

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**Diseño conceptual de un vehículo submarino de apoyo para el
mantenimiento preventivo de los cordones de soldadura en la carena de los
buques**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO
DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA
MECATRÓNICA**

AUTOR

Martín Antonio Bañón Espinoza

ASESOR:

Michel Siguenza Astoquillca

Lima, enero, 2021

RESUMEN

En la actualidad, la inspección de los cordones soldados ubicados en la obra viva (carena) de los buques es un proceso raramente realizado debido al tiempo y costo que este implica. En respuesta a esto se han postulado distintas soluciones como el uso de buzos experimentados o desplazar el buque a un dique seco, pero estos siguen siendo poco eficientes.

Por esta razón, en el presente trabajo de investigación se expone el diseño conceptual de un vehículo submarino capaz de sumergirse a aguas poco profundas; y de un algoritmo de visión con la capacidad de funcionar en un entorno tan variable como es el entorno marino. El vehículo constará de una serie de propulsores y sensores IMU, que le permitirán desplazarse en el agua, y mantenerse estable, o en una posición fija cuando se encuentre detenido. Además, contará con sensores de humedad, temperatura y profundidad, que permitirán monitorear al vehículo desde la interfaz, la cual será una laptop. Esta tendrá, un software que podrá procesar la imagen y clasificar los defectos de la imagen. Adicionalmente, el software permitirá comandar todas las acciones del vehículo.

Para este trabajo de investigación, se realizó un análisis de los antecedentes, lo cual incluye definir los objetivos, la metodología y el alcance del trabajo de investigación. Además, de investigar acerca de las tecnologías existentes. Luego, se procedió a realizar el diseño conceptual del sistema. Y se finalizó, describiendo los diagramas que conforman el diseño preliminar del mismo.

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
INDICE DE FIGURAS	iii
INDICE DE TABLAS	v
INTRODUCCION	1
ANTECEDENTES	2
1.1. PROBLEMÁTICA.....	2
1.2. PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	5
1.3. OBJETIVOS	6
1.4. ALCANCE.....	7
1.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	7
1.6. MARCO TEÓRICO.....	9
1.7. ESTADO DEL ARTE.....	14
DISEÑO CONCEPTUAL	24
2.1. LISTA DE REQUERIMIENTOS	24
2.2. BLACK BOX.....	29
2.3. ESTRUCTURA DE FUNCIONES	31
2.1. CONCEPTOS DE SOLUCIÓN	37
2.2. EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA	42
2.3. CONCEPTO ÓPTIMO	48
DISEÑO PRELIMINAR	49
3.1. MODELO 3D.....	49
3.2. DIAGRAMA DE OPERACIONES	50
3.3. ARQUITECTURA DE HARDWARE.....	53
3.4. FLUJOGRAMA GENERAL DEL SISTEMA	54
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXO A: Matriz Morfológica	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Porosidad en unión soldada	3
Figura 1.2. Servicio de inspección	4
Figura 1.3. Ejemplo de dique flotante y seco	5
Figura 1.4. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido.....	9
Figura 1.5. Soldadura por alambre tubular con fundente	10
Figura 1.6. Soldadura por Gas Inerte y electrodo de Tungsteno	10
Figura 1.7. Soldadura por arco de metal y gas.	10
Figura 1.8. Clasificación de la soldadura subacuática.	11
Figura 1.9. Esquema de unión soldada.....	12
Figura 1.10. Grietas en juntas a tope.....	13
Figura 1.11. Poros en cordones de soldadura.....	13
Figura 1.12. Cordón irregular.	13
Figura 1.13. Sobreespesor excesivo	14
Figura 1.14. Algoritmo de visión poros	16
Figura 1.15. Algoritmo de visión para salpicaduras	17
Figura 1.16. Algoritmo de visión	19
Figura 1.17. Algoritmo de visión	20
Figura 1.18. Resultados parciales de las etapas.....	21
Figura 1.19. Sensores inerciales tipo MEMS	21
Figura 1.20. Funcionamiento de GPS subacuático.....	22
Figura 1.21. Imagen de ejemplo de K-NN	23
Figura 2.1. Diagrama Black Box del sistema	29
Figura 2.2. Dominio de energía.....	31
Figura 2.3. Dominio de procesamiento/control	32
Figura 2.4. Dominio de software/interfaz	33
Figura 2.5. Dominio de comunicación	34
Figura 2.6. Dominio de sensores.....	34
Figura 2.7. Dominio de actuadores	35
Figura 2.8. Dominio mecánico.....	35
Figura 2.9. Estructura de funciones del sistema	36
Figura 2.10. Bosquejo del concepto de solución 1.	39
Figura 2.11. Bosquejo del interior del vehículo del concepto de solución 1.	40
Figura 2.12. Bosquejo de la interfaz del concepto de solución 2.....	40
Figura 2.13. Bosquejo del interior del vehículo del concepto de solución 2.	41
Figura 2.14. Bosquejo del concepto de solución 3.	41
Figura 2.15. Bosquejo del interior del vehículo del concepto de solución 3	42
Figura 2.16. Gráfica de evaluación técnica-económica.....	47
Figura 2.17. Vehículo del concepto óptimo.	48

Figura 2.18. Vista interior del vehículo del concepto óptimo.....	48
Figura 3.1. Vista externa del modelo 3D del vehículo.	49
Figura 3.2. Vista de sección del modelo 3D del vehículo.	50
Figura 3.3. Diagrama de operaciones para el mantenimiento preventivo del vehículo.....	50
Figura 3.4. Diagrama de operaciones para el mantenimiento preventivo del vehículo.....	51
Figura 3.5. Diagrama de operaciones para instalar el vehículo y la interfaz.	51
Figura 3.6. Diagrama de operaciones para usar el vehículo y la interfaz.	52
Figura 3.7. Diagrama de operaciones para guardar el vehículo y la interfaz.	52
Figura 3.8. Diagrama de arquitectura de Hardware.....	53
Figura 3.9. Flujograma general del controlador	54
Figura 3.10. Flujograma general de la interfaz.....	55



INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Procesos de soldadura.	9
Tabla 1.2. Defectos en soldadura.	13
Tabla 1.3. Comparación entre modelos ROV	15
Tabla 1.4. Descripción del algoritmo de visión de poros	16
Tabla 1.5. Descripción del algoritmo de visión de salpicaduras.....	18
Tabla 1.6. Descripción de las herramientas usadas en el algoritmo.....	19
Tabla 1.7. Definición de los sensores y sistemas de navegación. Elaboración propia	21
Tabla 1.8. Descripción de los algoritmos para clasificación de defectos.....	23
Tabla 2.1. Lista de Exigencias.	26
Tabla 2.2. Conceptos de solución	37
Tabla 2.3. Valor técnico de los conceptos de solución.....	45
Tabla 2.4. Valor económico de los conceptos de solución	47



INTRODUCCION

Los cordones de soldadura son la unión irreversible más usada en el ámbito industrial. En la industria naval se utiliza para la fabricación de submarinos, y buque. La desventaja principal que presentan los cordones de soldadura son las discontinuidades o defectos que se puedan presentar debido a las condiciones bajo las que fueron realizados. Por esta razón, se realizan inspecciones de mantenimiento preventivo de los cordones, para evitar que las discontinuidades se conviertan en defectos y que no se susciten fallas.

Existen pocas empresas que brindan este tipo de servicios. Estas hacen uso de sus buzos experimentados para realizar la inspección, pero este proceso es laborioso y en ciertas ocasiones perjudicial para la salud. Por este motivo, en el presente trabajo de investigación se abarcará el diseño conceptual de un sistema semiautomático sumergible tipo ROV que permita solventar esta problemática.

En el primer capítulo se detallará en profundidad la problemática y la situación actual en la que se encuentra. Además, se mostrará la propuesta de solución a la misma, así como los objetivos a cumplir. Adicionalmente, se realizará una revisión del proceso de soldadura, y los defectos que pueda presentar, y el estado de la tecnología para el diseño del sistema. En el tercer capítulo se realizará el diseño conceptual del sistema, el cual se subdivirá en la evaluación de los requerimientos del mismo, el detalle de las funciones que debe cumplir el sistema, y la elaboración de la matriz morfológica, la cual será base para la elaboración de los conceptos de solución. El capítulo tres finalizará con la evaluación técnico-económica de los conceptos elaborados y la definición del concepto óptimo. En el cuarto capítulo se mostrará un diseño preliminar del sistema mediante la elaboración de los diagramas de operaciones, flujo y arquitectura de hardware del concepto óptimo. Finalmente, se mostrarán las conclusiones del trabajo de investigación.

ANTECEDENTES

En este capítulo se evaluará la problemática a solucionar, la propuesta de solución, la cual se desarrollará en todo el trabajo de investigación. Adicionalmente, se definirán los objetivos generales y específicos, el alcance y la metodología del trabajo que se seguirá para el desarrollo íntegro del trabajo de investigación. Finalmente se investigarán los sistemas, subsistemas, y tecnologías existentes, cruciales para el desarrollo del diseño conceptual.

1.1. PROBLEMÁTICA

La soldadura es un proceso de unión irreversible entre dos elementos metálicos, o dos plásticos. La unión de ambos elementos se consigue mediante la aplicación de calor, presión y, dependiendo del proceso, un material de aporte sobre la junta. Esta es ampliamente usada debido a su facilidad de ejecución, además de la firmeza y resistencia que posee la junta soldada. Según la AWS (Sociedad americana de soldadura), la soldadura se clasifica en soldadura por fusión, y de estado sólido (Groover, 2010).

Los procesos de soldadura por fusión, en especial los que involucran la aplicación de calor mediante un arco eléctrico, son los más utilizados en la industria naval. La desventaja principal de estos procesos son las discontinuidades o defectos que un cordón de soldadura pueda presentar. Algunos ejemplos son: Poros como se aprecia en la figura 1.1, sobre- espesores, salpicaduras, entre otros. Estos pueden presentarse debido al estado del equipo de soldadura, la velocidad y las condiciones bajo las que se ha realizado la soldadura, etc. Una discontinuidad puede derivar en un defecto si excede los límites definidos en la norma AWS D1.1 (AWS, 2015).



Figura 1.1. Porosidad en unión soldada.(Murillo Sigero, 2010)

A su vez, un defecto puede derivar en una falla si es que no se le detecta o repara a tiempo. Con la finalidad de evitar estas situaciones es que se realizan cordones de prueba, a los cuales se les aplican ensayos destructivos, es decir, se los corta para observar la integridad de su interior, o también se opta por realizar ensayos no destructivos, en los cuales se puede realizar una simple inspección visual, o también se utilizan líquidos que penetren en las cavidades presentes en la superficie del cordón de soldadura, para luego revelarlos mediante el uso de un compuesto especial; o, se puede optar por esparcir partículas magnéticas, que luego con el uso de un electro imán se adhieren a las cavidades del cordón. Cabe resaltar que además de realizarse un ensayo previo, se realiza un mantenimiento preventivo en intervalos de tiempo establecidos por el diseñador o el soldador.

En la industria naval, específicamente en los buques, resulta complicado realizar un mantenimiento preventivo a todos los cordones presentes, debido a su extensa longitud. Es por ello, que se recurre a realizar inspecciones semestrales o anuales. Estos controles consisten en la verificación de la integridad total de la maquinaria, lo cual incluye a los cordones de soldadura. Con la finalidad de concretar este proceso, se opta por trasladar el buque a un dique seco, o de recurrir a un buzo experimentado, con conocimientos acreditados en inspección de soldadura, que descienda los 10 o 15 metros que tenga la obra viva o carena del mismo para realizar la inspección. Por estos motivos, en reiteradas ocasiones se opta por posponer estos

controles o no realizarlos. En términos de la compañía KBA Marine, compañía de origen singapurense, movilizar un barco hacia un dique seco para realizar una inspección resulta una tarea extensa, y por esta misma razón, no se realiza con frecuencia. (*Underwater Ship Inspections | Assessing Ship Hull Condition, 2020*)

Por otro lado, empresas como FN Diving de Holanda realizan la inspección de los cordones de soldadura haciendo uso de sus buzos experimentados, como se observa en la figura 1.2. Además, utilizan métodos no destructivos adicionales para realizar la inspección (*Underwater NDT Inspections, 2020*). Este método, aun siendo rápido en comparación a la opción de transportarlo a un dique seco, sigue resultando lento, debido a la necesidad de descender y recorrer la longitud de la carena. Inclusive, puede resultar perjudicial para la salud de los trabajadores. Los buzos se encuentran constantemente expuestos a enfermedades y afecciones durante la ejecución de su trabajo. Por un lado, un cambio rápido de altura o presión puede ocasionar la enfermedad conocida como Barotrauma Ótico, es decir, la lesión del tejido interno de los oídos. A su vez, esta puede causar vértigo, sangrado, inclusive pérdida de la audición. Por otro lado, la expansión del aire almacenado en los pulmones puede causar la rotura de tejido del mismo, causando dolor torácico e insuficiencia respiratoria (Felmer et al., 2020).



Figura 1.2. Servicio de inspección (Underwater NDT Inspections, 2020)

En el Perú, la empresa Servicios Industriales de la Marina (SIMA) brinda los servicios de mantenimiento e inspección haciendo uso de un dique flotante, como se muestra en la figura

1.3, para poder lograr la puesta en seco. Este proceso resulta ser lento y costoso debido a la necesidad de transportar el buque desde su posición original hasta el dique.



Figura 1.3. Ejemplo de dique flotante y seco. (Dique seco flotante, 2020)

Finalmente, la existencia de los ROVs sumergibles abre las puertas a la posibilidad de monitorear construcciones marítimas, inspeccionar buques o tuberías en tiempos bastante cortos, y sin la necesidad de usar buzos profesionales para acceder a aguas profundas. Un ejemplo de estos dispositivos es el SEASAM (Seasam Autonomous Drone) de la empresa Notilo Plus, el cual está destinado a toda esta clase de trabajos. (Notilo Plus, 2020). La mayor desventaja que tienen estos dispositivos es su alto costo para las funciones que uno necesita. Por ejemplo, el modelo mencionado puede descender hasta 100m de profundidad y tiene un precio aproximado de 4000 dólares americanos. La carena del buque tiene en promedio unos veinte metros de profundidad (Bilogistik S.A., 2019), por lo que un ROV con las características del SEASAM resulta poco eficiente.

1.2. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

La propuesta de solución tiene como finalidad facilitar el proceso de inspección visual de la zona sumergida del casco (carena u obra viva) de los buques, ya que es un procedimiento largo, costoso, y, en ocasiones, perjudicial para la salud. El sistema resolverá los problemas de la accesibilidad, iluminación, y costo. El mismo constará de un vehículo submarino remotamente operado mediante una laptop. El vehículo será capaz de sumergirse a un

máximo de 30 metros de profundidad, inclusive a temperaturas bajo cero. Adicionalmente, mediante el uso de una cámara, el vehículo podrá transmitir la imagen del entorno en tiempo real. La laptop, mediante la ejecución de un software, ofrecerá la opción de procesar la imagen para facilitar la visibilidad de las discontinuidades o defectos que este presente. Por todo lo explicado anteriormente, la meta es cumplir con los siguientes requerimientos:

- Minimizar el tiempo del proceso de inspección
- Eliminar la necesidad de descender a examinar los cordones de soldadura.
- Reducir los costos del mantenimiento preventivo de los cordones de soldadura.

1.3. OBJETIVOS

En este apartado se expondrá el objetivo general de este trabajo de investigación, así como los objetivos específicos que lo complementan.

Objetivo General

- Diseñar conceptualmente un sistema semiautomático sumergible (ROV) para la inspección visual en el mantenimiento preventivo de cordones de soldadura en la carena de los buques.

Objetivos Específicos

- Evaluar la problemática de la inspección visual poco eficiente de los cordones soldados ubicados en la carena de los buques.
- Revisar la tecnología disponible para la elaboración de un vehículo submarino capaz de inspeccionar objetos sumergidos
- Elaborar la lista de requerimientos, acto seguido, realizar la estructura de funciones y la matriz morfológica, ambas basadas en la lista.

- Elaborar conceptos de solución para el diseño de un vehículo submarino remotamente controlado que permita transmitir imágenes, en base a la matriz morfológica, y elaborar el concepto óptimo mediante una evaluación técnico-económica.
- Diseñar el concepto óptimo de forma preliminar, mediante un modelo 3D, un diagrama de operaciones del sistema, el diagrama de arquitectura de hardware para visualizar la interacción entre los componentes electrónicos, y un diagrama de flujos del controlador para entender el funcionamiento del vehículo.

