

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL CON UN SISTEMA DE
SENSORES INTELIGENTES PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN TUBERÍAS
PRIMARIAS DE LIMA NORTE**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico, que presenta el bachiller:

ALEXANDER FRANCISCO SEGOVIA RAZO

ASESOR:

MSc. FRANCISCO FABIÁN CUELLAR CÓRDOVA

Lima, Febrero del 2020

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Francisco y María, quienes en cada día de mi vida me enseñan valores que permiten formarme como una persona de bien.

A mi hermano Wilfredo, quien es mi ejemplo de superación y lucha.

A mis abuelos y tíos, que con cada consejo me han guiado a lo largo de todos estos años.

A mi asesor, por la oportunidad brindada para ser parte de este proyecto y las enseñanzas brindadas a lo largo de este proceso.

RESUMEN

El sistema de distribución de agua potable en la ciudad de Lima posee aproximadamente 40 años de antigüedad, causa por la cual en los últimos años se han presentado aniegos en diversos puntos de la capital peruana. La corrosión y falta de mantenimiento han provocado pérdidas económicas al Estado que ascienden hasta 10 millones de soles por tubería dañada. Además, las conexiones clandestinas se presentan como un problema latente en la comunidad limeña al ocasionar pérdidas económicas de hasta 2 millones 400 mil soles anualmente. El presente trabajo, motivado por la problemática descrita, tiene como objetivo principal el desarrollo de un sistema de inspección de tuberías. Este sistema debe integrar un conjunto de sensores que permitan extraer información relevante para una posterior reconstrucción tridimensional de la tubería inspeccionada y un procesamiento digital de imágenes de la superficie interna de la tubería. En el desarrollo de la presente tesis se muestra el detalle del diseño electrónico y mecánico del sistema mencionado. Finalmente, se concluye que el diseño descrito es económicamente viable ya que otros robots comerciales ofrecen características inferiores por costos iguales o más elevados que los estimados para este sistema.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MARCO DE REFERENCIA.....	4
1.1 MARCO HISTÓRICO	5
1.2 MARCO TEÓRICO	9
1.2.1 ROBOTS MÓVILES	9
1.2.2 SENSORES PARA DIGITALIZACIÓN DE AMBIENTES	16
1.3 MARCO METODOLÓGICO	18
CAPÍTULO 2: DISEÑO CONCEPTUAL.....	20
2.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	20
2.1.1 REQUERIMIENTOS DE LA ESTACIÓN DE CONTROL.....	21
2.1.2 REQUERIMIENTOS DEL ROBOT MÓVIL.....	22
2.2 ESTRUCTURA DE FUNCIONES.....	23
2.3 CONCEPTO SOLUCIÓN.....	26
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO	29
3.1 ESTACIÓN DE CONTROL	29
3.1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	30
3.1.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES	31
3.2 ROBOT MÓVIL	36
3.2.1 DOMINIO DE SENSORES	37
3.2.2 DOMINIO DE ACTUADORES	41
3.2.3 DOMINIO ELECTRÓNICO.....	54
3.2.4 DOMINIO ENERGÉTICO.....	63
3.2.5 DOMINIO MECÁNICO	75
3.2.6 DOMINIO DE CONTROL	89
CAPÍTULO 4: PLANOS Y ESTIMACIÓN DE COSTOS	96
4.1 RELACIÓN DE PLANOS MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS.....	97
4.2 COSTOS DE LA ESTACIÓN DE CONTROL.....	98
4.3 COSTOS DEL ROBOT MÓVIL.....	99
4.3.1 COSTOS DE DISEÑO.....	99
4.3.2 COSTO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS.....	99
4.3.3 COSTOS DEL DOMINIO MECÁNICO.....	101
4.4 COSTO TOTAL DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS	103
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES.....	106
BIBLIOGRAFÍA.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag
Tabla 1.1: Sistemas comerciales de inspección de tuberías	4
Tabla 1.2: Sistemas de inspección de tuberías – Investigaciones	6
Tabla 1.3: Sensores de inspección para tuberías	7
Tabla 3.1: Tabla comparativa de ordenadores	31
Tabla 3.2: Tabla comparativa de gamepad's	32
Tabla 3.3: Tabla comparativa de generadores eléctricos	33
Tabla 3.4: Características del cable de conexión	34
Tabla 3.5: Tabla comparativa de tambor para cable	35
Tabla 3.6: Tabla comparativa para la cámara delantera	38
Tabla 3.7: Tabla comparativa para la cámara trasera	39
Tabla 3.8: Tabla comparativa para la cámara de profundidad	40
Tabla 3.9: Tabla comparativa para Lidar 2D	41
Tabla 3.10: Tabla comparativa para mortor-reductor	50
Tabla 3.11: Tabla comparativa de luces	55
Tabla 3.12: Tabla comparativa para controlador de motor	58
Tabla 3.13: Tabla comparativa para sistema embebido de control	59
Tabla 3.14: Tabla comparativa para ordenador	60
Tabla 3.15: Tabla comparativa para módulo de comunicación	61
Tabla 3.16: Tabla comparativa para enrutador	62
Tabla 3.17: Resumen energético general	64
Tabla 3.18: Resumen energético	65
Tabla 3.19: Regulador DC-DC	65
Tabla 3.20: Relé de estado sólido	69
Tabla 3.21: Disipador para relé	71
Tabla 3.22: Diodo	72
Tabla 3.23: Disipador para diodo	73
Tabla 3.24: Fuente conmutada	74
Tabla 3.25: Baterías	75
Tabla 3.26: Caja electrónica	85
Tabla 3.27: Conector de señales y potencia	86
Tabla 3.28: Conectores de la caja electrónica de control	87
Tabla 3.29: Transmisión de información	96
Tabla 4.1: Planos principales	99
Tabla 4.2: Planos del chasis inferior	99
Tabla 4.3: Planos del chasis superior	100

Tabla 4.4: Planos para los sensores traseros-delanteros	100
Tabla 4.5: Planos esquemáticos	100
Tabla 4.6: Costos de la estación de control	101
Tabla 4.7: Costos de diseño	101
Tabla 4.8: Costos de actuadores, sensores y del dominio electrónico	102
Tabla 4.9: Costos de componentes del dominio energético	103
Tabla 4.10: Costos de implementación y tarjetas electrónicas	103
Tabla 4.11: Costos de fabricación de las piezas del chasis inferior	104
Tabla 4.12: Costos de fabricación del chasis superior	104
Tabla 4.13: Costos de fabricación para los sensores delanteros-traseros	104
Tabla 4.14: Costos de ensamble y pruebas	104
Tabla 4.15: Costos de componentes adicionales	105
Tabla 4.16: Costo estimado total	105



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag
Figura 1.1: Sistema de locomoción basado en piernas	8
Figura 1.2: Comparación de potencia mecánica en sistemas de locomoción	9
Figura 1.3: Robot móvil de inspección de tuberías	10
Figura 1.4: Diagrama cinemático de un robot móvil de 4 ruedas motrices	10
Figura 1.5: Modelo dinámico de un robot móvil	12
Figura 1.6: Diagrama eléctrico de un motor DC	14
Figura 1.7: Deformaciones de un patrón de luz IR	15
Figura 1.8: Sistema de visión estereoscópica	16
Figura 1.9: Nube de puntos extraída a partir de un sensor LiDAR	17
Figura 2.1: Caja negra del sistema mecatrónico	22
Figura 2.2: Diagrama de funciones del sistema mecatrónico	25
Figura 2.3: Diseño conceptual del sistema mecatrónico	26
Figura 3.1: Diseño conceptual de la estación de control	29
Figura 3.2: Diagrama de bloques de la estación de control	30
Figura 3.3: Partes principales de la mesa de trabajo de la estación de control	36
Figura 3.4: Dimensiones de la mesa de trabajo de la estación de control	36
Figura 3.5: Diseño conceptual de un robot móvil	37
Figura 3.6: Módulo de comunicación para LIDAR 2D	42
Figura 3.7: Diagrama de cuerpo libre del robot móvil	43
Figura 3.8: Diagrama de cuerpo libre del cable de conexión	45
Figura 3.9: Diagrama de cuerpo libre para una rueda	48
Figura 3.10: Comparación en transmisiones angulares: Oruga vs planetaria	51
Figura 3.11: Punto de operación crítico para el motor DC de la rueda trasera	51
Figura 3.12: Punto de operación crítico para el motor DC de la rueda delantera	53
Figura 3.13: Diagrama de iluminación	54
Figura 3.14: Diagrama general del dominio electrónico	56
Figura 3.15: Diagrama esquemático del dominio electrónico	57
Figura 3.16: Diagrama esquemático para la distribución energética	63
Figura 3.17: Vistas de la cara inferior y de la cara superior de la tarjeta electrónica	64
Figura 3.18: Diagrama esquemático del circuito de administración energética	67
Figura 3.19: Circuito de control energético	68
Figura 3.20: Diagrama de baterías	76
Figura 3.21: Dominio mecánico del robot móvil	77
Figura 3.22: Partes del dominio mecánico	78

Figura 3.23: Chasis inferior del robot móvil	78
Figura 3.24: Ensamble de las ruedas y eje de transmisión	79
Figura 3.25: Ensamble de la rueda del robot móvil	80
Figura 3.26: Ensamble del aprisionamiento del motor-reductor	80
Figura 3.27: Ensamble del soporte para rodamiento	81
Figura 3.28: Ensamble del sellado estático para motor-reductor	81
Figura 3.29: Ensamble del sellado estático para el soporte de rodamiento	82
Figura 3.30: Ensamble del sellado dinámico para el eje de transmisión	82
Figura 3.31: Ensamble de los motor-reductores en el chasis base	83
Figura 3.32: Ubicación de los penetrator en el chasis base	83
Figura 3.33: Partes principales del chasis superior	84
Figura 3.34: Distribución de elementos en la caja electrónica	85
Figura 3.35: Ubicación de los conectores en la caja electrónica de energía	86
Figura 3.36: Distribución de componentes en la caja electrónica de control	87
Figura 3.37: Ubicación de conectores en la caja electrónica de control	88
Figura 3.38: Sensores en la parte delantera del robot móvil	88
Figura 3.39: Componentes de la parte delantera del robot móvil	89
Figura 3.40: Componentes del soporte de sensores delanteros	89
Figura 3.41: Componentes para la protección de la cámara de profundidad	90
Figura 3.42: Sensores en la parte posterior del robot móvil	90
Figura 3.43: Ensamble de las luces posteriores	91
Figura 3.44: Ensamble de los sensores posteriores	91
Figura 3.45: Ensamble de los componentes de protección de la cámara trasera	92
Figura 3.46: Ensamble del soporte de sensores posteriores	92
Figura 3.47: Operario en la estación de control y robot ingresando al ducto	93
Figura 3.48: Controles en el gamepad	94
Figura 3.49: Diagrama de flujo de la estación de control	94
Figura 3.50: Interfaz de control implementada en el ordenador de la estación de control	95
Figura 3.51: Diagrama de flujo del ordenador del robot móvil	97
Figura 3.52: Diagrama de flujo del microcontrolador del robot móvil	97

INTRODUCCIÓN

La ingeniería mecatrónica posee un amplio campo de acción, ya que integra conocimientos de electrónica, mecánica y control de sistemas. La sinergia de estas disciplinas permite brindar soluciones a problemas relacionados con la automatización y robótica, los cuales han sido la base fundamental para el desarrollo tecnológico que se observa en la actualidad. La automatización se enfoca en el desarrollo de sistemas físicos o algoritmos que permiten la integración y control de diferentes procesos de manufactura en la industria, logrando que estos puedan trabajar de forma sincronizada y automática. Por otro lado, la robótica ofrece aplicaciones versátiles, siendo las principales aquellas orientadas al ámbito social, industrial y de servicios. En este último aspecto se busca el desarrollo de prototipos funcionales que brinden apoyo a los humanos en tareas domésticas, repetitivas, hostiles o peligrosas. Entre estas tareas se encuentran problemas relacionados con la inspección y mantenimiento de espacios de difícil acceso para los humanos, como tuberías oleo-hidráulicas, hidráulicas o cavernas con gases peligrosos como las encontradas en los procesos de exploración minera.

En la actualidad se han registrado accidentes y tragedias a partir de la falta de inspección en espacios de difícil acceso o exposición de seres humanos a condiciones hostiles de trabajo. El 28 de agosto del 2018, un obrero y un ingeniero murieron en Acolla, distrito perteneciente a la provincia de Jauja, departamento de Junín; debido a la inhalación de gases tóxicos mientras realizaban la inspección de una cueva al interior de una mina [1]. Las inspecciones en minería son una actividad recurrente y de alto riesgo, actualmente se busca la utilización de sistemas robóticos remotos para el cumplimiento de dicha tarea; sin embargo, este no es el único campo que requiere de la implementación de sistemas inteligentes, actividades como la inspección y mantenimiento de tuberías también presentan un alto riesgo para los seres humanos. El 31 de marzo del 2018 un trabajador murió ahogado mientras realizaba una reparación al interior de una tubería de alimentación principal de 1900mm de diámetro. El trabajador fue arrastrado por

la corriente del agua y su cuerpo fue encontrado al día siguiente del accidente [2]. A partir de los acontecimientos mencionados se concluye que las actividades como la exploración minera e inspección y mantenimiento de tuberías son tareas de alto riesgo, las cuales han sido causales de pérdidas de vidas humanas, lo cual motiva a la búsqueda de soluciones que permitan salvaguardar la integridad de las personas.

La inspección y mantenimiento de tuberías es una tarea que se ejecuta con baja frecuencia en la comunidad limeña, ya que esta conlleva un alto riesgo para los operarios que la realizan además de un alto costo económico; sin embargo, esta deficiencia ha provocado que a lo largo de los años se produzcan una gran cantidad de inundaciones, los cuales han llevado a pérdidas significativas para las familias peruanas. El 7 de febrero del 2019, en San Juan de Lurigancho, distrito de Lima Metropolitana, una tubería colapsó y causó una inundación en las calles del asentamiento humano Enrique Montenegro. Esta inundación logró ingresar a las viviendas de aproximadamente 2000 personas, las cuales perdieron un gran porcentaje de sus pertenencias [3]. Este problema se presentó debido a que una tubería fue mal colocada cuando se realizaban las obras correspondientes a la Línea 1 del Metro de Lima [4]. Asimismo, las conexiones clandestinas representan un problema significativo, ya estas generan pérdidas económicas al Estado ya que SEDAPAL, empresa que brinda el servicio de alcantarillado y agua potable, pertenece al régimen estatal. En agosto del 2017, el inspector de SEDAPAL, Guillermo Gonzales, detectó un gran número de conexiones clandestinas pertenecientes a grandes empresas como Gloria y Lima Airport Partners. La deuda generada por estas conexiones ascendía a 30 millones de soles aproximadamente [5]. A partir de estos problemas, actualmente SEDAPAL ha reportado un 28% de pérdidas económicas, aproximadamente 420 millones de soles, debido a conexiones clandestinas y tuberías rotas [6].

En contraposición a los problemas presentados, se han venido desarrollando diversas soluciones tecnológicas como lo son los robots de inspección de tuberías. Estos robots son diseñados a partir de plataformas móviles las cuales llevan integradas un sistema de visión y comunicación, así como un conjunto de sensores que permiten detectar fisuras e imperfecciones en la superficie interna de la tubería. En adición a lo mencionado, existen sensores que permiten realizar una reconstrucción total de la tubería a partir de un escaneo 3D; esta información permite conocer el grosor de la tubería en determinados puntos críticos al momento de la inspección lo cual brinda la oportunidad de prever un posible cambio para alguna tubería deteriorada. Con el sistema de visión se puede realizar un procesamiento de imágenes superficial, lo cual permite la rápida detección de fisuras y conexiones clandestinas que pudieran existir a lo largo de la red de distribución de agua.

Finalmente, el objetivo de la presente tesis es realizar el diseño mecatrónico de un robot de inspección de tuberías para realizar trabajos de monitoreo en las tuberías primarias de agua en el área de Lima Norte. Como requerimientos principales del proyecto se ha solicitado que el robot pueda recorrer 400m al interior de la tubería y que estas tengan un diámetro de 650mm a 2000mm. Este sistema consistirá en un robot móvil que permita transportar los sensores y componentes electrónicos, además deberá ser resistente al agua para que los circuitos eléctricos no sufran daños; y contará con un sistema de visión y sensado, los cuales extraerán datos relevantes del interior de la red de distribución de agua potable. Finalmente, con el presente proyecto se busca disminuir la intervención humana en tareas de alto riesgo

CAPÍTULO 1

MARCO DE REFERENCIA

El presente capítulo se divide en tres secciones, las cuales muestran la situación actual de la robótica en el campo de inspección de tuberías. En el marco histórico se muestran las soluciones comerciales presentes en la actualidad, así como los resultados de algunas investigaciones que tuvieron como objetivo el desarrollo de un sistema de inspección de tuberías o métodos para la determinación de fallas. En el marco teórico se desarrollan los conceptos fundamentales relacionados al control de las variables cinemáticas, dinámicas y eléctricas en un robot móvil; y también se describen las tecnologías actuales que permiten realizar una reconstrucción tridimensional de ambientes abiertos. Finalmente, en el marco metodológico se establecen los tópicos a desarrollar en los capítulos siguientes.

1.1 MARCO HISTÓRICO

Los defectos presentados en las tuberías del sistema de distribución de agua potable en Perú se dan por 2 factores principales; la presencia de conexiones clandestinas y deterioro natural de la tubería por tiempo de operación. Las conexiones clandestinas provocan pérdidas económicas ya que el recurso hídrico brindado es extraído de forma ilegal del sistema de distribución de agua potable. Por otro lado, el deterioro es un proceso natural al interior de la tubería causado por la corrosión o desastres naturales como terremotos o derrumbes. Para solucionar estos problemas es necesario la programación de inspecciones que permitan conocer el estado actual de la superficie interna de las diferentes tuberías a lo largo de la red de distribución de agua [7].

Estas inspecciones actualmente son realizadas por humanos y sistemas robóticos, los cuales son introducidos al interior de la tubería para extraer los datos de interés. Los humanos al encontrarse en ambientes hostiles con poca movilidad, como el interior de una tubería, pueden sufrir accidentes o incluso la pérdida de la vida si la operación no es realizada correctamente o los parámetros de seguridad no son los adecuados; además, los datos visuales extraídos tienen una naturaleza subjetiva, por lo cual existe una alta probabilidad de presencia de errores. En contraposición, un sistema robótico permite realizar inspecciones de forma remota, evitando la exposición del operario a una situación riesgosa, y con mayor precisión al utilizar métodos como procesamiento digital de imágenes, corrientes inducidas de campo remoto y detección de fuga de campos magnéticos [8]. Esta recolección de datos se da a partir de sensores especiales, y los datos son analizados en computadoras con una elevada capacidad de procesamiento. Actualmente, el número de robots móviles desarrollados para inspección se ha incrementado; sin embargo, aún es insuficiente para cubrir las necesidades presentes a nivel mundial. En la tabla 1.1 se muestra un resumen de los principales robots de inspección de tuberías comerciales existentes actualmente, así como sus principales características.

