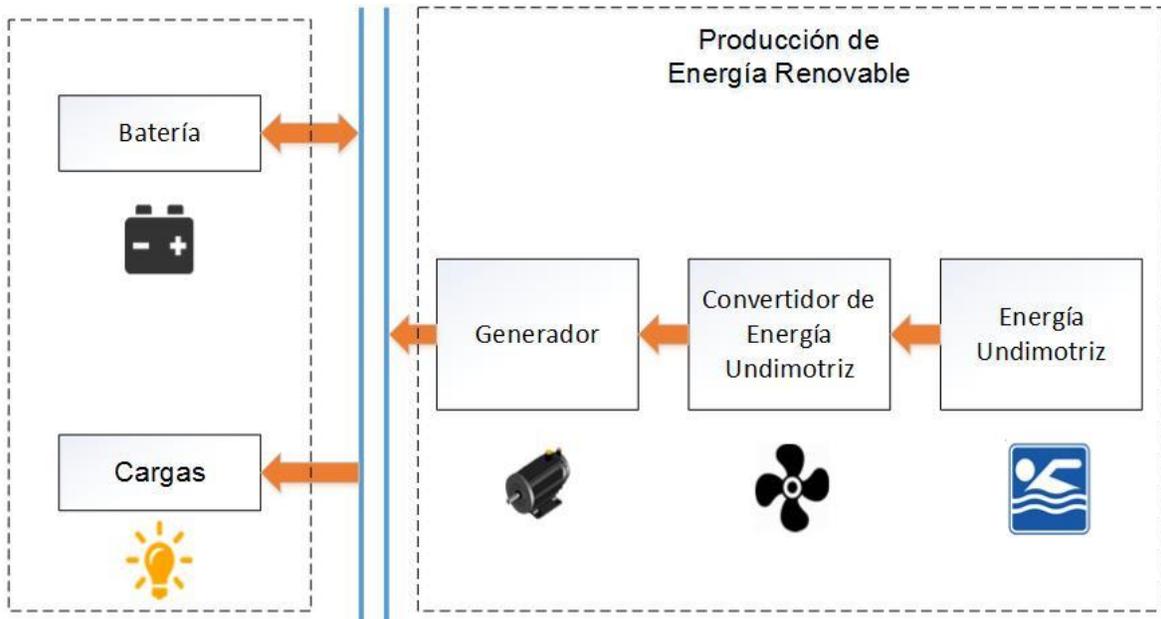


Figura 7. Esquema del sistema de Generación de Energía Undimotriz en la piscina.

Fuente: Elaboración propia.

Para el presente trabajo, únicamente la primera fase del sistema fue desarrollada. la energía undimotriz dentro de la piscina fue aprovechada por un WEC de tipo Columna de Agua Oscilante (OWC), en el cual un mecanismo de toma de poder se encargó de transformar la energía undimotriz a energía mecánica y un generador de convertir dicha energía a electricidad. A continuación se detallan cada uno de los componentes del sistema de producción de energía renovable.

6.2.1 Convertidor de Energía Undimotriz

Los elementos de diseño del dispositivo propuesto tienen como principal objetivo la innovación de la tecnología de los WEC la cual destinada a ser utilizada a gran escala, para su adaptación y aplicación a pequeña escala; además su implementación en un ambiente diferente al abordado en la literatura.

El WEC se encarga de aprovechar la energía de las olas como energía mecánica a través de su mecanismo de toma de poder, para posteriormente convertirlo a energía eléctrica. De entre los diferentes tipos de WEC la tecnología del dispositivo OWC representa ventaja de diseño sobre los demás, debido a que cuenta con dimensiones

horizontales pequeñas con respecto a la longitud de olas y aprovecha el flujo de energía del oleaje que incide directamente sobre la superficie del dispositivo resulta ser el más adecuado para su aplicación en una piscina. Básicamente es atrapado dentro de la cámara inferior de la OWC un volumen de aire y una columna de agua oscila dentro como un pistón de doble acción, bombeando un flujo de aire bidireccional a través de una turbina.

6.2.1.1 Cabina

Durante la construcción del WEC fueron empleadas dos cabinas neumáticas diferentes buscando la mejora del desempeño y adaptabilidad del dispositivo a la piscina, la primera es mostrada en la Figura 8. Con el objetivo de tener la mejor configuración para un mejor desempeño del sistema se optó por una cabina cilíndrica de dos dimensiones, la parte superior de la cabina con un diámetro de 15cm y 34cm de altura, la cabina inferior de 45 cm de diámetro y 60 cm de altura.

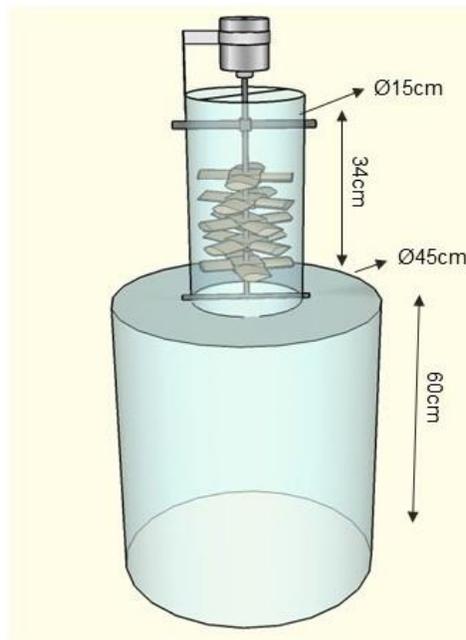


Figura 8. Primera cabina utilizada para la OWC.

Fuente: Elaboración propia.

Algunas pruebas para la adaptación de la primera cabina fueron realizadas; sin embargo, presentó grandes dificultades de diseño para su aseguramiento y amarre a la orilla de la piscina, lo cual se representaba a una limitación para el desarrollo de la experimentación; por lo cual, se optó por buscar una cabina más adecuada.

La construcción de la segunda cabina neumática se llevó a cabo con una configuración geométrica triangular que permite su fácil adaptación a una de las esquinas de la piscina, el acoplamiento de la OWC a las paredes de dicha piscina permitió mantener la cabina inmóvil durante su desempeño, lo cual es un aspecto importante para la producción de energía. Adicionalmente los ángulos y uniones fueron biselados para evitar riesgos de cortaduras en los usuarios.

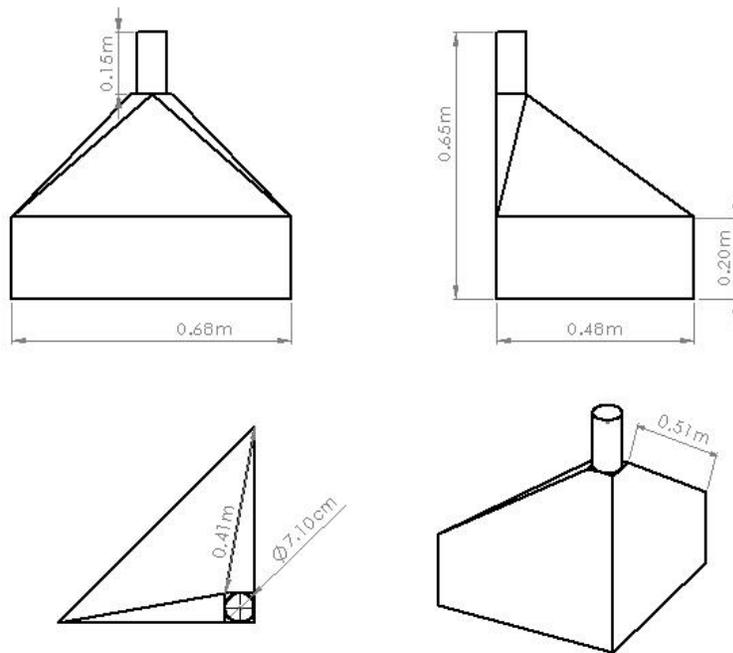


Figura 9. Diseño preeliminar de la cabina utilizada para la OWC.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 9 muestra el diseño preliminar propuesto para la cabina neumática, éste consiste en una estructura hueca de dos dimensiones la cual actúa como una cavidad resonante al estar semisumergida 10cm por debajo del nivel del agua. La estructura es una cabina piramidal con efecto Venturi, en la cual la abertura de mayor área de 1632cm^2 está en contacto con el agua y de menor área de 39.59cm^2 es donde se encuentra el mecanismo de toma de poder. Este tipo de forma da lugar al aumento de la velocidad del aire, debido a que a consecuencia a la acción de la columna de agua oscilando dentro de la cabina el fluido es obligado a pasar por una zona de menor área. La posición de la cabina dentro de la piscina es mostrada en la Figura 10.

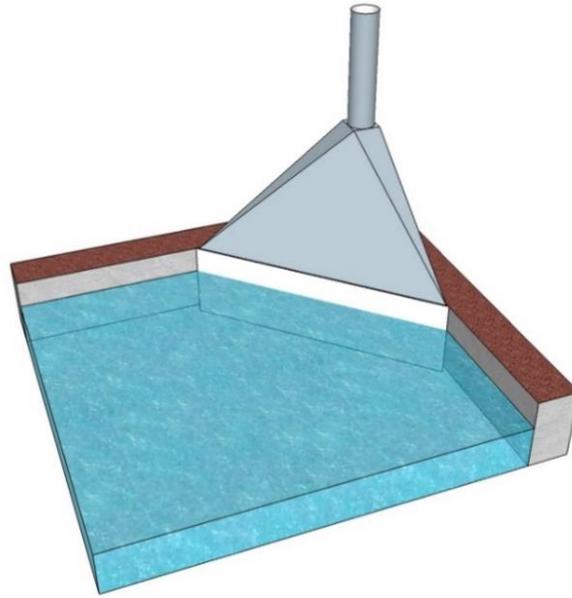


Figura 10. Posición de la OWC dentro de la piscina.