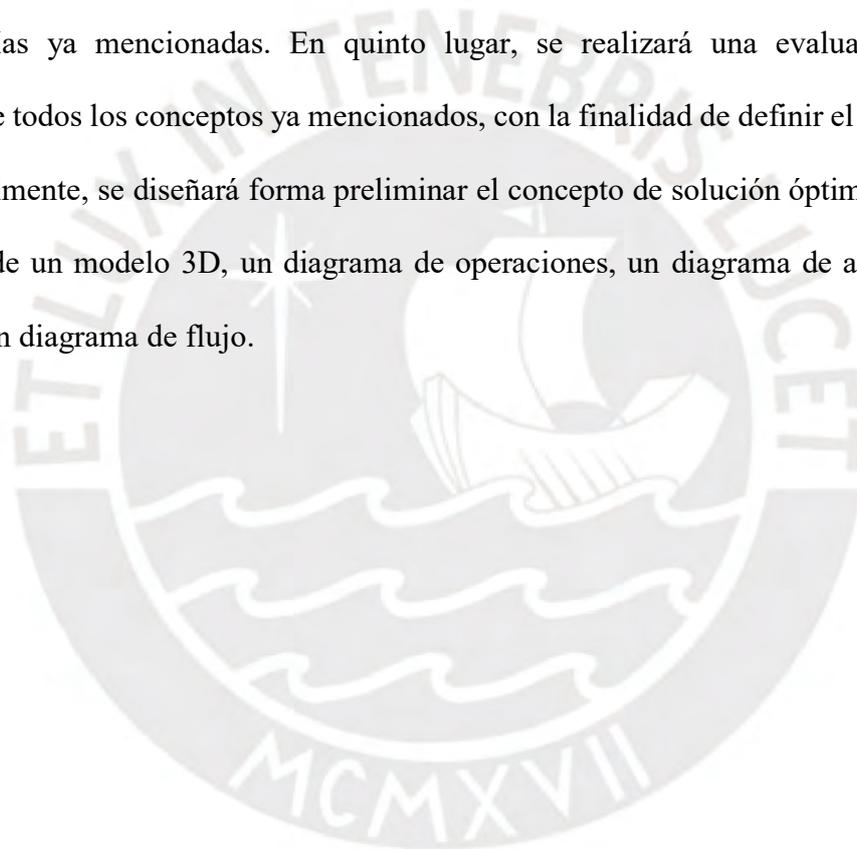
1.4. ALCANCE

El desarrollo de este trabajo de investigación está dirigido a servir de apoyo a inspectores navales o de soldadura, para facilitar la toma de decisiones cuando se realiza un mantenimiento preventivo de los cordones de soldadura localizados en la obra viva de un buque, mediante el uso de un vehículo submarino (ROV), y un algoritmo de visión artificial para la detección de defectos y discontinuidades que puede presentar el cordón.

1.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se trabajará en base a la metodología establecida en la norma VDI 2221 (VDI, 2007). En primer lugar, se procederá a evaluar la problemática mediante la búsqueda de información acerca de: La importancia de los cordones de soldadura en el ensamblaje de máquinas, la relevancia de la inspección y mantenimiento de los mismos, y las empresas que brindan estos servicios. Luego, se elaborará una propuesta de solución delimitando su alcance, especificando para el uso de quienes estaría dirigido y que funciones debe cumplir; finalizando con la definición del objetivo general y los objetivos específicos. En segundo lugar, se recolectará la información necesaria acerca de: Los tipos de soldadura usados en ensamblaje y reparación de buques; los proyectos o productos ya existentes; los distintos algoritmos de visión usados para el seguimiento de cordones soldados y la detección de defectos, y las tecnologías necesarias para la elaboración

del vehículo submarino. En tercer lugar, se detallará la lista de exigencias en base a las necesidades que el usuario presente. Luego, se identificarán las entradas y salidas del sistema definiendo un diagrama black box, además de elaborar un diagrama de estructura de funciones que represente las interacciones de los distintos dominios del proyecto (dominio de actuadores, sensores, control, interfaz, energía, comunicación y mecánico). En cuarto lugar, se propondrán distintas tecnologías existentes para la elaboración de la matriz morfológica de soluciones, seguidamente, se elaborarán esquemas y bosquejos de los distintos conceptos de solución con las tecnologías ya mencionadas. En quinto lugar, se realizará una evaluación técnico-económica de todos los conceptos ya mencionados, con la finalidad de definir el concepto más óptimo. Finalmente, se diseñará forma preliminar el concepto de solución óptimo mediante la elaboración de un modelo 3D, un diagrama de operaciones, un diagrama de arquitectura de software, y un diagrama de flujo.



1.6. MARCO TEÓRICO

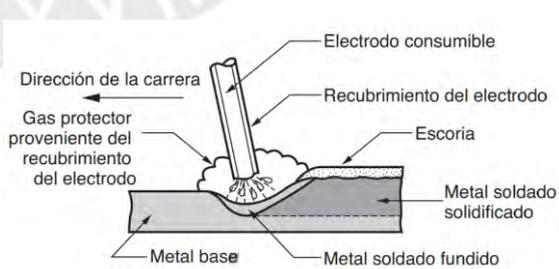
En el marco teórico se expandirán los conceptos respecto a las tecnologías de soldadura más utilizadas en la industria naval, las discontinuidades presentes en una junta soldada, sus causas, y cuando pasan a considerarse defectos.

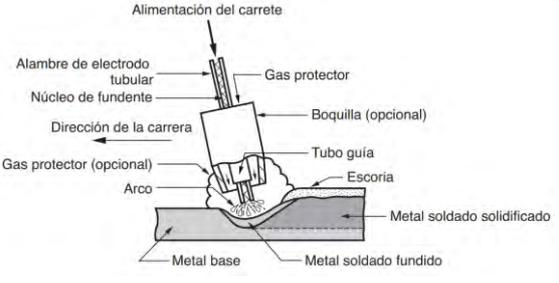
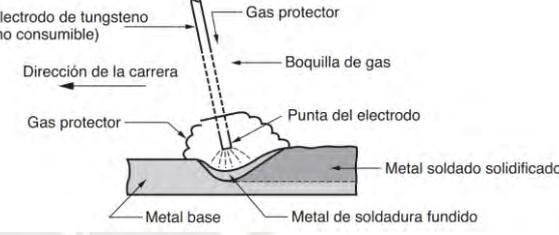
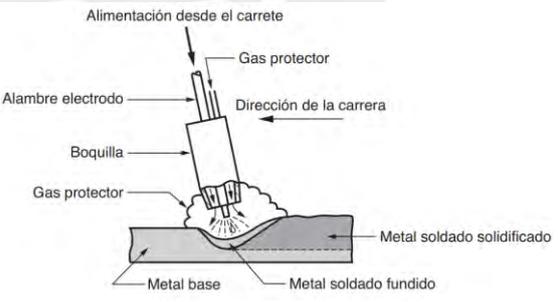
TECNOLOGÍAS DE SOLDADURA

- **Soldadura por arco eléctrico**

En términos generales, el proceso de soldadura por arco eléctrico consiste en la unión de dos elementos metálicos mediante el uso del calor generado por un arco eléctrico. Existen diferentes variantes de la misma: Soldadura por arco con electrodo metálico revestido (SMAW), por alambre tubular con fundente (FCAW), con gas Tungsteno y gas inerte (GTAW), y por arco de metal y gas (GMAW). Estas se diferencian por el elemento que usen para generar el arco eléctrico, por el tipo de protección que usen, o por si requieren material de aporte. En la siguiente tabla se muestran las principales características de los procesos de soldadura por arco eléctrico.

Tabla 1.1. Procesos de soldadura. Información e imágenes adaptadas de: (Groover, 2010)

Proceso	Descripción	Imagen
SMAW	<p><i>-Shielded Metal Arc Welding</i></p> <p>-Hace uso de un electrodo revestido y consumible para sostener el arco y servir de material de aporte.</p> <p>-El electrodo posee químicos especiales para proteger la junta de soldadura.</p> <p>-Gran adaptabilidad, poca capacidad de automatización.</p> <p>-El electrodo debe ser compatible con los materiales a unir</p> <p>-Muy usado en la construcción de buques debido a su versatilidad (Guivernau, 2011).</p>	 <p><i>Figura 1.4. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido</i></p>

<p>FCAW</p>	<p><i>-Fluxed Core Arc Welding</i></p> <ul style="list-style-type: none"> -Hace uso de un electrodo consumible en forma de alambre tubular que se aporta constantemente. -Se suministran gases por dentro del alambre o externamente para proteger la junta de soldadura. -Muy usado en situaciones que requieran gran deposición de material. (Guivernau, 2011) 	 <p><i>Figura 1.5. Soldadura por alambre tubular con fundente</i></p>
<p>GTAW</p>	<p><i>-Gas Tungsten Arc Welding</i></p> <ul style="list-style-type: none"> -Hace uso de un electrodo no consumible de Tungsteno -Se puede usar material de aporte, pero este debe ser suministrado externamente. -Unión de todo tipo de metales -Excelente acabado superficial -Utilizado en el empalmado y conformado de tuberías.(Guivernau, 2011) 	 <p><i>Figura 1.6. Soldadura por Gas Inerte y electrodo de Tungsteno</i></p>
<p>GMAW</p>	<p><i>-Gas Metal Arc Welding</i></p> <ul style="list-style-type: none"> -Usa un electrodo consumible de suministro constante sin revestimiento alguno -MIG, protección por gas inerte (Argon, Helio) para soldar aluminio. -MAG, protección por gas activo (CO₂) para soldar aceros con medio grado de carbono -Los gases evitan la producción de escoria. -Buen potencial de automatización -Combina la versatilidad del SMAW y el buen acabado del GTAW, por lo que es muy usado en la industria naval. (Guivernau, 2011) 	 <p><i>Figura 1.7. Soldadura por arco de metal y gas.</i></p>

- **Soldadura hiperbárica**

La soldadura hiperbárica o soldadura subacuática consiste en la adaptación de procesos como el SMAW o FCAW al entorno acuático; normalmente se realiza con propósitos de reparación.

Esta se puede realizar de tres maneras expuestas en la Figura 1.8.

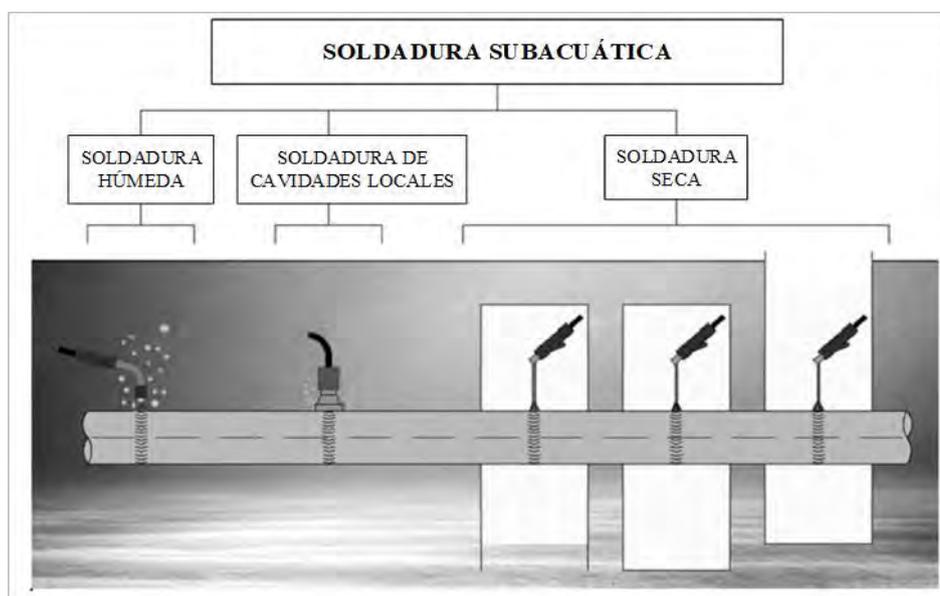


Figura 1.8. Clasificación de la soldadura subacuática. Imagen adaptada de: (Łabanowski et al., 2008)

Como se visualiza en la imagen, en el caso de la soldadura húmeda no existe barrera alguna entre el equipo de soldeo y el agua, por lo que se recurre a adaptar los procesos SMAW y FCAW mediante un recubrimiento especial en los electrodos. En consecuencia, esta es la más barata y versátil de las tres. La calidad del cordón se ve afectada por factores como:

- **Hidrógeno adherido a la junta:** El hidrógeno provoca un enfriamiento a largo plazo en la zona afectada por el calor o ZAC, vista en la Figura 1.9. En este sentido el hidrógeno provoca grietas o fisuras las cuales pueden aparecer en semanas o meses.
- **Estabilidad del arco:** Una baja estabilidad del arco puede ocasionar la gran mayoría de discontinuidades presentes en un cordón de soldadura, como poros, grietas, falta de fusión, falta de penetración entre otros.

- **Variación de temperatura:** Una variación muy brusca de temperatura provoca un cambio en la estructura interna de los materiales presentes en la unión. En consecuencia, la unión se vuelve más frágil. Este proceso, combinado con las tensiones residuales que puedan generarse durante la unión o que estén ya presentes por el mecanizado de ambas piezas, ocasionan grietas.

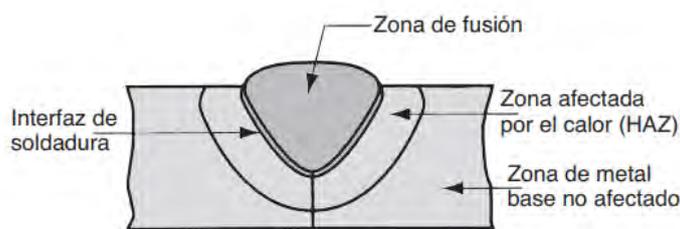


Figura 1.9. Esquema de unión soldada. (Groover, 2010)

En el caso de la soldadura de cavidades locales, se adapta el proceso GMAW, añadiéndole al instrumento una cubierta para poder aislar el cordón. Este método posee una calidad mejor que el de soldadura húmeda, debido a las temperaturas parecidas a un proceso en el exterior y a la buena estabilidad. Su mayor desventaja recae en que no se puede visualizar el cordón debido a la cubierta.

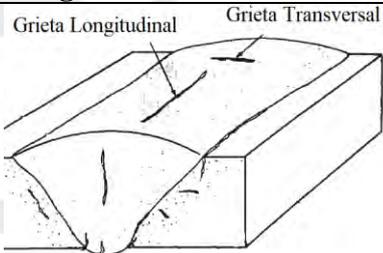
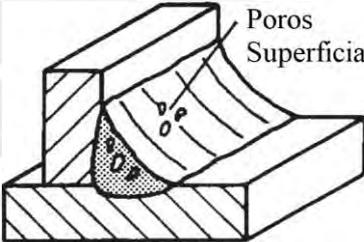
Finalmente, en la soldadura en seco se obtienen resultados idénticos a una soldadura en superficie. Esto se debe a que se recurre a aislar el área con una cabina y extraer toda el agua con un gas. En este método se pueden usar los procesos SMAW, FCAW, GMAW y GTAW. La soldadura en seco se ve limitada por la necesidad de descender todo el equipo de contención y extracción de agua. (Łabanowski et al., 2008)

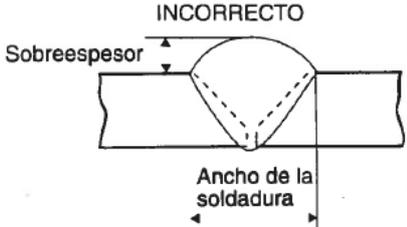
DEFECTOS DE SOLDADURA

Cuando se realiza un proceso de soldadura, pueden aparecer discontinuidades o defectos. Los defectos superficiales, que son los que se van a abarcar en este trabajo de investigación, son

detectados mediante ensayos no destructivos como lo son la inspección visual; el ensayo de líquidos penetrantes, uso de líquidos que se adentren en las distintas discontinuidades, para luego mediante un reactivo resaltarlos; o el de partículas magnéticas, el cual consiste en atraer partículas metálicas las discontinuidades mediante un campo magnético ocasionado por la discontinuidad y la aplicación de la corriente. La forma de interpretar los resultados, y determinar cuándo una discontinuidad es realmente un defecto se encuentra detallado en la norma ISO 6520-1 (ISO, 2013). En la Tabla 1.2 se definirán las discontinuidades que aparecen con mayor frecuencia, y las posibles situaciones que pueden ocasionar que estos se manifiesten.

Tabla 1.2. Defectos en soldadura. Información e imágenes adaptadas de: (Hernandez Riesco, 2002)

Defectos	Definición	Causas	Imagen
Grietas o Fisuras	Como su nombre indica, consisten en una abertura en el cordón soldado. No se toleran en ningún caso, ya que, puede llevar a una falla de la junta.	<ul style="list-style-type: none"> - Excesiva intensidad de soldeo. - Cambio brusco de temperatura - Retirar el electrodo muy rápidamente. 	 <p>Grieta Longitudinal Grieta Transversal</p> <p><i>Figura 1.10. Grietas en juntas a tope</i></p>
Sopladuras y Poros	Los poros vienen a ser sopladuras esféricas. Muchas veces un poro aislado puede servir de alivio de tensiones. La norma dicta que el diámetro no debe superar 3mm y, en el caso de Aluminio, 1mm.	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimiento de electrodo húmedo - Mal ángulo de desplazamiento -Malas condiciones climáticas. - Excesiva intensidad de soldeo. 	 <p>Poros Superficiales</p> <p><i>Figura 1.11. Poros en cordones de soldadura</i></p>
Ancho y superficie irregular	Cordón con un ancho que varía demasiado a lo largo de él o con una superficie muy rugosa.	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de soldeo irregular. - Línea de soldeo irregular. 	 <p><i>Figura 1.12. Cordón irregular. (Ruiz, 2020)</i></p>

Sobreespesor excesivo	El sobreespesor se da cuando la sobremonta es excesiva. La norma indica que debe medir entre 1 a 3mm, nunca debe superar los 5mm.	-Baja velocidad de soldeo. -Poco espacio entre las juntas.	 <p><i>Figura 1.13. Sobreespesor excesivo</i></p>
-----------------------	---	---	---

1.7. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se recopilan en orden los modelos de ROVs existentes, entre modelos comerciales, y los expuestos por universidades. También se expondrán algoritmos de procesamiento de imágenes diseñados para detectar discontinuidades en juntas soldadas; y distintas tecnologías importantes para el desarrollo de este trabajo de investigación.

SUBSISTEMA MOVIL

Los vehículos submarinos remotamente operados (ROVs) son utilizados para la inspección de entornos marinos y estructuras subacuáticas. Estos vehículos requieren de una estación en tierra, la cual, mediante un cable umbilical, envía las señales de control al vehículo, y recibe la información recopilada (imagen, temperatura, posición, entre otros).

Existen distintas empresas que producen ROVs especializados para aplicaciones industriales, exploración marina, o para entretenimiento. Algunos ejemplos: Notilo Plus con su modelo SEASAM (Notilo Plus, 2020), FIFISH V6 de la empresa china Qysea (*Fifish V6*, 2020), MiniROV Guardian de la empresa SubseaTech (Subsea Tech, 2020), y el VLBV950 de la empresa Seabotix (SeaBotix, 2020). Por otro lado, existen distintos diseños independientes, como el submarino USFQ (Soria et al., 2014), el cual muestra el uso de un compartimiento seco para aislar los circuitos eléctricos y electrónicos.

