



## DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN ROBOT ACUÁTICO PARA MONITOREO DE ARRECIFES

**Aurora Aparicio Castillo**

*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctricas Unidad Azcapotzalco*  
*[aaparicioc@gmail.com](mailto:aaparicioc@gmail.com)*

**Hugo Armando Guerra Calva**

*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctricas Unidad Azcapotzalco*  
*[hguerra14@hotmail.com](mailto:hguerra14@hotmail.com)*

**José Victoriano Chávez Aguilar**

*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctricas Unidad Azcapotzalco*  
*[jvchavez.aguilar@gmail.com](mailto:jvchavez.aguilar@gmail.com)*

### Resumen

*Los arrecifes de coral, o también llamados arrecifes coralinos, son estructuras subacuáticas parecidas a grandes rocas. Investigaciones como las del doctor Eric Jordán, investigador en biología marina de la Universidad Nacional Autónoma de México, han mencionado que los corales se encuentran en riesgo por el impacto directo e indirecto que producen las múltiples actividades humanas en su ambiente, tales como son la pesca, el turismo y la contaminación. Este proyecto nace debido a la gran importancia de los arrecifes de coral para el ser humano. El propósito es servir de primer contacto con el tema y el desarrollar paso a paso el diseño estructural de un robot acuático que permita el monitoreo de los arrecifes para tener un mapeo de la zona, así como los cambios que suceden dentro de éste.*

*Palabras clave: Arrecifes, coral, robot acuático, monitoreo*

Se estima que los ambientes coralinos aportan el 10% de la producción pesquera mundial, el 50% del carbonato de calcio producido a nivel global y arena para la consolidación de innumerables playas (Flores, 2006). Estudios recientes muestran que el 75% de los arrecifes de coral en el mundo se encuentran en peligro

por la actividad humana y el cambio climático. Lo anterior proyecta que para el 2030 el 90% estarán amenazados y para el 2050 todos se encontrarían en riesgo. Estos hábitats albergan más de 8,000 especies de peces, lo que representa casi el 25% de todas las especies de peces marinos conocidos hasta ahora.

### 1. Árbol de Funciones

En la Figura 1 se encuentra un diagrama dividido en los diferentes sistemas que debe de componer el robot y las diferentes opciones que se tomarán en cuenta en las matrices morfológicas cuyo objetivo será la comparación de estos elementos.

Principales sistemas del Robot:

- El sistema de alimentación
- En el sistema de monitoreo
- El sistema de iluminación
- El sistema mecánico de movimiento
- El sistema de control
- Selección de los materiales
- La interfaz es la comunicación usuario-máquina



Figura 1. Árbol de Funciones

### 2. Descripción de las Funciones de cada Sistema

2.1 Sistema de alimentación. Dentro del diseño debe de tener un tiempo mínimo, en el cual debe de durar el robot en funcionamiento, a partir del uso de los componentes que se utilizaran.

2.2 Sistema de monitoreo. El monitoreo se encargará de la visualización e iluminación de lo que será nuestro campo de estudio.

2.3 Sistema mecánico de movimiento. El sistema mecánico nos permitirá desplazarnos dentro del agua ya sea a través de aletas o hélices.

2.4 Sistema de control. El sistema de control permitirá los movimientos requeridos para que el robot se pueda desplazar de punto a otro.

2.5 Selección de materiales. Se llevará a cabo para que los materiales seleccionados funcionen de la mejor manera, no se desgasten ni debiliten por su uso dentro del mar.

2.6 Interfaz de usuario. Este permitirá que el usuario le sea posible hacer uso del robot para lograr una mejor visualización del entorno.

### 3. Diseño de Ingeniería

En esta sección se explica los diferentes materiales que se tienen al alcance para el diseño del robot, especificaciones técnicas de cada uno de éstos, así como una comparación de ventajas y desventajas que se presentan, con ello hacer una selección oportuna del material empleado en este proyecto.

Podemos observar en la Figura 2 el diseño del robot acuático para el monitoreo de arrecifes, en el cual ya se encuentra acoplado los motores, y unida la estructura.

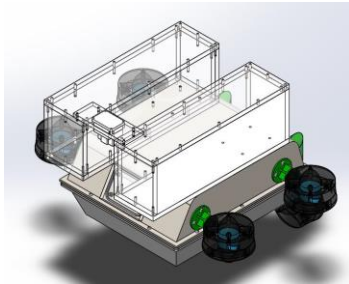


Figura 2. Vista en Isométrico del Robot Acuático

### 3.1 Selección de Materiales

**Acero:** Los aceros inoxidable pertenecen a un grupo de aceros altamente aleados diseñados para proporcionar gran resistencia a la corrosión.