Tabla 1.1

SISTEMAS COMERCIALES DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS

Fuente	[33]	[20]	[34]
Fabricante	FiberScope	DeepTrekker	Shenzhen Schroder
Modelo	Stormer S300	DT340S	SINGA300
Dimensiones	108 x 108 x 145 mm	141 x 151 x 610 mm	450 x 65 x 575 mm
Peso	35 kg	15.5 kg	11 kg
Material	Latón Acero inoxidable	Aluminio	Aluminio
Diámetro de la tubería a inspeccionar	150 – 1000 mm	200 - 915 mm	300 – 2000 mm
Método de conexión	Alámbrica	Alámbrica	Alámbrica
Energía (Autonomía)	Generador eléctrico	Baterías (4 Horas)	Baterías
Distancia de inspección máxima	250m	400m	300m
Sensores	Cámara	Cámara	Cámara
Precio	USD 35 900.00	USD 41 666.00	USD 35 000.00
Imagen			


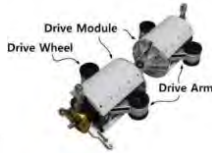
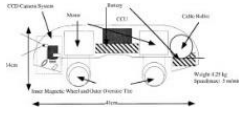
Como ha sido mostrado en la tabla 1.1, el modelo STORMER S3000 cuenta con un sistema móvil basado en 4 motores correctamente sellados e impermeables, cuyos ejes sobresalen del chasis y pueden ser acoplados a ruedas con una longitud diametral variable. Asimismo, el robot cuenta con un sistema de comunicación alámbrico, el cual le permite realizar exploraciones con una distancia máxima de 250m con respecto al usuario. El único sensor incluido en este modelo es una cámara PTZ, la cual permite una inspección visual y la posibilidad de registrar imágenes y videos. Para el modelo DT340S se tiene un sistema móvil con ruedas intercambiables y con componentes modulares, lo cual permite inspeccionar un amplio intervalo de tuberías con diferentes diámetros. Otra característica resaltante de este robot es la capacidad de inspeccionar tuberías de hasta 400m de profundidad. El sistema de comunicación es alámbrico e integra una cámara PTZ; además este robot cuenta con un tambor para cable

motorizado que brinda la posibilidad de recuperar el robot de forma automática. Finalmente, el robot de modelo SINGA300 posee un sistema de tracción basado en cuatro ruedas, y un sistema de comunicación alámbrico que permiten una exploración máxima de 300m. Este robot posee una cámara, así como un giroscopio; los cuales son los encargados de extraer los datos internos de la tubería. La principal característica de este robot es la inclusión de un soporte móvil para la cámara, el cual permite obtener imágenes con mayor resolución en determinados puntos de interés.

En adición a los robots comerciales presentados en el apartado anterior, diferentes soluciones a condiciones de operación específicas han sido desarrolladas alrededor del mundo a través de investigaciones científicas. En [9] se detalla un robot con la capacidad de inspeccionar tuberías con un diámetro en el intervalo 125 - 180 mm a través de un mecanismo que ejerce presión en las paredes internas de la tubería. Este mecanismo consta de 3 sistemas de fajas ubicados circunferencialmente con una separación de 120 grados, los cuales pueden expandirse o contraerse diametralmente. Adicionalmente, el robot consta de dos cuerpos unidos por una articulación, la cual permite un movimiento adecuado a través de diferentes tipos de uniones en tuberías [10], además de disponer de una cámara PTZ para extraer datos visuales. En [11], se explica la realización y validación de un robot de inspección de tuberías modular, el cual cuenta con un sistema mecánico que le permite adaptarse a un amplio intervalo de diámetros internos en tuberías; este robot cuenta con una cámara PTZ. Finalmente, en [12] se detalla el desarrollo de un robot de inspección de tuberías con la capacidad de adherirse a las paredes internas de la tubería. El robot presentado cuenta con un sistema móvil basado en la utilización de ruedas imantadas, cuya finalidad es resolver problemas como el ascenso a través de superficies verticales y la exploración en uniones de difícil maniobrabilidad como las articulaciones en T [10]. En la tabla 1.2 se muestra un resumen de los datos presentados.

Tabla 1.2

SISTEMAS DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS - INVESTIGACIONES

Fuente	[9]	[11]	[12]
Tipo	Robot de diámetro adaptable	Robot modular	Robot de ruedas magnéticas
Diámetro de la tubería	125 - 180 mm	-	150 - 600 mm
Sistema de comunicación	Alámbrica	Alámbrica	Alámbrica
Sensores	Cámara Láser tipo anillo	Cámara	Cámara
Imagen			

En los apartados anteriores se han presentado diferentes modelos de robots de inspección de tuberías, comerciales y aquellos desarrollados en investigaciones científicas, cuyo objetivo principal es la extracción de datos a partir de la inspección visual. Este método de inspección se presenta efectivo para obtener datos como el deterioro de la superficie interna, presencia de grietas o localización de conexiones clandestinas. Si bien estos datos son relevantes para conocer el estado actual de una tubería, no son suficientes si se quieren determinar características como el grosor de la tubería, rugosidad de las paredes internas o detección de defectos geométricos. Existen diferentes métodos y sensores para lograr los objetivos mencionados; por ejemplo, en [13] se plantea la utilización de un LIDAR para realizar una reconstrucción interna de la tubería, así como el uso de un radar de ondas penetrantes (GPR), el cual permite la obtención de la estructura interna de las paredes de la tubería. Otro método efectivo es mostrado en [7], en donde se utiliza un láser tipo anillo el cual irradia ondas de alta frecuencia, las cuales al rebotar en la superficie y regresar al sensor permiten conocer la presencia de grietas o imperfecciones. En la tabla 1.3 se muestra el resumen de los principales sensores utilizados en sistemas de inspección de tuberías.

Tabla 1.3

SENSORES PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS

Método de inspección	Inspección por nube de puntos	Inspección por espectro electromagnético	Escaneo del perfil de la tubería
Fuente	[13]	[13]	[7]
Fallas a detectar	Grietas superficiales	Grietas en internas Espesor de pared Grietas superficiales	Grietas superficiales
Sensor	Sensor LIDAR	Sensor GPR	Sensor láser
Imagen			

1.2 MARCO TEÓRICO

En la presente sección se detalla la base teórica para lograr el objetivo del presente documento; para ello, de [14] y [15] se han extraído los conceptos fundamentales que validan el uso de robots móviles para tareas como inspección y monitoreo, de [16] se extrae el modelo electrónico para controlar motores de corriente continua, componentes fundamentales en el diseño de un robot móvil. Finalmente, en [17], [18] y [19] se detallan los métodos de sensado utilizados para la reconstrucción de ambientes y adquisición de imágenes.

1.2.1 ROBOTS MÓVILES

La robótica ha surgido como solución a una gran cantidad de problemas en la industria y en la vida diaria; el ejemplo más representativo es la inclusión de brazos robóticos o manipuladores en las plantas de producción, lo cual permite una mejora en la productividad y en la calidad de los productos obtenidos. Sin embargo, estos brazos robóticos se encuentran fijos en una posición, si bien pueden ejecutar procesos dentro de su celda o área de acción, no tienen la libertad para moverse a otras posiciones en el interior de una planta. El tipo de robot que posee la capacidad de locomoción se conoce como “Robot Móvil”, cuyo concepto integra a aquellos

que posean ruedas o un sistema de articulaciones y piernas. En la figura 1.1 se muestran diferentes arreglos de piernas para obtener sistemas móviles, este tipo de robots se encuentran inspirados en la forma de movimiento del ser humano, bípedos, o animales e insectos, cuadrúpedos o hexápodos respectivamente.

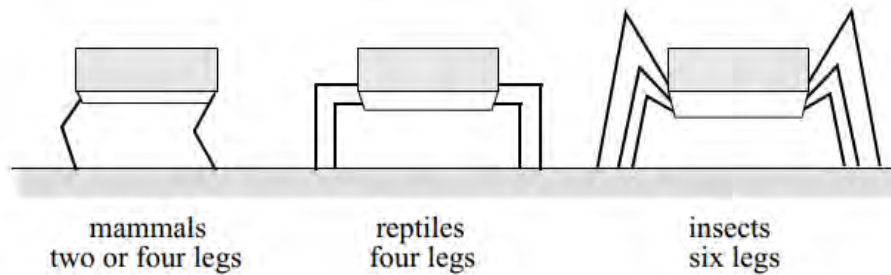


Figura 1.1 Sistemas de locomoción basado en piernas

Si bien los sistemas de locomoción mostrados en la figura 1.1 logran el objetivo de movilización, el sistema de locomoción más eficiente es aquel basado en ruedas ya que posee una menor complejidad mecánica y posee una mayor eficiencia en terrenos planos, esto es mostrado en la figura 1.2, en donde se observa que el uso de ruedas requiere menor potencia que los arreglos basados en piernas para lograr la misma velocidad de avance.

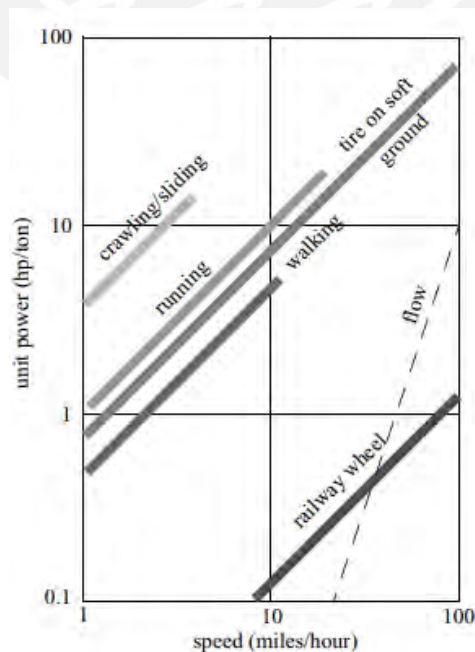


Figura 1.2 Comparación de potencia mecánica en sistemas de locomoción

ROBOTS MÓVILES CON LOCOMOCIÓN BASADA EN RUEDAS

El control de avance y dirección para un robot móvil depende de la distribución de ruedas que este tenga. Un robot móvil solo requiere de tres ruedas para asegurar su estabilidad, para arreglos con mayor cantidad de ruedas se sugiere la utilización de un sistema de suspensión que asegure que todas las ruedas se encuentren en contacto con el terreno. En la figura 1.3 se muestra un robot de inspección de tuberías el cual posee una distribución de 4 ruedas motrices. Asimismo, en los siguientes párrafos se desarrollan las ecuaciones cinemáticas que controlan su movimiento.



Figura 1.3 Robot móvil de inspección de tuberías

MODELO MATEMÁTICO PARA UN ROBOT MÓVIL CON 4 RUEDAS MOTRICES

En [35] se describe el modelo matemático de un robot con cuatro ruedas motrices. En la figura 1.4 se presenta el diagrama cinemático de un robot móvil de 4 ruedas motrices en donde w_i representa la velocidad angular en cada rueda, v_x y v_y representan las velocidades lineales en los ejes X e Y respectivamente y w la velocidad angular del robot móvil. Los parámetros L_x y L_y representan las dimensiones de largo y ancho del robot móvil respectivamente, y R representa el radio de la rueda del robot móvil.

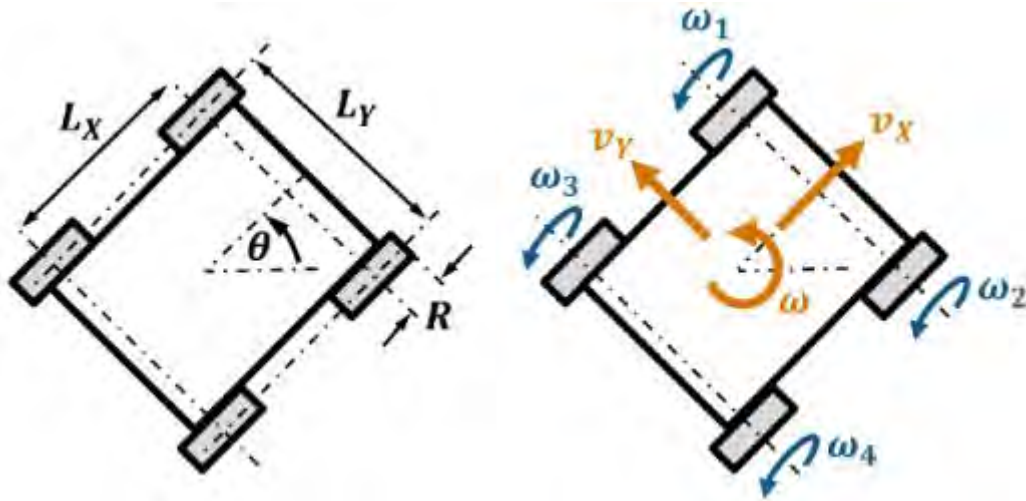


Figura 1.4 Diagrama cinemático de un robot móvil de 4 ruedas motrices

Las variables de entrada al sistemas descrito son w_1, w_2, w_3 y w_4 , las cuales representan las velocidades angulares de cada una de las ruedas y son controladas a partir del voltaje aplicado a cada motor; y las variables de salida son v_x (velocidad lineal en el eje X), v_y (velocidad lineal en el eje Y) y w (velocidad angular del robot), las cuales son obtenidas a partir de la ley mostrada en (1).

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -2 & 2 & -2 & 2 \\ \frac{1}{L_x + L_y} & \frac{1}{L_x + L_y} & \frac{1}{L_x + L_y} & \frac{1}{L_x + L_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} \dots (1)$$

MODELO DINÁMICO DE UN ROBOT MÓVIL EN TRASLACIÓN RECTILÍNEA

El análisis cinemático para un robot móvil se enfoca en su movimiento y en variables como velocidad lineal y velocidad angular; sin embargo, no toma en cuenta la masa o presencia de fuerzas externas que modifican la trayectoria o potencia en el robot. El análisis dinámico permite establecer las relaciones entre el movimiento del robot y las fuerzas que actúan para lograrlo. En la figura 1.5 se muestra el diagrama de cuerpo libre para un robot móvil de 4 ruedas. El peso se encuentra ubicado en el centro de gravedad del robot (mg) y es equilibrado por las fuerzas normales N_1 y N_2 . Debido a la naturaleza simétrica del robot N_1 y N_2 representan las

sumatoria de las fuerzas normales en las dos llantas traseras y delanteras respectivamente. Al aplicar el equilibrio en el eje vertical se tiene:

$$mg = N_1 + N_2 \dots (2)$$

En el caso de las fuerzas de fricción f_1 y f_2 , estas son producidas por el torque motriz transmitido a las ruedas. Al aislar cada una de las ruedas y establecer el equilibrio de momentos en su eje de rotación se tiene la siguiente relación:

$$f_i * r = t_i \dots (3)$$

En donde t_i representa el momento transmitido desde el motor para cada una de las ruedas, f_i la fuerza de fricción y r el radio de las ruedas. Finalmente, ya que las llantas del robot móvil no deben sufrir deslizamiento en el suelo, la fuerza de fricción f_i debe ser menor que el valor del límite de fricción estático (u_s : *Coefficiente de fricción estático*, N_i : *fuerza normal*), dicha relación es mostrada en (4).

$$f_i < u_s * N_i \dots (4)$$

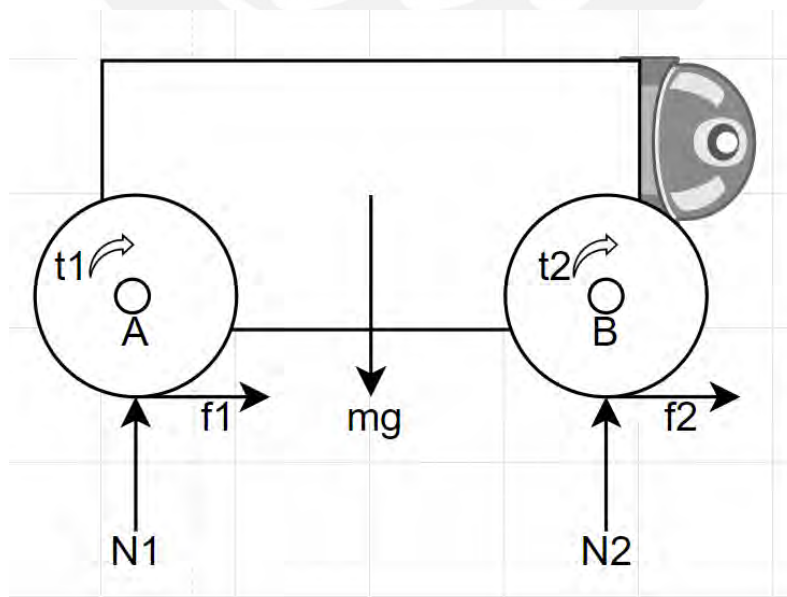


Figura 1.5 Modelo dinámico de un robot móvil

MODELO MATEMÁTICO PARA UN MOTOR DC

En las secciones anteriores se describieron las relaciones cinemáticas y dinámicas, logrando obtener expresiones que controlan el movimiento y las fuerzas presentes del robot a partir de la velocidad angular y momento requerido en cada motor. Los motores DC son actuadores que transforman la energía eléctrica en energía mecánica a través de fenómenos electromagnéticos. En esta sección se busca establecer las relaciones entre el momento y la velocidad angular con variables eléctricas como corriente en el motor y el potencial eléctrico.