A continuación, se presenta una tabla comparativa en la cual se especifican las características principales (profundidad, peso, velocidad máxima) de los ROVs mencionados.

Tabla 1.3. Comparación entre modelos ROV.

Modelos	SEASAM 	MiniROV Guardian 	FIFISH V6 	Submarino USFQ 	VLBV950 
Características	SEASAM				
Fabricante	Notilo Plus	Subsea Tech	Qysea	Nicolás Soria	Seabotix
Profundidad máxima (m)	100	150	100	50	300
Dimensiones (mm)	550 x 450 x 230	470 x 254 x 160	383 x 331 x 143	1000 x 500 x 500	625 x 390 x 390
# Motores	7 (4Hor., 3Vert.)	5 (4Hor., 1Vert.)	6 (4Diag., 2Hor.)	6 diag.	6 (4Diag., 2Vert.)
Comunicación	Wifi acuático y cable umbilical	Cable umbilical	Cable umbilical	Cable umbilical	Cable umbilical
Velocidad máxima (nudos)	2,4	3	3	5	3
Peso (Kg)	9	4,5	3,8	40	18
Costo (\$)	3000	-	1600	-	-

Como se puede observar, todos los modelos tienen como mínimo 5 propulsores, esto para controlar los seis grados de libertad presentes en un vehículo submarino. Adicionalmente, se observa que el peso de los modelos comerciales no excede los 18kg.

SUBSISTEMA DE INSPECCIÓN

Como se ha especificado, debido al entorno marino es necesario elaborar un algoritmo de visión robusto, es decir, que tenga la capacidad de procesar los cordones de soldadura, y no se vea afectado por lo caótico del entorno. Para ello, se explican distintas publicaciones académicas, las cuales nos muestran algoritmos para el procesamiento de cordones soldadura, y algunas herramientas que ayudarán a concretar el objetivo.

- **Identificación de poros en uniones soldadas**

En este artículo académico se desarrolla un algoritmo de visión por computador (ver figura 1.14) para poder resaltar poros en un cordón de soldadura GMAW.

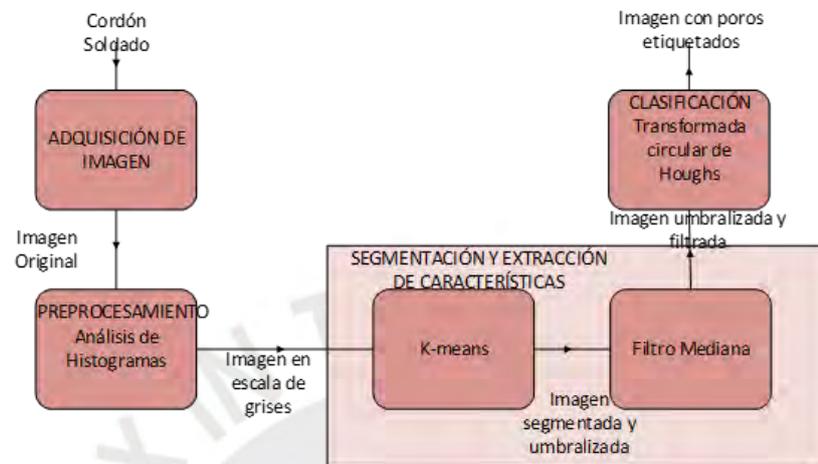
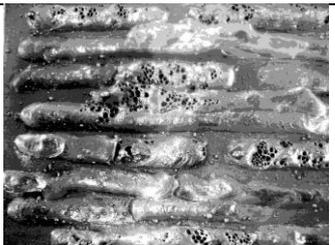
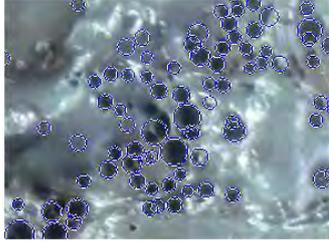


Figura 1.14. Algoritmo de visión poros. Adaptado de: (Sánchez & Espinosa, 2018)

El modelo de procesamiento de imágenes se compone por el preprocesamiento, la segmentación, la extracción de características, y la clasificación. En la Tabla 1.4 se detallan los pasos y las herramientas que se usó dentro de cada uno.

Tabla 1.4. Descripción del algoritmo de visión de poros. Imágenes sacadas de: (Sánchez & Espinosa, 2018)

	Herramientas	Descripción de las herramientas	Resultado
Preprocesa- miento	Histogramas	Los histogramas muestran la distribución de las intensidades en la capa RGB.	Selección de la capa azul
Segmentación y extracción de características	K-means	Permite aproximar 5 puntos de intensidad, mediante iteración, que umbralizan equitativamente la imagen (Liu & Yu, 2009).	

	Filtro mediana	Atenúa el ruido presente en la imagen	
Clasificación	Transformada circular de Hough	Detecta y aproxima pixeles que podrían formar un círculo mediante el algoritmo de detección de bordes de Canny.	

La publicación finaliza con un análisis de la eficiencia del algoritmo mediante una regresión lineal $\#pe$ (número de poros etiquetados en cada imagen) vs. $\#p$ (número de poros reales en cada imagen), donde una recta de 45° de pendiente sería el 100% de precisión. Finalmente, se obtiene una precisión del 78,7%.

- **Identificación de salpicaduras en uniones soldadas**

El siguiente algoritmo fue realizado con la intención de detectar salpicaduras en cordones soldados.

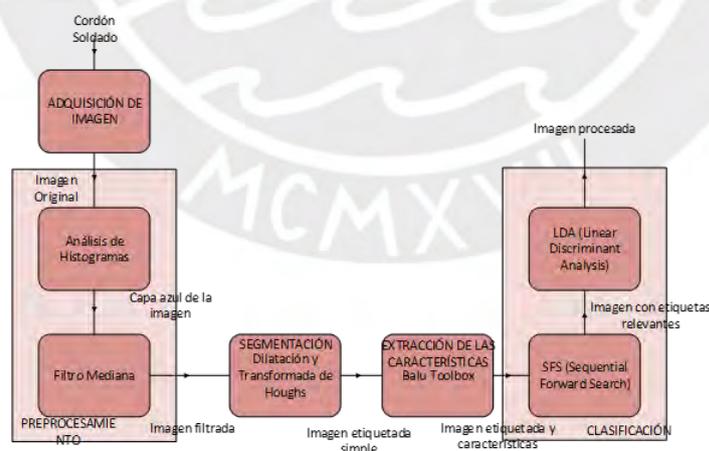


Figura 1.15. Algoritmo de visión para salpicaduras. Adaptado de: (Arrieta et al., 2014)

Como se puede observar, el algoritmo sigue la secuencia de 5 pasos principales: Adquisición, Preprocesamiento, segmentación, extracción de características, y clasificación

Tabla 1.5. Descripción del algoritmo de visión de salpicaduras. Imágenes sacadas de: (Arrieta et al., 2014)

	Herramientas	Descripción de las herramientas	Resultado
Preprocesamiento	Histogramas	Los histogramas muestran la distribución de las intensidades en la capa RGB.	
	Filtro mediana	Atenúa el ruido presente en la imagen	
Segmentación	Dilatación	Se pasa un elemento estructurante el cual primero “cierra” la imagen, eliminando las discontinuidades externas de la imagen, y luego “abre” la imagen, para eliminar las discontinuidades internas	
	Transformada circular de Houghs	Detecta y aproxima pixeles que podrían formar un círculo mediante la detección de bordes de Canny	
Extracción de características	Balu	Toolbox del software Matlab, útil para extraer diferentes características de una imagen	Datos de posición, intensidad, áreas, entr otros (78 datos en total)
Clasificación	SFS	También conocido como búsqueda secuencial, consiste en crear un grupo vacío, e ir seleccionando uno a uno que datos del otro grupo se necesitan.	
	LDA	Genera una recta de probabilidades, en base a las características seleccionadas, mediante el teorema de Bayes. Clasifica en base a dicha recta.	

TECNOLOGÍAS

- **Sistemas de estabilidad y navegación**

- **Control por visión**

Un Control Robusto de Flotación para ROV basado en Visión

Este artículo académico expone la necesidad de mantener la estabilidad de un ROV cuando se requiere realizar una inspección de alguna infraestructura. Adicionalmente, detalla que si bien lo más usado actualmente son los sensores IMU (Giroscopios o acelerómetros), estos no son usados ROVs de baja y media gama debido a su elevado precio. Por lo que, se propone el uso del siguiente algoritmo.

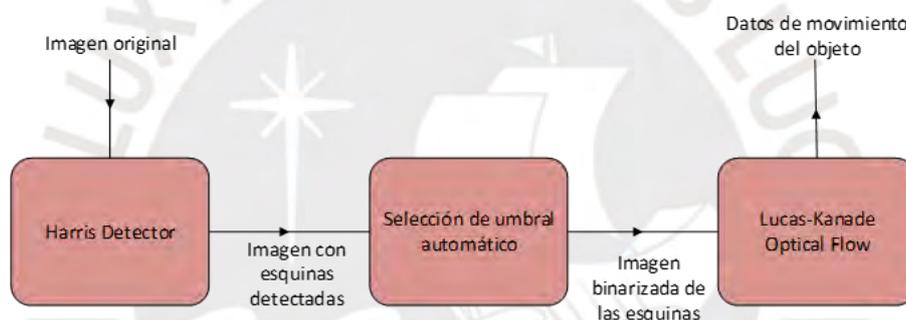


Figura 1.16. Algoritmo de visión. Elaborado con información de: (Kerdels et al., 2008)

Como se observa, el algoritmo de visión utiliza dos herramientas particulares para su desarrollo: Harris Detector, Lucas-Kanade. En la siguiente tabla se muestran las principales características de estas herramientas.

Tabla 1.6. Descripción de las herramientas usadas en el algoritmo. (Kerdels et al., 2008)

	Descripción
Harris Detector	Herramienta capaz de detectar esquinas mediante el análisis de los gradientes de intensidad de una imagen. (OpenCV, 2020a)
Umbral automático	Utiliza la función densidad de probabilidad para estimar la variabilidad de las esquinas encontradas. Luego se selecciona un umbral en base a ello. Con la finalidad de minimizar el efecto del ruido, se busca interpolar un valor de umbral por cada pixel,

Lucas Kanade	Calcula el desplazamiento de un objeto mediante el análisis de la vecindad de uno de sus píxeles. Lucas-Kanade asume que, entre una imagen y otra, en una vecindad de 3x3 todos se trasladan en el mismo sentido.
--------------	---

El artículo concluye realizando una prueba en el LBV150B2 de Seabotix Inc. Los resultados de dicha prueba son satisfactorios, el sistema muestra gran robustez ante las interferencias externas como la iluminación y el contraste variable. (Kerdels et al., 2008)

Algoritmo de visión para la estabilización automática de ROVs

Esta tesis plantea una solución a las perturbaciones que sufre un ROV en estado estacionario cuando se encuentra el área que se quiere observar. La solución se basa en un algoritmo de visión (ver Figura 1.17) y un control por lógica difusa de los motores para garantizar la estabilidad del ROV.

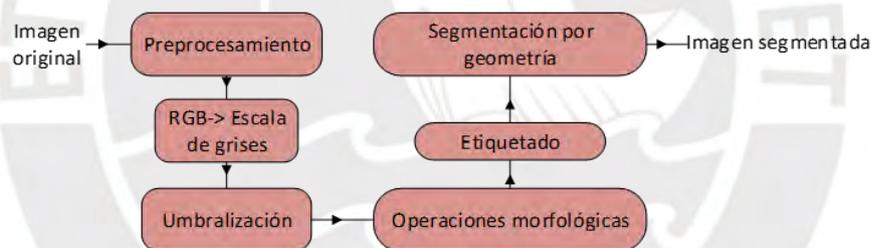


Figura 1.17. Algoritmo de visión. Adaptado de: (Hidalgo Herencia, 2012)

Como se puede observar se inicia por la conversión de la imagen de RGB a escala de grises, y luego se umbraliza por el método Otsu; este método se basa en el análisis de las varianzas entre las escalas de gris en la imagen, obteniéndose un valor de umbral que satisfaga esta distribución. Acto seguido, se procede a realizar el “closing” de la imagen para rellenar los huecos internos que puedan haber aparecido del procedimiento anterior. Este procedimiento consiste en primero dilatar la imagen y luego erosionarla con un elemento estructurante, para este caso se usa un disco de diámetro de 10. Luego, considerando una conectividad de 4 píxeles mínimo se

etiquetan los objetos, para finalmente segmentarlos geoméricamente. En la siguiente imagen se pueden visualizar los resultados de cada etapa.

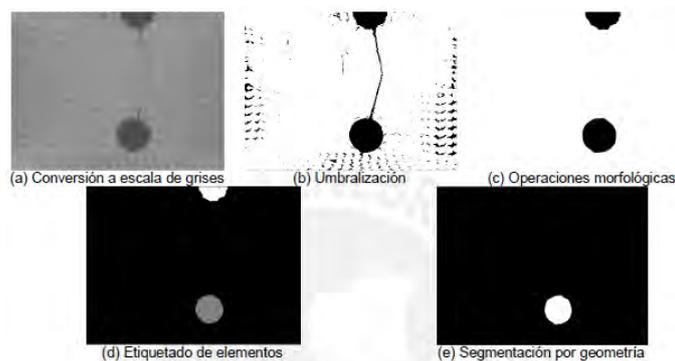


Figura 1.18. Resultados parciales de las etapas. (Hidalgo Herencia, 2012)

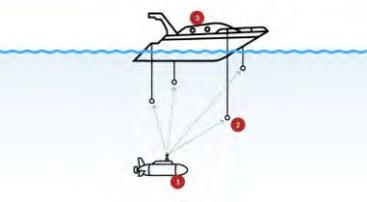
Además, se explica que una vez segmentada la imagen se extrae el centroide para el siguiente análisis. Primero, se busca una relación entre la distancia del objeto a la cámara y el diámetro, para esto se realiza un experimento acumulando datos y obteniéndose una ecuación que permite relacionarse ambas variables. Halladas ambas variables es que se puede obtener el ángulo de visión, el cual, junto con la distancia de la cámara al objeto, permitirán realizar un control por lógica difusa para los motores del ROV.

- Sensores y sistemas de navegación

Cuando se opera un ROV es necesario tener un control sobre en donde se está ubicando y como se está inclinando con respecto a su propio eje. Por este motivo, se exponen los siguientes sensores en la siguiente tabla

Tabla 1.7. Definición de los sensores y sistemas de navegación. Elaboración propia

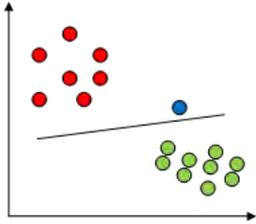
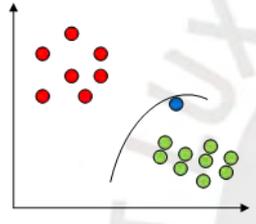
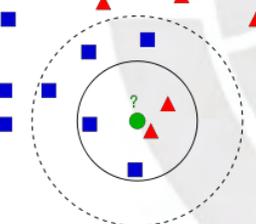
		Funcionamiento	Imagen
IMU	Acelerómetro	Sistema masa-resorte que permite medir la aceleración lineal de un sistema. Este sensor IMU requiere de una calibración minuciosa. (XSENS, 2020)	 <p>Figura 1.19. Sensores inerciales tipo MEMS. (XSENS, 2020)</p>
	Giroscopio	Permiten medir la inclinación de un sistema mediante un haz de luz que	

		impacta en un lugar diferente si el sistema rota sobre su propio eje.	
GPS acuático	En un entorno acuático el GPS funciona posicionando un receptor acústico en la base del bote, y un emisor en el vehículo a seguir. El emisor emite ondas acústicas que viajan hacia el receptor, y este, en base a la señal recibida, estima donde se encuentra el vehículo.	 <p><i>Figura 1.20. Funcionamiento de GPS subacuático.</i> (<i>Underwater GPS – Water Linked AS, 2020</i>)</p>	

- **Algoritmos para clasificación de defectos**

El procesamiento de imágenes clásico permite segmentar y/o extraer las características que uno requiere de una imagen, pero cuando se requiere procesar una serie de imágenes, aumenta la posibilidad que los algoritmos clásicos den resultados erróneos. Ante esto, los algoritmos de aprendizaje máquina supervisado permiten reducir la cantidad de errores presentes al final del procesamiento de imágenes. A esta etapa se le conoce como clasificación de imágenes; esta toma las características principales de la discontinuidad (radio, intensidad media, entre otras) y determina si es una discontinuidad o una detección errónea. Para esto, se entrena el algoritmo con un grupo de datos (*dataset*) del que se tiene un conocimiento previo acerca de la clase a la que pertenece (Discontinuidad, no discontinuidad). En el caso de la detección de discontinuidades en cordones soldados se ha observado el efecto que tienen algoritmos de clasificación como *LDA*, *QDA* y *K-Nearest Neighbours*. Por ello en la Tabla 1.8 se define como es el funcionamiento de estos.