Los aceros inoxidable se pueden encontrar en tres grandes ramas:

1. Aceros inoxidable austeníticos
2. Aceros inoxidable ferríticos
3. Aceros inoxidable martensítico

En la Tabla 1 se observa las características cada grupo, de ésta podemos observar que de acuerdo con las condiciones en las que se encontrará el robot acuático, es conveniente utilizar los aceros inoxidable austeníticos.

Tabla 1. Características de los Aceros Inoxidables

Grupo	Aceros inoxidable austeníticos	Aceros inoxidable ferríticos	Aceros inoxidable martensíticos
<b>Características</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Composición: 18% Cr, 8% Ni</li> <li>✓ Más resistente de los 3 a la corrosión</li> <li>✓ No son magnéticos</li> <li>✓ Muy dúctiles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Composición: 15 a 20% Cr, poco C, 0% Ni.</li> <li>✓ Son magnético</li> <li>✓ Menor ductilidad y resistencia ante los austeníticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Composición: Hasta 18% Cr, 0% Ni, mayor contenido de C que los ferríticos</li> <li>✓ Fuerte, duro</li> <li>✓ Resistente a la fatiga</li> <li>✓ No tan resistente a la corrosión</li> </ul>

Los aceros inoxidable pertenecientes al grupo Austenítico, son los AISI 316 y 304. A continuación, en la Tabla 2 se enumeran las características que cada acero aporta. (Carbone Stainless Steel, 2018).

Tabla 2. Composiciones de Acero Inoxidable AISI 304 y 316 (ASM International, 1990)

Tipo	Fe	Cr	Ni	C	Mn	Mo
304	69	19	9	0.08	2	0
316	65	17	12	0.018	2	2.5

Como podemos observar, la que presenta mejores características para nuestro propósito es el AISI 316.

**Acrílico:** El acrílico será usado para permitir la visión de la cámara con el exterior y también donde el sistema de iluminación será colocado, puesto que permite la visibilidad adecuada y la resistencia al agua.

Los acrílicos poseen resistencia mecánica moderada, buenas propiedades ópticas y resistencia a la intemperie.

En la siguiente tabla se observan las características mecánicas y las propiedades con las que cuenta el acrílico.

Tabla 3. Características de los acrílicos

	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Resistencia a la intemperie	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Resistencia a los ácidos débiles	No es atacado	No es atacado	No es atacado	No es atacado
Resistencia a los ácidos fuertes	No es atacado	No es atacado	No es atacado	No es atacado
Resistencia a los álcalis débiles	No es atacado	No es atacado	No es atacado	No es atacado
Resistencia a los álcalis fuertes	Es atacado	Es atacado	Es atacado	Es atacado
Ácidos oxidantes	Es atacado	Es atacado	Es atacado	Es atacado

**Neopreno:** El Neopreno destaca por su única combinación de propiedades que lo adapta a miles de aplicaciones en diversos ambientes (Hulera Vulcano, 2018).

Tabla 3. Características Técnicas

Dureza	60 a 70 shore “A”
Resistencia a la tensión	600 psi
Temperatura optima de trabajo	20°C-+80°C
Elongación	400%

Con los datos de la tabla 3 se puede ver que el neopreno proporciona características ideales para que el robot pueda ser hermético, además de que con la investigación se logró ver que el neopreno presenta diferentes usos como:

- Juntas
- Empaques
- Mangueras
- Revestimientos para la corrosión
- Aislamiento del ruido

Con estas aplicaciones se puede entender que es un buen material para que resguarde el paso de fluido dentro del robot.

### 3.2 Flotabilidad y Estabilidad

Un cuerpo en un fluido, ya sea que flote o que esté sumergido, experimenta una fuerza hacia arriba igual al peso del fluido que desplaza.