En la figura 1.6 se muestra un diagrama del circuito equivalente para un motor DC. E_s representa el potencial aplicado a las terminales del motor, mientras que R es la resistencia de la armadura. Al aplicar una diferencia de potencial E_s y al no existir carga en el motor ($E_0 = 0 V$), toda la potencia transmitida es disipada en la resistencia de la armadura, la cual soporta corrientes elevadas hasta que el motor comience a girar y la diferencia de potencial E_0 se encuentre equilibrada con la velocidad angular y el torque a transmitir. Debido a que la resistencia R en la armadura es muy baja su efecto se puede despreciar para simplificar las ecuaciones posteriores en esta sección.

$$E_s \cong E_0 \dots (5)$$

Para un motor DC se tiene que la fuente inducida en sus devanados es proporcional a la velocidad de rotación del motor (n) y al flujo magnético en sus polos (\emptyset).

$$E_s = \frac{Z * n * \emptyset}{60} \dots (6)$$

En (6) se concluye que la velocidad angular del eje motor es proporcional al voltaje aplicado en los terminales del motor obteniéndose la relación mostrada en (7)

$$n = 9.55 * w$$

$$E_s = \left(\frac{Z * 9.55 * \Phi}{60} \right) * w \dots (7)$$

Z es una constante que depende del tipo de devanado interno en el motor y del número de vueltas en la armadura. Asimismo, la potencia de entrada (8) y la potencia de salida del motor (9) deben de ser aproximadamente iguales al despreciar la pérdida energética en la resistencia de la armadura.

$$P_i = E_s * I \dots (8)$$

$$P_o = \frac{T * n}{9.55} \dots (9)$$

$$P_i = P_o \dots (10)$$

T es el torque transmitido en el eje del motor e I es la corriente que conduce el devanado. A partir de (23), (25), (26) y (27) se obtiene la siguiente relación mostrada en (11).

$$\frac{Z * n * \Phi}{60} * I = \frac{T * n}{9.55}$$

$$T = \left(\frac{Z * \Phi}{6.28} \right) * I \dots (11)$$

En (11) se concluye que el torque transmitido por el motor es directamente proporcional a la corriente conducida a través de sus devanados.

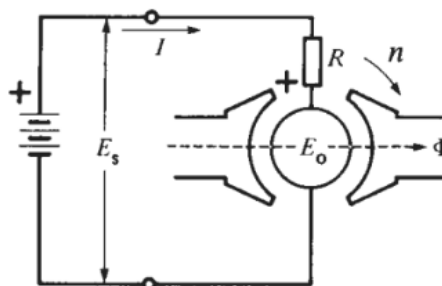


Figura 1.6 Diagrama eléctrico de un motor DC

1.2.2 SENSORES PARA DIGITALIZACIÓN DE AMBIENTES

De acuerdo a los objetivos de la presente tesis se requiere extraer información de las tuberías que permita realizar una posterior reconstrucción tridimensional y un procesamiento de imágenes para la detección de anomalías o fallas. Las imágenes pueden ser captadas por cámaras de alta resolución; sin embargo, estas no pueden obtener información tridimensional de las tuberías. A continuación, se describen dos tipos de sensores que permiten extraer nubes de puntos en determinados ambientes, las cuales al ser procesadas en un ordenador permiten obtener superficies tridimensionales.

CAMARA DE PROFUNDIDAD

Las cámaras digitales codifican las imágenes a través de píxeles logrando un arreglo bidimensional, en donde cada píxel se encuentra definido por un color determinado. Para codificar estos colores existen diferentes modelos de color siendo el modelo RGB el más utilizado. En este modelo cada píxel es un vector de tres componentes en donde cada uno de estos representa la intensidad para cada color (Rojo, Verde o Azul; RGB por sus siglas en inglés). Es así que un píxel con la codificación [255 0 0] representa el color rojo, un píxel [0 255 0] representa al color verde y un píxel [0 0 0] representa al color blanco.

Para lograr una imagen tridimensional a cada píxel se le debe de adicionar un cuarto componente conocido como profundidad, el cual representa la distancia del píxel hacia el lente de la cámara. Para la extracción de este dato existen dos mecanismos: Detección de luz IR y Arreglo estereoscópico de cámaras.

En la detección de luz IR, un emisor envía patrones de luz hacia la escena a procesar, esta luz al entrar en contacto con un objeto sufre deformaciones, las cuales son captadas por un sensor IR. Asimismo, al realizar un contraste entre los datos capturados y los datos esperados se

obtiene el dato de la profundidad para cada uno de los píxeles.

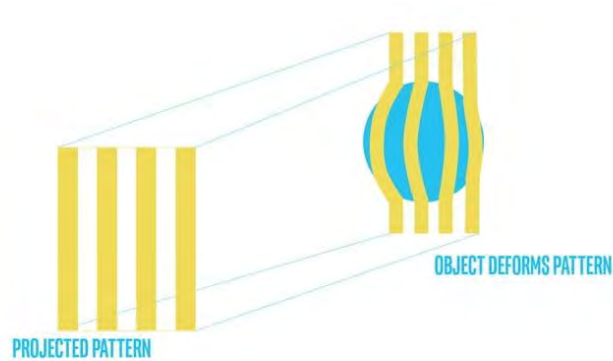


Figura 1.7 Deformaciones de un patrón de luz IR

En el caso de los arreglos de cámaras estereoscópicas se tienen dos sensores RGB separados una distancia conocida, lo cual le permite capturar dos imágenes diferentes y realizar un contraste entre ellas; esta triangulación y comparación de imágenes permite obtener el dato de la profundidad para cada píxel.

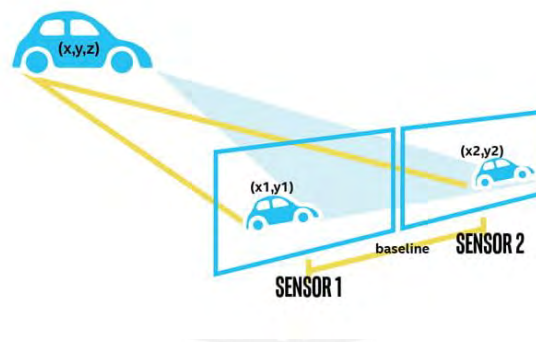


Figura 1.8 Sistema de visión estereoscópica

SENSOR LIDAR

Otro método para la reconstrucción de superficies es la utilización de un sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*), el cual permite extraer nubes de puntos en ambientes extensos. Su funcionamiento se basa en la emisión de haces de luz IR, los cuales viajan hasta ser reflejados en un objeto o superficie, parte de la energía retorna al sensor LiDAR y a partir de la determinación de la diferencia temporal entre el momento de emisión del haz de luz y su recepción se puede determinar la distancia hasta el punto de reflexión. Los sensores LiDAR

rotan su sensor IR para extraer información de diferentes puntos en el ambiente y así poder crear un mapa o nube de puntos; el cual si es procesado correctamente permite obtener una reconstrucción tridimensional del ambiente de trabajo.

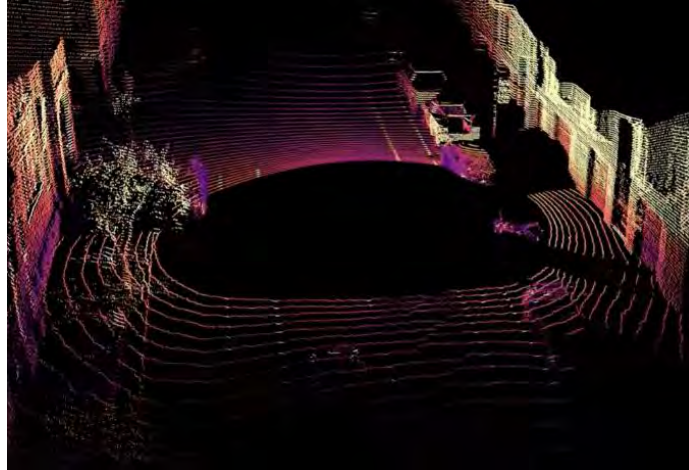


Figura 1.9 Nube de puntos extraída a partir de un sensor LiDAR

1.3 MARCO METODOLÓGICO

El presente trabajo de investigación fue desarrollado a partir de la metodología alemana VDI 2221 “Enfoque sistemático para el desarrollo de sistemas y productos técnicos”. Esta metodología sigue una estructura de pasos, los cuales son realimentados durante el desarrollo de la investigación. Como primer paso se determinan y especifican los requerimientos a ser cumplidos al finalizar con la implementación del proyecto. A partir de la comprensión de estos requerimientos, se establecen las funciones a cumplir por el sistema en desarrollo, obteniendo como resultado la Estructura de funciones. Para cada una de las funciones definidas se establecen soluciones, las cuales son detalladas en la Matriz Morfológica. A partir de las soluciones encontradas se establecen los Conceptos de solución, los cuales serán evaluados técnica y económicamente para encontrar el concepto óptimo de solución. Finalmente, se toma como referencia el concepto óptimo de solución y se procede a la selección de componentes a utilizar en la implementación del sistema.

En el capítulo 2 se presentará el desarrollo de las etapas para obtener el concepto solución a partir de los requerimientos propuestos; mientras que en el capítulo 3 se presenta el diseño mecatrónico detallado del concepto óptimo de solución y la selección de componentes. La estructura del diseño del sistema está organizada en subsistemas; un subsistema de control y un subsistema móvil, este último se divide en dominios, lo cuales son el dominio mecánico, electrónico, de control, energético, de sensores y de actuadores. Al finalizar el capítulo se obtiene como resultados los planos mecánicos y electrónicos, así como los algoritmos de control a utilizar para controlar el robot.

En el capítulo 4 mostrará el detalle de los planos mecánicos y eléctricos del sistema a diseñar, asimismo se realizará una estimación del costo total del sistema teniendo en cuenta los componentes seleccionados en el capítulo 3. Finalmente, se presentarán las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos en el campo de inspección de tuberías y la robótica de servicios.

CAPÍTULO 2

DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se detallan los pasos seguidos para la obtención del diseño conceptual de un sistema de inspección de tuberías. Se inicia presentando los requerimientos del sistema, el cual se divide en una estación de control y un robot móvil. A partir de los requerimientos se desarrolla la estructura de funciones, la cual describe las variables de entrada y salida del sistema integral. Finalmente, a partir de las propuestas en la matriz morfológica y el análisis técnico-económico de las soluciones presentadas en el ANEXO A, se describe el concepto solución óptimo que será detallado e implementado en capítulos posteriores del presente documento.

2.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO

El objetivo principal de la presente tesis es el desarrollo e implementación de un sistema de inspección y detección de fallas en las tuberías primarias de agua en Lima norte. Este sistema se compone de un robot móvil, el cual ingresará a la tubería a inspeccionar y extraer datos relevantes de su estado interno; y una estación de control, la cual se encontrará ubicada en el punto de ingreso de la tubería. El procesamiento de los datos extraídos por los sensores se

encuentra fuera del alcance de esta tesis. Los componentes nombrados se encontrarán conectados a partir de un cable eléctrico y un operario se ubicará en la estación de control para dirigir el avance del robot móvil al interior de la tubería. A partir del objetivo descrito se desprenden requerimientos específicos para ambas partes del sistema; los cuales son descritos a continuación.

2.1.1 REQUERIMIENTOS DE LA ESTACIÓN DE CONTROL

- La estación de control debe encontrarse ubicada en el ingreso de la tubería durante un proceso de inspección.
- La estación de trabajo debe asegurar el asegurar una posición ergonómica para el operario durante un proceso de inspección.
- La estación de control deberá encontrarse conectada al robot móvil y le brindará la energía e instrucciones necesarias para su correcto funcionamiento.
- Las instrucciones de control serán comunicadas por el usuario a partir de un “gamepad”, el cual se encontrará conectado a la estación de control. Estas instrucciones controlarán las acciones cinemáticas (avance, retroceso y giros) del robot, así como la intensidad de la iluminación.
- El cable de conexión debe encontrarse almacenado en un módulo automático de liberación y retracción.
- La energía eléctrica generada en la estación de control debe asegurar el funcionamiento de todos los componentes electrónicos del robot móvil a una distancia de separación de 400 metros. La energía disipada en por la resistencia del cable debe ser menor al 15%.

2.1.2 REQUERIMIENTOS DEL ROBOT MÓVIL

- El robot móvil debe encontrarse equipado con sensores que permitan la obtención y almacenamiento de datos para la reconstrucción tridimensional del ambiente a inspeccionar.
- El robot móvil debe ser capaz de ingresar hasta 400m al interior de una tubería horizontal, pueden existir trayectorias curvas al interior de esta. La velocidad mínima de avance del robot móvil debe ser 0.2m/s
- El diámetro de las tuberías a inspeccionar podrá encontrarse entre 800mm y 1800mm.
- El peso máximo del robot móvil será de 85 kg, y sus dimensiones máximas serán de 600 x 600 x 1300 mm.
- El robot móvil deberá movilizarse incluso en superficies húmedas, resbaladizas o con un ángulo de elevación máximo de 10°.
- Los componentes electrónicos del robot móvil deben estar situados al interior de una estructura con grado de protección IP65 como mínimo.
- El robot móvil transmitirá el video del recorrido al interior de la tubería hacia la estación de control en tiempo real. Además, el ordenador interno deberá realizar un procesamiento de imágenes primario para reconocer grietas y obstáculos
- El robot móvil tendrá un circuito de energización dual, la cual extraerá la potencia eléctrica necesaria de un arreglo de baterías o de la energía transmitida desde la estación de control. En caso de extraer la energía del arreglo de baterías, estas deben proveer una autonomía de 45 minutos como mínimo.

- El robot móvil deberá poseer un conjunto de luces de intensidad variables que permitan una clara visualización de la superficie interna en una tubería hasta 100cm por delante y detrás del robot.

2.2 ESTRUCTURA DE FUNCIONES

En la figura 2.1 se muestra la caja negra del sistema a desarrollar, en donde se muestran las variables que ingresan y salen del sistema durante una operación de inspección al interior de una tubería. A partir de estas variables se reconocieron las funciones internas que permiten lograr un óptimo funcionamiento del sistema, las cuales son mostradas en la figura 2.2.

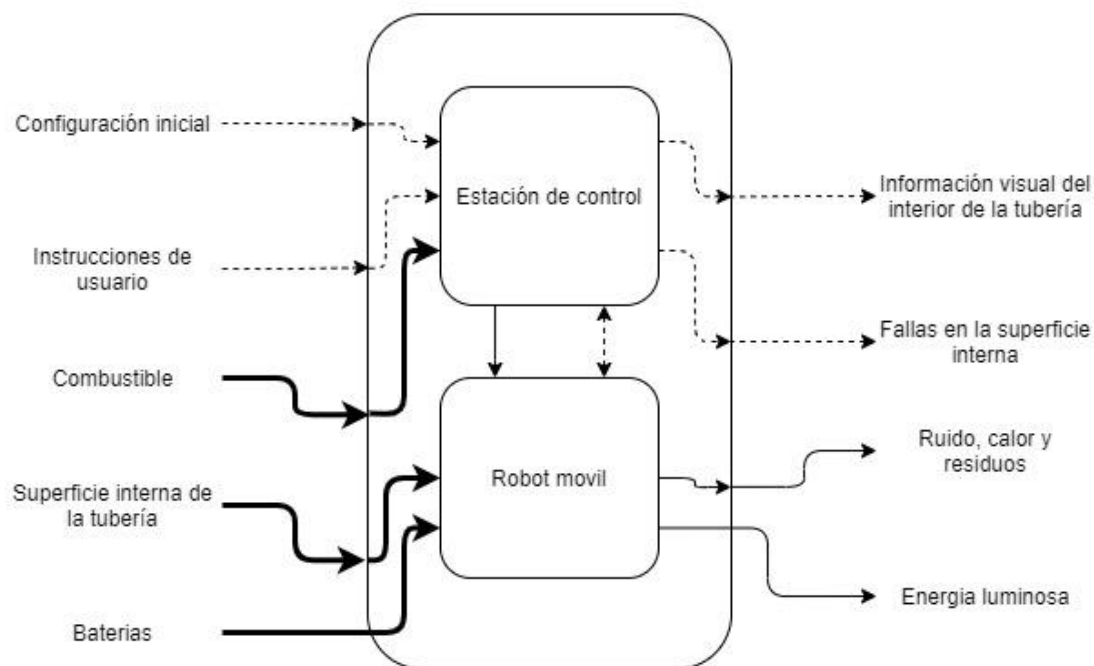


Figura 2.1 Caja negra del sistema mecatrónico

En la estación de control, la función “Procesar, almacenar y visualizar información” es cumplida por un ordenador. La “Configuración inicial” es comunicada al ordenador de la estación de control y establece los parámetros iniciales del funcionamiento del sistema integral. Las “Instrucciones de usuario” ingresan a la función “Recibir instrucciones” y son transformadas en señales eléctricas que son posteriormente comunicadas al ordenador de la

estación de control. El “combustible” es la principal fuente de energía del sistema de inspección de tuberías e ingresa a la estación de control para ser transformado en energía eléctrica a través de la función “Generar energía eléctrica”. La función “Enviar/Recibir información” tiene como objetivo establecer el protocolo de comunicación apropiado para lograr una comunicación bidireccional exitosa a través de la extensa longitud del cable que conecta el robot móvil con la estación de control. La función “Almacenar/Liberar/Retraer cable” tiene como objetivo administrar y almacenar dicho cable. Durante un proceso de inspección, en el ordenador de la estación de control se visualizará la “Información visual del interior de la tubería”; mientras que con los datos extraídos de los sensores equipados en el robot móvil se podrá generar un “Informe de fallas del interior de la tubería”.

En el robot móvil se cuenta con cinco dominios que engloban a las principales funciones del sistema. En el dominio de sensores se tiene como entrada a la “Superficie interna de la tubería”, ya que este es el ambiente del cual se desea extraer información. Las funciones “Captura delantera de imágenes” y “Captura trasera de imágenes” tienen como objetivo la extracción de información visual del ambiente de inspección; mientras que la función “Extraer nube de puntos” busca sensar la información que permita reconstruir la superficie interna de la tubería. La función “Escanear el perfil de la tubería” tiene como objetivo detectar fallas geométricas durante el proceso de inspección.

La función “Procesar y almacenar información” en el dominio electrónico del robot móvil es cumplida por un ordenador. Dicho ordenador extrae la información del dominio de sensores, la almacena y posteriormente la transmite hacia la estación de control a través de la función “Enviar/Recibir información”. La función “Controlar actuadores” recibe comandos del ordenador del robot móvil y controla el accionamiento de los actuadores.

En el dominio de actuadores se cuentan con las funciones “Movilizar robot móvil” e “Iluminar

superficie interna de la tubería”. La primera de estas recibe energía eléctrica y la transforma en energía mecánica, esta función recibe señales de control desde el dominio electrónico a través de la función “Administrar energía eléctrica”; mientras que la segunda función recibe energía eléctrica y la transforma en energía luminosa para asegurar la visualización de detalles en la superficie interna del ambiente de inspección.

En el dominio energético se recibe la energía proveniente de la estación de control, y a través de la función “Acondicionar fuente de energía” se genera el voltaje apropiado para energizar el robot. La función “Seleccionar fuente de energía” recibe el voltaje de las baterías y de la función “Acondicionar energía eléctrica”, y selecciona la de mayor prioridad para energizar al robot móvil; el voltaje de salida de esta función es entregada a la función “Controlar ON/OFF”. La función “Energizar componentes electrónicos” se encarga de proveer el voltaje apropiado para los diferentes componentes electrónicos del robot móvil.