Tabla 1.8. Descripción de los algoritmos para clasificación de defectos. Información obtenida de (OpenCV, 2020b) y (Izenman, 2008)

	Descripción
 <p>LDA (Análisis discriminante lineal)</p>	<p>El análisis discriminante consiste en diferenciar uno o más grupos por sus características representativas, esto mediante los teoremas de probabilidad de Bayes. En el caso de LDA se forma una recta que representa el cambio entre grupos. En el ejemplo se muestran dos grupos (verde y rojo) de entrenamiento, un objeto azul a clasificar, y una recta que representa la separación de ambos grupos.</p>
 <p>QDA (Análisis discriminante cuadrático)</p>	<p>A diferencia de la discriminación lineal, la discriminación cuadrática se caracteriza por su flexibilidad, ya que elabora una curva que separa ambos grupos mediante el mismo teorema, pero considerando que la covarianza de ambos grupos es distinta. Además, este cálculo significa un aumento en la velocidad de procesamiento que puede tener el algoritmo. En el ejemplo se observan dos grupos (rojo y verde), pero en este caso el objeto a clasificar se encuentra más cerca al grupo verde.</p>
 <p><i>Figura 1.21. Imagen de ejemplo de K-NN. (OpenCV, 2020b)</i></p> <p>K-Vecinos más cercanos</p>	<p>El algoritmo de K vecinos más cercanos define un número K de miembros más cercanos a analizar, y basado en la cantidad de elementos perteneciente a un grupo de entrenamiento (rojo o azul), clasifica al objeto de prueba (verde). Este método tiene, en consecuencia, el consumo computacional más bajo de los tres.</p>

DISEÑO CONCEPTUAL

En esta sección se definirán los requerimientos mínimos que debe presentar el diseño óptimo. Así como las entradas y salidas del sistema. En base a estas, se elaborará la estructura de funciones para entender la interacción entre los distintos dominios del sistema. Además, se buscarán distintas tecnologías que cumplan con las funciones establecidas. Finalmente, se elaborará el concepto óptimo en base a una evaluación técnica económica.

2.1. LISTA DE REQUERIMIENTOS

Las exigencias o deseos del presente proyecto se presentan en la Tabla 2.1. En seguida se detallarán las justificaciones de las exigencias más relevantes.

Cinemática: El sistema deberá poder desplazarse a lo largo de un área de 5x5 metros. Por lo que se requiere tener una velocidad de desplazamiento rápida, la cual, no deberá ser menor a 50 cm/s; pero, también se requiere de una velocidad reducida para visualizar el cordón sección por sección, esta deberá ser no mayor a 20cm/s.

Fuerzas: En lo que respecta al diseño del vehículo, este deberá tener una flotabilidad positiva y su centro de gravedad deberá encontrarse en la parte sumergida del mismo, para evitar problemas de estabilidad (Soria et al., 2014). Acorde con el artículo 2 de la ley N°29088 dictada por el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, el peso del vehículo no deberá exceder de los 15kg para que sea posible de cargar por solo una persona (MTPE, 2009). Considerando las capacidades de algunos componentes (sensores, propulsores, o la misma estructura), el vehículo no debe ser sometido a más de 300kPa de presión de agua, lo que se traduce en una profundidad máxima de 30m, cuando el vehículo se esté acercando a este valor, se dará un aviso mediante la interfaz.

Seguridad: Considerando el ambiente marino en el cual se desplaza el vehículo, se tomará en consideración lo siguiente: En primer lugar, los componentes electrónicos (placas de potencia, placas de comunicación, controlador, entre otros) deberán estar completamente aislados de cualquier contacto acuoso, por lo que se requerirá del diseño de un compartimiento seco, el cual se encargará de albergarlos. En segundo lugar, considerando el efecto que puedan tener algunos materiales en el entorno marino, será de suma importancia la selección de materiales no corrosivos y no tóxicos. Finalmente, como medida contra posibles cortes o sobrecargas eléctricas, se requerirá de una puesta a tierra en la conexión energética.



Tabla 2.1. Lista de Exigencias.

Lista de Exigencias		Fecha: 06.07.2020
		Página 1 de 4
<p>Función Principal: Descender a aguas poco profundas y, mediante algoritmos de visión artificial, resaltar los defectos de los cordones soldados para facilitar su mantenimiento preventivo.</p>		
Característica	Exigencia o Deseo	Descripción
Geometría	Exigencia	- Dimensiones máximas del vehículo: 500mm x 500mm x 700mm
Cinemática	Exigencia	-Velocidad: 10cm/s hasta 50cm/s,
Fuerzas	Exigencia	- Peso máximo del vehículo: 15kg - Tipo de flotabilidad: Positiva. - Ubicación del centro de gravedad: En la zona sumergida. - Presión máxima de trabajo: 300kPa (30m de profundidad).
Energía	Exigencia	El cliente debe facilitar un entorno que permita proveer al sistema (Interfaz y vehículo) 220VAC - 60Hz monofásico, esto incluye situaciones en mar adentro.
	Deseo	- Sistema de respaldo: 50VDC-30min
Señales	Exigencia	<p>Para el vehículo submarino: Señales de Entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Encender/Apagar vehículo. - Tipo de movimiento (lento, rápido) - Dirección en la que se quiere desplazar al vehículo. - Aumentar disminuir iluminación - Entorno frente al vehículo. <p>Señales de Salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Imagen en tiempo real. -Profundidad. -Temperatura y humedad del compartimiento seco -Advertencia.

Tabla 2.1. Lista de Exigencias. (continuación)

Lista de Exigencias		Fecha: 06.07.2020
		Página 2 de 4
<p>Función Principal: Descender a aguas poco profundas y, mediante algoritmos de visión artificial, resaltar los defectos de los cordones soldados para facilitar su mantenimiento preventivo</p>		
Característica	Exigencia o Deseo	Descripción
Señales	Exigencia	<p>Para la interfaz: Señales de Entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Encender/Apagar vehículo. -Tipo de movimiento (lento, rápido) -Dirección de movimiento. -Iniciar procesamiento. -Imagen en tiempo real. <p>Señales de Salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Imagen en tiempo real. -Imagen procesada. -Profundidad. -Temperatura en compartimiento seco. -Humedad en compartimiento seco.
Electrónica	Exigencia	<p>Vehículo submarino:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se requerirá de una placa electrónica de potencia para energizar los dominios mecánicos, de sensores, actuadores y de comunicación. - Se requerirá de una placa de distribución de señales para tener una buena comunicación entre el controlador y los distintos sensores y actuadores. - Se hará uso de 6 propulsores para el desplazamiento del vehículo, lo cual, en consecuencia, requerirá de 1 driver de motor por cada 2 propulsores para su control. - Se necesitarán sensores de temperatura y humedad en el compartimiento seco, para verificar su correcto funcionamiento. - Se utilizarán sensores orientación para tener un monitoreo constante del estado del vehículo. - Se hará uso de sensores para medir la velocidad (intensidad de corriente) de los propulsores.

Tabla 2.1. Lista de Exigencias. (continuación)

Lista de Exigencias		Fecha: 06.07.2020
		Página 3 de 4
<p>Función Principal: Descender a aguas poco profundas y, mediante algoritmos de visión artificial, resaltar los defectos de los cordones soldados para facilitar su mantenimiento preventivo</p>		
Característica	Exigencia o Deseo	Descripción
Electrónica	Exigencia	<ul style="list-style-type: none"> - La cámara deberá poder captar imágenes con una calidad mínima de 480p. <p>Interfaz:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La interfaz será un software para ser instalado en una laptop con sistema operativo Windows.
Seguridad	Exigencia	<ul style="list-style-type: none"> - El vehículo y la interfaz requerirán una puesta a tierra en su conexión. - La placa electrónica del vehículo debe estar correctamente aislada del agua, teniendo un grado IP de 28. - Los materiales que componen la estructura del vehículo deberán ser amigables con el ambiente siendo este un factor clave para su selección, evitándose materiales corrosivos y tóxicos.
Comunicación	Exigencia	<ul style="list-style-type: none"> - Se utilizará un cable umbilical que pueda transmitir energía e información.
Montaje	Exigencia	<ul style="list-style-type: none"> - El sistema móvil deberá constar solo de uniones desmontables (atornilladas, entre otras) para facilitar su ensamble.
Transporte	Exigencia	<ul style="list-style-type: none"> - El vehículo tendrá agarraderas y deberá poder ser trasladado por una persona.
Uso	Exigencia	<ul style="list-style-type: none"> - El vehículo podrá trabajar entre los -10°C a 40°C, cerca de los límites se dará un aviso.
Software y Control	Exigencia	<ul style="list-style-type: none"> - El software para la interfaz requerirá de un algoritmo de visión que permita detectar defectos en cordones soldados. - El software deberá permitir una fácil comunicación entre la interfaz y el vehículo.

Tabla 4.1. Lista de Exigencias. (continuación)

Lista de Exigencias		Fecha: 06.07.2020
		Página 4 de 4
Función Principal: Descender a aguas poco profundas y, mediante algoritmos de visión artificial, resaltar los defectos de los cordones soldados para facilitar su mantenimiento preventivo		
Característica	Exigencia o Deseo	Descripción
Mantenimiento	Exigencia	<ul style="list-style-type: none"> - El vehículo requiere un mantenimiento preventivo cada 2 meses, y una antes de su uso. - Se deberá revisar la integridad y buen funcionamiento de los motores. - Para la verificación del compartimiento en seco, se debe sumergir en agua por completo durante 20 min y verificar que nada se halla filtrado.
Plazos	Exigencia	- El trabajo de investigación y diseño se realizará en un plazo máximo de 7 meses.

2.2. BLACK BOX

Con la finalidad de analizar las entradas, salidas, y señales de interacción entre el vehículo y la interfaz, se elaboró el diagrama de caja negra mostrado a continuación.

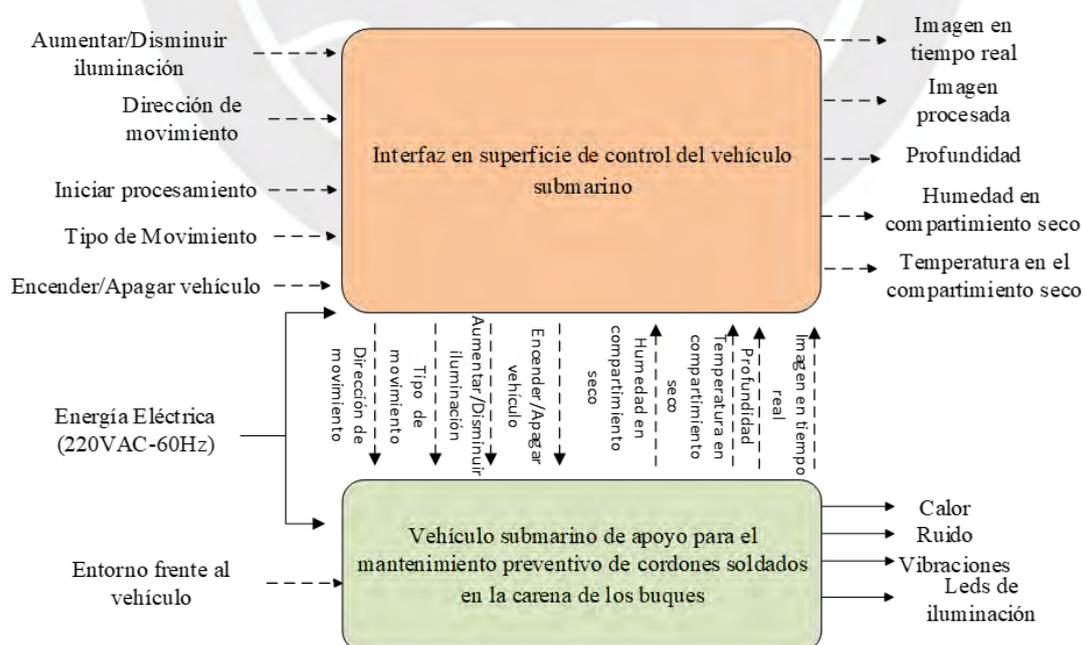


Figura 2.1. Diagrama Black Box del sistema

Interfaz

• Entrada

- Aumentar/Disminuir iluminación: Señal de entrada que permite regular la iluminación en la superficie del vehículo submarino.
- Dirección de movimiento: Señal que permite indicar en qué dirección debe desplazarse el vehículo
- Tipo de movimiento: Señal que selecciona la velocidad a la que debe desplazarse el vehículo.
- Iniciar procesamiento: Señal de inicio de procesamiento de la imagen capturada por el vehículo
- Encender/Apagar vehículo: Enciende o apaga el vehículo
- Energía eléctrica (220VAC-60Hz): Energía necesaria para energizar la interfaz.

• Salida

- Imagen en tiempo real: Imagen capturada por el vehículo.
- Imagen procesada: Resultado del procesamiento de la imagen en tiempo real.
- Profundidad: Profundidad a la que se encuentra el vehículo.
- Humedad en compartimiento seco: Nivel de humedad presente en el compartimiento seco.
- Temperatura en compartimiento seco: Temperatura a la que se encuentra sometido el compartimiento seco.

Vehículo

• Entrada

- Entorno frente al vehículo: Entorno visible por la cámara instalada
- Energía eléctrica(220VAC-60Hz): Energía necesaria para encender el vehículo.

- **Salida**

- Leds de iluminación: Iluminación controlada en la superficie frente al vehículo
- Calor, ruido y vibraciones: Energía típica disipada por cualquier sistema.

2.3. ESTRUCTURA DE FUNCIONES

Para el sistema se definen los siguientes dominios con sus respectivas funciones.

Dominio de Energía

Se detallan las funciones de la Figura 2.2.

- **Acondicionar energía:** Reduce el voltaje de la entrada para los distintos dominios del sistema:

Sensores: 3.3Vdc

Actuadores: 18Vdc

Controlador: 5Vdc

- **Energizar sensores:** Envía energía a los distintos sensores del subsistema móvil.
- **Energizar desplazamiento:** Envía energía a los actuadores que ejecutan el desplazamiento del subsistema móvil.
- **Energizar iluminación:** Envía energía al actuador que se encarga de la iluminación en la superficie vista por el vehículo

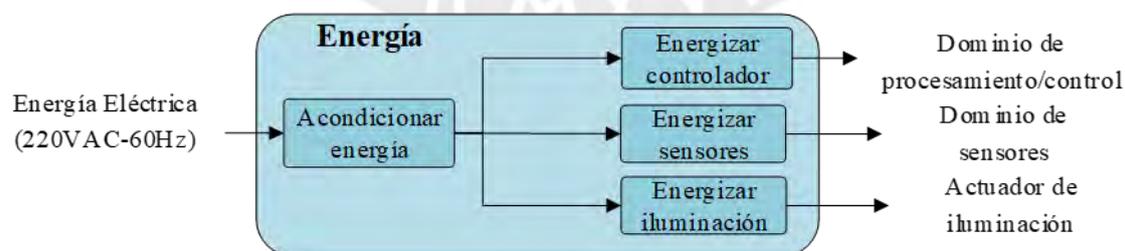


Figura 2.2. Dominio de energía

Dominio de Procesamiento/Control

Se detallan las funciones de la Figura 2.3.

- **Procesar datos:** Interpreta la señal recibida por cada sensor del dominio de sensores
- **Controlar desplazamiento del vehículo:** Controlar la velocidad de los propulsores para un correcto desplazamiento del vehículo submarino, a través de los sensores de intensidad de corriente en los motores.
- **Controlar estabilidad del vehículo:** Estabiliza el vehículo cuando este se encuentre detenido mediante el uso del sensor de orientación.
- **Regular iluminación:** Aumenta o disminuye la iluminación en base a la señal enviada por el usuario.
- **Transmitir imagen:** Recibe la imagen del sensor y lo envía a la interfaz/software.

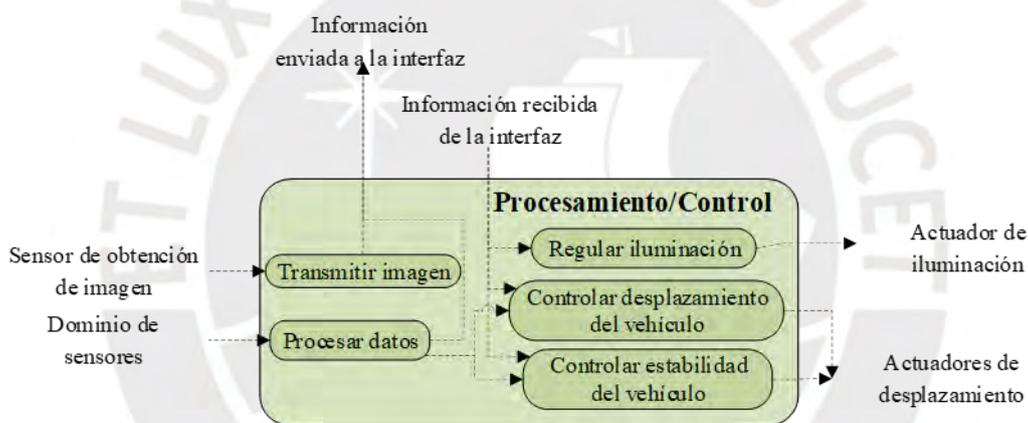


Figura 2.3. Dominio de procesamiento/control

Dominio de Interfaz/Software

Se detallan las funciones de la figura 2.4.

- **Procesar Imagen:** Recibe la imagen real y si se desea, se extraen las características de las discontinuidades y se las clasifica para determinar si son o no defectos.
- **Direccionar vehículo:** Permite al usuario indicar hacia dónde y a qué velocidad (10 o 50cm/s) quiere que se desplace el vehículo.
- **Encender/Apagar vehículo:** Apaga o enciende el vehículo.

- **Nivel de iluminación:** Permiten aumentar o disminuir la iluminación de la superficie a analizar.
- **Monitorear profundidad:** Monitorea la profundidad a la que se encuentra al vehículo, en caso se está muy cerca del límite de 25 metros.
- **Monitorear temperatura:** Monitorea la temperatura del compartimiento seco, en caso esta sea muy alta, se lanzará una advertencia.
- **Monitorear humedad:** Monitorea la humedad del compartimiento seco para evitar malfuncionamientos.
- **Mostrar información:** Muestra los datos relevantes del vehículo:
 - Profundidad
 - Temperatura y humedad en compartimiento seco
 - Imagen en tiempo real y procesada
 - Advertencias.