La fuerza de flotación actúa en forma vertical hacia arriba a través del centroide del volumen desplazado, y se define en forma matemática por medio del principio de Arquímedes, como sigue:

$$F_b = \gamma_f V_d$$

$$F_b = \text{Fuerza de flotación}$$

$$\gamma_f = \text{Peso específico del fluido}$$

$$V_d = \text{Volumen desplazado del fluido}$$

$$F_b = \left(1027 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.02520 \text{m}^3) = 253.8867 \text{N}$$

$$\Sigma F_v = 0$$

$$F_b - W + F_e = 0$$

$$\text{Ecuación 3.2.2}$$

$$F_e = W - F_b$$

$$\text{Ecuación 3.2.3}$$

$$F_e = 245.25 - 253.8867 = -13.636 \text{N}$$

$$\therefore F_b - W - F_e = 0$$

Un cuerpo sumergido cuyo centro de gravedad G está directamente arriba del B es inestable y cualquier perturbación hará que este cuerpo se voltee. Un cuerpo para el cual G y B coinciden es neutralmente estable. Para esos cuerpos no existe tendencia de voltearse o enderezarse por si mismo. Tal como se muestra en la Figura 3.

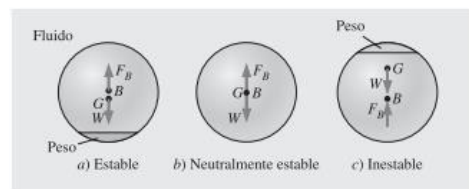


Figura 3. Casos de Estabilidad

## 4. Diseño del Sistema de Control

### Motor para movimiento del Robot

El motor comercial seleccionado es el T100 Thruster, de acuerdo con el fabricante es ideal para robots marítimos. (BlueRobotics, 2018) y especifica que soporta hasta 100 metros de profundidad (3 nudos), lo que permite su uso en el robot, ya que se pretende sumergir a una

profundidad de 10 metros que es menor a la del fabricante, además el robot trabajara a 300 RPM como mínimo y a un máximo de 1200 RPM a 4 Amper, ver figura 4.

	Parámetros	
Díámetro de la hélice	3.0"	76.2 mm
Díámetro del centro	1.6"	40mm
Inclinación(ángulo)	15 grado (en el 75% del	
Inclinación(viaje)	1.9 in/	48 mm/rev

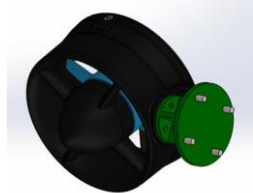


Figura 4. Motor T100

Tabla 4 Especificaciones motor T100 Thruster

Performance		
Maximum Forward Thrust	2.36 kg	5.2 lb
Maximum Reverse Thrust	1.85 kg	4.1 lb
Minimum Thrust	0.01 kg	0.02 lb
Rotational Speed	300-4200 rev/min	
Electrical		
Operating Voltage	6-16 volts	
Max Current	12.5 amps	
Max Power	135 watts	
Phase Resistance	0.24 +/- 0.01 Ohms	
Phase Inductance (@ 1 kHz)	0.120 +/- 0.008 mH	
Physical		
Length	102 mm	4.0 in
Diameter	100 mm	3.9 in
Weight in Air (with 1m cable)	0.65 lb	295 g
Weight in Water (with 1m cable)	0.26 lb	120 g

### Motor M100 para el Propulsor

El M100 Motor es un motor eléctrico sin escobillas para su uso bajo el agua. Es resistente a la presión y robustos frente a las duras condiciones del mar. Muchos de los componentes del motor se utilizan en el propulsor T100 (BlueRobotics, 2018).

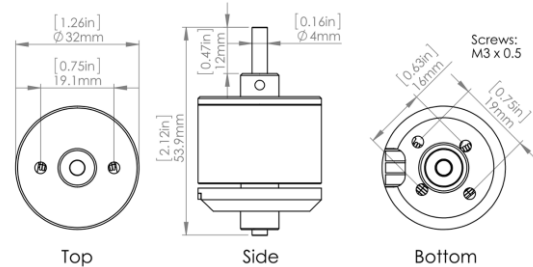


Figura 5. M100 Dimensiones

### Hélice T100

En la siguiente tabla se pueden observar las dimensiones de la hélice del T100.

Tabla 5. Especificaciones de Hélice

### Controlador Electrónico de Velocidad (ESC)

Los ESC's o controles de velocidad electrónicos son circuitos que tienen como propósito variar la velocidad de un motor eléctrico.

Este controlador ayudará a la comunicación entre la Raspberry y el motor, ya que de acuerdo a la Figura 6 cuenta con dos cables en los cuales se le enviará una señal y controlar el ancho de pulso mediante el PWM.