Fuente: Elaboración propia.

El diseño preliminar de la cabina neumática tuvo cuatro configuraciones geométricas importantes durante la etapa de experimentación, esto con el objetivo de buscar una mejora del desempeño en la captura de energía. La primera configuración es la mostrada en la Figura 9, la cual sirvió como base de la experimentación de las siguientes configuraciones. En la segunda configuración se le realizó a la cabina preliminar un corte vertical de en la pared frontal de la OWC, buscando una disminución en la inmersión de la cabina en el agua dejándola solo 5cm por debajo del nivel del agua. La tercera configuración es mostrada en la Figura 11, se decidió incorporar un ducto vertical en forma de U al diseño preliminar, con el objetivo de evitar la incidencia irregular de las olas dentro del dispositivo, contrarrestando la entrada de agua; esperando obtener dentro de la cabina solo una columna de agua uniforme con un nivel cambiante. La cuarta configuración de la cabina es mostrada en la Figura 12, donde se puede observar que el conducto de forma U le fue removido dejando una OWC con una extensión en la pared frontal y un total de 15cm de inmersión bajo el nivel del agua.



Figura 11. OWC con ducto de forma U.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 12. OWC con extensión en la pared frontal.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.2 Mecanismo de toma de poder

El Mecanismo de Toma de Poder (PTO) propuesto fue una turbina de impulso, utilizada para la recuperación del flujo de aire dentro de la cabina y posterior conversión a energía mecánica, ésta gira sobre un mismo eje el cual es sostenido por un soporte que cruza la circunferencia de la parte superior de la cabina, a su vez el generador está colocado sobre el mismo eje para un aprovechamiento directo de la energía mecánica.

El arreglo básico para la integración del PTO en la cabina neumática de la OWC es mostrado en la Figura 13, la turbina de impulso es sostenida por dos soportes y directamente acoplada con un generador de corriente directa.

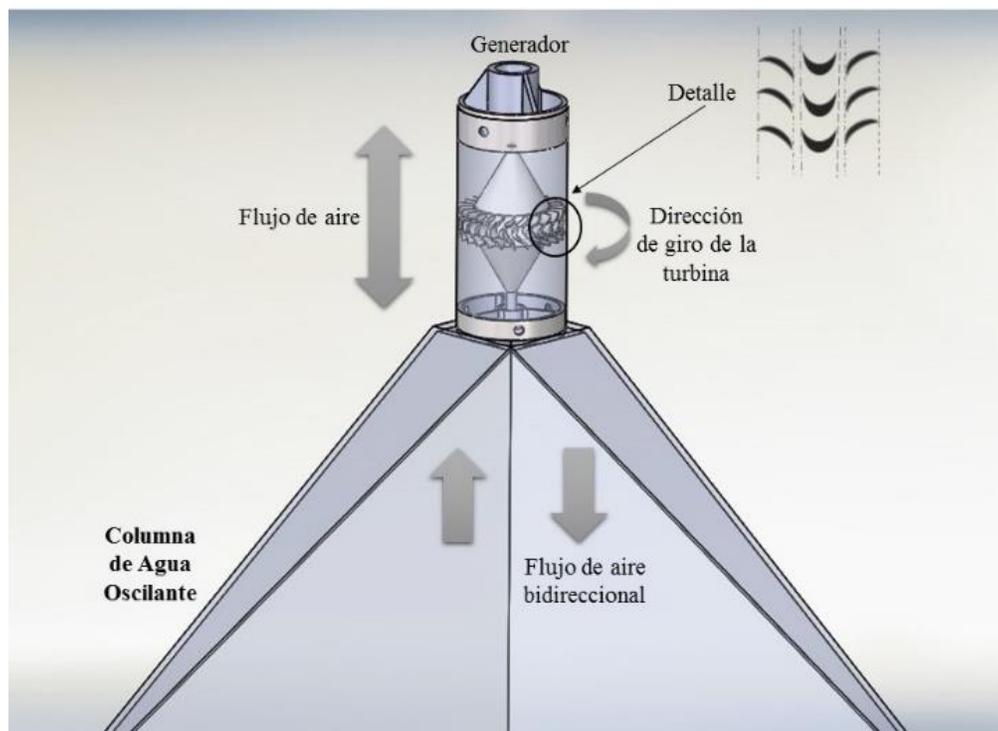


Figura 13. PTO del sistema productor de energía renovable.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la selección de tipo de turbina y de acuerdo al tamaño de la cabina neumática utilizada para el sistema generador de energía renovable, se realizó el modelado 3D de los componentes utilizando la versión del software 2014 de SolidWorks. La turbina propuesta es mostrada en la Figura 14, dicha turbina fue construida con base en el modelo propuesto por Setoguchi, et al. (2001), el cual presenta la característica de tener un solo sentido de giro independientemente de la dirección del flujo de aire que incida sobre ella.

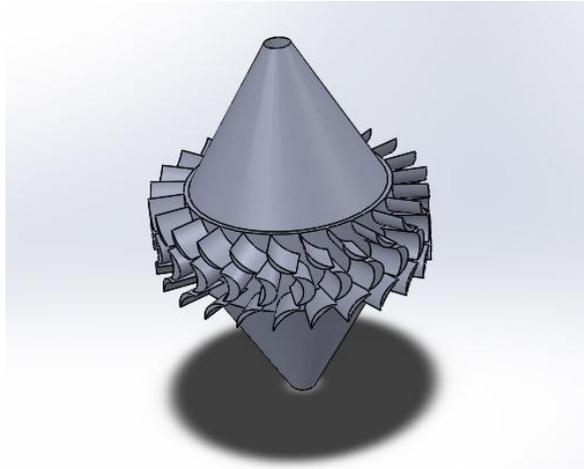


Figura 14. Diseño 3D de la turbina de impulso.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se incorporó un centrifugador en forma de cono al cubo central de la turbina, el cual cumple la función de direccionar el flujo de aire directamente al rotor de la misma, buscando un mejor desempeño aerodinámico. Las medidas de la turbina son presentadas en la Figura 15.

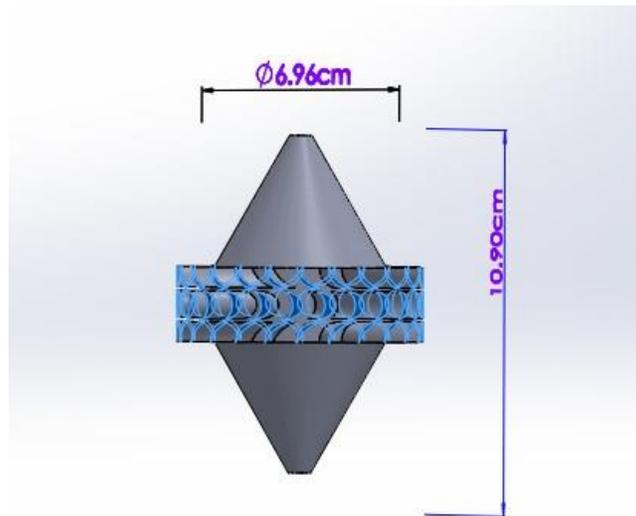


Figura 15. Medidas turbina de impulso.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 16 muestra el detalle del rotor de la turbina, dicho rotor cuenta con 24 perfiles simétricos compuestos por dos filas de álabes guías en cada extremo y una de aspas a mitad. La función de los álabes guía es principalmente servir como conductores del flujo de aire hacia las aspas.

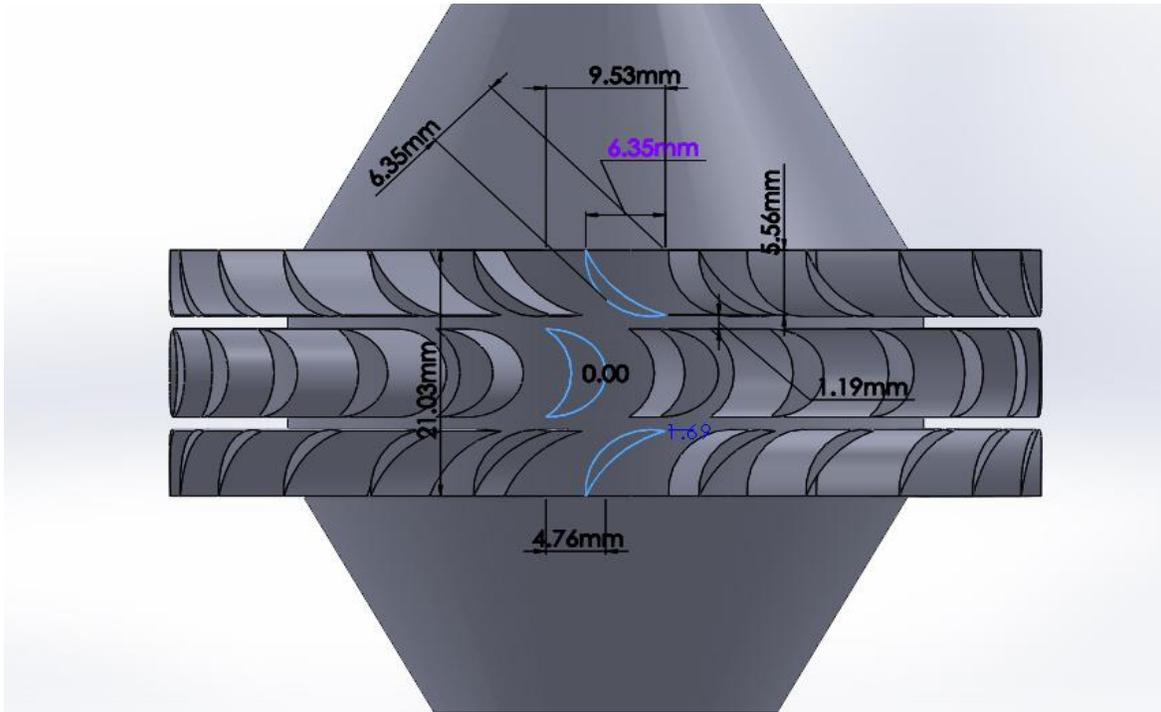


Figura 16. Perfil del rotor y álabes guías.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.2.1 Simulación Computacional del PTO