En el dominio mecánico se busca integrar y proteger los componentes que se encuentran en los otros dominios del robot móvil. La función “Proteger actuadores” tiene como objetivo evitar el contacto de los actuadores con fluidos o partículas de polvo, además de servir como chasis para el robot móvil. La energía mecánica proveniente del dominio de actuadores es transmitida a la función “Movilizar robot móvil”, la cual permite el desplazamiento del robot al interior de la tubería. Los diferentes componentes del dominio energético, dominio electrónico y dominio de sensores deben ser protegidos del contacto con fluidos o partículas de polvo para lo cual se deben implementar las funciones “Proteger sensores”, “Proteger componentes del dominio electrónico” y “Proteger componentes del dominio energético” respectivamente. Finalmente, “Ruido, calor y residuos” son la salida del robot móvil durante un proceso de inspección

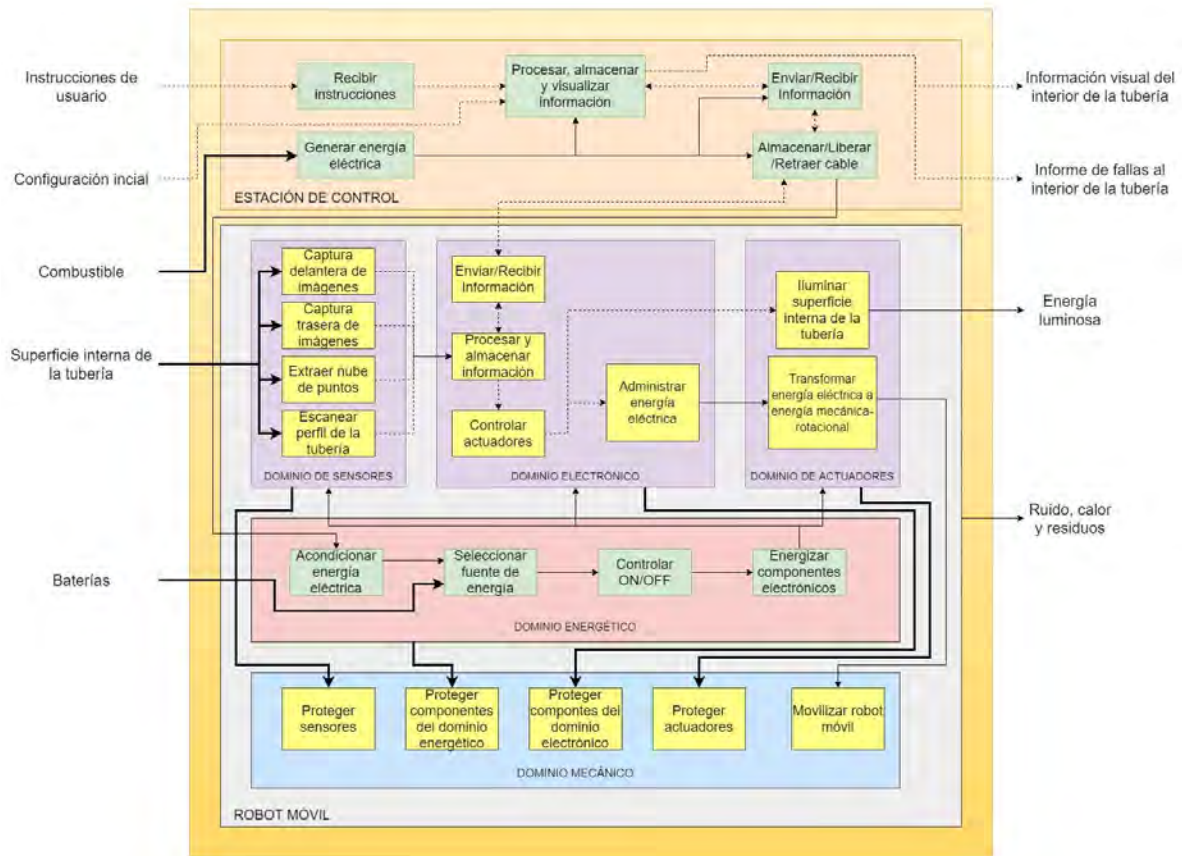


Figura 2.2 Diagrama de funciones del sistema mecatrónico

2.3 CONCEPTO SOLUCIÓN

En la figura 2.3 se muestra el concepto de solución óptimo, obtenido a partir de un análisis técnico – económico entre diferentes soluciones propuestas. Esta selección se dio siguiendo los lineamientos de la norma VDI2221, la cual establece la metodología utilizada para el desarrollo de la presente tesis. En el ANEXO A se muestra el detalle de los pasos realizados para obtener la solución óptima. A continuación, se desarrolla una descripción general de la solución seleccionada, para luego continuar con la descripción detallada de sus componentes.

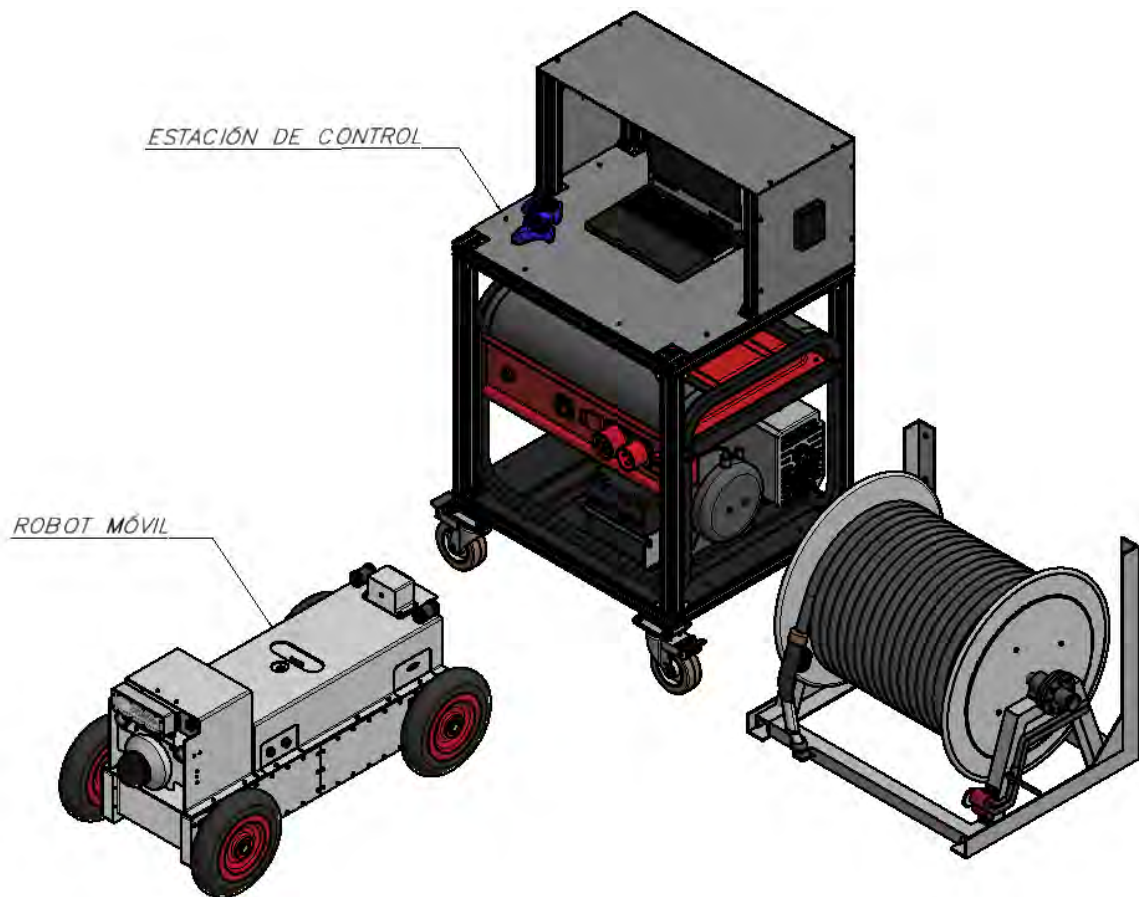


Figura 2.3 Diseño conceptual del sistema mecatrónico

El sistema de inspección de tuberías consta de una estación de control y un robot móvil. La estación de control se compone de un ordenador resistente a condiciones ambientales hostiles, un tambor automático para el almacenaje y liberación del cable de conexión, un “gamepad”, un generador eléctrico y una mesa de trabajo. La estación de control se encarga de monitorear el avance del robot móvil, recibir las instrucciones de un operario a través del “gamepad” y proveer energía eléctrica a través del generador; asimismo debe encontrarse situado en el ingreso de la tubería a inspeccionar. La mesa de trabajo, en donde se encuentra posicionada la laptop, debe encontrarse a una altura entre 85 cm y 110 cm [21] debido a consideraciones ergonómicas durante el desarrollo de un proceso de inspección de tuberías.

El robot móvil se encuentra unido a la estación de control mediante un cable diseñado especialmente para este propósito. Este cable posee líneas para transmisión de datos y energía

eléctrica, asimismo el robot móvil cuenta con un banco de baterías el cual le permitirá seguir operando en caso de presencia de fallas en el generador eléctrico. El diseño del robot se desarrollará a partir de su división en dominio mecánico, electrónico, de control, de sensores y actuadores.

Los componentes electrónicos del robot móvil se encuentran al interior de dos cajas electrónicas con grado de protección IP67; en la primera de estas se tiene el banco de baterías, así como un circuito de conversión AC-DC utilizado para acoplar la energía proveniente del generador; y en la segunda se tienen los componentes que controlan la velocidad de los motores, gestionan la toma de datos y establecen la comunicación con la estación de control.

En el dominio de actuadores se utilizarán 4 motores DC para movilizar el robot móvil y luces led con grado de protección IP68 para la iluminación trasera y delantera del robot móvil. En el dominio de sensores, en la frontal se ubican una cámara PTZ, para registrar imágenes delanteras, y una cámara de profundidad, encargada de la obtención de la nube de puntos para la reconstrucción tridimensional de la tubería; mientras que en la parte trasera se cuenta con un lidar-2D, el cual escanea el perfil geométrico de la tubería, y una cámara para el registro de imágenes traseras.

En el dominio mecánico del robot móvil se utiliza un chasis de aluminio para el posicionamiento de los motores y se utiliza O-RING'S estático y dinámicos para su respectiva protección. Los sensores también cuentan con compartimientos apropiados para su protección. La transmisión de potencia mecánica desde los motores hacia las ruedas se da a través del mecanismo eje-chaveta.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

En el presente capítulo se desarrolla el diseño del sistema mecatrónico propuesto en el capítulo anterior. Se inicia describiendo la estación de control y se detallan los criterios para la selección de sus componentes. El diseño del robot móvil se encuentra dividido en cinco dominios: electrónico, energético, mecánico, de sensores y de actuadores. Finalmente se detalla el dominio de software, el cual engloba a ambos componentes y presenta sus respectivos diagramas de flujo.

3.1 ESTACIÓN DE CONTROL

Al realizar una operación de inspección, el robot móvil ingresa al ducto y obtiene datos de su estado interno a partir de los sensores integrados. Durante su avance es necesario la manipulación de la velocidad de los motores, así como el control de su dirección de avance con el objetivo de evitar obstáculos o extraer información visual de puntos específicos. Debido a lo mencionado, se requiere una estación de control que se conecte con el robot móvil de forma alámbrica. En dicha estación se requerirá la presencia de un operario, el cual ingresará los comandos o señales apropiadas para ejercer control sobre los actuadores del robot móvil. En la figura 3.1 se muestra el diseño conceptual de la estación de control, así como los principales componentes que lo integran.

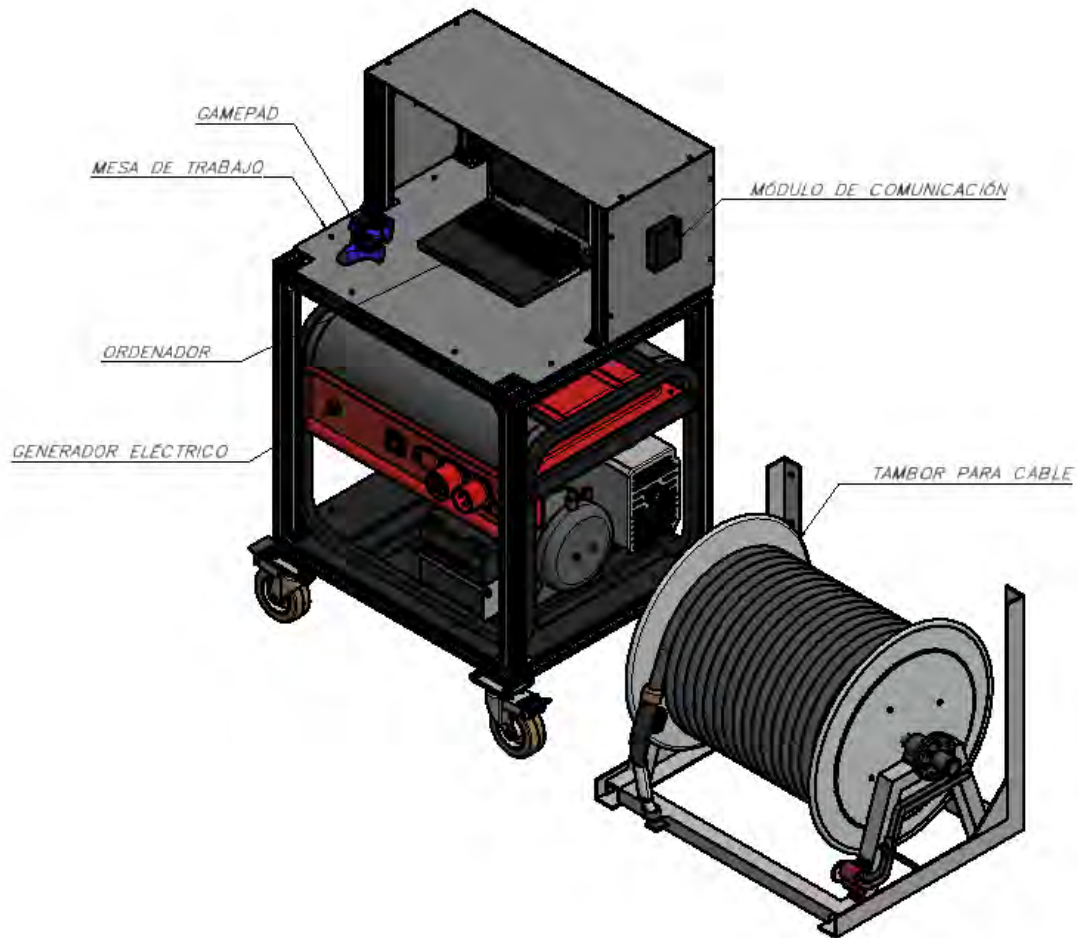


Figura 3.1 Diseño conceptual de la estación de control

3.1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

En la figura 3.2 se presenta el diagrama de bloques con los componentes principales de la estación de control y las conexiones entre ellos y el robot móvil. El “gamepad” recibe las instrucciones del operario y las comunica al ordenador a través de la conexión USB. El ordenador se conecta con el módulo de comunicación a través de una red LAN y establece la comunicación bidireccional con el robot móvil a través del protocolo “VDSL2”. La salida del módulo de comunicación es conectada al cable de conexión, el cual se encuentra almacenado en el tambor para cable. El generador eléctrico se encarga de energizar al módulo de comunicación y al ordenador, asimismo transmite energía eléctrica a través del cable de conexión. El cable de conexión tiene una longitud de 400m y se encuentra conectado al robot móvil para transmitir información y energía eléctrica.






Figura 3.2 Diagrama de bloques de la estación de control

3.1.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES

ORDENADOR

El ordenador ubicado en la estación de control tiene como función principal alojar y ejecutar la interfaz gráfica que controla al robot móvil. Dicha interfaz también muestra la transmisión en tiempo real del video obtenido por las cámaras equipadas en el robot. A diferencia de un ordenador de escritorio común, el ordenador de la estación de control debe soportar condiciones medio-ambientales hostiles como exposición a temperaturas extremas y el contacto con fluidos o partículas de polvo. En la tabla 3.1 se muestran las alternativas encontradas en el mercado nacional e internacional.

Tabla 3.1
TABLA COMPARATIVA DE ORDENADORES

Imagen			
Modelo	CF-31	Latitude 5420	V110
Fabricante	PANASONIC	DELL	GETAC
Procesador	Intel Core I5-7300	Intel Core I5-8350	Intel Core I7-10610
Almacenamiento	512 Gb – SSD	512 Gb – SSD	256 Gb
Memoria RAM	16 Gb – DDR4	16 Gb – DDR4	8 Gb – DDR4
Pantalla	LCD – FHD (AR)	LCD – FHD	LCD - FHD
Resolución	2160 x 1440	1920 x 1080	1920 x 1080
Grado de protección	IP65	IP53	IP65

De las alternativas mostradas, el modelo CF-31 es la mejor opción debido a que posee una mejor resolución de pantalla y tecnología anti reflectante (AR), lo cual permite realizar inspecciones en ambientes abiertos con luz solar.

GAMEPAD

El *gamepad* de control tiene como objetivo adquirir y transmitir las señales de control emitidas por el usuario, para cumplir con el objetivo se requiere una amplia variedad de botones para codificar todas las funciones del robot móvil. En la tabla 3.2 se presentan las alternativas propuestas para la selección de este componente.

Tabla 3.2
TABLA COMPARATIVA DE GAMEPAD'S

Imagen			
Modelo	DUALSHOCK 4	F310	XBOX
Fabricante	SONY	LOGITECH	MICROSOFT
Cantidad de botones	14	14	14
Interface	Inalámbrica	Alámbrica	Inalámbrica
Compatibilidad	Windows	Windows - Linux	Windows
Precio	PEN 259	PEN 169	PEN 304.69

A partir de las alternativas mostradas en la tabla 3.2, el *gamepad* seleccionado es el modelo F310 de Logitech debido a que posee compatibilidad con distribuciones de Linux y es el más económico de las alternativas presentadas.




GENERADOR ELECTRICO

Otra de las funciones de la estación de control es proveer energía eléctrica al robot móvil a través de un generador eléctrico. Según los cálculos detallados en el ANEXO B, se requiere 900 W de potencia como mínimo para energizar el sistema integral en su punto de operación crítico. En la tabla 3.3 se presentan las alternativas propuestas para la selección de este

componente.