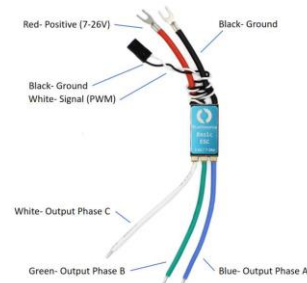


Figura 6. Conexiones del ESC

Tabla 6. Datos Técnicos del ESC

Datos eléctricos:	Voltaje 7-26 V	Corriente 30 A
Datos físicos:	Longitud 35 mm	Ancho 17.1 mm Alto 5.5 mm Peso 16.3 g
Características del pulso:	Señal de voltaje 3.3-5 V	frecuencia máxima 400Hz

### Bomba de Agua

El robot en condiciones iniciales necesitará flotar para hacer un mapeo de la zona, cuando éste finalice es necesario poder sumergirlo, para ello se utiliza el principio del submarino, el cual contiene un compartimiento interno para llenado de agua marina. Después de haber concluido el trabajo y se requiera que el robot emerja, se ocupará una bomba que permita sacar el agua interna del compartimiento hacia el mar. La bomba de agua que se ocupará tiene las siguientes características técnicas mostradas en la tabla 7.

Tabla 7. Datos técnicos de la bomba de agua modelo AD20P-1230C

Voltaje nominal	12 V
Velocidad máxima de flujo	240 L/H
Esperanza de vida	20,000 horas
Tipo:	Bomba centrífuga de una sola etapa
Voltaje mínimo:	10 VDC
Rango de trabajo de voltaje	10-14 VDC
Potencia nominal	4.8 W
Corriente nominal	400±20(mA)
Grado de protección	IP IP68
Dimensiones de la bomba	L54.4*W52*H40.8(mm)
Diámetro exterior de entrada / salida	8.5 mm / 8.5 mm

### Sensor MPU6050. (IvenSense Inc, 2018)

El módulo MPU6050 contiene un giroscopio de tres ejes con el que se puede medir velocidad angular y un acelerómetro también de 3 ejes con el que se mide los componentes X, Y y Z de la aceleración, el acelerómetro trabaja sobre el

principio piezo eléctrico y posee además un sensor de temperatura.



Figura 7. Sensor MPU6050

### Acelerómetro

Así pues, el sensor MPU-6050 (figura 7) es una pequeña pieza tecnológica de procesamiento de movimiento. El cual combina un MEMS (Sistemas Micro electromecánicos) giroscopio de 3 ejes y un MEMS acelerómetro de 3 ejes en la misma pastilla de silicio junto con un DMP™ (Movimiento Digital Processor™), que es capaz de procesar los algoritmos de movimientos complejos de 9 ejes (MotionFusion™) en una placa.

### Electroválvula de accionamiento directo 2/2 vías. (U.S Solid, 2018)

Se ha seleccionado una electroválvula para el paso de caudal (agua) normalmente cerrada, ya que a partir de una señal eléctrica la cual permitirá abrir el paso del agua en el tanque de lastre haciendo que el robot se sumerja y a su vez la comunicación con la motobomba para extraer el agua del mismo tanque y así pueda el robot emerger a la superficie. En la Tabla 8 se puede observar que, al ser de Nylon, no permitirá que exista una corrosión debido a la salinidad del agua de mar.

Tabla 8. Ficha técnica electroválvula

Fluidos	Agua, aceite, líquidos y fluidos agresivos
Temperatura del fluido	-5°C - +80°C
Material del cuerpo	Nylon
Material del orificio	Nylon
Modo de Operación	Normalmente Cerrada
Tamaño de Orificio	1/8"
Voltaje	12V

### Sensor de Nivel de Agua Optomax Digital LLC200D3SH-LLPK1

Dentro de la carcasa del sensor se encuentra un LED infrarrojo (IR) y un fototransistor. Al aire libre, la luz IR del LED rebota de nuevo al sensor, con esto se sabe que se encuentra seco. Cuando la punta de detección se sumerge en líquido, la luz IR se escapa y el transistor se apaga. El sensor puede detectar la presencia o ausencia de casi cualquier tipo de líquido; aceite o agua. Es insensible a la luz ambiente y no se ve afectado por la espuma cuando está en el aire o por pequeñas burbujas cuando está en líquido.