Para la realización de la simulación se establecieron los parámetros de entrada y salida, como parámetro de entrada la velocidad del fluido de 5 m/s, como parámetro de salida la presión atmosférica, es decir 101 325 Pa. Después de definir los parámetros de entrada se definió un volumen de referencia de rotación para la pieza movable, posteriormente se creó un volumen de control para la pieza de 40 x 50 x 50 cm. La simulación computacional mostró que la velocidad del flujo de aire alcanza un valor máximo de 14.992 m/s, como se puede observar en las Figuras 17 y 18.

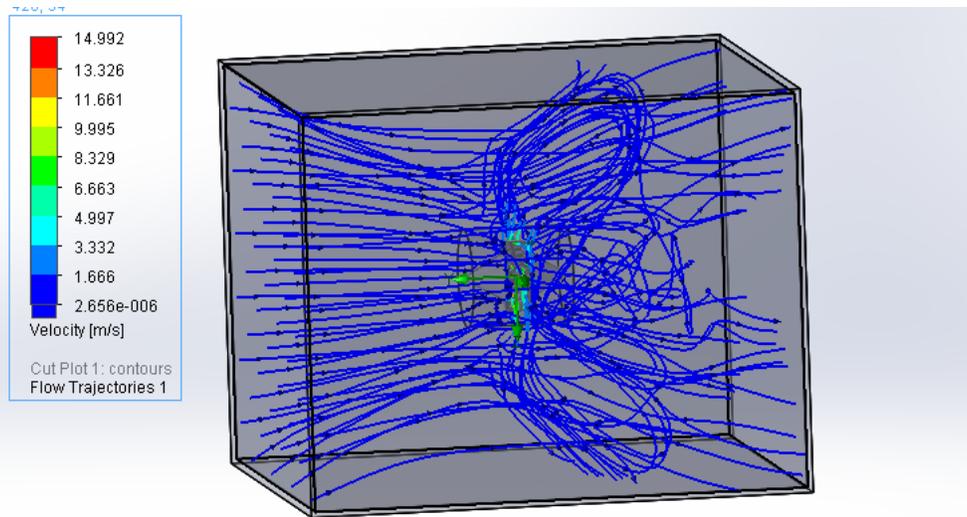


Figura 17. Simulación de flujo de aire para la turbina.

Fuente: Elaboración propia.

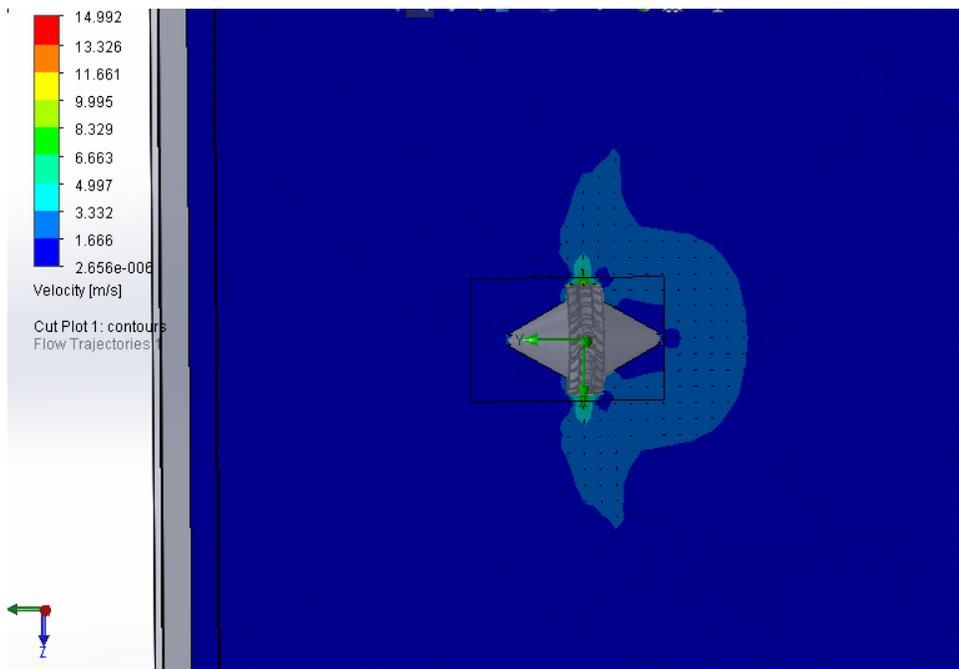


Figura 18. Campo de velocidades de Simulación de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.3 Soportes

La configuración utilizada para el presente dispositivo implica la implementación de un elemento rodante, colocado en el centro de la turbina actuando como un eje axial, el cual a su vez descansa en un mecanismo de rodamiento en la parte inferior de la cabina superior, dicho mecanismo de rodamiento es soportado por una estructura de plástico con elementos que lo mantienen en el centro de la cabina superior (Figura 19), dándole también soporte sobre las paredes de la misma y permitiendo la exhalación y/o inhalación de aire a la OWC debido a su configuración.

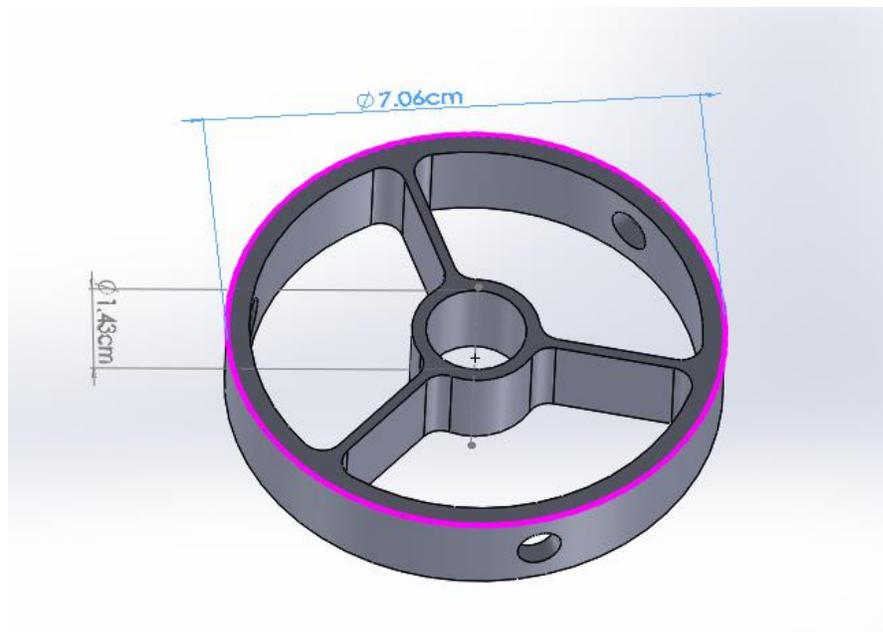


Figura 19. Diseño 3D del soporte inferior PTO.

Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior cercana a la boca de exhalación del dispositivo, el eje axial finaliza en una pieza que contiene un punto de apoyo en el cual embona el eje del generador, el cual a su vez está centrado mediante un soporte, actuando así como un sostén. Lo anterior da la posibilidad de no utilizar otro mecanismo de rodamiento en esta parte del sistema, conectando directamente el eje de rotación de la turbina con el eje del motor. El diseño 3D de la pieza es mostrado en la Figura 20.