Tabla 3.3

TABLA COMPARATIVA DE GENERADORES ELÉCTRICOS

Imagen			
Modelo	GG1ER1000	GEN-10P	EG1000
Fabricante	EBERTH	PRETUL	HONDA
Voltaje de salida	230 VAC	120 VAC	220 VAC
Frecuencia nominal	50 Hz	60 Hz	60 Hz
Factor de potencia	0.98	0.97	0.95
Potencia máxima	1000 W	1100 W	1000 W
Capacidad de combustible	5 L	6 L	3.6 Litros
Autonomía	6 Horas	4 Horas	5.5 Horas
Peso	23 kg	22 kg	22 kg
Dimensiones (LxWxH)	460 x 360 x 375 mm	450 x 380 x 350 mm	376 x 430 x 301 mm

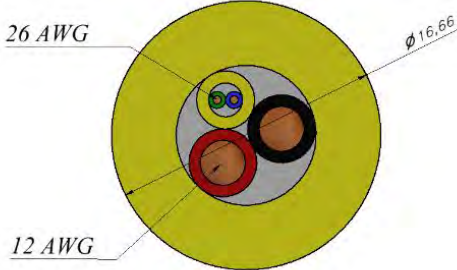
El generador seleccionado es el modelo EG1000 fabricado por la compañía HONDA debido a que ofrece un voltaje de salida de 220 VAC, el cual es apropiado para la transmisión de potencia eléctrica a lo largo del cable de conexión y reducir las pérdidas producidas por la resistencia del conductor; además las dimensiones de este componente facilitan su transporte en comparación con las otras alternativas presentadas.

CABLE DE CONEXIÓN

La conexión entre la estación de control y el robot móvil se dará a través de un cable, el cual será diseñado especialmente para los requerimientos de la presente tesis. Se requiere la transmisión de energía eléctrica e información; por lo tanto, el cable de conexión debe poseer dos líneas de transmisión de potencia y dos líneas de transmisión de datos. La longitud de este cable debe ser de 400 metros para cumplir con el recorrido máximo del robot móvil. En la tabla

3.4 se muestran las características del cable a utilizar, mientras que en el ANEXO B se presenta el detalle de los cálculos realizados para la selección de los parámetros de diseño.




Tabla 3.4
CARACTERÍSTICAS DEL CABLE DE CONEXIÓN

	Conductor	12 AWG	26 AWG
	Cantidad	2	2
	Diámetro del conductor	2.8mm	0.52mm
	Aislamiento	PE	PE
	Diámetro externo	4.2mm	1.05mm
	Aislamiento general		
	Material	PUR	
	Diámetro externo	16.67mm	
	Masa(d_c kg/m)	0.205kg/m	
	Tensión de rotura	155kgf	

TAMBOR PARA CABLE DE CONEXIÓN

El tambor para cable es el componente encargado de almacenar, liberar y retraer el cable de conexión, estos procesos deben realizarse de forma automática. Además, el tambor debe poseer la capacidad para almacenar 400 metros del cable presentado en el apartado anterior. En la tabla 3.5 se presentan las alternativas consideradas para la selección de este componente.

Tabla 3.5
TABLA COMPARATIVA DE TAMBOR PARA CABLE

Imagen			
Modelo	MK8	Large 22/2000	MK6
Fabricante	OUTRECH TECH	AKVA GROUP	OUTRECH TECH
Tipo de tambor	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico
Capacidad de cable (Diámetro)	750m (17mm)	2000m (22.7mm)	1100m (21mm)
Dimensiones (LxHxW)	1247 x 910 x 910 mm	2160 x 1800 x 1450 mm	1980 x 1120 x 1500 mm

El componente seleccionado es el modelo MK8, fabricado por OUTRECH TECH; este modelo posee capacidad para 750m de cable de 17mm de diámetro, capacidad suficiente para cumplir con el requerimiento del sistema integral, además de tener las menores dimensiones, lo cual facilita su transporte.

MESA DE TRABAJO

En la figura 3.3 se presentan las principales piezas utilizadas para la implementación de la mesa de trabajo. La armadura de esta mesa se compone de perfiles V-SLOT de 40 mm y planchas de aluminio para el soporte de los componentes como el generador eléctrico y el ordenador. Las garruchas aseguran la apropiada movilización de la mesa y sus ruedas tienen 6'' de diámetro.

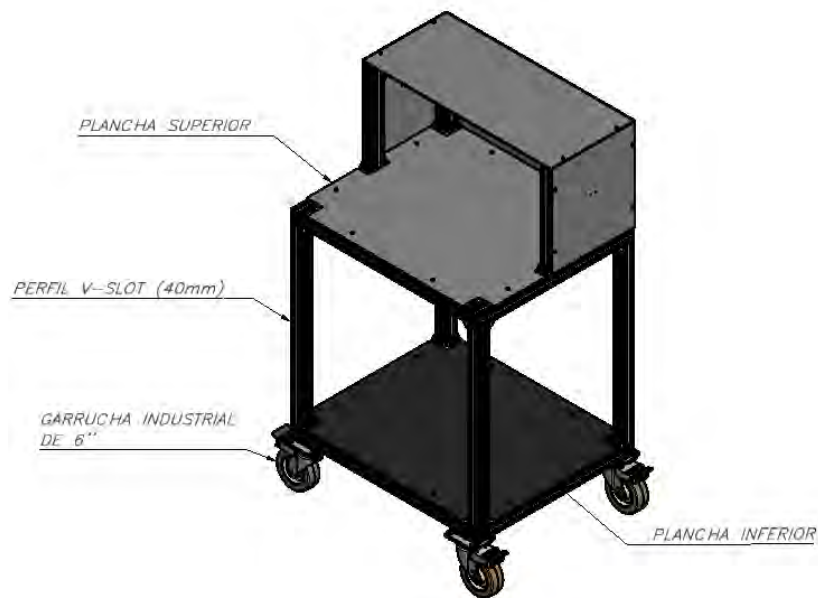


Figura 3.3 Partes principales de la mesa de trabajo de la estación de control

En la figura 3.4 se muestran sus principales dimensiones. La mesa en donde se encuentra ubicada la laptop se encuentra a una distancia de 908.11mm del suelo, lo cual asegura una posición ergonómica del operario durante un proceso de inspección.

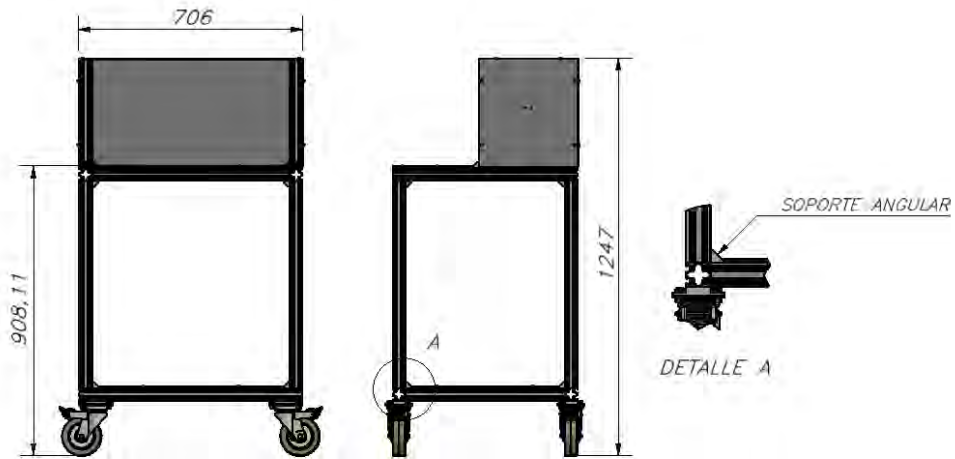


Figura 3.4 Dimensiones de la mesa de trabajo de la estación de control

3.2 ROBOT MÓVIL

El robot móvil es un componente que tiene como objetivo ingresar al interior de la tubería extraer la información apropiada para realizar la reconstrucción tridimensional del interior de la tubería. En la figura 3.5 se muestra el diseño conceptual del robot móvil y en las siguientes secciones de detallará la selección de componentes de los diferentes dominios.

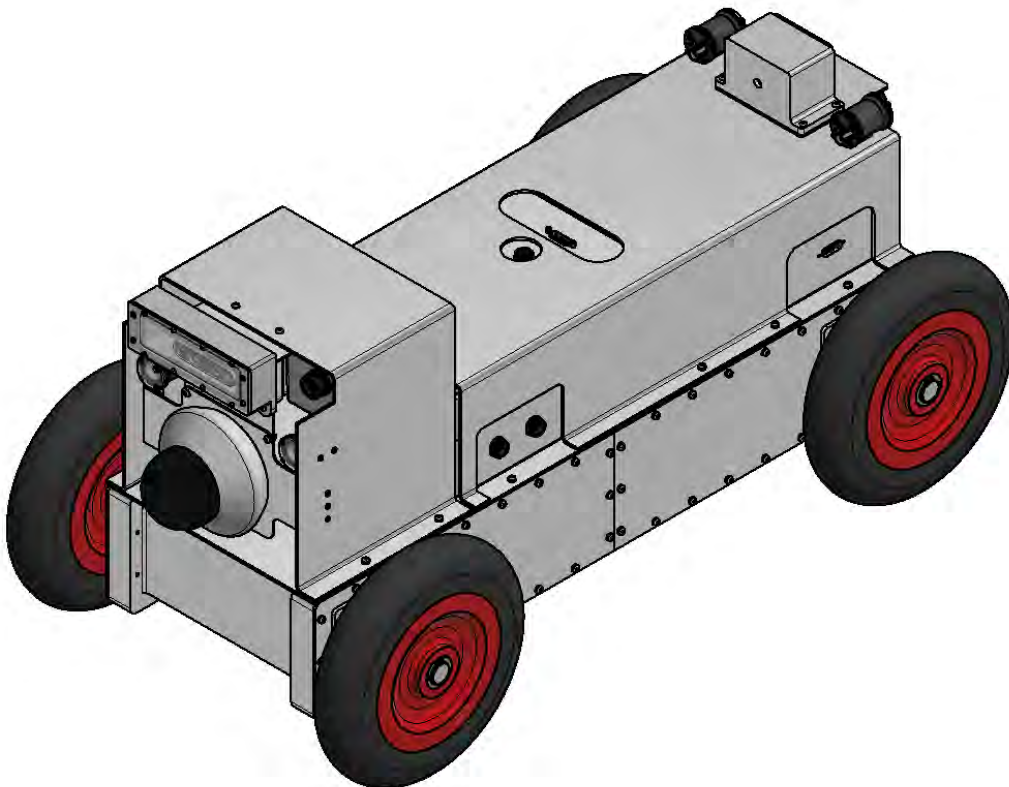


Figura 3.5 Diseño conceptual de un robot móvil

3.2.1 DOMINIO DE SENSORES

En los siguientes apartados se presentarán las principales alternativas comerciales para los sensores que serán equipados en el robot móvil.

CAMARA DELANTERA

La cámara delantera se encarga de captar las imágenes de la parte frontal del robot para que luego puedan ser transmitidas hacia la estación de control, en donde el operario podrá visualizarlas y detectar daños u obstáculos presentes en la superficie interna de la tubería. La característica principal de esta cámara es la posibilidad de movimiento a partir de sus ejes coordinados permitiendo enfocar distintos puntos al interior de la tubería. En la tabla 3.6 se presentan las alternativas comerciales para la selección de la cámara delantera.

Tabla 3.6
TABLA COMPARATIVA PARA LA CÁMARA DELANTERA

Imagen			
Modelo	42212TNI	DS-2DE2A404IW-DE3	NDP – 7512-Z30
Fabricante	ALHUA	HIKVISION	BOSCH
Resolución	1920 x 1080	2560 x 1440	1920 x 1080
Interfaz de comunicación	TCP/IP	TCP/IP	TCP/IP
Grado de protección	IP66	IP67	IP66
Dimensiones	295 x 280 x 280 mm	130.7 x 103.7 x 101.7 mm	-
Voltaje de operación	12 VDC	12 VDC	12 VDC
Consumo energético	12 W	12 W	24 W

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 3.6, la cámara PTZ seleccionada es el modelo DS-2DE2A404IW-DE3 debido a que posee un mayor grado de protección que las otras alternativas presentes, además de poseer el menor factor de forma y el menor consumo energético. Dicha

cámara posee una resolución de 2560x1440 la cual brinda una calidad de imagen FHD, lo cual permite el análisis de pequeños detalles en las imágenes capturadas. El protocolo utilizado por este sensor es TCP/IP, por lo cual con la ayuda de un enrutador se podrá establecer una comunicación con el ordenador del robot. Este componente requiere 12 VDC para su alimentación y tiene un consumo máximo de 12 W.

CÁMARA TRASERA

La cámara trasera muestra la parte posterior del robot y brinda una retroalimentación a lo observado por la cámara PTZ. La importancia de esta cámara radica en la observación del retroceso del robot móvil cuando este quiera salir de una tubería; las imágenes captadas son transmitidas hacia la estación de control en donde el operario podrá maniobrar el robot de tal forma que pueda evitar colisionar con obstáculos o enredarse con el cable de comunicación. En la tabla 3.7 se presentan las alternativas comerciales para la selección de este componente.

Tabla 3.7

TABLA COMPARATIVA PARA LA CÁMARA TRASERA

Imagen			
Modelo	LifeCAM HD-3000	C525	MK6
Fabricante	Microsoft	Logitech	OUTRECH TECH
Resolución (fps)	1280 x 720 (60)	1280 x 720 (30)	1920 x 1080 (30)
Interfaz de comunicación	USB 2.0	USB 2.0	USB 3.0
Precio	PEN 199.90	PEN 269.90	PEN 228.00

De acuerdo a lo presentado en la tabla 3.7, la cámara seleccionada es el modelo “LifeCAM HD-3000” debido a que posee una mayor emisión de fps’s y menor costo. La resolución de la cámara es 1280x800 y captura imágenes en calidad HD. Este sensor se comunica con el ordenador del robot de inspección de tuberías a través del protocolo serial USB, el cual es


también el medio por donde recibe energía eléctrica.

CÁMARA DE PROFUNDIDAD

La cámara de profundidad es un componente electrónico que permite obtener superficies a partir de un arreglo estereoscópico de cámaras y un sensor IR. Estos datos o imágenes son traducidas a una nube de puntos en el ordenador del robot y finalmente almacenados para una posterior reconstrucción 3D en una PC. La nube de puntos se define como la discretización del ambiente en puntos digitales, las ubicaciones de dichos puntos son almacenadas en un archivo el cual será procesado por una herramienta CAD generando la reconstrucción tridimensional del ambiente inspeccionado. En la tabla 3.8 se presentan las opciones comerciales para la selección de este componente.

Tabla 3.8

TABLA COMPARATIVA PARA CÁMARA DE PROFUNDIDAD

Imagen			
Modelo	Xtion 2	D435i	SENZ3D
Fabricante	Asus	Intel	Creative
Componentes	Sensor de profundidad Cámara RGB	Sensor de profundidad Cámara RGB	Sensor de profundidad Cámara RGB
Resolución RGB	2594 x 1944	1920 x 1080	1920 x 1080
Resolución del sensor de profundidad	640 x 480	1280 x 720	640 x 480
Sensores adicionales	-	IMU	-
Campo de visión (H x V x D)	74° x 52° x 90°	64° x 41° x 77°	77° x 77° x 77°
Rango de medición	0.8 – 3.5 m	0.3 – 3 m	0.2 – 1.5 m
Interfaz de comunicación	USB 3.0	USB 3.0	USB 3.0
Consumo energético	4.5 W	3.5 W	4.5 W
Dimensiones	110 x 35 x 35 mm	90 x 25 x 25 mm	44 x 100 x 157 mm




De acuerdo a lo presentado en la tabla 3.8, la cámara de profundidad seleccionada es el modelo

D435i. Este modelo posee una mayor resolución en el componente de profundidad, así como un IMU como sensor adicional; además de tener el menor consumo energético entre las alternativas mostradas. Este sensor se comunica con el ordenador del robot móvil a través de una conexión USB 3.0, por donde también recibe energía eléctrica.

SENSOR LIDAR 2D

El sensor LIDAR 2D es un componente que integra un sensor IR; el cual rota continuamente y emite ondas de luz IR. Estas ondas rebotan en la superficie sólida más cercana y regresan hacia el sensor, el cual detecta la distancia a partir de la diferencia temporal entre la emisión y recepción. Debido a la rotación de este sensor se puede extraer el perfil del ambiente donde se realiza la inspección. Dicho perfil permitirá conocer defectos geométricos en la tubería, como su cilindridad y presencia de grietas. En la tabla 3.9 se presentan alternativas comerciales para la selección de este componente.

Tabla 3.9
TABLA COMPARATIVA PARA LIDAR 2D

Imagen			
Modelo	TiM3xx	R2000	A3
Fabricante	SICK	PEPPERL+FUCHS	SLAMTEC
Condiciones de operación	Ambientes internos	Ambientes internos	Ambientes internos/externos
Rango de medición	0.05 – 4 m	0.1 – 30 m	0 – 20 m
Frecuencia de muestreo	15 Hz	250 kHz	10 kHz
Resolución angular	1°	0.014°	0.54°
Interfaz de comunicación	USB 2.0	TCP/IP	TTL UART
Voltaje de operación	9 – 28 VDC	10 – 30 VDC	5 VDC
Consumo energético	16 W	-	5 W
Dimensiones	60 x 60 x 79 mm	106 x 116.5 x 106 mm	41 x 76 x 76 mm

De acuerdo a la tabla 3.9; el sensor seleccionado es el modelo A3 de SLAMTEC. Este sensor es el único entre las alternativas presentadas que se encuentra diseñado para ser utilizado en ambientes externos; además es el que posee el menor consumo energético. La comunicación de este componente con el ordenador central se logra a través de un módulo TTL-USB (figura 3.6).



Figura 3.6 Módulo de comunicación para LIDAR 2D

3.2.2 DOMINIO DE ACTUADORES

En el diseño integral del robot móvil se requieren actuadores para el accionamiento motriz e iluminación del ambiente a inspeccionar. El accionamiento motriz del robot debe permitir el avance del robot móvil hasta 400m al interior de la tubería arrastrando el cable de conexión desplegado; mientras que en el caso de la iluminación se debe asegurar la visibilidad de 1m por delante y detrás del ambiente de inspección.