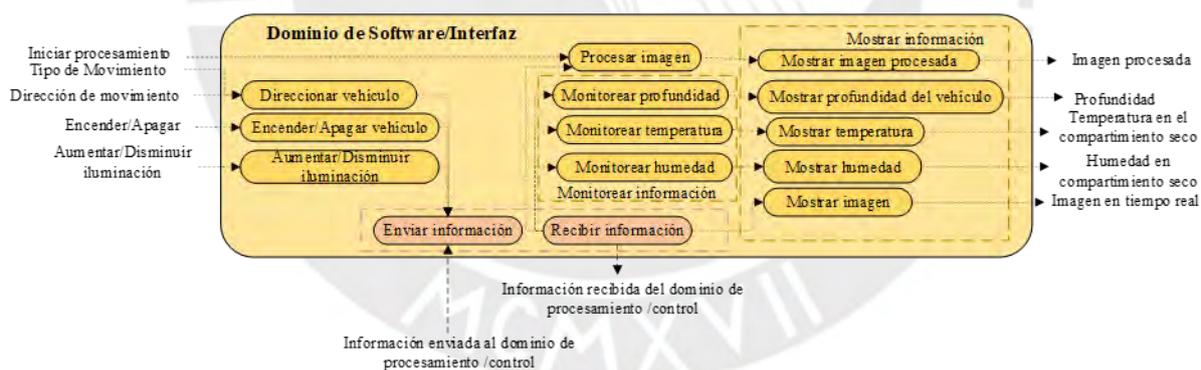


Figura 2.4. Dominio de software/interfaz

Dominio de Comunicación

Se detallan las funciones de la figura 2.5.

- **Enviar información:** Envía los comandos de control de la interfaz al controlador.
- **Recibir información:** Transmite hacia la interfaz la información recopilada por el vehículo submarino.

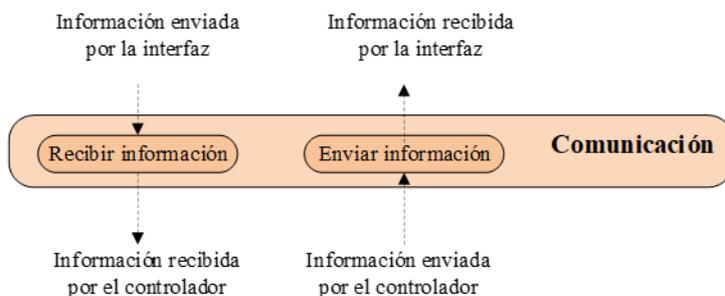


Figura 2.5. Dominio de comunicación

Dominio de Sensores

Se detallan las funciones de la figura 2.6.

- **Sensar profundidad:** Obtener la profundidad a la que se encuentre el vehículo.
- **Sensar temperatura:** Obtener la temperatura a la que se encuentre el compartimiento seco del vehículo.
- **Sensar humedad del compartimiento seco:** Obtener la humedad del compartimiento seco para evitar malfuncionamientos del circuito eléctrico-electrónico.
- **Sensar orientación del vehículo:** Obtener la orientación (inclinación) actual del vehículo.
- **Sensar corriente (potencia) consumida por los motores:** Obtiene la corriente(potencia) consumida por los motores, para estimar la velocidad de los mismos.
- **Obtener imagen:** Captura la imagen del entorno frente al vehículo submarino.

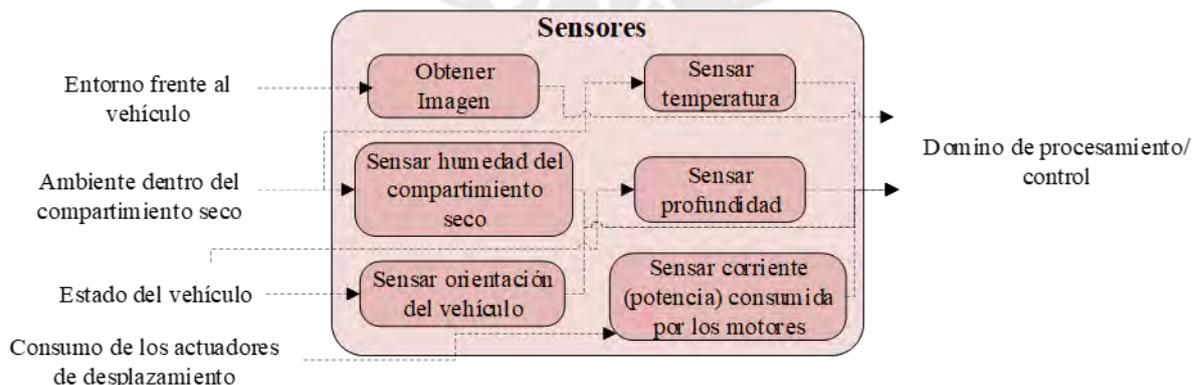


Figura 2.6. Dominio de sensores

Dominio de Actuadores

Se detallan las funciones de la figura 2.7.

- **Desplazar vehículo:** Desplaza el vehículo en la dirección indicada por el controlador.
- **Iluminar superficie:** Aumenta la iluminación de la zona a analizar.

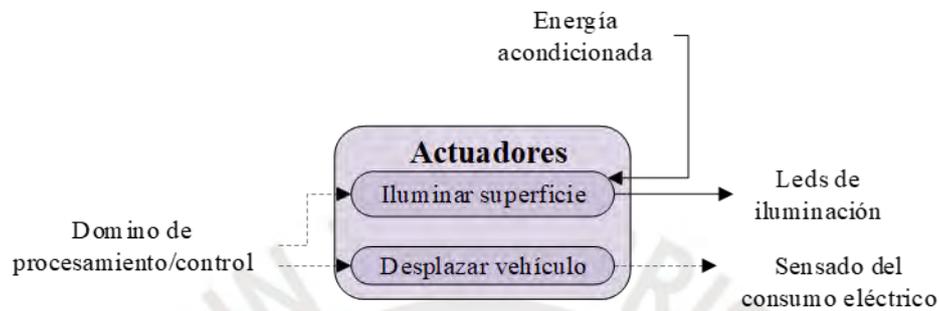


Figura 2.7. Dominio de actuadores

Dominio de Mecánica:

Se detallan las funciones de la Figura 2.8.

- **Proteger componentes electrónicos:** Compartimento seco que protegerá los circuitos de cualquier contacto con el agua.
- **Transportar/Albergar componentes:** Estructura del vehículo.
- **Compensar peso:** Elemento de baja densidad que pueda mejorar la flotabilidad del vehículo

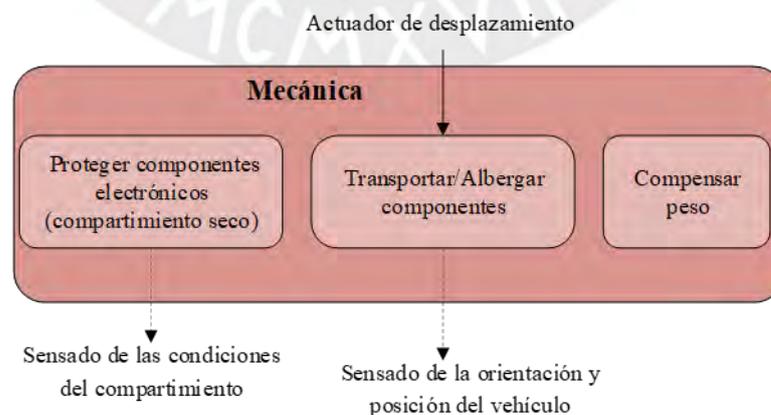


Figura 2.8. Dominio mecánico

En la Figura 2.9 se presenta el diagrama de estructura de funciones.

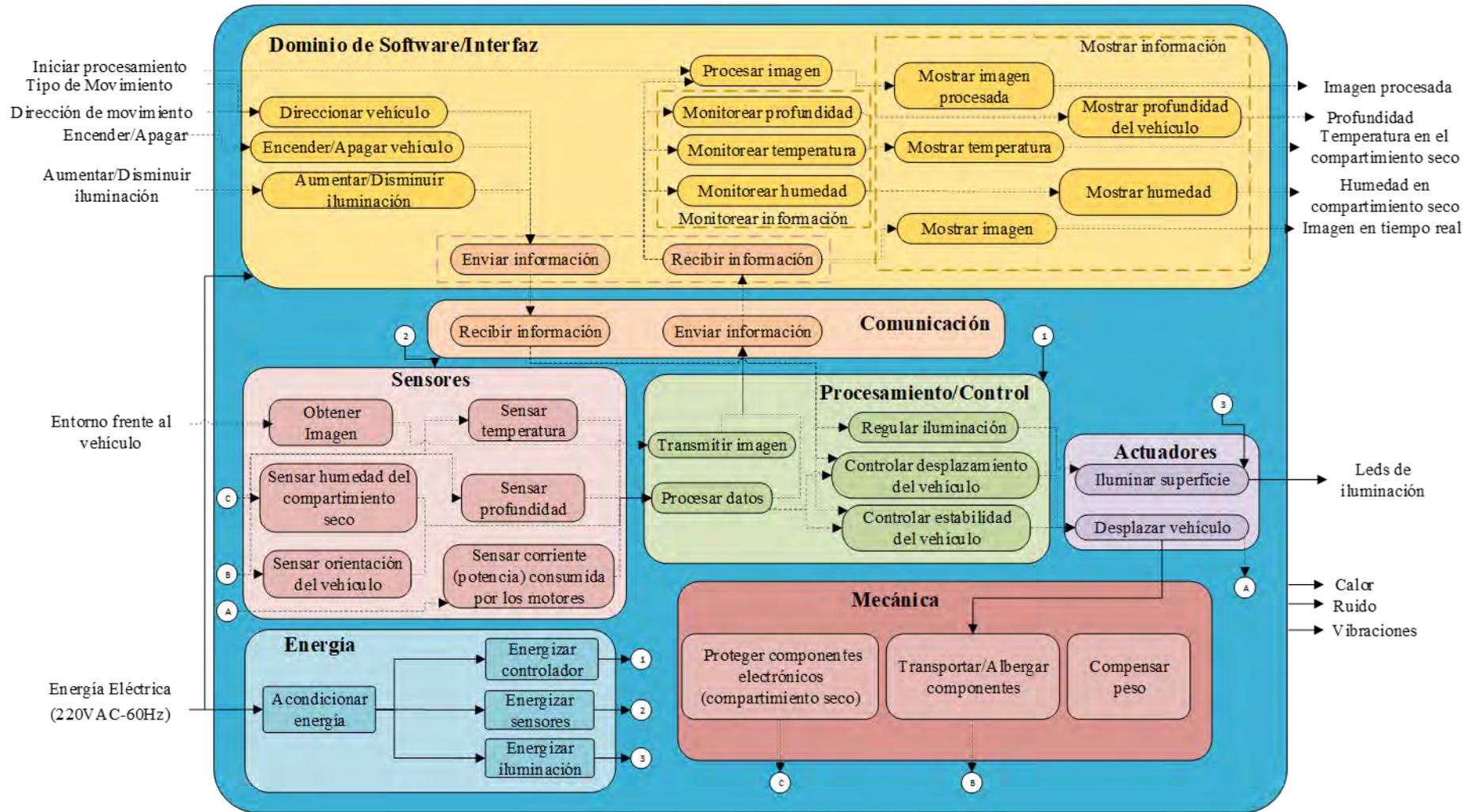


Figura 2.9. Estructura de funciones del sistema

2.1. CONCEPTOS DE SOLUCIÓN

La siguiente tabla se elaboró mediante la combinación de las opciones mostradas en la matriz morfológica, presentada en el anexo A.

Tabla 2.2. Conceptos de solución.

Dominio de interfaz/software					
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Encender/Apagar vehículo		Pulsador	Pulsador giratorio	Botón pulsador de llave electromecánico	
Aumentar/Disminuir Iluminación		Joystick analógico	Teclado de computadora/laptop	Teclado de computadora/laptop	
Direccional vehículo		Joystick analógico	Joystick analógico	Teclado de computadora/laptop	
Procesar Imagen	Hardware	Extracción de características	Laptop	Laptop	
		Clasificación de imagen			Laptop
	Software	Extracción de características	Algoritmo de visión en Python	Algoritmo de visión por Matlab	Algoritmo de visión en Python
		Clasificación de imagen	Análisis discriminante lineal	Análisis discriminante cuadrático	K-vecinos más cercanos
Monitorear información		Laptop	Laptop	Laptop	
Mostrar información					
Dominio de actuadores					
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Desplazar vehículo		Propulsor DC largo +Driver de motor DC	Propulsor DC pequeño +Driver de motor DC	Propulsor AC +Driver de motor AC	
Iluminar superficie		LED de iluminación subacuática controlada por PWM + On/off con mosfet	LED de iluminación subacuática controlada por PWM. + On/off con mosfet	Foco de filamento LED+ On/off con BJT	
Dominio de sensores					
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Obtener imagen		Webcam	Cámara de luz tenue para ROV	Cámara IP	
Sensor temperatura del compartimiento seco		Sensor mixto (humedad y temperatura)	Sensor de temperatura RTD	Sensor de temperatura infrarrojo	

Sensar humedad del compartimiento seco	Sensor mixto (humedad y temperatura)	Sensor de humedad resistivo	Sensor de humedad capacitivo	
Sensar profundidad	Sensor de profundidad por presión	Sensor de profundidad por presión	Sensor de profundidad y de cabeceo	
Sensar orientación del vehículo	Giroscopio, acelerómetro	Sensor de flujo óptico.	Sensor de profundidad y de cabeceo	
Sensar corriente/potencia consumida por los motores	Sensor de corriente de medición directa	Sensor de corriente de efecto Hall	Sensor de corriente de efecto Hall	
Dominio de comunicación				
Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Enviar información	Cable umbilical UTP	Cable umbilical UTP	Cable umbilical UTP	
Recibir información				
Dominio mecánico				
Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Proteger componentes eléctricos	Compartimiento seco de aluminio	Compartimiento seco de acrílico	Compartimiento seco de platino	
Transportar/Albergar componentes	Estructura rectangular-cilíndrica	Estructura dinámica	Estructura cilíndrica	
Compensar peso	Flotadores	Flotadores	Flotadores	
Dominio de procesamiento/control				
Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Procesar datos	Ordenador de placa simple (microprocesador)	Placa de microcontrolador	FPGA y microprocesador	
Transmitir imagen	Ordenador de placa simple (microprocesador)	Ordenador de placa simple (microprocesador)	FPGA y microprocesador	
Hardware	Regular iluminación	Ordenador de placa simple (microprocesador)	Ordenador de placa simple (microprocesador)	FPGA y microprocesador
Software	Regular iluminación	Incremento y decremento normal	Incremento y decremento normal	Incremento y decremento normal
Controlar desplazamiento del vehículo	Ordenador de placa simple (microprocesador)	Placa de microcontrolador	FPGA y microprocesador	
Dominio de energía				
Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Acondicionar energía	Reductor de voltaje 220VAC-70VDC	Fuente switching 50VDC	Estabilizador de energía.	

Energizar controlador	Step down DC-DC	Regulador integrado de voltaje DC	Regulador integrado de voltaje DC
Energizar sensores	Step down DC-DC	Regulador integrado de voltaje DC	Regulador integrado de voltaje DC
Conmutar iluminación	On/off con mosfet	On/off con BJT	On/off con BJT

Concepto de solución 1:

En la Figura 2.10 se muestra que el primer vehículo, de forma cilíndrica, se desplaza con la ayuda de seis propulsores DC. Además, cuenta con una webcam para capturar el video del entorno, y un Led PWM para corregir la iluminación del entorno. Un joystick analógico conectado a una laptop se encarga de controlar el desplazamiento del vehículo. Un software desarrollado en Python, e instalado en una laptop, se encarga de monitorear y procesar toda la información obtenida transmitida por el vehículo, a través del cable umbilical.

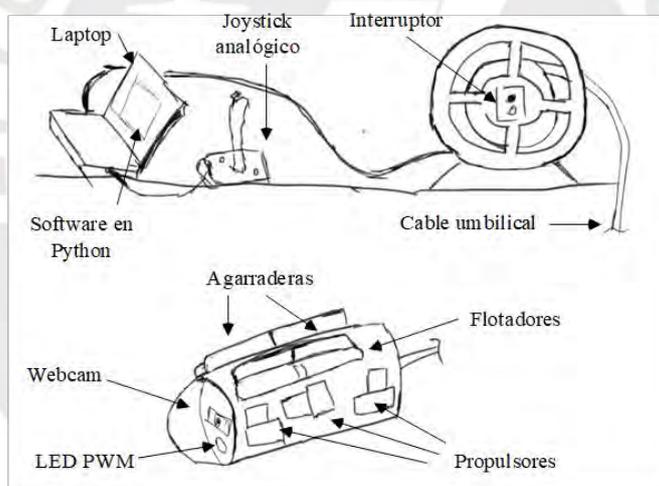


Figura 2.10. Bosquejo del concepto de solución 1. Elaboración propia

En la Figura 2.11 se muestra el interior del vehículo, donde se encuentra instalada una placa SBC la cual se encarga de retransmitir el video recibido de la webcam, y de controlar los actuadores del sistema. El sensor IMU se encarga de proveer la inclinación y la aceleración del vehículo. Finalmente, los drivers de motores DC facilitan el control de los propulsores, y el *mosfet* permite ajustar la intensidad del Led PWM,

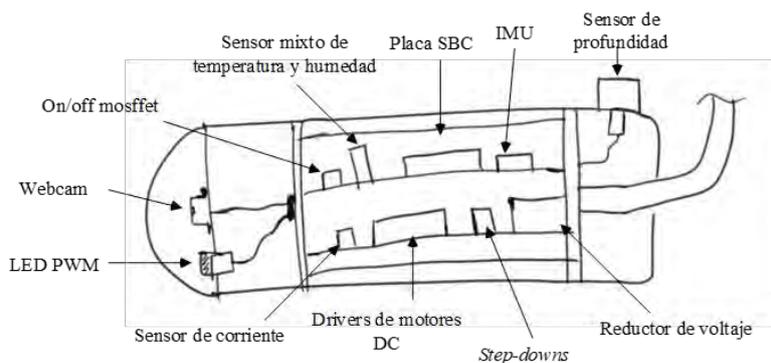


Figura 2.11. Bosquejo del interior del vehículo del concepto de solución 1. Elaboración propia

Concepto de solución 2:

Como se observa en la siguiente figura, la interfaz en tierra tiene, una disposición muy parecida al del concepto de solución 1, con la diferencia que se está utilizando un pulsador giratorio y el software en el que se ejecutará el software es Matlab. Además, el joystick cumple solamente la función de direccionar al vehículo.