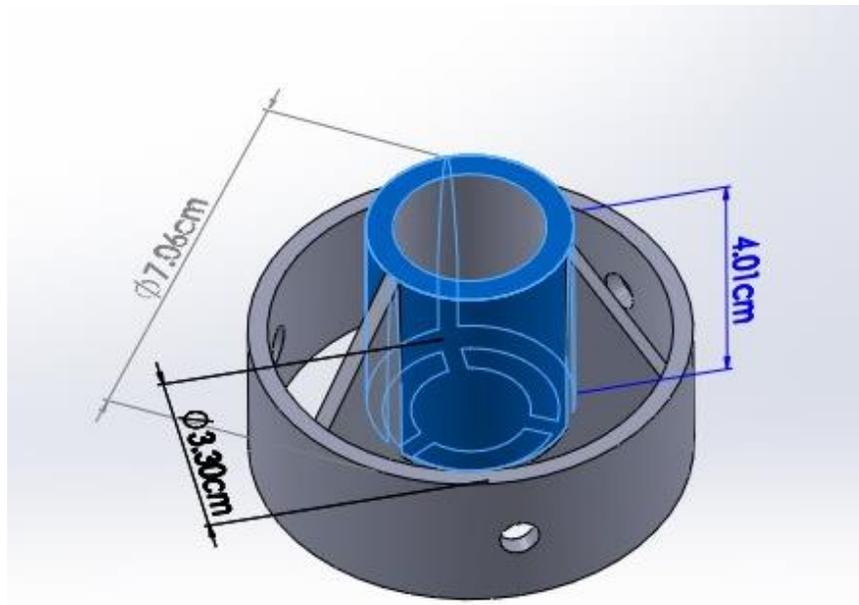


Figura 20. Diseño 3D del soporte superior del PTO.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 Generador

Para la elección del generador utilizado existen algunos aspectos a considerar en un proyecto de este tipo, tomando en cuenta que el sistema será implementado dentro de una piscina de uso público en la que existe actividad humana constante a lo largo del día, y las posibles implicaciones de seguridad de los usuarios o impedimento para el desarrollo de las actividades que puedan surgir a partir de la implementación del WEC, el dispositivo es diseñado de una manera más compacta y amigable hacia el usuario del centro deportivo, por lo cual las dimensiones del generador fueron elegidas a manera de que concuerden con el resto de la geometría que el tipo de convertidor de energía undimotriz le requiera. Un diseño preliminar del WEC incorporó un generador de 12V con capacidad máxima de producción de energía de 15 Watts de corriente directa mostrado en la Figura 21, sin embargo la cantidad de energía mecánica producida por el mecanismo de toma de poder no fue capaz de accionar el rotor de dicho generador .



Figura 21. Generador de 12V.

Fuente: Elaboración propia.

Para el presente proyecto decidió utilizarse un motor de corriente directa de 7V invertido, como generador de energía eléctrica. La Figura 22 muestra el motor integrado al WEC mediante el soporte superior del PTO, la producción de energía con este generador resultó en una corriente directa.



Figura 22. Generador del sistema de producción de energía.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Experimentación

Las pruebas de experimentación fueron llevadas a cabo en la piscina del centro deportivo PichySport, en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Las medidas y características de la piscina son dadas en la Tabla 1, y Figura 3. El prototipo fue posicionado en una de las esquinas de la piscina en el nivel primer nivel de profundidad a 1.10 m, esta disposición del WEC fue decidida para evitar causarle a los usuarios incomodidad o dificultades para realizar sus actividades normales.

Durante las pruebas experimentales el voltaje de salida del generador fue registrado con respecto al tiempo mediante la utilización de la herramienta de adquisición de datos explicada en la sección anterior del documento. Dado que los resultados obtenidos mediante las mediciones del sistema de adquisición de datos son en unidades de voltaje y la unidad de energía que es de interés del presente trabajo es el Watt, se realizó un cálculo para obtener la potencia eléctrica producida por el WEC; de acuerdo a la ley de Ohm:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5)$$

Las conversiones necesarias fueron realizadas teniendo en cuenta que la resistencia del generador utilizado es de 9.8 Ohms.

6.3.1 Resultados Experimentales

Durante la etapa de experimentación con el WEC, fueron monitoreadas con la herramienta de adquisición de datos en total 50 pruebas de producción de energía de 5 minutos, de las cuales 28 resultaron fallidas debido a errores técnicos del programa, desconexiones y daños del microcontrolador, y sobreescritura de las mediciones. Por lo cual únicamente son presentadas 22 pruebas del desempeño de la OWC en la piscina.

Las pruebas realizadas fueron llevadas a cabo durante diferentes actividades de usuarios dentro de la piscina, la Tabla 2 muestra la clasificación de los tipos de ejercicio que fueron tomados en cuenta para la presentación de los resultados experimentales con el sistema de producción de energía.

Tabla 2. Clasificación de actividades.

No. De Actividad	Tipo de ejercicio
Actividad 1	Ejercicios piernas
Actividad 2	Ejercicios brazos
Actividad 3	Nado
Actividad 4	Gimnasia acuática
Actividad 5	Clavado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Pruebas de producción de energía con el WEC.

Config. cabina	Prueba	Fecha	Número de nadadores	Pico máximo de producción mW	Promedio de producción de energía mW	Tipos de ejercicios	Grupo
1	1	30/09/2015	6	0.56208396	0.00821354	Actividad 1	Mujeres
	2	30/09/2015	6	3.58737245	0.12967672	Actividad 2	Mujeres
	3	30/09/2015	6	8.758233518	0.24684156	Actividad 1	Mujeres
	4	30/09/2015	6	5.41998416	0.19682344	Actividad 3	Mujeres
	5	01/10/2015	5	0.50447425	0.00571081	Actividad 4	Mujeres
	6	01/10/2015	6	6.78237604	0.40556732	Actividad 1	Hombres
	7	01/10/2015	6	3.29465282	0.12799694	Actividad 1	Hombres
	8	01/10/2015	5	1.59438776	0.03498343	Actividad 3	Hombres
	9	01/10/2015	6	4.21018017	0.35292587	Actividad 4	Hombres
	10	02/10/2015	5	0.18839933	0.00088201	Actividad 4	Mujeres
	11	02/10/2015	5	0.30517578	0.00266724	Actividad 4	Mujeres
	12	02/10/2015	6	1.7999143	0.02520481	Actividad 4	Mujeres
	13	02/10/2015	6	0.26313626	0.00195302	Actividad 4	Mujeres
	14	02/10/2015	6	1.7999143	0.01408048	Actividad 4	Mujeres
2	15	06/10/2015	6	31.8394875	1.95247448	Actividad 4	Hombres
	16	06/10/2015	6	1.22070313	0.05670034	Actividad 4	Hombres
	17	07/10/2015	6	8.52623764	0.02436225	Actividad 2	Mujeres
	18	05/11/2015	6	0.01401317	0.000181874	Actividad 4	Hombres
3	19	24/11/2015	5	0.00155702	1.77E-05	Actividad 4	Hombres
4	20	09/12/2015	6	2.491230867	0.07221929	Actividad 3	Hombres
	21	09/12/2015	6	6.9894596	0.2504259	Actividad 3	Hombres
	22	10/12/2015	2	0.26313626	0.00222237	Actividad 5	Hombres

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 muestra un resumen de los resultados obtenidos en la realización de 22 pruebas de producción de energía, éstos son clasificados entre las 4 configuraciones que se realizaron al diseño preliminar de la cabina neumática. Para efectos de clasificación la configuración 1 de la cabina es el diseño preliminar mostrado en la Figura 9, la configuración 2 es la cabina neumática con inmersión de la pared frontal de 5cm. Configuración 3 es la cabina incorporada con el ducto de forma U presentado en la Figura 11 y la configuración 4 es la mostrada en la Figura 12.

Son presentados el pico máximo de producción de energía y el promedio de producción de energía en miliwatts de cada una de las pruebas; el tipo de actividad, número de nadadores

y género de nadadores durante cada prueba son indicados ya que pudieran ser un importante factor en la producción de energía y facilitar el análisis de los datos obtenidos. La Figura 23 muestra una gráfica con los promedio de producción de energía obtenida en cada una de las pruebas realizadas a partir del funcionamiento del WEC.

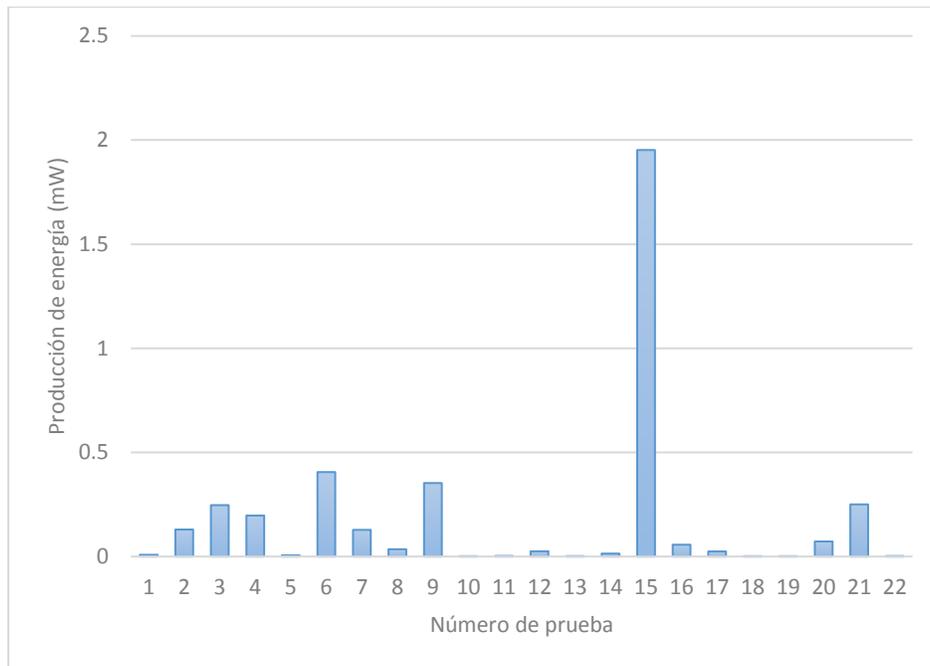


Figura 23 Promedios de producción de energía en las pruebas.

Fuente: Elaboración propia.

La máxima producción de energía fue dada en la prueba 15, tanto el mayor pico de energía como el mayor promedio de producción. Las 21 pruebas restantes se mantienen en un rango de producción similar en el cual casi la mitad de las pruebas resultó en un muy bajo rendimiento del WEC. La prueba con la menor producción de energía fue la número 19 con 0.0000177438mW de potencia producida.