Tabla 9. Datos técnicos del sensor de nivel

Voltaje de suministro	4.5 VDC a 15.4 VDC
Corriente de suministro	2.5 mA máx
Disipador y fuente de corriente	100 mA
Temperaturas de funcionamiento	-25 ° C a + 80 ° C
Temperaturas de almacenamiento	-30 ° C a + 85 ° C
Presión de funcionamiento	7bar

### Batería Hyperion G5 50C 4S 4000mAh LiPo Battery

Para la adecuada selección de la batería, se realiza el siguiente calculo:

$$C = xT$$

Donde: X=El amperaje a utilizar T=El tiempo C=La capacidad de la batería en Amper-hora Por lo siguiente se puede deducir que si trabajamos a 4 Amperes (suma del consumo de corriente de componentes excepto Rasberry)

para un tiempo de 1 hora la capacidad es la siguiente:

$$C = 4 A * 1Hrs.= 4000mAh$$



Figura 8. Imagen Batería LiPo

### G5 50Cmax 2S 1300mAh 4.2V-Max LiPo.

Esta batería se seleccionó para poder alimentar a la Raspberry ya que, de acuerdo con el fabricante en sus especificaciones técnicas, la Raspberry Pi 3 Modelo B debe ser alimentada a 5 V con hasta 2.5 A (Raspberry, 2018).

### Cable de comunicación.

El cable de comunicación permitirá la transferencia de señales y datos entre el robot y la interfaz, con una distancia de cable de 150 metros, además de un carrete para la retracción como se ve en la Figura 9. El Cable cuenta con las conexiones para los motores, y señales de estos.



Figura 9. Carrete de Cable (datos)

### Sello en conexión con el cable

Se agrega un sello a la entrada del cable hacia el robot para de esta manera evitar cualquier filtración de agua, así como errores en la señal, se utiliza un sello Roxtec, tal cual como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Sello Roxtec RS 25

### 5. Diagrama de Control

En la Figura 11 se puede observar que la comunicación principal será entre la Raspberry y la PC. De ahí la Raspberry será la que controle los diferentes sensores y motores que se ocupan en el robot. Para que las electroválvulas se activen, será necesario la lectura del sensor de nivel de agua, ya que éste nos permitirá conocer el estado actual del compartimento interno. La cámara y los leds estarán activos, y la transmisión de datos pasará por la Raspberry hacia la PC mediante cable UTP. Se ocupará el control de velocidad para manejar a cada uno de los motores y de esta manera poder realizar el movimiento del robot.

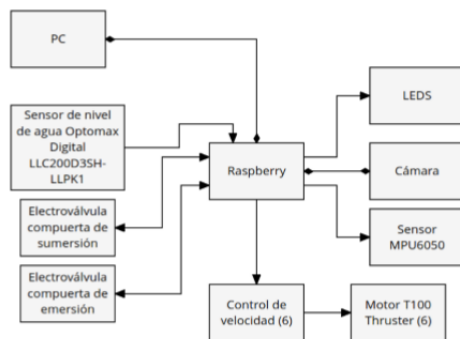


Figura 11. Diagrama a bloques del sistema de control del robot

### 6. Etapa de Potencia

Para la etapa de potencia se tomó en cuenta que las baterías cumplieran con las especificaciones técnicas del distribuidor y el amperaje seleccionado, por lo que se empleó como protección un diodo y un fusible para

proteger al variador de velocidad, así como un LM7805 que nos permite asegurar que a la Raspberry le llegue 5 V. Estos estarán conectados a señales de la Raspberry, cuando se necesite cargar las baterías de los motores, se activarán los relay, permitiendo que mediante un conector del robot se pueda conectar a un tomacorriente.

### 7. Vistas Seccionadas del Robot

En la Figura 12 se muestra una sección central vista frontalmente donde se puede ver el tanque de lastre, la motobomba, las válvulas, la Raspberry, el sensor de nivel y la instalación del sistema de propulsión. En esta figura es fácil apreciar la conexión de las válvulas con la motobomba y el tanque de lastre donde la electroválvula de la derecha es la entrada del caudal al tanque de lastre y la motobomba con la otra electroválvula es la salida del agua con ello va a ser posible que el robot emerja.

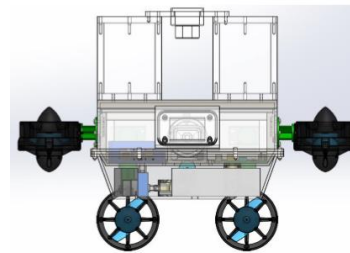


Figura 12 Corte central diseño final

En la Figura 13 se observa un corte seccionado por la vista lateral donde se percibe la base de la cámara y el acrílico donde permitirá la vista de la cámara.