MOTOR – REDUCTOR DC

De acuerdo a los requerimientos propuestos en el capítulo anterior, el robot móvil diseñado debe ser capaz de movilizarse por una pendiente de 10° a una velocidad de $0.20m/s$ e ingresar hasta 400m al interior de la tubería a inspeccionar. En la presente sección se presentarán los cálculos apropiados para la selección de los actuadores que garantizarán la traslación del robot. En primer lugar, se desarrollarán las ecuaciones apropiadas para determinar el torque motriz en cada motor; luego se obtiene la velocidad de rotación y la potencia mecánica que debe

transferir el motor, con dichos datos se seleccionará el motor apropiado entre las alternativas comerciales presentadas.

Un motor-reductor es un elemento electromecánico que se encarga de la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica a través de fenómenos electromagnéticos. Para su selección es importante tener en cuenta factores cinemáticos como la velocidad de traslación del robot y su aceleración. En la figura 3.7 se presenta el diagrama de cuerpo libre del robot móvil, en donde se analizarán las fuerzas presentes durante un proceso de inspección.

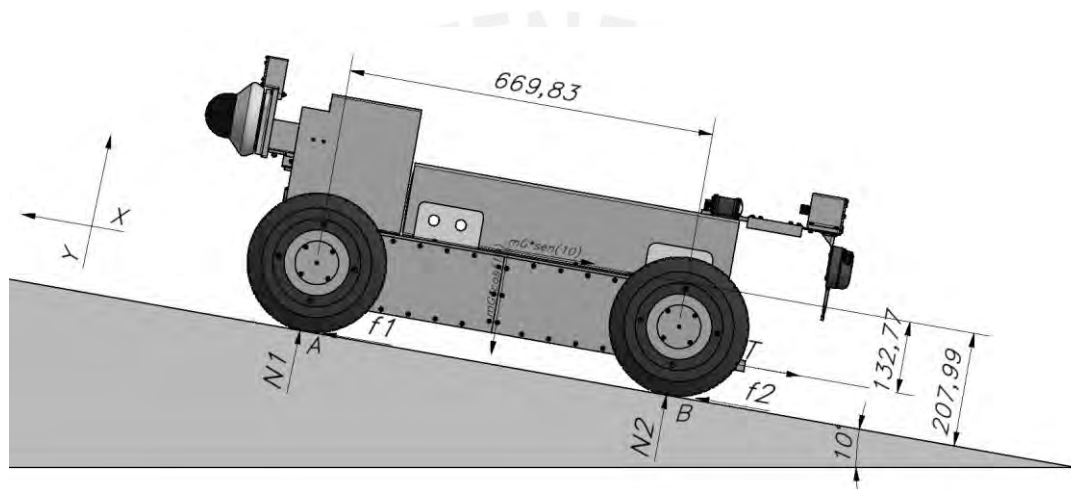


Figura 3.7 Diagrama de cuerpo libre del robot móvil

En la figura 3.7, el peso del robot es aplicado en su centro de gravedad y es descompuesto en sus componentes de los ejes X e Y . Las fuerzas N_1 y N_2 surgen como reacción a la componente del peso en el eje Y . Debido a que la conexión entre el robot móvil y la estación de control es alámbrica, el robot deberá arrastrar el cable de conexión hasta $400m$ al interior de una tubería; la fuerza T representa la tensión ejercida por el cable durante la traslación del robot. Las fuerzas f_1 y f_2 surgen como reacción al torque motriz (T_m), el cual es analizado más adelante, al momento de iniciar el movimiento del robot móvil y representan las fuerzas de tracción. El dominio electrónico del robot móvil permite controlar la velocidad en cada motor a partir de la variación de voltaje, dicho voltaje se relaciona con el torque motriz (T_m) a través de la relación “Torque vs Velocidad” en el motor. El torque motriz (T_m) es analizado al describir las fuerzas

que interactúan en las ruedas del robot móvil.

Al aplicar las ecuaciones dinámicas en el centro de gravedad se obtienen las relaciones mostradas en (12), (13) y (14).

$$\sum F_x = (f_1 + f_2) - T - mg * \text{sen}(10^\circ) = m * a_{rx} \dots (12)$$

$$\sum F_y = (N_1 + N_2) - mg * \text{cos}(10^\circ) = m * a_{ry} \dots (13)$$

$$\sum M_G = N_2 * 334.92 + T * 132.77 - N_1 * 334.92 - (f_1 + f_2) * 207.99 = I * \alpha \dots (14)$$

Las condiciones a considerar para el análisis dinámico del robot móvil se presentan a continuación:

$$a_{rx} = 0.5 \frac{m}{s^2} \dots (15)$$

$$a_{ry} = 0 \frac{m}{s^2} \dots (16)$$

$$\alpha = 0 \frac{rad}{s^2} \dots (17)$$

$$m_r = 85 \text{ kg} \dots (18)$$

Para garantizar el movimiento del robot móvil se requiere una aceleración de $0.5 \frac{m}{s^2}$ en el eje X. Debido a que durante el trayecto el robot móvil no se desprende de la superficie de la tubería inspeccionada, la aceleración en el eje Y (a_{ry}) debe ser nula. La aceleración angular (α) del robot móvil respecto al centro de gravedad debe ser nula, mientras que la masa del robot (m_r) tendrá un valor máximo de 85 kg . El valor de la gravedad (g) considerado es de 9.81 m/s^2 . Con las consideraciones presentadas las ecuaciones (12), (13) y (14) se transforman en (19), (20) y (21) respectivamente.

$$(f_1 + f_2) - T = 187.30 \text{ N} \dots (19)$$

$$(N_1 + N_2) = 821.18 \text{ N} \dots (20)$$

$$(N_2 - N_1) * 334.92 + T * 132.77 - (f_1 + f_2) * 207.99 = 0 \dots (21)$$

Para la determinación de todas las variables incógnitas es necesario encontrar la fuerza de tensión que ejerce el cable durante la traslación del robot móvil. En la figura 3.8 se presenta el diagrama de cuerpo libre del cable de conexión y su respectivo análisis dinámico.

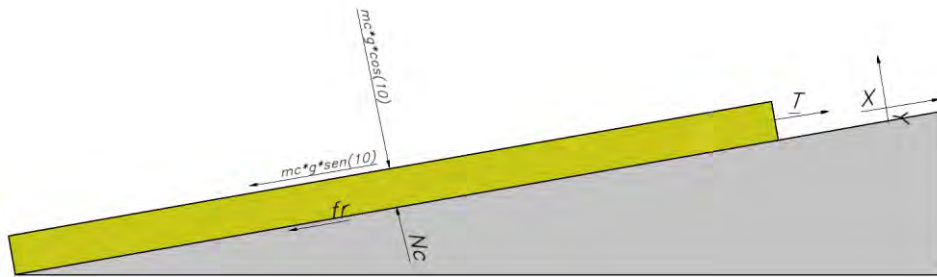


Figura 3.8 Diagrama de cuerpo libre del cable de conexión

El peso del cable ($m_c g$) se descompone en los ejes X e Y . En el eje X aparece la fuerza T , la cual representa a la tensión en el cable, y la fuerza f_r , la cual se produce por el contacto del cable con la superficie y depende del coeficiente de fricción cinético (μ_k) ya que el cable es arrastrado. La fuerza N_c surge como la reacción a la componente del peso en el eje Y . Al aplicar las ecuaciones del equilibrio en los ejes X e Y se tienen las relaciones mostradas en (22) y (23).

$$\sum F_x = T - m_c g * \text{sen}(10^\circ) - f_r = m_c * a_{cx} \dots (22)$$

$$\sum F_y = N_c - m_c g * \text{cos}(10^\circ) = m_c * a_{cy} \dots (23)$$

Debido a que se plantea un despliegue de $400m$ para el cable de conexión y considerando las características mostradas en la tabla 3.4, se obtiene como resultado la relación mostrada en (24).

$$m_c = d_c * l = (0.205) * 400 = 82kg \dots (24)$$

El cable es arrastrado por el robot móvil y por lo tanto su aceleración en el eje X es igual a la aceleración del robot móvil en dicho eje. Además, el cable tampoco se desprende de la superficie durante su traslación por lo cual su aceleración en el eje Y es nula. Estas relaciones son mostradas en (25) y (26).

$$a_{cx} = a_{rx} = 0.5 \frac{m}{s^2} \dots (25)$$

$$a_{cy} = 0 \dots (26)$$

Considerando las ecuaciones (23), (24) y (26) se obtiene el valor de N_c , el cual es mostrado en (27).

$$N_c = 792.20N \dots (27)$$

De acuerdo a [28] el coeficiente de fricción cinético entre el poliuretano (material del cable) y concreto húmedo (material de la tubería) es 0.35. Debido a que el cable de conexión es arrastrado durante el proceso de inspección, la fuerza de fricción es calculada a partir de (28) y la fuerza de tensión en el cable es mostrada en (29).

$$f_r = u_k * N_c = 277.27N \dots (28)$$

$$T = 457.96N \dots (29)$$

Tomando en consideración el resultado de (29) y las ecuaciones (19) y (21) se obtienen los resultados mostrados en (30) y (31).

$$f_1 + f_2 = 645.25N \dots (30)$$

$$N_2 - N_1 = 219.16N \dots (31)$$

De (20) y (31) se obtienen los valores de N_1 y N_2 , los cuales son mostrados en (32) y (33)

$$N_1 = 301.01N \dots (32)$$

$$N_2 = 520.17N \dots (33)$$

Tomando en consideración [36], las fuerzas de tracción son proporcionales a las fuerzas normales y se cumple la relación (34); la cual en conjunto con la relación (30), (32) y (33) dan como resultado las fuerzas de tracción f_1 y f_2 , las cuales son mostradas en (35) y (36).

$$\frac{f_1}{N_1} = \frac{f_2}{N_2} = cte \dots (34)$$

$$f_1 = 236.51N \dots (35)$$

$$f_2 = 408.74N \dots (36)$$

Al iniciar con el análisis dinámico se asumió que no existe deslizamiento entre las ruedas y la superficie, por lo que se debe cumplir la relación (37); en donde u_s es el coeficiente de fricción estático entre las llantas y el concreto húmedo y de acuerdo a [29] tiene un valor de 1.0.

$$f_i < u_s * N_i \dots (37)$$

Las fuerzas de fricción calculadas deben ser menores a la fuerza de fricción estática máxima para cumplir con la relación (37). De acuerdo a los resultados en (32), (33), (35) y (36) se concluye que las ruedas no deslizan y los cálculos realizados anteriormente son coherentes con los resultados hallados.

Para la determinación del torque motriz es necesario realizar el análisis dinámico para la rueda que posea la mayor fuerza de tracción; las cuales son las ruedas traseras. El diagrama de cuerpo libre es presentado en la figura 3.9.

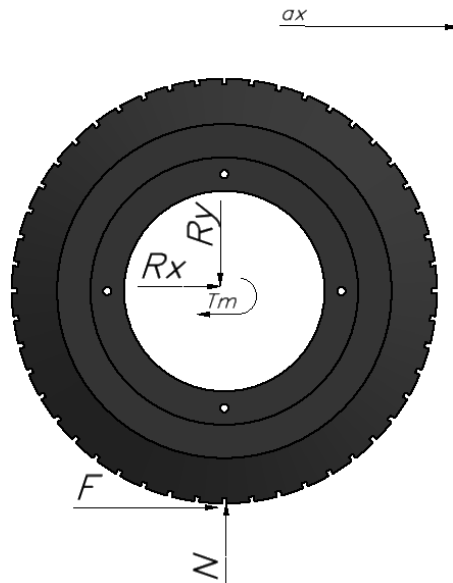


Figura 3.9 Diagrama de cuerpo libre para una rueda

Los parámetros a considerar para el cálculo del torque motriz son mostrados en (38), (39), (40), (41) y (42)

$$F = 204.37N \dots (38)$$

$$N = 260.09N \dots (39)$$

$$a_x = \alpha = 0.5 \frac{m}{s^2} \dots (40)$$

$$R = 0.1 m \dots (41)$$

$$I = 0.004kg.m^2 \dots (42)$$

La fuerza de tracción máxima (38) en una de las ruedas traseras es 204.37N, el cual es la mitad del valor de f_2 ; mientras que el valor de la fuerza normal (39) es 260.09N, la mitad de N_2 . El radio de la rueda es mostrado en (41) mientras que en (42) se detalla el valor del momento de inercia de la rueda. La aceleración del robot (40) en el eje X es igual a la aceleración angular en el centro de la rueda, con lo cual se obtiene la relación (43); mientras que en (44) se muestra

el resultado esperado. El torque motriz máximo que debe proveer el motor debe ser 20.44N, ya que este valor es requerido en su punto crítico.

$$\sum M = T_m - F * R = I * \alpha \dots (43)$$

$$T_m = 20.44 \dots (44)$$

Para la determinación de la velocidad de rotación se hace uso de la relación (45) en donde N_r es la velocidad angular en “rpm” y R es el radio de la rueda, el cual es definido en (41). La velocidad de avance requerida en el robot móvil es de 0.20m/s. En (46) se detalla el valor de la velocidad angular del motor en $\frac{rad}{s}$.

$$N_r = \frac{60 * 0.2}{2 * \pi * R} = 15 \text{ rpm} \dots (45)$$

$$w_r = 1.57 \frac{rad}{s} \dots (46)$$




Finalmente, la potencia que debe proveer el motor en su punto crítico se calcula a partir de la relación mostrada en (47), cuyo resultado es mostrado en (48).

$$P_m = T_m * w_r \dots (47)$$

$$P_m = 20.44 * 1.57 = 32.09 \text{ W} \dots (48)$$

Tabla 3.10

TABLA COMPARATIVA PARA MOTOR-REDUCTOR

Imagen			
Modelo	62656	E30-150-24-G	725
Fabricante	Groschopp	AMPFLOW	BISONGEAR
Torque nominal	5.60 N.m	5.00 N.m	6.50 N.m
Velocidad nominal	59.5 RPM	72 RPM	60 RPM
Potencia de salida	35 W	130 W	55 W
Eficiencia	46.4%	68%	42%
Torque máximo	33.75 N.m	40.67 N.m	18.75 N.m
Voltaje nominal	24 VDC	24 VDC	24 VDC
Corriente nominal	3.10 A	8 A	8.90 A
Corriente de arranque	14.69 A	120 A	30 A
Dimensiones	298 x 90.70 x 169 mm	74 x 52 x 17 mm	110 x 80 x 55 mm

En la tabla 3.10 se presentan 3 diferentes alternativas para la selección del motor DC apropiado. Se aprecia que las 3 opciones ofrecen un torque motriz mayor al requerido mientras; sin embargo, por un factor de forma los modelos 62656 de Groschopp y 725 de BISONGEAR son preferible a la opción de AMPFLOW; se prefieren motores con transmisión de ángulo recto ya que son más compactos y permiten lograr un robot móvil con menores dimensiones para ingresar en tuberías de menor diámetro. Entre los dos modelos mencionados, se selecciona el modelo 62656 de Groschopp ya que la transmisión que este posee es planetaria en contraposición a la transmisión tipo oruga del modelo 725 de BISONGEAR; ya que el primero es más eficiente que el segundo (figura 3.10).

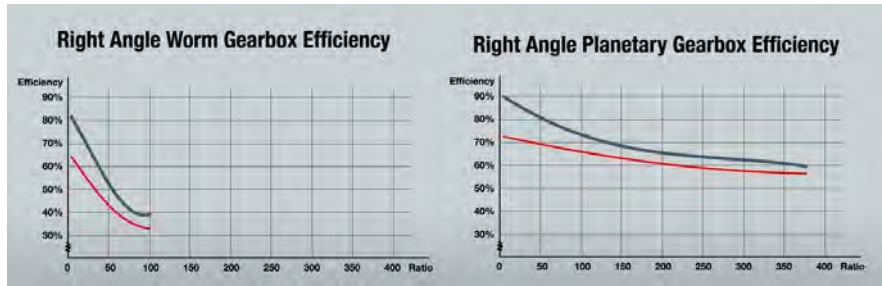


Figura 3.10 Comparación de las eficiencias en transmisiones angulares: oruga (izquierda), planetaria (derecha)

Para la determinación del consumo energético de cada motor DC es necesario conocer sus puntos de operación. Para los motores que transmiten potencia mecánica a las ruedas traseras se tienen los parámetros definidos en (50) y (51).

$$T_m = 20.44 \text{ N.m} \dots (50)$$

$$\omega_r = 1.57 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \dots (51)$$

En la figura 3.11 se muestra el punto de operación para cada motor de las ruedas traseras y en (52), (53), (54) y (55) se presentan los parámetros para dicho punto de operación.

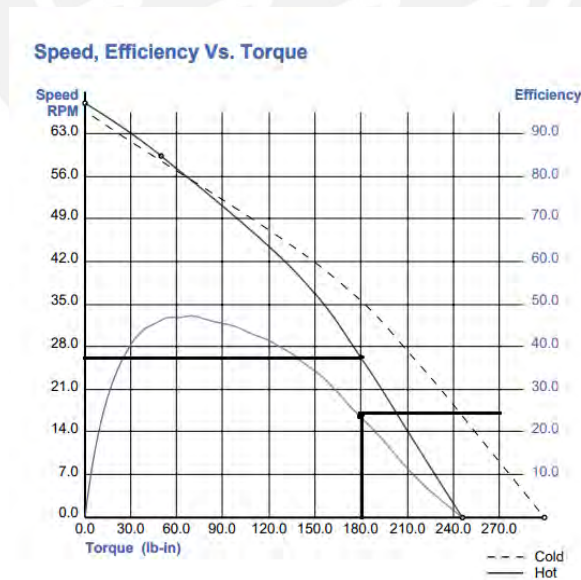


Figura 3.11 Punto de operación crítica para el motor DC de la rueda trasera

$$n_{rt} = 25\% \dots (52)$$

$$T_m = 20.44 \text{ N.m} \dots (53)$$

$$N_r = 26 \text{ rpm} = 2.72 \text{ rad/s} \dots (54)$$

$$P_e = 128.36 \text{ W} \dots (55)$$

De acuerdo a lo obtenido en la figura 3.11 se concluye que el motor 62656 de Groschopp cumple con los requerimientos propuestos ya que los valores obtenidos en (53) y (54) son superiores a los parámetros requeridos en (50) y (51). En (55) se muestra la potencia eléctrica consumida por un motor de la rueda trasera en su punto crítico.

En el caso de las ruedas delanteras, los parámetros de operación son mostrados en (54) y (55); mientras que la figura 3.12 se ilustra el punto de operación.

$$T_m = 11.84 \dots (56)$$

$$w_r = 1.57 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \dots (57)$$

En (56) se presenta la eficiencia para cada rueda delantera mientras que en (59) y (60) se detallan los parámetros para el punto de operación descrito. Además, en (61) se detalla la energía eléctrica consumida por un motor de la rueda delantera en su punto de operación crítico.