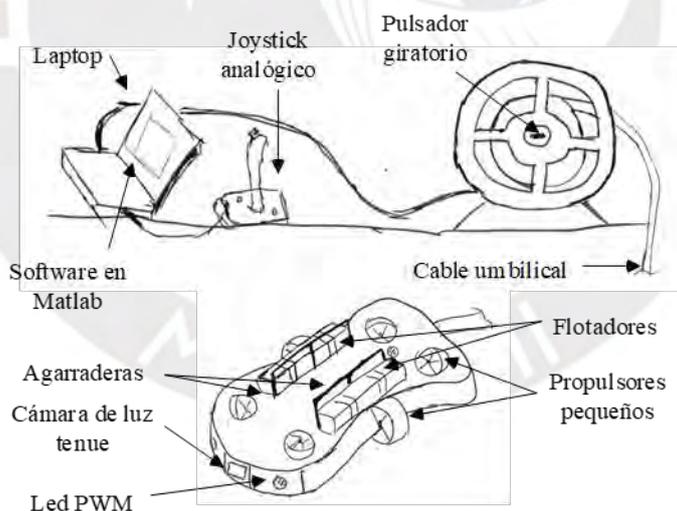


Figura 2.12. Bosquejo de la interfaz del concepto de solución 2. Elaboración propia

Para este concepto el vehículo tiene un diseño más dinámico (complejo), el cual facilita el desplazamiento del mismo. En adición, se tiene que los propulsores usados son más compactos y están colocados en una disposición específica (2 en horizontal y 4 en diagonal), este concepto

se destaca por el uso de un sensor de flujo óptico para controlar la inclinación, y de una cámara de luz tenue, especializada para vehículos submarinos (Figura 2.12).

Finalmente, en la vista interna del vehículo (Figura 2.13) se tiene una disposición similar al concepto anterior, con la diferencia del uso de acrílico para el diseño del compartimiento seco y del uso de sensores de corriente de efecto Hall y una fuente conmutada.

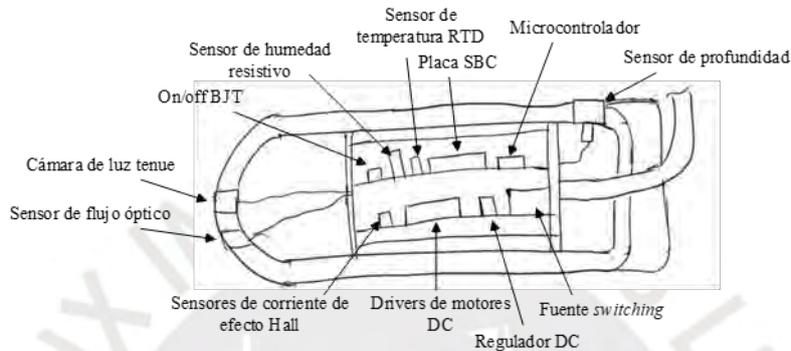


Figura 2.13. Bosquejo del interior del vehículo del concepto de solución 2. Elaboración propia

Concepto de solución 3:

En el concepto de solución 3 se opta por el uso del programa Python para el desarrollo de la interfaz, y se utiliza solamente la laptop para comandar todos los aspectos del vehículo (Figura 2.14).

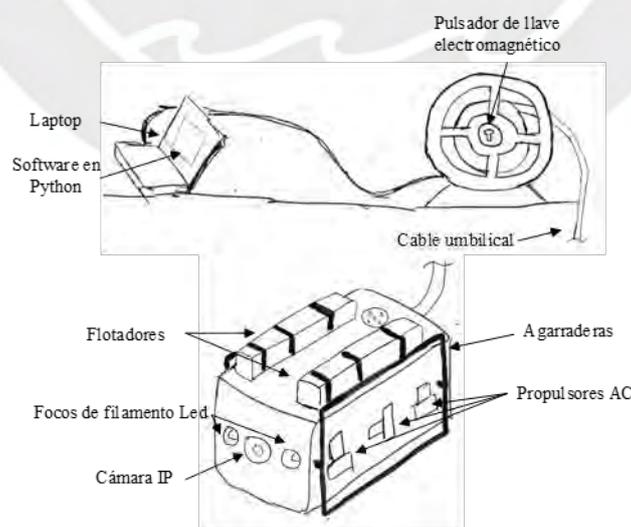


Figura 2.14. Bosquejo del concepto de solución 3. Elaboración propia

Como se puede observar, el vehículo de este concepto es mucho más grande en comparación a los otros dos. Esto se debe principalmente al uso de motores AC, los cuales requieren de un mayor espacio para funcionar correctamente. Se tiene también una cámara IP para la transmisión de imágenes y un par de focos de filamento LED para iluminar la superficie vista por el vehículo.

Dentro del vehículo (Figura 2.15) se dispone de un compartimiento seco hecho de platino. Se tiene, además, un estabilizador de voltaje, un grupo de drivers de motor AC, y un sensor mixto de profundidad y cabeceo para controlar la orientación y la altura a la que se encuentra el vehículo.

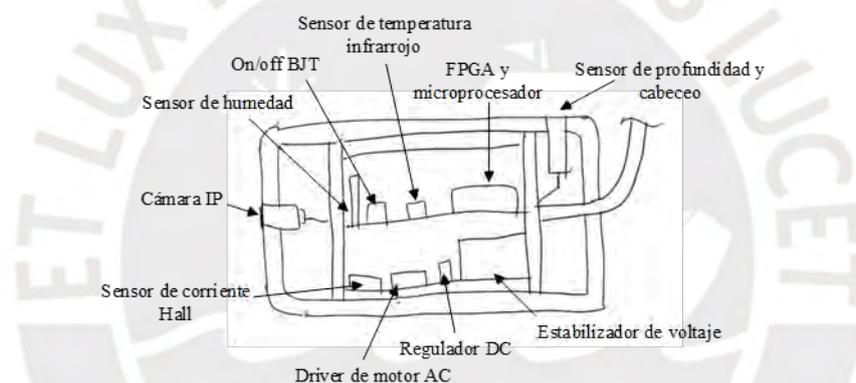


Figura 2.15. Bosquejo del interior del vehículo del concepto de solución 3

2.2. EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

En esta sección, se detallarán los criterios usados para elaborar el concepto óptimo.

Evaluación Técnica:

- **Estabilidad:** En la lista de requerimientos se estableció que, debido a la sensibilidad que presentan los algoritmos de visión artificial, es necesario que cuando el vehículo se encuentre detenido no se incline más de 2° y no se desplace más de 1cm en cualquiera de sus 6 grados de libertad, por este motivo es que el peso del criterio es de 4. Antes de proseguir con la evaluación de los puntajes se debe aclarar que no se puede realizar una

comparación basada en los algoritmos Fuzzy y PID, ya que los tiempos de respuesta y estabilidad dependen en su totalidad de la programación de ambos controladores. En primer lugar, se tiene que el concepto 1 basa el sensado de su inclinación y desplazamiento en un sensor IMU; existen distintos modelos y precios para estos sensores, muchos de los cuales tienen márgenes de error pequeños, por ello se le asigna un puntaje de 3. En segundo lugar, para el concepto 2 se propuso el uso de un sensor de flujo óptico, si bien se ha demostrado que estos pueden llegar a ser un buen reemplazo de los sensores IMU, aún presentan un tiempo de respuesta lento, muchas veces llegando a 1s, en consecuencia, se le asigna un puntaje de 2. Finalmente, el tercer concepto utiliza también un sensor IMU por lo que su puntaje es el mismo que el del concepto 1.

- **Facilidad de transporte:** Uno de los requerimientos planteados era que el equipo tenía que ser lo más ligero posible, con un peso no mayor a 15kg. Se le asigna un peso de 3 al criterio, debido a que es acorde a la ley N°20988 (MTPE, 2009). Para el análisis se tuvo en cuenta los componentes que tienden a tener un mayor peso, en este caso los propulsores y los acondicionadores de energía, no se toma en cuenta la estructura como tal ya que su diseño se basa en los componentes ya mencionados. En primer lugar, se tiene que el concepto 1 hace uso de 6 propulsores DC largos cuyos pesos oscilan entre los 0.7 kg y 1.5 kg (SeaBotix, 2020a); además, un reductor de voltaje de 70VDC o similares tiene un peso aproximado de 0.75 kg, por lo que harían un total de 5.25kg; ya que cumple con el requerimiento se le asigna un puntaje de 3. En segundo lugar, en el concepto 2 se tienen propulsores DC compactos los cuales pesan alrededor de 0.3 kg, y una fuente conmutada oscila entre los 0.2 kg y 0.25 kg, con lo que en total se tendría un peso aproximado de 2.05kg; por el mismo motivo que en el caso anterior se le asigna

un puntaje de tres. Finalmente, el concepto 3 utiliza 6 propulsores AC de 8.5kg aproximadamente y un estabilizador cuyo peso se encuentra alrededor de los 5kg, obteniéndose un peso total de 56kg lo cual excede el límite establecido, por ello obtiene un puntaje de 1.

- **Hidrodinámica:** Cuando se dice que un vehículo es hidrodinámico se hace alusión a su capacidad de desplazarse fácilmente por el agua. Esto en mayor parte depende del diseño de su carcasa (estructura). Se le asigna un peso de 2, ya que, si bien es una propiedad importante en cualquier vehículo, esta se puede compensar utilizando propulsores de gran capacidad (potencia). Como se mostró en la Figura 4.10, 4.12 y 4.14, el diseño estructural del segundo concepto de solución tiene distintos desniveles los cuales permiten un flujo suave del agua alrededor de él, facilitando su desplazamiento; por otro lado, los conceptos de solución 2 y 3 dependen más de la potencia de sus propulsores para desplazarse correctamente. En consecuencia, los conceptos 1 y 3 obtienen un puntaje de dos; y el concepto 2, un puntaje de tres.
- **Velocidad de procesamiento:** Depende en su mayoría de los algoritmos y el entorno (software) en el que se trabaja. Se le asigna un peso de 3, debido a que este delimita el tiempo que toma en realizar el análisis, afectando directamente las imágenes por segundo que visualizará el usuario. Por lo tanto, es importante realizar el procesamiento de imágenes con una librería y un entorno que sea capaz de manejar el procesamiento en tiempo real con buena velocidad y precisión. Es en este sentido en el cual OpenCV con Python supera a Matlab. Finalmente, el primer y tercer concepto de solución obtiene un puntaje de 3, mientras que el segundo concepto, un puntaje de 2.

Tabla 2.3. Valor técnico de los conceptos de solución

Conceptos	Concepto de solución 1			Concepto de solución 2		Concepto de solución 3		Solución ideal	
	g	p	pg	p	pg	p	pg	p	pg
Estabilidad	4	3	12	2	8	3	12	4	16
Facilidad de transporte	3	3	9	3	9	1	3	4	12
Hidrodinámica	2	2	4	3	6	2	4	4	8
Velocidad de procesamiento	3	3	9	2	6	3	9	4	12
Puntaje máximo	12	11	34	10	29	9	32	16	48
Valor técnico (\bar{X}_i)		0.67	0.71	0.625	0.6	0.56	0.67	1	1

Evaluación Económica:

- Consumo energético:** Este criterio es determinado por la cantidad de componentes y la potencia que requieren para funcionar; debido a que esto afecta directamente el costo de uso del vehículo y su interfaz es que se le asigna un peso de 2. Para el análisis se toma en cuenta el consumo de los propulsores únicamente, ya que son el componente que requieren una mayor potencia eléctrica para su funcionamiento. Para el primer concepto, se tiene que los propulsores consumen alrededor de 660W en total, por lo que se le asigna un puntaje de tres. Por otro lado, para el segundo concepto se calcula un consumo que oscila por los 810W; en consecuencia, recibe un puntaje de tres. Finalmente, el tercer concepto presenta el consumo eléctrico más elevado, alrededor de 6kW, obteniendo un puntaje de uno.
- Costo tecnológico:** Este criterio está vinculado al precio de los componentes que se requieren para la fabricación del vehículo, en consecuencia, este criterio tiene un peso de 4. Todos los conceptos poseen una cantidad similar de componentes, la diferencia recae en el tamaño de los mismos, para este caso los propulsores DC largos tienen un

precio aproximado de \$150 (US\$900 americanos en total), por lo que el primer concepto recibe un puntaje de tres. Por otro lado, el precio de un propulsor DC compacto es aproximadamente de US\$100 (US\$600 americanos en total); en consecuencia, el segundo concepto obtiene un puntaje de tres. Finalmente, el precio de los propulsores AC oscila en los \$300 (\$1800 americanos en total), otorgándole al último concepto un puntaje de uno. Cabe aclarar que todos los precios fueron promediados en base a distintas páginas web, en realidad estos valores pueden ser por mucho más bajos dependiendo de lo que se requiera.

- **Mantenimiento:** El criterio está relacionado con la facilidad con la que se puede desmontar y realizar el mantenimiento del vehículo, al ser un factor que afecta directamente al tiempo y, en consecuencia, al costo de mantenimiento del sistema, es que se le asigna un peso de 3. Para este análisis nos basaremos en la facilidad de extracción del compartimiento seco; el concepto 1 tiene una geometría simple y un tamaño mediano, por lo que el desmontaje del mismo no tendrá mayor inconveniente, por esto se le asigna un puntaje de 3. El concepto 2 por otro lado, tiene una geometría y una distribución más compacta, por lo que será más difícil de desmontar y extraer las piezas, en consecuencia, obtiene un puntaje de 2. Finalmente, el concepto 3, su gran tamaño y sus componentes fácilmente distinguibles facilitan su mantenimiento en comparación, solo jugándole en contra el peso relativamente elevado que tiene, por esta razón se le asigna un puntaje de 2.
- **Disponibilidad de componentes:** En términos generales, si bien el uso de drones se ha vuelto una práctica muy popular en el Perú; el uso de ROVs por otro lado no se ha masificado, en consecuencia, los componentes necesarios para la fabricación de uno

(propulsores, cable umbilical, entre otros) son, en su mayoría, importados. Por este motivo se le asigna un puntaje de 2 a todos los conceptos.

Tabla 2.4. Valor económico de los conceptos de solución

Conceptos	Concepto de solución 1			Concepto de solución 2		Concepto de solución 3		Solución ideal	
	g	p	pg	p	pg	p	pg	p	pg
Consumo energético	2	3	6	3	6	1	2	4	8
Costo tecnológico	4	3	12	3	12	1	4	4	16
Mantenimiento	3	3	9	2	6	2	6	4	12
Disponibilidad de componentes	3	2	6	2	6	2	6	4	12
Puntaje máximo	12	11	33	10	30	6	18	16	48
Valor técnico (\bar{Y}_i)		0.69	0.69	0.625	0.63	0.38	0.38	1	1

Gráfica Comparativa:

A continuación, se muestra la gráfica resultante de la evaluación anterior.



Figura 2.16. Gráfica de evaluación técnica-económica

Como se puede observar el concepto de solución 3 queda descartado por su bajo valor técnico, entonces entre el concepto 1 y 2 resulta como ganador el primero, ya que posee un mejor balance técnico-económico.

2.3. CONCEPTO ÓPTIMO

Si bien hay muchos aspectos que el concepto 1 resalta, como su precisión, estabilidad, bajo consumo, etc. Aún tiene muchos otros en los que el concepto 2 lo sigue superando en temas como el peso, costos, los cuales se ven reflejados por el tipo de propulsores usados y en la fuente usada; el diseño hidrodinámico no será cambiado ya que esto representaría una mayor dificultad de fabricación y montaje. Por lo que el concepto óptimo se obtendría realizándole un par de modificaciones al concepto de solución 1.

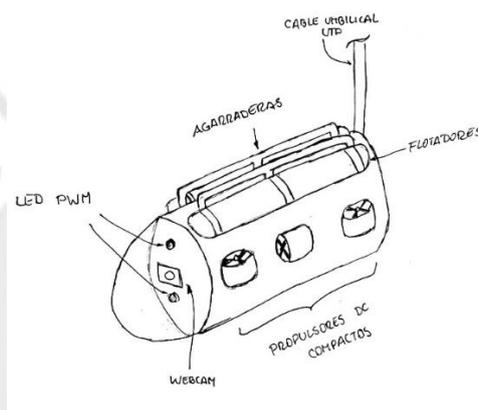


Figura 2.17. Vehículo del concepto óptimo. Elaboración propia

Como se puede visualizar en lo que respecta al vehículo se hizo solamente el cambio de los tipos de propulsores usados. Y para el caso del interior del vehículo de la Figura 2.18, se opta por una fuente conmutada en lugar del regulador anterior y por cambiar los convertidores DC-DC (step downs), por reguladores de voltaje integrados para reducir el espacio.