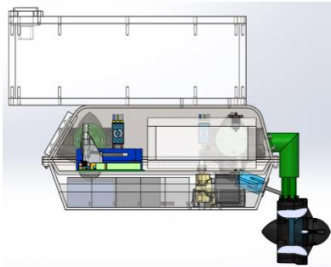


Figura 13. Diseño final sección vista lateral

## 8. Conclusiones

De acuerdo con el QFD, las necesidades como profundidad, tamaño adecuado, duración de batería que son las más importantes se cumplen perfectamente con la selección de componentes y materiales realizados. Así también, gracias a la cámara de video que se conecta por la Raspberry, es posible visualizar el entorno del robot una vez que se encuentre dentro del mar, permitiendo al cliente o investigador conocer de mejor manera el estado actual del arrecife y de esta manera se podrá crear una campaña de conciencia para preservar mejor los arrecifes.

## 9. Referencias

AF. (01 de noviembre de 2018). Así funciona el motor de corriente directa o continua. Obtenido de [http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af\\_motor\\_cd/af\\_motor\\_cd\\_6.htm](http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_motor_cd/af_motor_cd_6.htm)

AquaWorld. (27 de mayo de 2015). ¿Cómo se forman los arrecifes de coral? Obtenido de <https://aquaworld.com.mx/como-se-forman-los-arrecifes-de-coral/>

Arduino. (01 de noviembre de 2018). Introduction. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

ASM International. (1990). Metals Handbook Vol1. Properties and Selection: Iron, steels and High Performance alloys. Ohio: ASM International.

Barrientos, A. (1997). Fundamentos de robótica. Madrid: Mcgraw-Hill. BlueRobotics. (01 de noviembre de 2018).

Blue Robotics. Obtenido de Blue Robotics: <https://www.bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t100-thruster/>

BlueRobotics. (01 de Noviembre de 2018). M100 Motor Documentation. Obtenido de BlueRobotics: <http://docs.bluerobotics.com/thrusters/motors/>

BlueRobotics. (01 de Noviembre de 2018). T100 Propeller SET. Obtenido de Blue Robotics: <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t100-propeller-set-r1/>

Carbone Stainless Steel. (01 de Noviembre de 2018). Ficha técnica del acero inoxidable. Obtenido de <https://www.empresascarbhone.com/pdf/ficha-tecnica-del-aceroinoxidable.pdf>

Cátedra Naranja. (01 de noviembre de 2018). Interfaces usuario-máquina. Obtenido de [http://catedranaranja.com.ar/wp/wp-content/uploads/interfaces\\_usuario\\_maquina.pdf](http://catedranaranja.com.ar/wp/wp-content/uploads/interfaces_usuario_maquina.pdf)

CLR. (01 de noviembre de 2018). Motores de corriente continua y alterna: selección y consejos. Obtenido de Motores de corriente continua y alterna: selección y consejos

CNN Español. (08 de enero de 2018). Así se están muriendo los arrecifes coralinos en todo el mundo. Obtenido de LOS ARRECIFES DE CORALES, EN RIESGO DE SER TAN SOLO UN RECUERDO: <https://expansion.mx/tendencias/2018/01/08/asi-se-estamuriendo-los-arrecifes-coralinos-en-todo-el-mundo>

DTG2-Brochure. (01 de noviembre de 2018). Obtenido de Portable & Rugged. Submersible robots: <https://www.deeptrekker.com/wp-content/uploads/DTG2-Brochure.pdf>

EcuRed. (2018 de noviembre de 01). Baterías de Ni-Cd. Obtenido de



EcuRed:

[https://www.ecured.cu/Baterías\\_de\\_Ni-Cd](https://www.ecured.cu/Baterías_de_Ni-Cd)

EcuRed. (01 de noviembre de 2018). Batería de Ion de Litio. Obtenido de [https://www.ecured.cu/Batería\\_de\\_Ion\\_de\\_Litio](https://www.ecured.cu/Batería_de_Ion_de_Litio)

EcuRed. (01 de noviembre de 2018). Baterías de Ni-MH. Obtenido de EcuRed: [https://www.ecured.cu/Baterías\\_de\\_Ni-MH](https://www.ecured.cu/Baterías_de_Ni-MH)

ELAND Cables. (01 de noviembre de 2018). Cables Marinos y de alta mar. Obtenido de <https://www.elandcables.com/es/electrical-cable-and-accessories/cables-bytype/marine-and-offshore-cable>

IBUBBLE. (01 de noviembre de 2018). Technical specifications. Obtenido de Technical specifications: <https://ibubble.camera/features/technical-specifications/> Informática Moderna. (01 de noviembre de 2018). Camara de video digital - videocamara