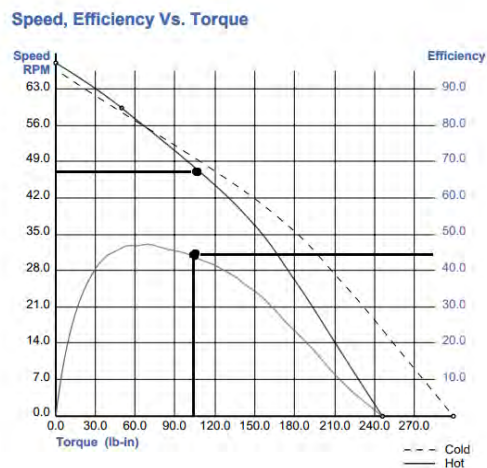


Figura 3.12 Punto de operación crítica para el motor DC de la rueda delantera

$$n_{rd} = 45\% \dots (56)$$

$$T_m = 11.84 \text{ N.m} \dots (59)$$

$$N_r = 47 \text{ rpm} = 4.92 \text{ rad/s} \dots (60)$$

$$P_e = 41.30 \dots (61)$$

De acuerdo a los resultados obtenidos en (55) y (61) se concluye que el consumo energético total de los 4 motores DC es de 339.32 W para un voltaje de operación de 24 V. De los resultados observados en (54) y (60) se puede observar que la velocidad angular del punto de operación es superior a la velocidad angular requerida; sin embargo, este parámetro puede ser controlado a través de la variación del voltaje aplicado a los motores DC como fue descrito en la relación (7).

ILUMINACIÓN

La distancia de inspección en una tubería que el robot debe alcanzar es de hasta 400 metros; por lo tanto, se requieren componentes que permitan iluminar la superficie interna de la tubería y poder visualizar detalles en un ambiente de total oscuridad. De acuerdo a los niveles de iluminación recomendados [30], se requiere como mínimo 750 lux para trabajos de inspección. Para asegurar una correcta visualización de fallas se requerirá reconocer objetos hasta un metro por delante y detrás del robot. La figura 3.14 muestra el diagrama de iluminación requerido en el robot móvil.

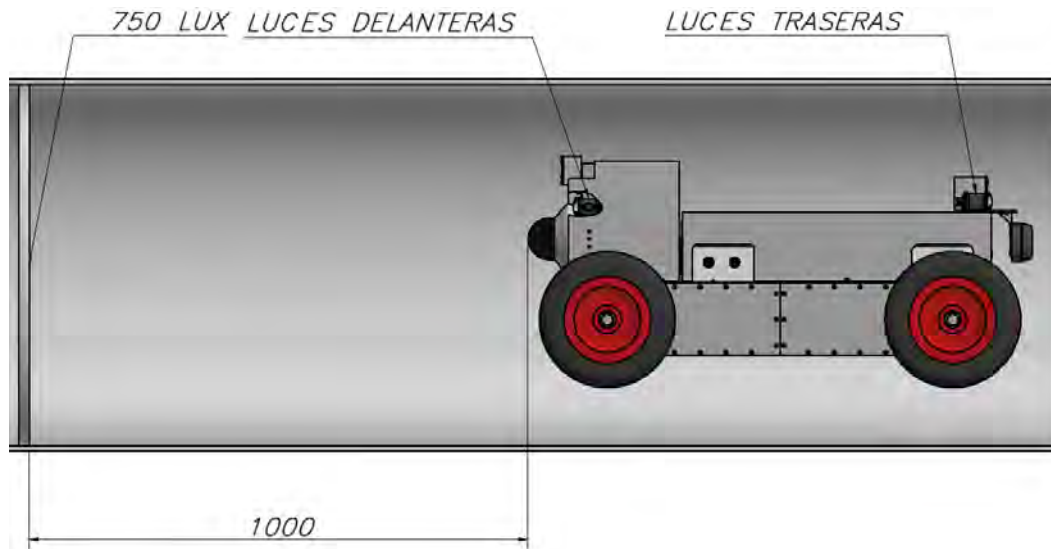


Figura 3.13 Diagrama de iluminación

Al requerir 750 lux (X = nivel luminoso) a una distancia de un metro ($h = 1$ m) del robot de inspección de tuberías se tiene la relación (62), en donde se obtiene el valor de I (intensidad luminosa) en (63).

$$X = \frac{I}{h^2} \dots (62)$$

$$I = 750 * 1 = 750 \text{ cd} \dots (63)$$

El flujo luminoso (F) requerido para obtener una intensidad luminosa de 750 cd con un ángulo de apertura de 120° se calcula a partir de la relación (64) en donde A representa al área del casquete circunferencial obtenido a 1 metro de la fuente de luz. En (65) se muestra el valor del flujo luminoso requerido.

$$F = A * I \dots (64)$$

$$F = 2 * (3.14) * 0.5 * 750 = 2356.13 \text{ lm} \dots (65)$$

A partir de los cálculos realizados se requiere un flujo luminoso total de 2356.13lm. En la tabla 3.11 se presentan las diferentes alternativas comerciales que pueden ser incluidos en el robot

móvil para asegurar una apropiada iluminación.

Tabla 3.11
TABLA COMPARATIVA DE LUCES

Imagen			
Modelo	9405.40.6000	R500	MINI LED
Fabricante	Blue Robotics	ANMA	DWTELK
Flujo luminoso	1500 lm	12000 lm	1580 lm
Interfaz de control	Señal PWM	ON/OFF	Analógico, PWM
Nivel de protección	IP68	IP67	IP69
Voltaje de operación	7 – 48 VDC	24 VDC	12 – 28 VDC
Consumo energético	15 W	18 W	24 W
Dimensiones	38.5 x 38.5 x 68.7 mm	65 x 80 x 90 mm	50 x 50 x 62 mm

De acuerdo a la tabla 3.11, el modelo 9405.40.6000 de blue robotics es el componente seleccionado debido a que posee un menor consumo energético y al situar dos de estos en la parte delantera y trasera se emite un flujo luminoso de 3000lm cumpliendo con el requerimiento presentado en el párrafo anterior. El uso de una señal PWM como interfaz de control permite establecer diferentes niveles de intensidad.

3.2.3 DOMINIO ELECTRÓNICO

Los componentes electrónicos del robot móvil se dividen en dominio electrónico; encargado de controlar los actuadores, extraer datos de los sensores y establecer la comunicación con la estación de control; y dominio energético, encargado de recibir la energía eléctrica de la estación de control y administrar el voltaje apropiado para los componentes del dominio electrónico. En la figura 3.14 se presenta el esquema de conexiones entre las partes mencionadas.

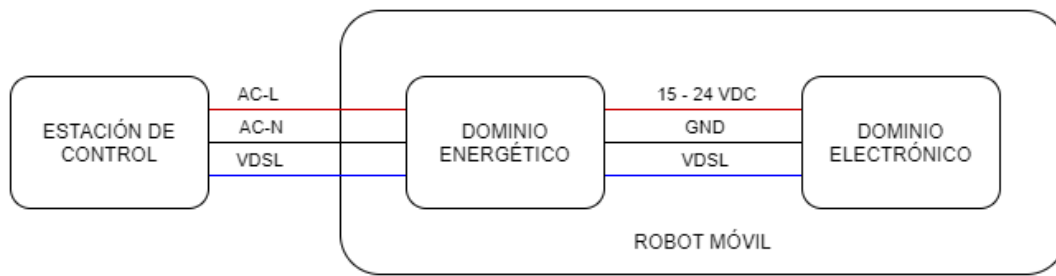


Figura 3.14 Diagrama general del dominio electrónico

En el dominio energético se recibe el voltaje AC proveniente del generador eléctrico y también se almacenan las baterías del robot móvil. Un circuito electrónico establece el orden de acción para ambas fuentes de energía y le otorga al generador la prioridad más alta; si el generador se encuentra funcionando correctamente será este el que brinde la energía eléctrica para el resto de componentes, en caso contrario serán las baterías. La selección o cambio de fuente energética se desarrolla de forma automática, además también se incluye un botón que gestiona el encendido y apagado del robot móvil.

En el dominio electrónico se cuentan con los componentes apropiados para regular la energía eléctrica, controlar a los actuadores y extraer los datos de los sensores. En la figura 3.15 se muestra el diagrama esquemático y las respectivas conexiones con los actuadores y sensores seleccionados en las secciones anteriores.

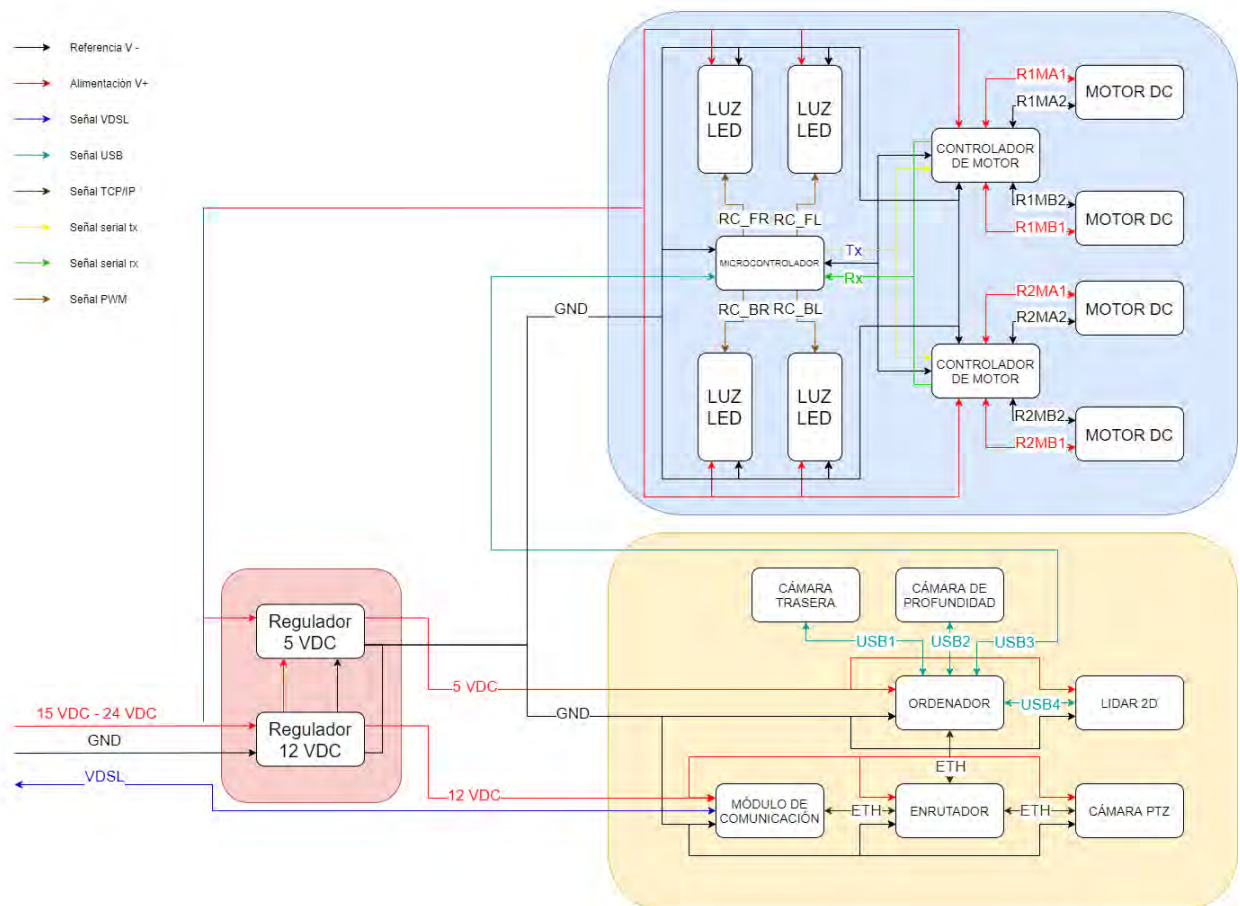


Figura 3.15 Diagrama esquemático del dominio electrónico del robot móvil




En la presente sección se detallarán los criterios de selección para el controlador de motor, microcontrolador, ordenador, enrutador y módulo de comunicación. Los actuadores y sensores fueron seleccionados en las secciones anteriores; mientras que los reguladores mostrados en el recuadro rojo de la figura 3.15 serán seleccionados en el dominio energético.

CONTROLADOR DE MOTOR DC

El “Controlador de motor” es un componente electrónico que recibe señales de control desde el sistema embebido de control a través del protocolo “serial TTL”, y administra la potencia entregada al motor DC para conseguir la velocidad deseada. En la tabla 3.12 se presentan 3 opciones comerciales para el controlador de motor.

Tabla 3.12

TABLA COMPARATIVA PARA CONTROLADOR DE MOTOR

Imagen			
Modelo	MDDS60	ROBOCLAW 2X30	EM-243C
Fabricante	CYTRON	BASICMICRO	ELECTROMEN
Canales	2	2	1
Voltaje de operación	7 – 45 VDC	6 – 34 VDC	10 – 58 VDC
Corriente continua	60 A	30 A	50 A
Corriente pico	120 A	60 A	100 A
Interfaces de comunicación	PWM, ANALÓGICA, TTL UART, RC	USB, ANALÓGICA, TTL UART, RC	PWM, ANALÓGICA, DIGITAL
Dimensiones	190 x 121 x 45 mm	74 x 52 x 17 mm	110 x 80 x 55

De acuerdo a los resultados obtenidos en (55) y (61), la corriente consumida para un motor DC en la parte trasera del robot es de 5.33 A y el voltaje de operación es de 24 V. Los 3 controladores mostrados en la tabla 3.12 cumplen con los requerimientos propuestos; por lo que se selecciona el controlador ROBOCLAW 2X30 debido a que es el más compacto y posee el protocolo UART como mecanismo de control.

MICROCONTROLADOR

Un microcontrolador es el encargado de recibir mensajes desde el ordenador a través del protocolo “serial USB” y controlar las variables del sistema de actuadores. Este componente se comunica con los controladores de motor a partir del protocolo “serial TTL” con el objetivo de controlar la velocidad angular en cada motor, y también debe enviar señales PWM hacia el actuador de iluminación para controlar su intensidad. El microcontrolador debe contar con dos puertos UART y dos puertos con temporizadores programables de 16 bits. En la tabla 3.13 se muestran diferentes opciones comerciales de microcontroladores.

Tabla 3.13

TABLA COMPARATIVA PARA SISTEMA EMBEBIDO DE CONTROL

Imagen			
Modelo	UNO	NUCLEO64 – F410RB	TIVA LAUNCHPAD
Fabricante	ARDUINO	STM MICROELECTRONICS	TEXAS INSTRUMENT
Microcontrolador	ATMEGA328P	STM32F410RB	TM4C123GH6PM
Tamaño de registros	8 bits	32 bits	32 bits
SRAM	2 KB	32 KB	32 KB
FLASH	32 KB	128 KB	256 KB
Frecuencia de operación	16 MHz	100 MHz	80 MHz
Puertos E/S	23	36	35
Temporizadores	3	6	6
Módulos de comunicación	1 x UART	3 x UART	8 x UART
Voltaje de operación	5 VDC	5 VDC	5 VDC
Consumo energético	2.5 W	1.5 W	1.5 W
Dimensiones	75 x 53 x 14 mm	70 x 82.5 x 14 mm	50 x 57 x 11 mm




Al tomar en cuenta las alternativas descritas se selecciona el microcontrolador STM32-F410RB ya que cumple con los requerimientos propuestos y posee el menor consumo energético; además de poseer la mayor frecuencia de operación asegurando una mayor rapidez en la ejecución de las instrucciones. El microcontrolador se conectará con el ordenador del robot móvil a través del protocolo USB, por donde también será energizado.

ORDENADOR

El ordenador central del robot móvil se encarga de establecer la comunicación con la estación de control a través del protocolo de comunicación TCP/IP; enviar señales de control hacia los actuadores a través del microcontrolador; y extraer los datos de la cámara PTZ, cámara trasera, cámara de profundidad y lidar 2D. Como requerimiento adicional se espera que este componente pueda realizar un procesamiento de imágenes primario y detectar anomalías

comunes mientras el robot realiza el proceso de inspección de una tubería, además de poder incorporar el sistema operativo ROS (*Robotic Operating System*) en su memoria interna. Todos los datos analizados o recolectados deben ser almacenados para un posterior procesamiento en una estación de trabajo. En la tabla 3.14 se muestran diferentes ordenadores comerciales con sus respectivas características.

Tabla 3.14
TABLA COMPARATIVA PARA ORDENADOR

Imagen			
Modelo	3B+	TINKER BOARD S	JETSON NANO
Fabricante	RASPBERRY PI	ASUS	NVIDIA
Procesador	Broadcom BCM2837	Rockchip RK3288	NVIDIA Maxwell
Nro de núcleos	Quad Core	Quad Core	Quad Core
Frecuencia de núcleo	1.4 GHz	1.8 GHz	1.43 GHz
GPU	Broadcom VideoCore	ARM Mali T764	NVIDIA Maxwell
Frecuencia de la GPU	250 MHz	600 MHz	-
Memoria RAM	1 GB – LPDDR3	2 GB – LPDDR3	4 GB – LPDDR3
Almacenamiento	MicroSD	MicroSD 16 GB eMMC	MicroSD 16 GB eMMC
Sistema operativo	GNU Linux	GNU Linux	GNU Linux
Interfaces	4 x USB 2.0 1 x Gigabit Ethernet	4 x USB 2.0 1 x Gigabit Ethernet	4 x USB 3.0 1 x Gigabit Ethernet
Voltaje de operación	5 VDC	5 VDC	5 VDC
Consumo energético	12.5 W	15 W	15 W




A partir de las opciones presentadas en la tabla 3.14 se selecciona el ordenador JETSON NANO fabricado por la compañía NVIDIA. Dicho ordenador posee 4 puertos USB 3.0 lo cual permite una adquisición de datos más rápida que las otras alternativas; así como una mayor memoria RAM lo que permite la ejecución de varios procesos sin afectar el rendimiento.

MÓDULO DE COMUNICACIÓN

El módulo de comunicación es el encargado de transferir datos bidireccionalmente entre la

estación de control y el robot móvil a través del cable de conexión. Además, la velocidad de transmisión entre ambos puntos de comunicación debe permitir el envío del video obtenido de las cámaras en el robot móvil en tiempo real para la inspección visual del interior de la tubería. En la tabla 3.15 se muestran diferentes módulos de comunicación que permiten realizar conexiones exitosas en distancias superiores a 300 m.