En la Tabla 4 y Figura 25 son presentados los promedios de producción de energía por actividad realizada, esto con la finalidad de conocer cuál de las 5 actividades resultó ser la que mejor aprovechaba el WEC.

El mayor promedio de producción de energía se dio en durante la realización de la actividad número 4, gimnasia acuática.

Tabla 4. Promedio de producción de energía por actividad.

No. Prueba	Ejercicio	No de personas	Prom Prd. Ener. (mW)
6	Actividad 1	6	0.40556732
2	Actividad 2	6	0.12967672
18	Actividad 3	6	0.2504259
15	Actividad 4	6	1.95247448
19	Actividad 5	6	0.00146169
TOTAL	5	24	2.73960611

Fuente: Elaboración propia.

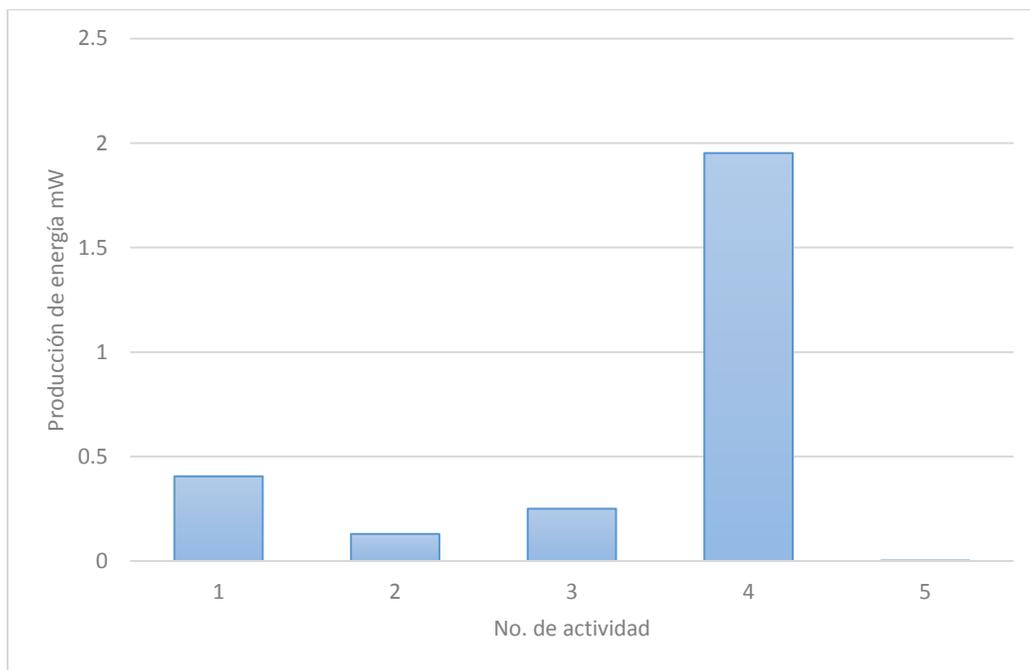


Figura 24. Comparativa de los promedios de producción de energía por actividad.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 25 muestra un ejemplo de la producción de energía en voltaje de una prueba realizada al grupo de estudio de hombres con 6 personas realizando actividades de gimnasia acuática dentro de la piscina.

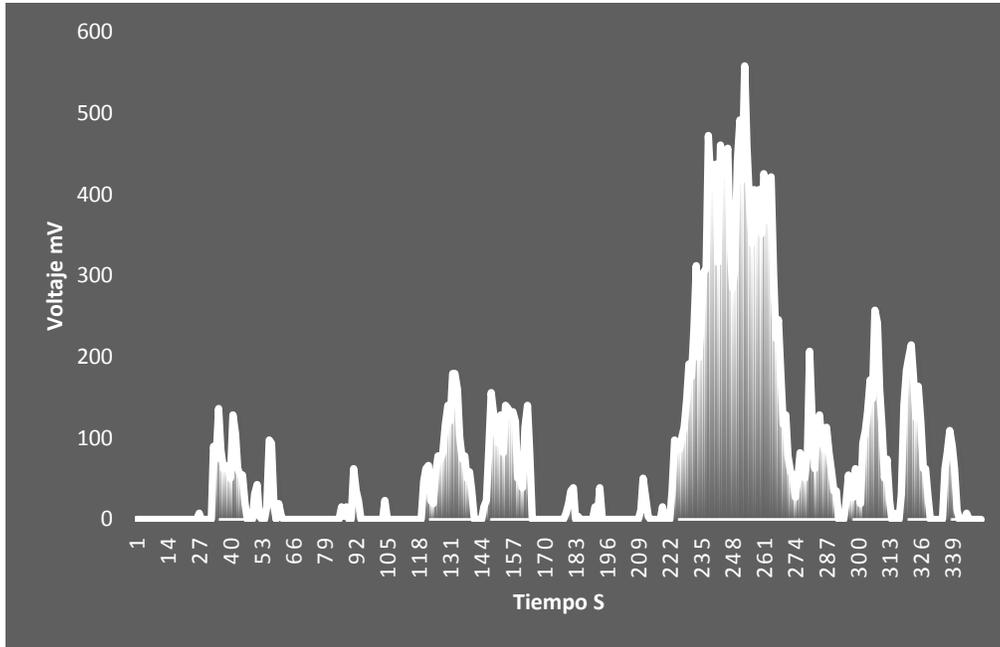


Figura 25. Ejemplo de lectura de producción de energía con el sistema de adquisición de datos.

Fuente: Elaboración propia.

El pulso de producción de energía es generado cuando los usuarios de la piscina provocan un desplazamiento variable de agua a consecuencia de movimientos durante sus actividades. Los momentos de potencia cero que separan los pulsos de producción de energía representan la inactividad de la turbina de impulso que en la mayoría de los casos corresponde con la disminución de intensidad de las actividades o movimiento de los usuarios en la piscina.

6.4 Análisis eficiencia de producción de energía

Tomando como base el promedio de producción para la prueba que arrojó un valor mayor de generación de energía, como se muestra en la Tabla 4, se realizó un análisis para verificar la eficiencia del convertidor como alternativa sustentable para complementar el requerimiento total de energía en el complejo deportivo. El mayor promedio de producción de energía mediante el WEC es de $1.95 \text{ mW} \cdot \text{h}$.

Como se muestra en (3), la demanda de energía del sistema que se pretende complementar es de $144 \text{ W} \cdot \text{h}$. Se tiene entonces que:

$$\frac{D_E}{P_E} = t_P = \frac{144 \text{ W} \cdot \text{h}}{0.00195 \text{ W}} = 73846.15 \text{ h} \quad (6)$$

Donde D_E es la demanda de energía para iluminación del área de la piscina, P_E es la producción de energía mediante el WEC, y t_P es el tiempo que se necesita producir energía para abastecer dicha demanda. En total se necesitarían **73846.15 h**, o bien 3076.92 días para cubrir la demanda, bajo el supuesto de que el banco de baterías es 100% eficiente en la tarea de almacenamiento y posterior entrega de esta energía, y además, la producción de la misma se da las 24 horas del día.

El porcentaje de la demanda que el sistema productor de energía propuesto tiene la capacidad de cubrir se define en base a una relación del número de días que este necesita operar para proveer energía que cubra un requerimiento total. Suponiendo que se establece dicha relación de la forma:

$$\frac{\text{días que se pueden satisfacer}}{\text{días que se requiere producir}} \times 100 = \% \text{Demanda} \quad (7)$$

$$\% \text{Demanda} = \frac{1 \text{ día}}{3076.92 \text{ días}} = 0.03 \% \quad (8)$$

Es decir, el sistema tiene la capacidad teórica de cubrir el 0.03% de la demanda de energía presentada en (3), dadas las condiciones antes mencionadas.

6.5 Costos de construcción del WEC

En este apartado se presentan los gastos relacionados a la construcción y funcionamiento del dispositivo y el sistema de adquisición de datos. La tabla 5 muestra la relación de costos de construcción del WEC, los gastos son divididos en 3 categorías, en la categoría cabina se incluyen el material utilizado para su construcción así como los gastos de mano de obra para el corte y armado de la cabina, en sistema mecánico están contemplados los gastos de impresión 3D de los soportes inferior y superior, turbinas, eje, rodamiento, soporte del eje del generador, en la categoría de sistema de adquisición de datos se incluyen los gastos de dos placas microcontroladores Arduino Uno que fueron utilizadas para la adquisición de datos.

Tabla 5. Gastos de construcción del WEC.

Categoría	Descripción	Monto
Cabina	Material	\$ 1500
	Mano de Obra	\$ 2250
Sistema mecánico	Turbina, Eje, Soportes	\$ 2309.97
Sistema de adquisición de datos	Placas microcontrolador	\$ 667
	TOTAL	\$ 6,726.97

Fuente: Elaboración propia.

VII. DISCUSIÓN

Existen en la literatura diversas investigaciones sobre dispositivos Convertidores de Energía Undimotriz (WEC) destinados a aplicaciones a pequeña escala y con mecanismo de baja potencia (Agamloh, Wallace y Von Jouanne 2008; Symonds, Davis y Ertekin, 2010); a pesar de ello, no se encontraron ejemplos de casos de estudio de tecnologías de energía undimotriz con las características de innovación que el modelo de utilidad presentado propone, para ser utilizado como sistemas de recuperación de energía dentro de una piscina. Esto puede ser debido a que aún no se han explorado estas opciones como alternativa sustentable, que se cree que no hay energía aprovechable en una piscina, o que se asume que la energía que pueda llegar a obtenerse no es significativa para el trabajo que representaría tratar de aprovecharla; los resultados de la investigación demuestran que si existe energía aprovechable en la piscina; sin embargo, los resultados de su aprovechamiento no fueron suficientes.