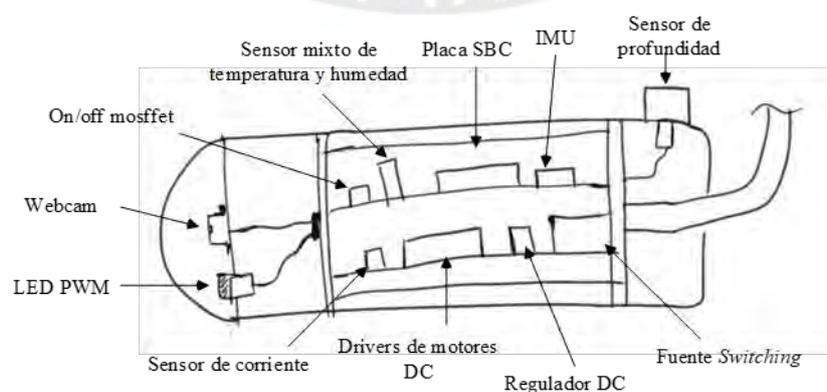


Figura 2.18. Vista interior del vehículo del concepto óptimo. Elaboración propia

DISEÑO PRELIMINAR

En esta sección se diseñará preliminarmente el concepto óptimo establecido anteriormente. En primer lugar, se elaborará el modelo 3D del sistema. Luego se mostrará el diagrama de operaciones para facilitar el uso del vehículo y la interfaz. Después, se expondrá la interacción entre los componentes electrónicos mediante un diagrama de arquitectura de hardware. Y se finalizará, con la definición del diagrama de flujo que sigue el controlador.

3.1. MODELO 3D

Una vez realizada la definición del concepto óptimo, se requiere realizar un modelo 3D que facilite la visualización y distribución de los componentes del vehículo. Por esta razón, en la siguiente imagen se puede visualizar el modelo 3D externo del vehículo submarino.

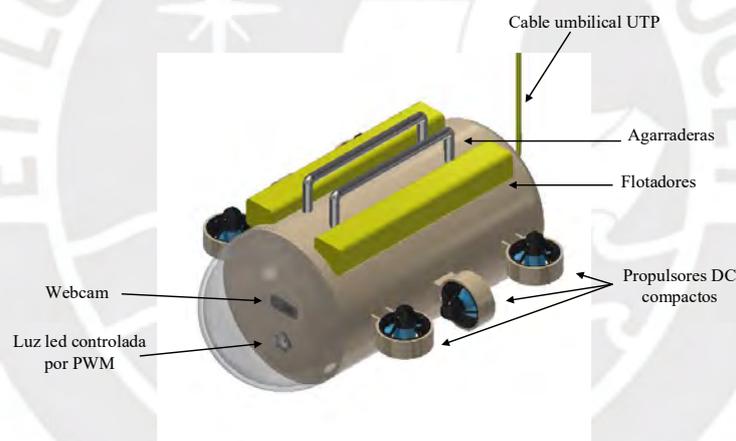


Figura 3.1. Vista externa del modelo 3D del vehículo. Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, los propulsores fueron cambiados por unos más compactos, lo cual cambia el diseño de la estructura. Por lo que, al igual que en el primer concepto de solución se tienen tres propulsores por lado, pero estos son compactos, permitiendo así una mayor versatilidad y un menor peso. Por otro lado, el interior del vehículo cambió, ahora como se definió en el concepto óptimo se muestran los reguladores de voltaje y la fuente conmutada en la siguiente imagen.

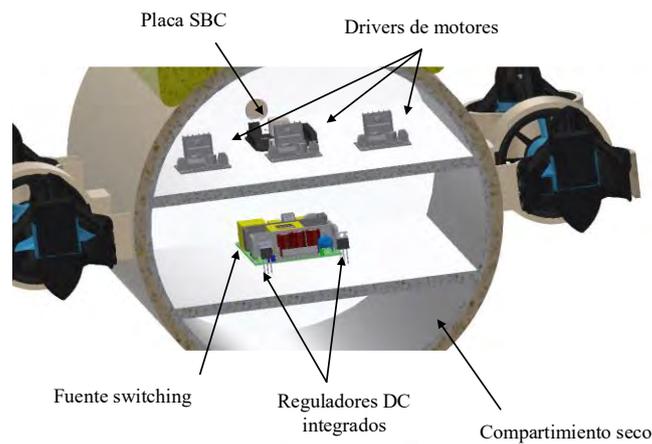


Figura 3.2. Vista de sección del modelo 3D del vehículo. Elaboración propia.

Además, también se puede observar el compartimiento seco de aluminio, y la placa media que separa el sistema eléctrico del sistema electrónico.

3.2. DIAGRAMA DE OPERACIONES

Para poder entender la forma correcta de utilizar el sistema (vehículo e interfaz), es que se elaboró el siguiente diagrama de operaciones.

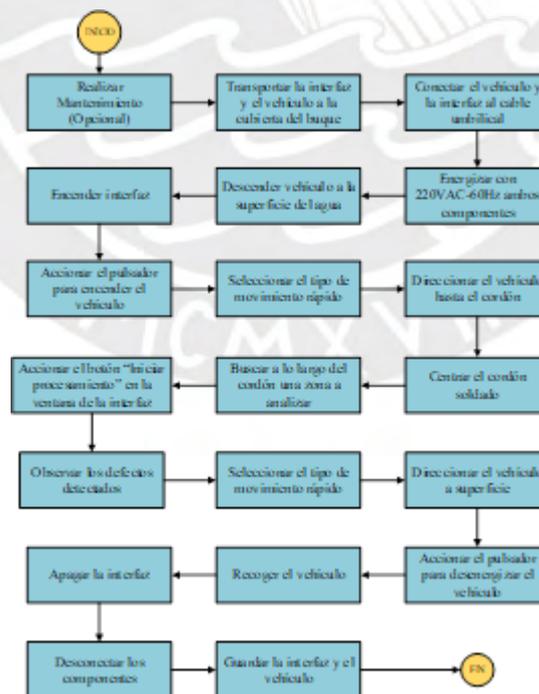


Figura 3.3. Diagrama de operaciones para el mantenimiento preventivo del vehículo. Elaboración propia.

Para un mayor entendimiento del diagrama de operaciones, este puede ser dividido en los siguientes esquemas.

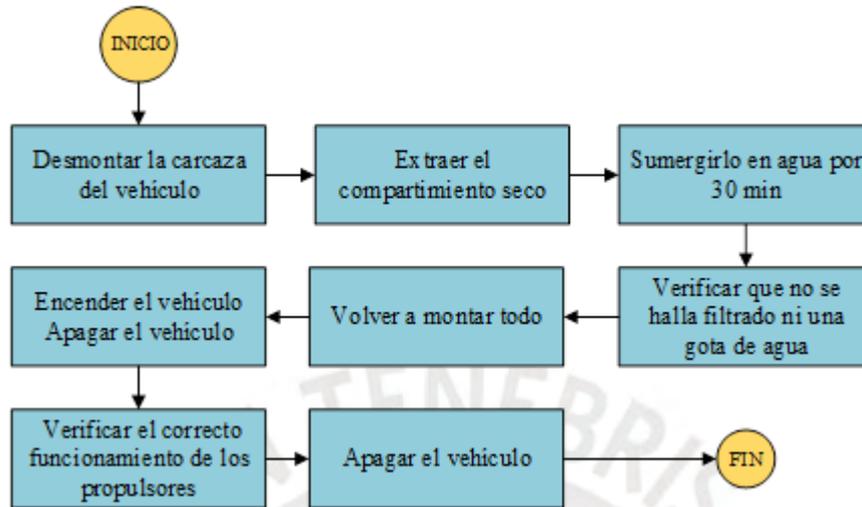


Figura 3.4. Diagrama de operaciones para el mantenimiento preventivo del vehículo. Elaboración propia.

En el diagrama mostrado en la Figura 3.4 se muestran los pasos a seguir para realizar el mantenimiento preventivo del vehículo submarino

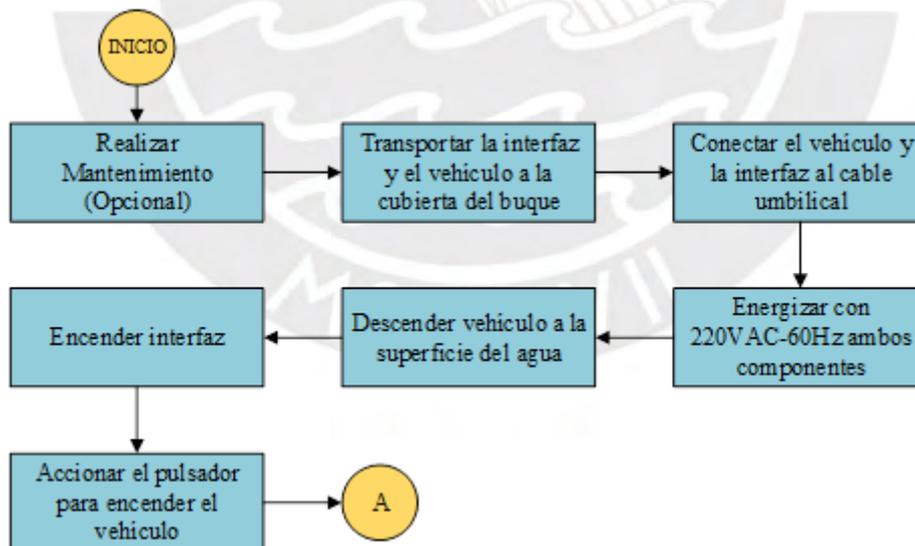


Figura 3.5. Diagrama de operaciones para instalar el vehículo y la interfaz. Elaboración propia.

En la Figura 3.5 se puede visualizar paso a paso todo lo que se debe realizar para instalar la interfaz y el vehículo, considerando el mantenimiento preventivo como un evento realizado cada 2 meses como mínimo.

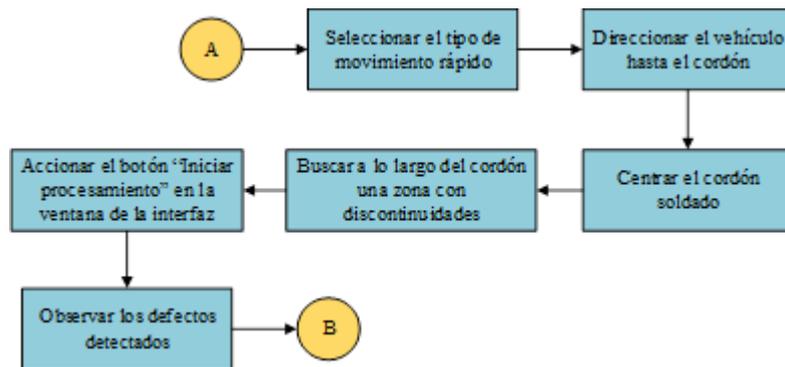


Figura 3.6. Diagrama de operaciones para usar el vehículo y la interfaz. Elaboración propia.

Después de la instalación del sistema, se prosigue con los pasos descritos en la Figura 3.6, los cuales indican como usarlo sin mayor inconveniente, cabe añadir que en caso se requiera seguir haciendo uso de él, se deberá repetir los pasos de la figura anterior.

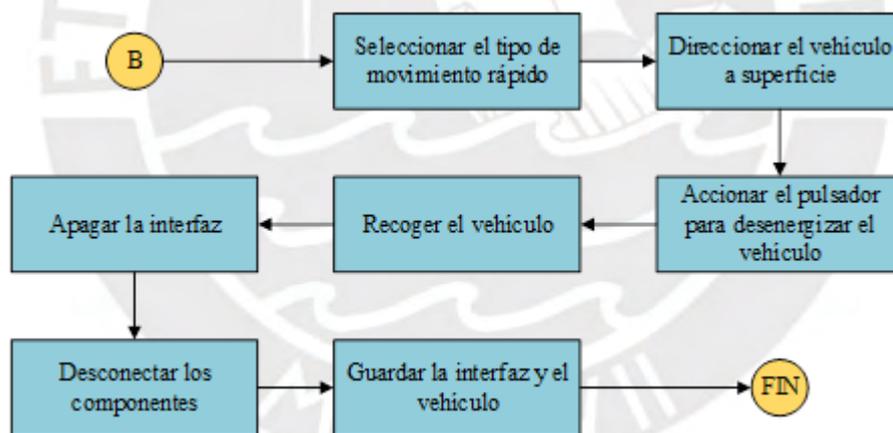


Figura 3.7. Diagrama de operaciones para guardar el vehículo y la interfaz. Elaboración propia.

Finalmente, si ya no se requiere hacer uso del vehículo y la interfaz se deben seguir los pasos descritos por la Figura 3.7.

3.3. ARQUITECTURA DE HARDWARE

En el siguiente diagrama se puede observar la interacción entre los distintos componentes electrónicos del sistema. Además de las funciones que cada grupo de ellos cumplen. Cabe aclarar que el procesamiento de imágenes va a ser realizado por la laptop, y la placa SBC se dedicará únicamente a controlar los actuadores, leer sensores, y mantener la base de datos a utilizar.

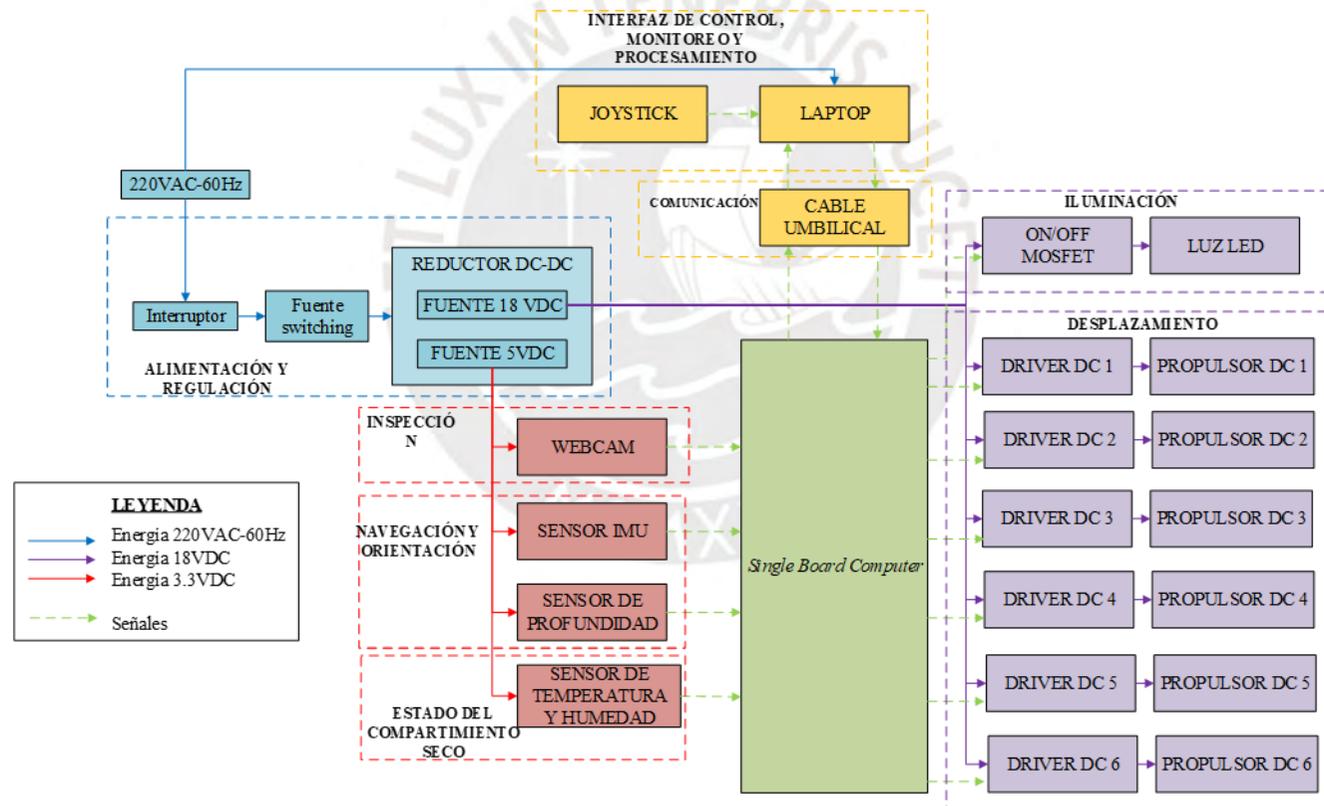


Figura 3.8. Diagrama de arquitectura de Hardware.

3.4. FLUJOGRAMA GENERAL DEL SISTEMA

Se expondrán dos diagramas de flujo general, el controlador y la interfaz. En primer lugar, en la Figura 3.9 se observa el flujograma del controlador. El cual inicializa los sockets para la comunicación ethernet y la base de datos. Luego, inicializa las variables, recopila la información de las cámaras y la escribe en la base de datos. Después, sigue un ciclo en el que obtiene de la base de datos información acerca del nivel de iluminación, y la velocidad y sentido del desplazamiento, y en base a estos modifica la señal de control de los actuadores. Finalmente, lee los datos de los sensores de estado, y profundidad para luego escribirlos en la base de datos.

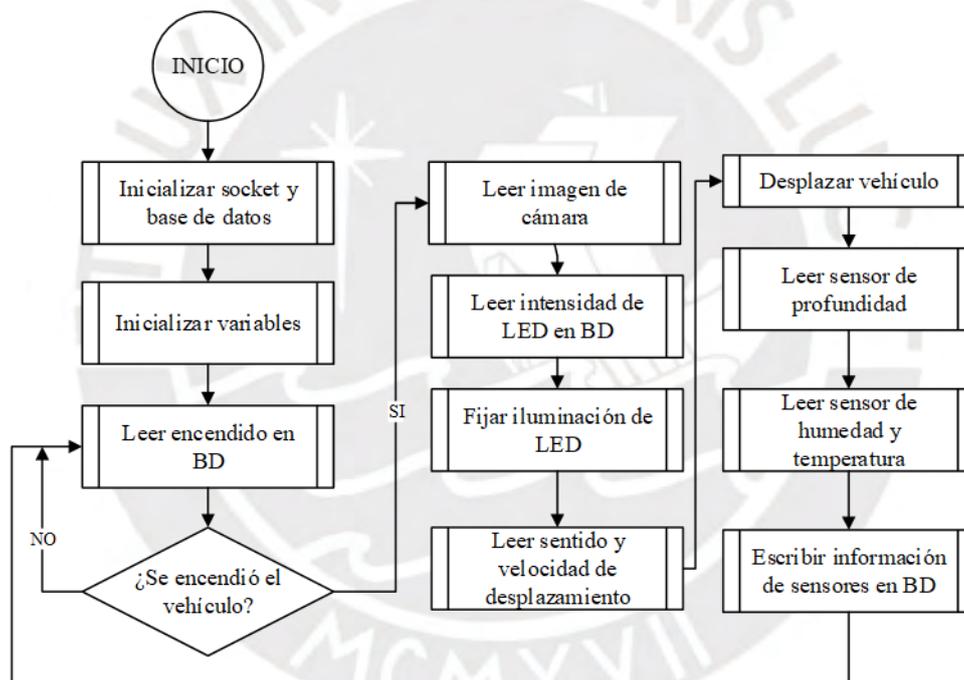


Figura 3.9. Flujograma general del controlador

Por otro lado, se tiene el diagrama de flujo de la Figura 3.10, el cual es similar al del controlador, pero en este caso, se verifican constantemente si se ha ejecutado un comando y monitorea la información de los sensores. Además, también se encarga del procesamiento de la imagen recibida.