Debido a que el poder de captura del WEC propuesto varía dependiendo tanto del tipo de actividad que se está realizando como de la cantidad de personas que se encuentran dentro de la piscina durante la misma, los promedios de producción son muy diferentes entre cada prueba, pues no todos los movimientos realizados provocan un desplazamiento de agua con características propicias para tener un mayor aprovechamiento de la energía por parte del dispositivo (Zhang, et al., 2013). Se encontró que las pruebas con mayor promedio de producción de energía tienen en común que pertenecían al grupo de estudio de hombres y a dos actividades en las que existe mayor movimiento de los usuarios, ejercicios de pierna y gimnasia acuática.

Las modificaciones realizadas en la Columna de Agua Oscilante (OWC) con fines de mejora de la captura de energía dieron a lugar una variabilidad en los rangos de las producciones de energía. Dado que el mayor promedio de producción de energía y pico de energía máximo fueron dados mediante la utilización del segundo diseño de la cabina neumática, esta resulta ser la más encaminada a la óptima configuración del WEC para producción de energía. Los resultados demostraron que el rendimiento del dispositivo depende de la inmersión de la pared frontal de la cabina en el nivel del agua (Das Neves, et al., 2013), siendo la más eficiente la cabina sumergida 5 cm por debajo del nivel del agua.

Contrario al aumento de captura de energía esperado con la incorporación de un ducto de forma U en la cabina neumática (Malara y Arena, 2013), el peor desempeño de producción de energía del WEC fue presentado durante las pruebas con la tercera configuración de la

cabina. Una casi nula producción de energía con el diseño 3, con una gran brecha que la separa de los resultados que dieron el resto de las configuraciones de la OWC prueba que para el dispositivo propuesto en este trabajo, una caracterización geométrica convencional de la OWC fue más adecuada para la conversión de energía. Por otro lado la cuarta configuración de la cabina demuestra una vez más que una mayor inmersión de la pared frontal en el agua, disminuyó la capacidad de captura de energía del dispositivo (Bouali y Larbi, 2013), viéndose esto reflejado en una baja en la producción de energía comparado con lo que se obtuvo con las otras cabinas.

A pesar de que las tecnologías de producción de energía renovable a pequeña escala han demostrado en la literatura tener un impacto positivo en cuanto a la complementación de la demanda energética y disminución de gastos relacionados al consumo en instalaciones deportivas (Lipu, 2013), el presente trabajo demuestra lo contrario, resultado de los altos costos asociados a la construcción del dispositivo propuesto, comparados con la baja cantidad de energía que pudo ser recuperada.

El desarrollo de diversos dispositivos con el propósito de aprovechar energía renovable a nivel local y a pequeña escala ha aumentado recientemente, logrando que la producción de energía sea directamente en lugar donde esta se necesita (Rezaie, Esmailzadeh y Dincer, 2011), la investigación de este tipo de tecnologías prometen un gran beneficio en cuanto a la reducción de consumo de fuentes de energía fósil y aumento de las opciones de fuentes más limpias de suministro de energía (Borge-Diez, et al., 2012). En el presente proyecto se demostró que una nueva fuente de energía a nivel local pudo ser aprovechada (Artuso y Santiangeli, 2008); sin embargo, el método de recuperación de energía en la piscina demuestra que la baja densidad de energía humana aprovechada, no muestra probabilidad de cumplir con una tarea tan importante como la de cubrir una parte de la demanda de energía destinada a iluminación de las instalaciones.

Los resultados obtenidos a partir de este estudio demuestran que existe todavía un gran camino por recorrer en término de desarrollo de tecnologías alternativas para la producción de energía sustentable (Munguia, et al., 2015); sin embargo, el refinamiento y desarrollo de esta tecnología de recuperación de energía, podría dar como resultado una mayor eficiencia de la misma, dando a lugar la disminución de costos de construcción y por lo tanto perfilarla como una adecuada alternativa de producción de energía sustentable para piscinas.

La generación de energía sustentable a pequeña escala es un mecanismo efectivo para lograr la reducción de la demanda de energía localizada, a pesar de que existen todavía problemas asociados con este tipo de tecnologías y la falta de financiamiento y de apoyo

(Allen, Hammond y Mcmanus, 2008), los resultados y perspectivas obtenidas a partir de la realización de esta investigación dejan en claro que existe un gran apoyo por la academia e inversionistas para la realización de este tipo de sistemas de innovación tecnológica hacia el desarrollo de las energías renovables.

VIII. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado un innovador sistema productor de energía sustentable basado en los principios de tecnologías undimotriz para ser aplicado en una piscina, con la finalidad de complementar los requerimientos energéticos destinados a iluminación del área. La innovación realizada demuestra que es posible la adaptación de tecnologías de producción de energía existentes como modelo de utilidad para el aprovechamiento de nuevas fuentes de energía.

Se logró contribuir al desarrollo de las energías renovables mediante la introducción de un nuevo sistema de producción de energía a pequeña escala, colocando la tecnología propuesta en el primer eslabón de la cadena de innovación; investigación y desarrollo.

A pesar de que las pruebas realizadas durante la etapa de experimentación demuestran que es posible la producción de energía a partir del aprovechamiento de la energía undimotriz dentro de la piscina, no se pudo lograr el objetivo principal de la presente investigación. Sin embargo fue posible llegar a diversas conclusiones que permitirán que el presente trabajo sirva como precursor de futuras investigaciones para mejoras de la eficiencia de dicha tecnología innovadora.

La producción de energía del sistema depende de la cantidad de energía que está siendo transmitida al ambiente por los usuarios al realizar actividades dentro de la piscina, ésta no pudo ser capturada en su totalidad debido a limitaciones relacionadas a características geométricas del dispositivo, las cuales representaban una causa de pérdidas de transmisión energía al mecanismo de toma de poder; sin embargo, fue posible observar un aumento en la producción de la energía a consecuencia de mejoras realizadas en la cabina neumática de la OWC.

El principal inconveniente para este tipo de generación es la variabilidad del recurso, lo que se traduce a una velocidad variable del mecanismo de toma de poder y por lo tanto una rotación variable sobre el rotor del generador reflejándose en una producción de energía pulsante.

Mediante un análisis realizado de la producción de energía se concluyó que el dispositivo propuesto tiene la capacidad teórica de cubrir el 0.03% de la demanda actual de energía destinada a la iluminación del área.

Debido a los altos costos que requieren la construcción, aplicación y mantenimiento para la tecnología que fue necesaria para recuperar pequeñas cantidades de energía humana empleada en actividades recreativas, este tipo de aplicaciones están limitadas por su viabilidad económica.

IX. RECOMENDACIONES

El trabajo futuro estará en las nuevas validaciones del método propuesto, incluyendo validaciones experimentales de una OWC en un tanque de pruebas, para conocer el comportamiento y poder de captura de energía del dispositivo en un ambiente controlado con olas regulares, y así poder conocer la eficiencia del sistema en diferentes ambientes.

Es necesario realizar un estudio para encontrar una turbina más adecuada para la aplicación que se está llevando a cabo, que presente un mejor desempeño bajo condiciones de flujo irregulares.

Un estudio del proceso de transferencia de energía dentro y alrededor de la geometría del dispositivo mediante el análisis de datos experimentales y numéricos, con la finalidad de encontrar donde suceden las mayores pérdidas de energía, permitirá mejorar la transferencia de energía al mecanismo de toma de poder disminuyéndolas mediante modificaciones en la forma de la cabina neumática.