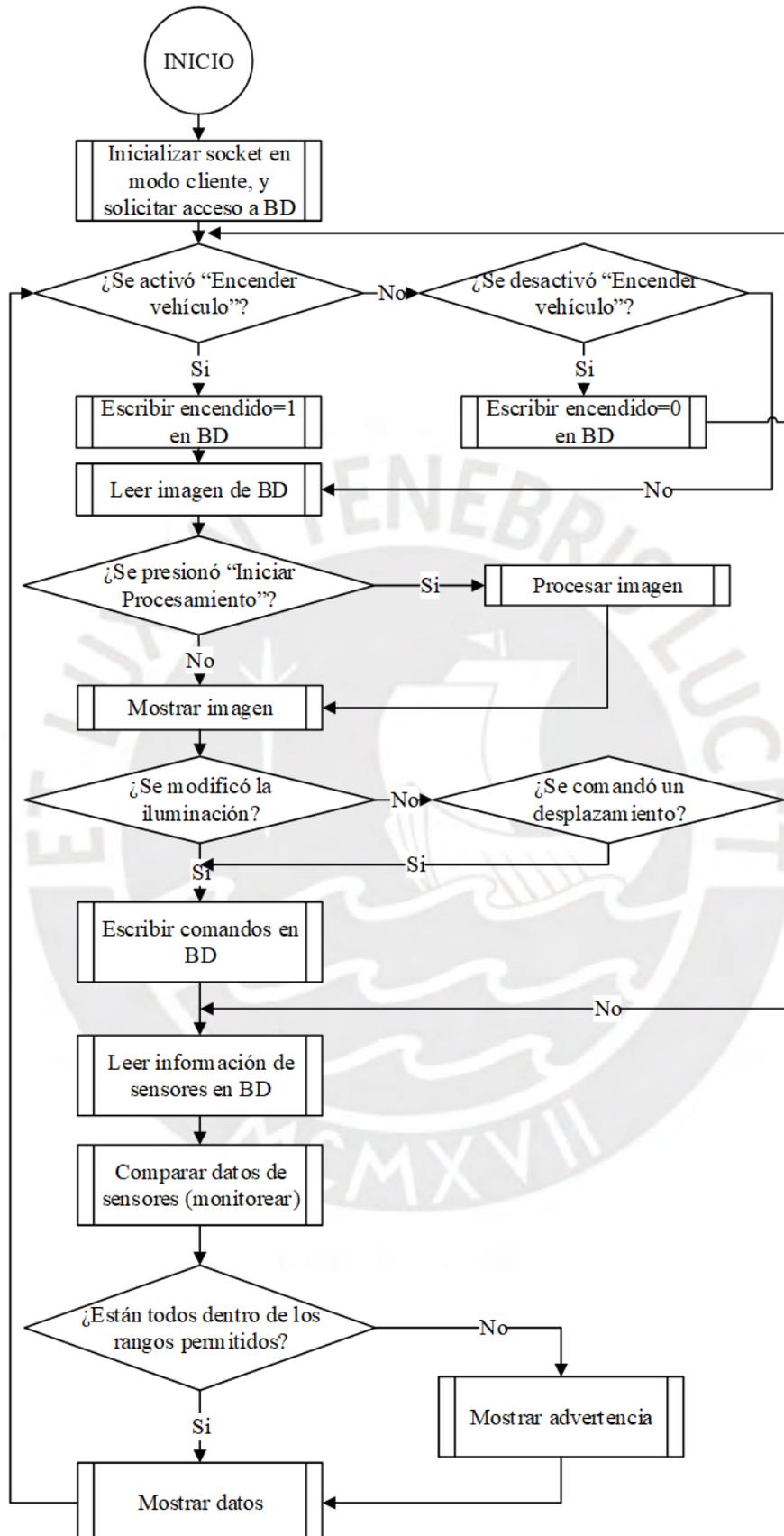


Figura 3.10. Flujograma general de la interfaz

CONCLUSIONES

- En base a la revisión de la problemática, se identificó la poca eficiencia que posee el proceso de mantenimiento preventivo de cordones soldadura en la carena de los buques. En respuesta, el uso de un ROV ayudará a superar problemas como la limitada accesibilidad, el costo y la duración del proceso, y los riesgos que el entorno marino conlleva.
- Se revisaron los distintos algoritmos de visión existentes, de los que se extrajeron distintas herramientas. El uso de la umbralización por PDF lidia correctamente con los entornos tan caóticos como lo es el entorno marino. Además, se estableció que para realizar una correcta detección de discontinuidades es necesario el uso de un algoritmo de *machine learning* (LDA, QDA, *K-nearest neighbours*) para poder clasificar las detectadas inicialmente, y así, determinar si son discontinuidades o no.
- Si bien existen distintos sistemas de visión para poder estabilizar los ROV, los cuales son una opción menos costosa respecto a un IMU (Unidad de Medición Inercial), estos requieren de un sistema de referencia. Por este motivo, no son eficientes en aplicaciones como la carena de un buque, en la cual no existe un objeto de referencia.
- Cuando se necesita capturar video en entornos marinos se requiere de tener iluminación, ya que el agua de mar dificulta la transmisión de la luz. Por este motivo, se requiere utilizar alguna fuente de luz. En la actualidad, el uso de Leds se a popularizado en el diseño de ROVs, esta se puede complementar con el uso de una cámara especializada para entornos de poca luz, también llamada cámara de luz tenue.

BIBLIOGRAFÍA

- Arrieta, J., Londoño, D., & Hernandez, A. (2014). *Identificación de salpicaduras en uniones soldadas mediante técnicas de visión artificial*. <https://doi.org/10.13140>
- AWS. (2015). AWS D1.1/D1.1M:2015. 2015. <https://pubs.aws.org/p/1677/d11d11m2015-codigo-de-soldadura-estructural-acero-spanish>
- Bilogistik S.A. (2019). *Tipos de buque según su tamaño*. <https://www.bilogistik.com/blog/tipos-buque-segun-tamano/>
- Dique seco flotante*. (2020). <https://products.damen.com/es-es/ranges/floating-drydock>.
- Felmer, A., Valverde, D., & Krugger, F. (2020). *PATOLOGIAS DEL BUCEO Guía Clínica y de Primeros Auxilios*. <https://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/patologias-del-buceo.pdf>
- Fifish V6*. (2020). Qysea. <https://www.qysea.com/products/fifish-v6-specs/>
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems* (John Wiley & Sons Inc (Ed.); 4th ed.). John Wiley & Sons. https://books.google.com.pe/books/about/Fundamentals_of_Modern_Manufacturing.html?id=QU-Qvud3OvoC&redir_esc=y
- Guivernau, J. (2011). *PROCESOS DE SOLDADURA APLICADOS EN LA CONSTRUCCION NAVAL* [Universidad Politécnica de Cataluña]. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13730/PFC-Procesos de soldadura aplicados en la construccion naval.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13730/PFC-Procesos%20de%20soldadura%20aplicados%20en%20la%20construccion%20naval.pdf)
- Hernandez Riesco, G. (2002). *Manual del Soldador* (10th ed.). CESOL.
- Hidalgo Herencia, F. (2012). *Sistema automático de estabilización para un vehículo submarino operado remotamente utilizando visión por computadora* [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/1752>
- ISO. (2013). *Soldeo y procesos afines. Clasificación de las imperfecciones geométricas en los materiales metálico*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu->

norma/norma?c=N0052416

Izenman, A. J. (2008). *Modern Multivariate Statistical Techniques*. Springer New York.

<https://doi.org/10.1007/978-0-387-78189-1>

Kerdels, J., Albiez, J., & Kirchner, F. (2008). A Robust Vision-Based Hover Control for ROV.

OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 1–7.

<https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2008.4531019>

Łabanowski, J., Fydrych, D., & Rogalski, G. (2008). Underwater Welding - A Review. *Advances in*

Materials Sciences, 8(3). <https://doi.org/10.2478/v10077-008-0040-3>

Liu, D., & Yu, J. (2009). Otsu Method and K-means. *2009 Ninth International Conference on Hybrid*

Intelligent Systems, 344–349. <https://doi.org/10.1109/HIS.2009.74>

MTPE. (2009). *Ley N°29088*. [http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-](http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-boletines/papa/reglamentoley29088.pdf)

[boletines/papa/reglamentoley29088.pdf](http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-boletines/papa/reglamentoley29088.pdf)

Murillo Sigero, A. (2010). *ANÁLISIS DE DEFECTOS Y COMO EVITARLOS EN SOLDADURAS DE*

ARCO SMAW Y SAW LONGITUDINALES Y CIRCUNFERENCIALES EN DUCTOS DE

TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS. 52.

[https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/269/1/MONO-ETSI-](https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/269/1/MONO-ETSI-MURILLO.SIGERO%283%29.pdf)

[MURILLO.SIGERO %283%29.pdf](https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/269/1/MONO-ETSI-MURILLO.SIGERO%283%29.pdf)

Notilo Plus. (2020). *Seasam*. <https://seasam.notiloplus.com/>

OpenCV. (2020a). *Harris corner detector*.

https://docs.opencv.org/3.4/d4/d7d/tutorial_harris_detector.html

OpenCV. (2020b). *Understanding k-Nearest Neighbour*.

https://docs.opencv.org/master/d5/d26/tutorial_py_knn_understanding.html

Ruiz, A. (2020). *Discontinuidades del Metal Base y de la Soldadura ASNT NDT Level III Services*.

Sánchez, A., & Espinosa, A. (2018). Identificación de Poros en Uniones Soldadas Empleando

Técnicas de Visión por Computador. *Ingenierías USBMed*, 9(2), 27–33.

<https://doi.org/10.21500/20275846.3532>

SeaBotix. (2020a). *ROV Accessories and Options* -. <http://www.teledynemarine.com/auv-rov->

thrusters/?BrandID=19

SeaBotix. (2020b). *VLBV950*. <http://www.teledynemarine.com/vlbv950>

Soria, N., Cabrera, D., & Guerra, P. (2014). Diseño y Construcción de un ROV (Remotely Operated Vehicule) Submarino USFQ. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 6(1).

<https://doi.org/10.18272/aci.v6i1.166>

Subsea Tech. (2020). *Mini-ROV Guardian*. <https://www.subsea-tech.com/mini-rov-guardian/>

Underwater GPS – Water Linked AS. (2020). <https://waterlinked.com/underwater-gps/>

Underwater NDT Inspections. (2020). <https://www.fndiving.com/services/underwater-inspection/underwater-ndt-inspections/>

Underwater Ship Inspections | Assessing Ship Hull Condition. (2020).

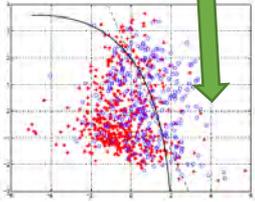
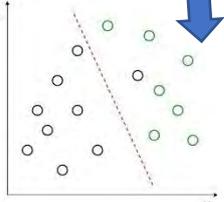
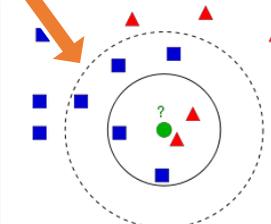
<https://www.kbamarine.com/blog/7/why-do-ships-require-underwater-inspections->

VDI. (2007). *General VDI-procedure of systematic development and design (VDI 2221)*.

https://www.researchgate.net/figure/General-VDI-procedure-of-systematic-development-and-design-VDI-2221-1993_fig1_229440281

XSENS. (2020). *Inertial sensors*. <https://www.xsens.com/inertial-sensors>

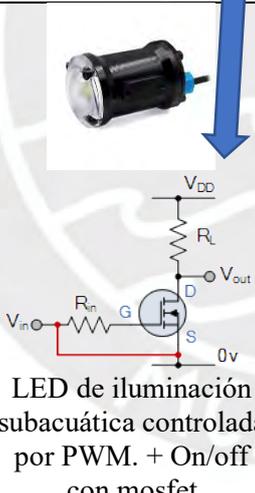
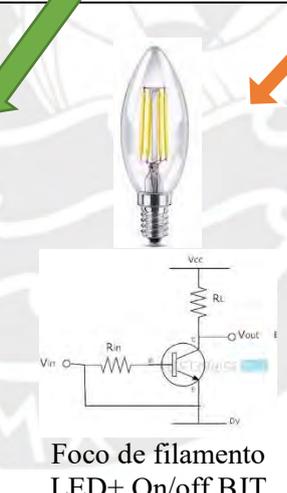
ANEXO A: Matriz Morfológica

			Dominio de interfaz/software			
Función			Opción 1	Opción 2	Opción 3	
Encender/Apagar vehículo			 <p>Pulsador</p>	 <p>Pulsador giratorio</p>	 <p>Botón pulsador de llave electromecánico</p>	
Aumentar/Disminuir Iluminación			 <p>Teclado de computadora/laptop</p>	 <p>Joystick analógico</p>		
Direccionar vehículo			 <p>Joystick analógico</p>	 <p>Teclado de computadora/laptop</p>		
Procesar Imagen	Hardware	Extracción de características	 <p>Laptop</p>			
		Clasificación de imagen				
	Software	Extracción de características	 <p>Algoritmo de visión por Matlab</p>	 <p>Algoritmo de visión en Python</p>		
		Clasificación de imagen	 <p>Análisis discriminante cuadrático</p>	 <p>Análisis discriminante lineal</p>	 <p>K-vecinos más cercanos</p>	

Monitorear información		
Mostrar información		

Laptop

Dominio de actuadores

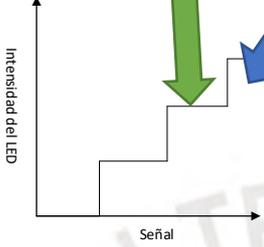
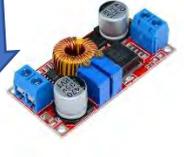
Función	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Desplazar vehículo	 <p>Propulsor DC largo +Driver de motor DC</p>	 <p>Propulsor DC pequeño+ Driver de motor DC</p>	 <p>Propulsor AC+ Driver de motor AC</p>
Iluminar superficie	 <p>LED de iluminación subacuática controlada por PWM. + On/off con mosfet</p>	 <p>Foco de filamento LED+ On/off BJT</p>	

Dominio de sensores

Función	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Obtener imagen	 <p>Cámara de luz tenue para ROV</p>	 <p>Webcam</p>	 <p>Cámara IP</p>

Sensar temperatura del compartimiento seco	 Sensor de temperatura RTD	 Sensor de temperatura infrarrojo	 Sensor mixto (humedad y temperatura)
Sensar humedad del compartimiento seco	 Sensor de humedad resistivo	 Sensor de humedad capacitivo	 Sensor mixto (humedad y temperatura)
Sensar profundidad	 Sensor de profundidad por presión	 Sensor de profundidad y de cabeceo	
Sensar orientación del vehículo	 Giroscopio, acelerómetro	 Sensor de flujo óptico	 Sensor de profundidad y de cabeceo
Sensar corriente/potencia consumida por los motores	 Sensor de corriente de medición directa	 Sensor de corriente de efecto Hall	
Dominio de comunicación			
Función	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Enviar información	 Cable umbilical UTP		
Recibir información			
Dominio de mecánico			
Función	Opción 1	Opción 2	Opción 3

<p>Proteger componentes eléctricos</p>	 Compartimiento seco de acrílico	 Compartimiento seco de aluminio	 Compartimiento seco de platino
<p>Transportar/Albergar componentes</p>	 Estructura dinámica	 Estructura rectangular	 Estructura cilíndrica
<p>Compensar peso</p>	 Flotadores		
Dominio de procesamiento/control			
<p>Función</p>	<p>Opción 1</p>	<p>Opción 2</p>	<p>Opción 3</p>
<p>Procesar datos</p>	 Placa de microcontrolador	 Ordenador de placa simple (microprocesador)	 FPGA y microprocesador
<p>Transmitir imagen</p>	 Ordenador de placa simple (microprocesador)	 FPGA y microprocesador	

Hardware	Regular iluminación	 Placa de microcontrolador	 Ordenador de placa simple (microprocesador)	 FPGA y microprocesador	
Software	Regular iluminación	 Intensidad del LED vs Señal Incremento y decremento normal			
Controlar desplazamiento del vehículo		 Placa de microcontrolador	 Ordenador de placa simple (microprocesador)	 FPGA y microprocesador	
Dominio de energía					
Función	Opción 1	Opción 2	Opción 3		
Acondicionar energía	 Reductor de voltaje 220VAC-70VDC	 Estabilizador de energía.	 Fuente switching 5VDC		
Energizar controlador	 Step down DC-DC	 Regulador integrado de voltaje DC			
Energizar sensores	 Step down DC-DC	 Regulador integrado de voltaje DC			

Energizar iluminación	 <p>Step down DC-DC</p>	 <p>Regulador integrado de voltaje DC</p>	
-----------------------	--	---	--