X. REFERENCIAS

- Agamloh, E., Wallace, A. y Von Jouanne, A., 2008. A novel direct-drive ocean wave energy extraction concept with contact-less force transmission system. *Renewable Energy*, 33, pp.520-529.
- Akikur, R., Saidur, R., Pinga, H. y Ullaha, K., 2013. Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, pp.738-752.
- Allen, S., Hammond, G. y Mcmanus, M., 2008. Prospects for and barriers to domestic micro-generation: A United Kingdom perspective. *Applied Energy*, 85, pp.528-544.
- Artuso, P. y Santiangeli, A., 2008. Energy solutions for sports facilities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, pp.3182-3187.
- Bouali, B. y Larbi, S., 2013. Contribution to the Geometry Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. *Energy procedia*, 36, pp.565-573.
- Brooke, J. y Engineering Committee on Oceanic Resources, 2003. *Wave energy conversion*. [e-book] Amsterdam, Elsevier. Disponible en: <<http://www.engineeringvillage.com/controller/servlet/OpenURL?genre=book&isbn=9780080442129>> [Consultado el 28/VII/2014].
- Boccotti, P., 2003. On a new wave energy absorber. *Ocean Engineering*, 30, pp.1191-1200.
- Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., Pérez-Molina, C., & Castro-Gil, M., 2012. Experimental validation of a fully solar-driven triple-state absorption system in small residential buildings. *Energy and Buildings*, 55, pp.227-237.
- Brouwer, A., Van Den Broek, M., Faaij, A. y Seebregts, A., 2014. Impacts of large-scale Intermittent Renewable Energy Sources on electricity systems, and how these can be modeled. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, pp.443-466.
- Chabchoub, A. y Fink, M., 2014. Time-Reversal Generation of Rogue Waves. *Physical Review Letters*, 112.
- Charters, W., 2001. Developing markets for renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 22, pp.217-222.
- Chauhan, A. y Saini, R., 2014. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp.99-120.
- Chen Z., Yu, H., Hu, M., Meng, G., y Wen, C., 2013. A review of offshore wave energy extraction system. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013.
- Chow, T., Bai, Y., Fong, K. y Lin, Z., 2012. Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating. *Applied Energy*, 100, pp.309-317.
- Claudy, M., Michelsen, C., y O'Driscoll, A., 2011. The diffusion of microgeneration technologies - assessing the influence of perceived product characteristics on home owners' willingness to pay. *Energy Policy*, 39, pp.1459-1469.
- Clément, Alain, C., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M., Schild, P., Sjöström, B., Sørensen, H y Thorpe, T., 2002. Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, pp.405-431.
- Das Neves, M., Domingues, E., Isoldi, L. y Oliveira, L., 2013. Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter of real scale. *22nd International Congress of Mechanical Engineering, COBEM*.
- Dincer, I., 1999. Environmental impacts of energy. *Energy Policy*, 27, pp.845-854.
- Drew, B., Plummer, A. y Sahinkaya, M., 2009. A review of wave energy converter technology. *Proc. IMechE*, 223, pp.887-902.
- Dunnett, D., y Wallace, J., 2009. Electricity generation from wave power in Canada. *Renewable Energy*, 34 (1), pp.179-195.
- Echevarria, N. y Jun, X., 2014. Energy related CO2 emissions and the progress on CCS projects: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, pp.368-385.
- Energy Information Administration, 2013. *Global Energy Outlook 2013*. [online] Disponible en: <[http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf)> [Consultado el 28/VIII/2014].
- Environmental Change Institute, 2009. *Power from the People, Domestic Microgeneration and the Low Carbon Buildings Programme*. [pdf] Environmental Change Institute. Disponible en: <<http://www.eci.ox.ac.uk/publications/downloads/bergmanjardine09powerpeople.pdf>> [Consultado el 05/VIII/2014].

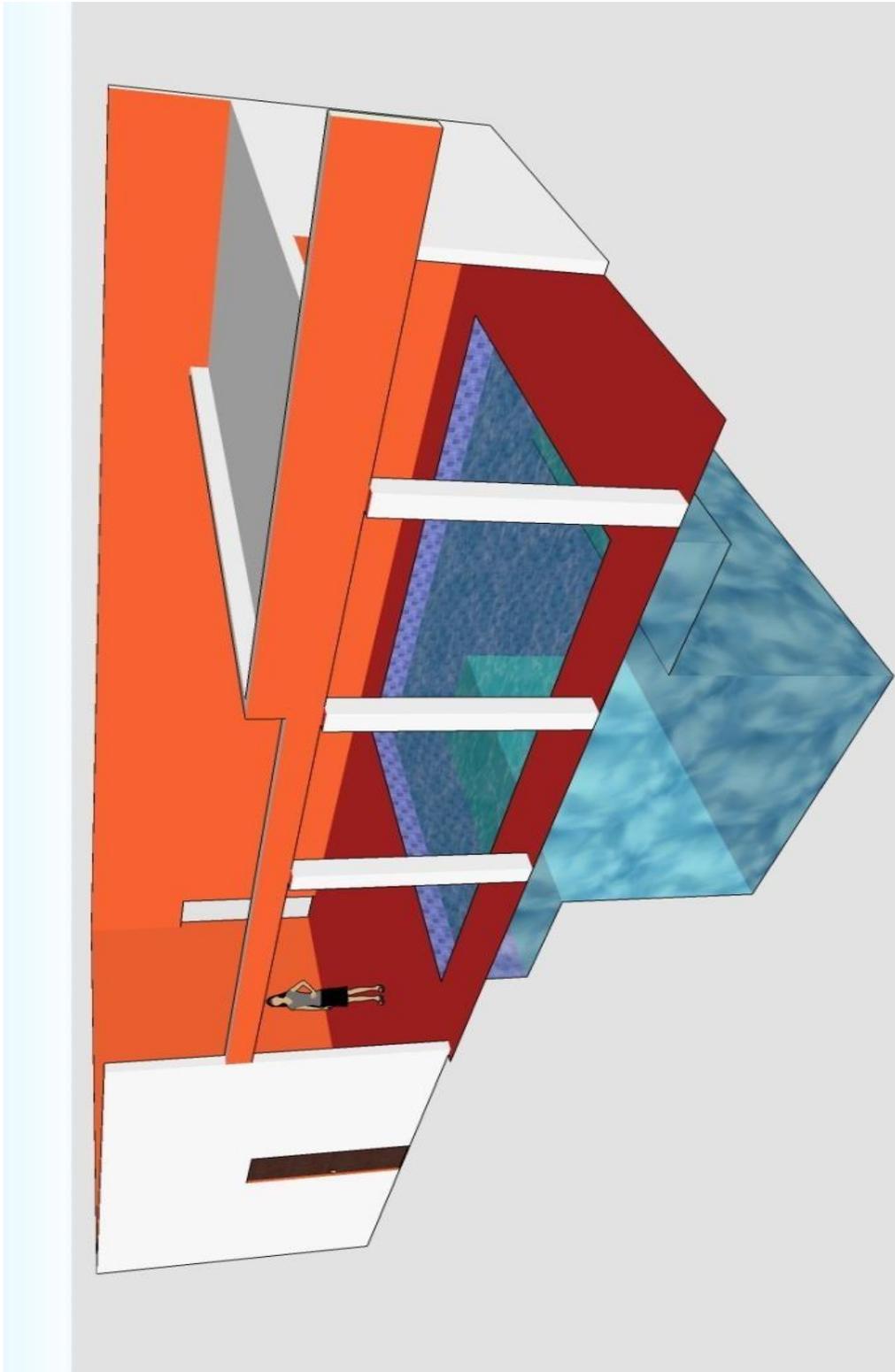
- Falcao, A., 2007. Modelling and control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic power take-off and gas accumulator. *Ocean Engineering*, 34, pp.2021-2032.
- Falcao, A., 2010. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp.899-918.
- Falcão, A., Gato, L., y Nunes, E., 2013. A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters. *Renewable Energy*, 50, pp.289-298.
- Fiaschi, D., Bandinelli, R. y Conti, S., 2012. A case study for energy issues of public buildings and utilities in a small municipality: Investigation of possible improvements and integration with renewables. *Applied Energy*, 97, pp.101-114.
- Florentin, A., Hautemanière, A. y Hartemann P., 2011. Health effects of disinfection by-products in chlorinated swimming pools. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214, pp.461-9.
- Goggins, J. y Finnegan, W., 2014. Shape optimisation of floating wave energy converters for a specified wave energy spectrum. *Renewable Energy*, 71, pp.208-220.
- Harne, R., Schoemaker, M., Dussault, B. y Wang, K., 2014. Wave heave energy conversion using modular multistability. *Applied Energy*, 130, pp.148-156.
- Heide, D., Von Bremen, L., Greiner, M., Hoffmann, C., Speckmann, M., y Bofinger, S., 2010. Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe. *Renewable Energy*, 35, pp.2483-2489.
- Hilmer, F., Ratka, A., Vajen, K., Ackermann, H., Fuhs, W., y Melsheimer, O., 1997. Investigation of a directly coupled photovoltaic pumping system connected to a large absorber field. *Solar Energy*, 61, pp.65-76.
- International Energy Agency, 2009. *Cities, Towns & Renewable Energy, Yes in My Front Yard* [online] International Energy Agency, Disponible en: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cities2009.pdf>>[Consultado el 28/VIII/2014].
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. *Climate change 2014 mitigation of climate change*, Geneva: IPCC.
- Ipakchi, A. y Albuyeh, F., 2009. Grid of the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, 7, pp.52-62.
- Johansson, L. y Westerlund, L., 2001. Energy savings in indoor swimming-pools: comparison between different heat-recovery systems. *Applied Energy*, 70, pp.281-303.
- Lagoun, M., Benalia, A. y Benbouzid, M., s.f. Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status. En: IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers), *Proceedings of the 2010 IEEE International Energy Conference and Exhibition*. Manama, Bahrain, 18-22 Diciembre 2010. Manama: IEEE.
- Lipu, M., 2013. An Approach towards Sustainable Energy Performance by Green Building: A Review of Current Features, Benefits and Barriers. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2(4), pp.180-190.
- Lopez, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martinez de Alegria, I. y Kortabarria, I., 2013. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, pp.413-434.
- Lund, P., 2012. Large-scale urban renewable electricity schemes – Integration and interfacing aspects. *Energy Conversion and Management*, 63, pp.162-172.
- Malara, G. y Arena, F., 2013. Analytical modelling of an U-Oscillating Water Column and performance in random waves. *Renewable Energy*. 60, pp.116-126.
- Meador, R., 1981. *Cogeneration and district heating: an energy-efficiency partnership*. Ann Arbor, Mich, Ann Arbor Science.
- Melo, N., Prata, R., Goncalves, R. y Mira, F., 2009. Microgeneration in portugal - EDP experience and future perspectives. En: IET (Institution of Engineering and Technology), *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. Praga, Republica Checa, 8-11 Junio 2009. IET Conference Publications.
- Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R., Meyer, L., & Intergovernmental Panel on Climate Change. Working group III., 2007. *Climate change 2007: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, N.Y., Cambridge University Press.
- Monarcha, A., y Fonseca, N., 2013. Finite depth effects on the wave energy resource and the energy captured by a point absorber. *Ocean Engineering*, 67, pp.13-26.
- Moriarty, P. y Honnery, D., 2007. Intermittent renewable energy: The only future source of hydrogen?. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, pp.1616-1624.
- Muller-Steinhagen, H. y Nitsch, J., 2005. The contribution of renewable energies to a sustainable energy economy, *Process Safety and Environmental Protection*, 83(B4), pp. 285-297.
- Munguia, N., Velazquez, L., Perez, R., Rincoin, D., Marin, M., Giannetti, B.F., Almeida, C.M.V.B. and Agostinho, F., 2015. Sustainability Assessment of Alternatives for Heat Generation and Transfer in Saunas. *Journal of Environmental Protection*, 6, pp.1378-1393.
- Negro, S., Alkemade, F. & Hekkert, M., 2012. Why does renewable energy diffuse so slowly? A review of innovation system problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp.3836-3846.

- Olvera, A., Prado, E., y Czitrom, S., 2007. Parametric resonance in an oscillating water column. *Journal of Engineering Mathematics*, 57, pp.1-21.
- Orazov, B., O'Reilly, O. y Savaş, Ö., 2010. On the dynamics of a novel ocean wave energy converter. *Journal of Sound and Vibration*, 329, pp. 5058-5069.
- Orazov, B., O'Reilly, O. y Savaş, Ö., 2010. Fig. 2. Illustration of the operation of the water intake mechanism. [Imagen online] Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X1000461X#>>[Consultado el 02/IX/2014].
- Panwar, N., Kaushik, S. y Kothari, S., 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), pp.1513-24.
- Peacock, A., Jenkins, D., Ahadzi, M., Berry, A., & Turan, S., 2008. Micro wind turbines in the UK domestic sector. *Energy and Buildings*, 40, pp.1324-1333.
- Pelc, R. y Fujita, R., 2002. Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26, pp.417-479.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2014. The First Decade: 2004 2014, 10 Years of Renewable Energy Progress, Paris: REN21.
- Rezaie, B., Esmailzadeh, E., y Dincer, I., 2011. Renewable energy options for buildings: Case studies. *Energy & Buildings*. 43, pp.56-65.
- Rhinefrank, K., Schacher, A., Prudell, J., Brekken, T., Stillinger, C., Yen, J., Ernst, S., Von Jouanne, A., Amon, E., Paasch, R., Brown, A. y Yokochi, A., 2012. Comparison of Direct-Drive Power Takeoff Systems for Ocean Wave Energy Applications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37, pp.35-44.
- Santos, M., Salcedo, F., Ben Haim, D., Mendia, J., Ricci, P., Villate, J., Khan, J., Leon, D., Arabi, S., Moshref, A., Bhuyan, G., Blavette, A., O'Sullivan, D., Alcorn, R., 2011. Integrating Wave and Tidal Current Power: Case Studies through Modelling and Simulation, Canada: OES-IA.
- Sarmento, A., 1992. Wave flume experiments on two-dimensional oscillating water column wave energy devices. *Experiments in Fluids*, 12, pp.12-12.
- Scruggs, J. y Jacob, P., 2009. ENGINEERING: Harvesting Ocean Wave Energy. *Science*, 323, pp.1176-1178.
- Setoguchi, T., Santhakumar, S., Maeda, H., Takao, M. y Kaneko, K., 2001. A review of impulse turbines for wave energy conversion. *Renewable Energy*, 23, pp.261-292.
- Şentürk, U. y Özdamar, A., 2012. Wave energy extraction by an oscillating water column with a gap on the fully submerged front wall. *Applied Ocean Research*, 37, pp.174-182.
- Sheng, W., Alcorn, R., y Lewis, T., 2014. Physical modelling of wave energy converters. *Ocean Engineering*, pp.84, 29-36.
- Sims, R., 2004. Renewable energy: a response to climate change. *Solar Energy*, 76, pp.9-17.
- Skoglund, A., Leijon, M., Rehn, A., Lindahl, M. y Waters, R., 2010. On the physics of power, energy and economics of renewable electric energy sources - Part II. *Renewable Energy*, 35, pp.1735-1740.
- Starner, T., 1995. Human powered wearable computing. [Cambridge, Mass.], [Perceptual Computing Section, Media Laboratory, Massachusetts Institute of Technology].
- Sun, P., Wu, J., Wang, R. y Xu, Y., 2011. Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools. *Energy & Buildings*, 43, pp.1071-1080.
- Symonds, D., Davis, E. y Ertekin, R., 2010. Low-power autonomous wave energy capture device for remote sensing and communications applications. En IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), *Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, Georgia, 12-16 Septiembre 2010. Atlanta: Institute of Electrical and Electronics Engineers .
- Tagliafico, L., Scarpa, F., Tagliafico, G., y Valsuani, F., 2012. An approach to energy saving assessment of solar assisted heat pumps for swimming pool water heating. *Energy & Buildings*, 55, pp.833-840.
- Triantistourna, E., Spyropoulou, K., Theofylaktos, C., Droutsa, K., Balaras, C., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., Lazaropoulou, G., y Papanikolaou, N., 1998. Energy conservation strategies for sports centers: Part B. Swimming pools. *Energy and Buildings*, 27, pp.123-135.
- Truong, D. y Ahn, K., 2014. Development of a novel point absorber in heave for wave energy conversion. *Renewable Energy*, 65, pp.183-191.
- U.S. Energy Information Administration, 2013. *International energy outlook*, Washington, U.S.: Energy Information Administration.
- Visa, I., Moldovan, M., Comsit, M. y Duta, A., 2014. Improving the renewable energy mix in a building toward the nearly zero energy status. *Energy and Buildings*, 68, pp.72-78.
- Wolfe, P., 2008. The implications of an increasingly decentralised energy system. *Energy Policy*, 36, pp.4509-4513.
- Yavuz, H., Mistikoğlu, S. y Stallard, T., 2011. Processing irregular wave measurements to enhance point absorber power capture performance. *Ocean Engineering*, 38, pp.684-698.
- Yuan, X., Wang, X. y Zuo, J., 2013. Renewable energy in buildings in China—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 24, pp1-8.

- Yuce, B., Li, H., Rezgui, Y., Petri, I., Jayan, B. y Yang, C., 2014. Utilizing artificial neural network to predict energy consumption and thermal comfort level: An indoor swimming pool case study. *Energy and Buildings*, 80, pp.45–56.
- Zabihian, F. y Fung, A., 2011. Review of marine renewable energies: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp.2461-2474.
- Zhang, D., Aggidis, G., Wang, Y., McCabe, A. y Li, W., 2013. Experimental results from wave tank trials of a multi-axis wave energy converter. *Applied Physics Letters*. 103(10).
- Zhang, Y., Sheng, S., You, Y., Wu B. y Liu, Y., 2014. Research on energy conversion system of floating wave energy converter. *China Ocean Engineering*, 28 (2), pp.105-113.
- Zuo, J., Zillante, G., Wilson, L., Davidson, K. y Pullen, S., 2012. Sustainability policy of construction contractors: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16, pp.3910-3916.

ANEXO 1.

3D de las instalaciones de la piscina



ANEXO 2.

Código para lectura de datos en Matlab

```
clc; clear all; close all;

a = arduino ('COM3'); % puerto del arduino
in1 = 0;% pin del arduino
in2 = 1;%pin del arduino segundo pot
tic; % inicio de conteo (del sistema)
i = 0; %variable
%Obtener el Path de la carpeta Actual
[stat,struc] = fileattrib;
PathCurrent = struc.Name;

for n=1
%crear las rutas (Path) para carpetas y archivos
FolderName = ['experiencia' num2str(n)];
PathFolder = [PathCurrent '/RESULTADOS2/' FolderName];
NameFile = [PathFolder '/readme.txt'];
Nameexcel = [PathFolder '/hoja.xls'];

%operacion del programa
%toc mide el tiempo transcurrido desde la ultima ejecucion de tic
while toc < 300
    i=i+1; % incrementos de la variable de control
    time(i)=toc; % crea un vector que contiene los difetentes momentos
de
    % toc
    v1(i)=(a.analogRead(in1))/256; % vector que almacena los valores
muestrados de
    %tension en cada ciclo de ejecucion
    v2(i)=(a.analogRead(in2))/256;
    figure(1); % ventana para graficar
    plot (time,v1,'b',time,v2,'g--'); % grafica los valores de tension
muestrados
    title ('adquisicion de datos con arduino');
    xlabel ('tiempo transcurrido de operacion');
    ylabel ('nivel de voltaje del sensor');

    pause(0.80);

end

% crear las carpetas para guardar los resultados
mkdir([PathCurrent '/RESULTADOS2'], FolderName);

% crear un archivo .txt con datos
fileID = fopen(NameFile,'w');
fprintf(fileID, '\n%6s %12s\n\n', 'v1', 'v2');
fprintf(fileID, '%6.2f %12.8f\n', v1, v2);
fprintf(fileID, '\n\nTiempo Simulación acumulado: %f segundos\n', toc);
```

```
fclose(fileID);

% guardar workspace en la carpeta
save([PathFolder '/workspace.mat']);
save([PathFolder '/v1v2.mat'], 'v1', 'v2' );

%Guardar datos en archivo EXCEL
titulo = {'v1', 'v2'};
datos = vertcat(v1,v2)';
xlswrite(Nameexcel, titulo, 1, 'A1');
xlswrite(Nameexcel, datos, 1, 'A2');
end

%% otros comandos utiles
%[x,y]=ginput(N) // donde N es el numero de puntos cuyas cordenadas
%queremos obtener
```