Tabla 3.15
TABLA COMPARATIVA PARA MÓDULO DE COMUNICACIÓN

Imagen			
Modelo	TEX – 100	NV-202EKIT	EthernetEx
Fabricante	TUPAVCO	NETSYS	STERTECH
Protocolo de transmisión	VDSL2	VDSL2	VDSL2
Rango de transmisión	0 – 2.1 km	0 – 3 km	0 – 1.0 km
Velocidad de transmisión	100/100mbps – up/down – 0.3km 22/19mbps – up/down – 1.0km 5/2mbps – up/down – 2.0km	100/100mbps – up/down – 0.3km 23/22mbps – up/down – 1.0km 2.5/14.9mbps – up/down – 2.0km	100/100mbps – up/down – 0.0km 75/75mbps – up/down – 0.3km 10/10mbps – up/down – 1.0km
Voltaje de operación	12 VDC	12 VDC	12 VDC
Consumo energético	5 W	12 W	12 W
Dimensiones	80 x 70 x 25 mm	95 x 110 x 27 mm	85 x 70 x 25 mm




A partir de la tabla 3.15, el módulo de comunicación seleccionado es el TEX-100 de TUPAVCO ya que posee un menor consumo energético y logra transmisiones de hasta 22 mbps para conexiones de 1km de largo. Además, su factor de forma lo hace más compacto que las otras alternativas mostradas.

ENRUTADOR

El enrutador es un componente electrónico que permite crear una red informática local a través del protocolo TCP/IP, el cual permite conectar bidireccionalmente diferentes componentes a

partir de la asignación de una dirección IP. De acuerdo al esquema de la figura 3.15; el módulo de comunicación y la cámara PTZ requieren comunicarse de forma simultánea con el ordenador del robot móvil, por lo tanto, el enrutador a seleccionar debe poseer 3 o más puertos ethernet. En la tabla 3.16 se presentan diferentes opciones comerciales para este componente.

Tabla 3.16
TABLA COMPARATIVA PARA ENRUTADOR

Imagen			
Modelo	HEX S	TL-WR841N	DGS-105
Fabricante	MIKROTIK	TP-LINK	D-LINK
Puertos	5 x Gigabit Ethernet	6 x Gigabit Ethernet	8 x Gigabit Ethernet
Dimensiones	113 x 78 x 28 mm	Quad Core	Quad Core
Voltaje de alimentación	12 VDC	12 VDC	12 VDC
Consumo energético	24 W	24 W	24 W

El enrutador seleccionado es el HEX S de MIKROTIK ya que cumple con los requerimientos propuestos y su factor de forma lo hace más compacto que las otras alternativas. Este último factor es importante ya que mientras se obtenga un menor espacio ocupado por los componentes, la caja electrónica seleccionada también podrá ser más pequeña y permitirá al robot móvil ingresar en tuberías de menor diámetro.

TARJETA DE DISTRIBUCIÓN ELECTRÓNICA

En el dominio electrónico se recibe la alimentación para los componentes a través de convertidores de voltaje. Para evitar la redundancia en el cableado y generar las salidas para los componentes externos se realizó el diagrama esquemático de la figura 3.16. En el diagrama esquemático se tiene como voltajes de ingreso de 12 VDC y 5 VDC, los cuales provienen de los reguladores de voltaje; además del voltaje de la fuente principal. El voltaje de 12 VDC es distribuido para alimentar al enrutador, el módulo de comunicación y la cámara delantera; mientras que 5 VDC es distribuido para alimentar al lidar 2d y el ordenador del robot móvil.

3.2.4 DOMINIO ENERGÉTICO

En la presente sección se mostrarán los cálculos apropiados para la selección de los componentes que recibirán, controlarán y entregarán la energía eléctrica requerida por los componentes del dominio electrónico. En la tabla 3.17 se presenta el voltaje y potencia requerida por todos los componentes seleccionados en las secciones anteriores.

Tabla 3.17

RESUMEN ENERGÉTICO GENERAL

Fuente	Componente	Potencia unitaria	Cantidad	Potencia total
5 V	Ordenador	15 W	1	15 W
	Sensor lidar 2D	5 W	1	5 W
Total				20 W
12 V	Camara PTZ	12 W	1	12 W
	Módulo de comunicación	5 W	1	5 W
	Router	24 W	1	24 W
Total				41 W
Fuente principal	Controlador de motor DC	140 - 160 W	4	339.32 W
	Luces LED	15 W	4	60 W
Total				399.32 W

A partir de la tabla 3.17 se observó que se requieren 3 fuentes de alimentación, siendo una de ellas la fuente principal y las otras 2 provenientes de un circuito regulador. La fuente principal energiza a los actuadores directamente y también a los circuitos reguladores de voltaje. En la tabla 3.18 se muestra la potencia requerida para cada una de los reguladores a seleccionar, mientras que en los párrafos siguientes se describe las principales características de los componentes seleccionados en el dominio energético.

Tabla 3.18

RESUMEN ENERGÉTICO

Fuente	Potencia total
Regulador de 5 V	20 W
Regulador de 12 V	41 W

REGULADOR DC - DC

El regulador de 12 VDC debe proveer una potencia de 41 W, mientras que el regulador de 5 VDC debe proveer 20 W. Ambos reguladores reciben la energía eléctrica de la fuente principal, la cual brindará un voltaje de alimentación entre 15 y 24 VDC. Como los reguladores DC-DC tendrán voltajes menores en su salida con respecto a su entrada, estos deben ser reguladores “*Step Down*”. El convertidor seleccionado para obtener 12 VDC y 5VDC es el modelo XL4016 fabricado por la compañía XLSEMI y sus características son mostradas en la tabla 3.19.

Tabla 3.19
REGULADOR DC - DC

Características generales	
Imagen	
Modelo	XL4016
Fabricante	XLSEMI
Voltaje de entrada	8 V – 40 V
Voltaje de salida	12 V
Eficiencia (12 V, 5 V)	93 %, 85%
Potencia máxima regulada	300 W

La potencia máxima regulada por XL4016 es 300 W, siendo esta mayor a la potencia eléctrica requerida. Para obtener 41 W de potencia eléctrica en la salida a un voltaje de 12 VDC se tiene 93% de eficiencia, lo que significa que la fuente principal debe proveer 44.09 W en la entrada. En el caso del regulador de 5 VDC se tiene una eficiencia de 85%, lo que significa que requerirá 23.53 W en la entrada.

Finalmente, a partir de los componentes mostrados, la fuente principal del sistema debe proveer 67.62 W adicionales para aquellos componentes que requieran un regulador como intermediario, es así que la fuente principal debe proveer en total una potencia eléctrica de 466.94 W en su punto de operación crítico, ya que de acuerdo a la tabla 3.17, 399.32 W serán

utilizados por los actuadores. Estos valores fueron calculados tomando en cuenta el consumo energético máximo de los componentes; sin embargo, es probable que estos requieran una menor potencia durante la operación ya que muchos de ellos no operarán de forma simultánea.

CIRCUITO DE CONTROL ENERGÉTICO

En la presente sección se muestra el detalle del diseño del circuito electrónico utilizado para la gestión energética del robot de inspección de tuberías. En el diagrama esquemático mostrado en la figura 3.18 se observa la distribución general de los componentes a seleccionar. La principal característica del circuito mostrado es la dualidad de las fuentes de alimentación, ya que el robot móvil puede ser energizado por baterías o por la fuente conmutada.

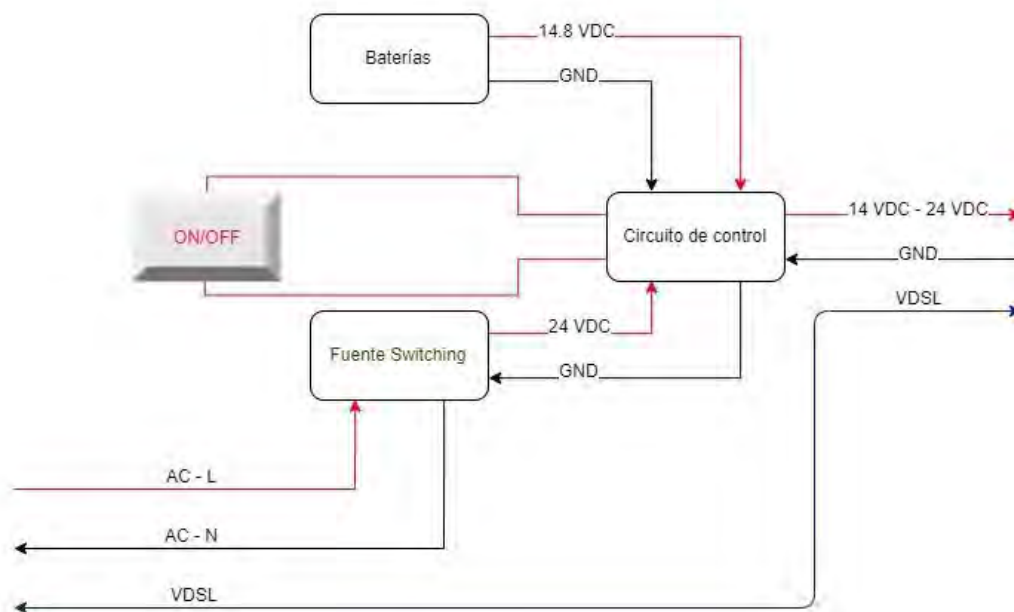


Figura 3.18 Diagrama esquemático del circuito de administración energética. Fuente: Propia

En los cálculos realizados en el apartado anterior se determinó que tanto las baterías como la fuente conmutada deben de proveer hasta 466.94 W de potencia para asegurar la operación del robot móvil en su punto crítico. En la figura 3.19 se muestra el circuito de control, el cual seleccionará de forma automática la fuente de energía para el robot (baterías o fuente conmutada). La prioridad energética se encuentra con la fuente conmutada, es decir si esta se

encuentra operando, será esta la que provea de energía al robot, en caso la fuente se encuentre apagada la energía será obtenida de las baterías. Las entradas para el circuito serán los 24 VDC provenientes de la fuente conmutada y 14.8 V provenientes de las baterías. Además, se tiene un botón de encendido y apagado que controla la energización total del robot. El circuito mostrado fue validado experimentalmente en [31].

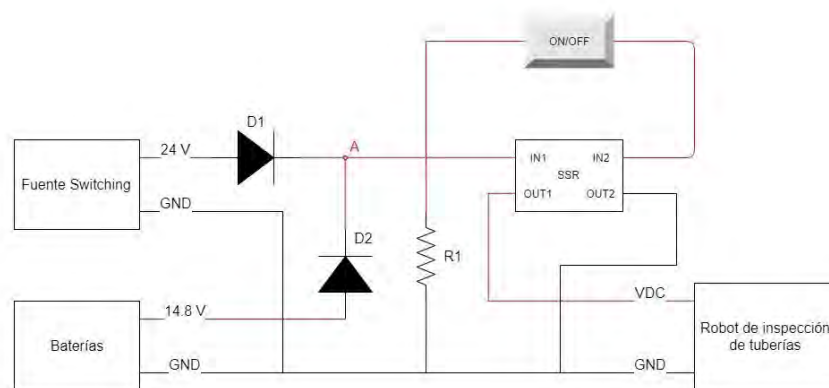



Figura 3.19 Circuito de control energético. Fuente: Propia

El arreglo de diodos D1 y D2, ambos diodos Schottky con una caída de voltaje máxima de 1.2 VDC, determina cual será la fuente de alimentación principal para el robot de inspección de tuberías. Si el generador está funcionando correctamente y la fuente conmutada se encuentra operativa el diodo D1 comenzará a conducir, por lo que en el nodo A se tendrá 22,8 V y el diodo D2 se encontrará bloqueado. En el caso de presentarse alguna falla en la fuente conmutada o el generador, el diodo D1 recibirá 0 V en su entrada por lo que el nodo A se polarizará con 0 V por la presencia de R1. Al existir una diferencia de potencial de 0 V en el diodo D1, el diodo D2 comenzará a conducir y entregará la potencia eléctrica proveniente de las baterías. Esta línea de transmisión pasará a través de un relé de estado sólido, el cual controlará sus terminales de potencia a partir de un botón. De acuerdo a [31] el tiempo de conmutación debe ser menor a 20 ms para no interrumpir la continuidad del funcionamiento de los componentes del dominio electrónico, dicho requerimiento será analizado en los componentes a seleccionar.

RELÉ DE ESTADO SÓLIDO

La potencia requerida por el robot de inspección de tuberías en su punto de operación crítico es de 466.94 W; por lo tanto, a través del relé se transmitirá una corriente de hasta 31.55 A en caso las baterías se encuentren alimentando al robot, o hasta 19.45 A en caso la fuente conmutada actúe como fuente de alimentación. El componente seleccionado es el relé D1D60, fabricado por la compañía CRYDOM, sus características principales son mostradas en la tabla 3.20.

Tabla 3.20
RELÉ DE ESTADO SÓLIDO

Características generales	
Imagen	
Fabricante	CRYDOM
Denominación del fabricante	D1D60
Características mecánicas	
Dimensiones	57.3 mm x 44.5 mm x 22.6 mm
Masa	75.5 g
Temperatura de operación	-40 °C – 125 °C
Características eléctricas	
Voltaje de entrada	1 V – 72 V
Voltaje de control	3.5 V – 32 V
Corriente máxima	60 A
Resistencia térmica (R_{jc})	0.34 °C/W
Resistencia térmica al disipador (R_{cs})	0.05 °C/W
Caída de voltaje máxima (V_l)	0.6 VDC
Tiempo de encendido	100us
Tiempo de apagado	100us

De acuerdo a la tabla 3.20; la caída de voltaje máxima cuando el relé se encuentra en conducción es de 0.6 VDC, y considerando un consumo de corriente de 31.55 A, se tiene la

disipación de potencia eléctrica mostrada en (66).

$$PD \text{ (Potencia disipada)} = V_l * I \dots (66)$$

$$PD = 0.6 \text{ VDC} * 31.55 \text{ A} \dots (67)$$

$$PD = 18.93 \text{ W} \dots (68)$$

Debido al alto flujo de corriente a través del relé se requiere de un disipador que permita mantener la temperatura del componente dentro de sus límites de operación; la relación entre la potencia disipada y la resistencia del disipador es mostrada en (69).

$$PD \leq \frac{(T_{jmax} - T_a)}{R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}} \dots (69)$$


En la tabla 3.20 se detalla que la temperatura máxima de operación (T_{jmax}) para el componente es de 125 °C, mientras que el valor de su resistencia térmica (R_{jc}) es de 0.34. La temperatura del ambiente (T_a) se asume en promedio 25 °C. Con los datos presentados y asumiendo $R_{cs} \cong 0$; se obtiene la relación mostrada en (70), la cual muestra que la resistencia térmica del disipador debe ser menor o igual a 4.94 °C/W.

$$R_{sa} \leq 4.94 \text{ } ^\circ\frac{C}{W} \dots (70)$$

De acuerdo a la hoja de datos del relé D1D60, el disipador apropiado es HS301, cuyas principales características son presentadas en la tabla 3.21. La utilización de este disipador asegura que la temperatura del componente se mantendrá a una temperatura menor a 90 °C en su punto crítico de operación ($I = 31.55 \text{ A}$).

Tabla 3.21

DISIPADOR PARA RELÉ


Características generales	
Imagen	
Fabricante	CRYDOM
Denominación del fabricante	HS301
Características mecánicas	
Dimensiones	81.00 x 40.00 x 90.00 mm
Masa	178 g
Resistencia térmica (R_{sa})	3.0 °C/W
Material	Aluminio

Finalmente, el tiempo de encendido y apagado del relé es 100us, por lo que una conmutación en las fuentes de energización tomará 200us; este valor se encuentra dentro de los límites permitidos [31] con lo cual se asegura que los componentes del dominio electrónico funcionaran continuamente.

DIODOS D1 Y D2

En el caso de los diodos D1 y D2, estos también deben conducir hasta una corriente de 31.55 A, además deberán poseer una corriente reversa inferior a 1 mA para evitar daños en la fuente conmutada o en las baterías. El diodo seleccionado para esta tarea tiene el código GSXD060A006S1-D3 y es fabricado por la compañía Global Power; sus principales características son presentadas en la tabla 3.22.

Tabla 3.22
DIODO

Características generales	
Imagen	
Modelo	GSXD060A006S1-D3
Fabricante	Global Power
Empaquetado	SOT-227
Características mecánicas	
Dimensiones	38.00 x 25.50 x 13.00 mm
Masa	-
Temperatura de operación	- 40 °C – 150 °C
Características eléctricas	
Corriente máxima	60 A
Caída de voltaje (V_f)	0.75 V
Voltaje inverso	max 60 V
Corriente de fuga	1 mA
Resistencia térmica (R_{jc})	0.8 °C/W
Resistencia térmica al disipador (R_{cs})	0.05 °C/W
Tiempo de recuperación (T_r)	500 ns

De acuerdo a la tabla 3.22; la caída de voltaje máxima cuando un diodo se encuentra en conducción es de 0.75 VDC. Al considerar una corriente conducida de 31.55 A, se obtiene la disipación de potencia mostrada en (73).

$$PD \text{ (Potencia disipada)} = V_f * I \dots (71)$$

$$PD = 0.75 \text{ VDC} * 31.55 \text{ A} \dots (72)$$

$$PD = 23.66 \text{ W} \dots (73)$$

La potencia disipada en el punto crítico de operación del diodo es de 23.66 W. Debido al alto flujo de corriente a través del diodo se requiere de un disipador que permita mantener la

temperatura del componente dentro de sus límites de operación.


$$PD \leq \frac{(T_{jmax} - T_a)}{R_{jc} + R_{sa} + R_{cs}} \dots (74)$$

En la tabla 3.22 se detalla que la temperatura máxima de operación (T_{jmax}) para el componente es de 150 °C, mientras que el valor de su resistencia térmica (R_{jc}) es de 0.8. La temperatura del ambiente (T_a) se asume en promedio 25 °C.

$$R_{sa} \leq 4.43 \text{ } ^\circ\frac{C}{W} \dots (75)$$

En (75) se establece que el disipador a seleccionar debe poseer una resistencia térmica máxima de 4.43 °C/W y debe ser apropiado para el empaquetado SOT-227. El disipador seleccionado es VXA-35-101E, fabricado por la compañía OHMITE. Sus principales características son mostradas en la tabla 3.21. La utilización de este disipador asegura que la temperatura del componente se mantendrá por debajo de los 85 °C incluso en su punto crítico de operación ($I = 31.55 \text{ A}$).

Tabla 3.23
DISIPADOR PARA DIODO

Características generales	
Imagen	
Fabricante	OHMITE
Denominación del fabricante	VXA-35-101E
Características mecánicas	
Dimensiones	30.00 x 48.50 x 35.00 mm
Masa	39g
Resistencia térmica (R_{ca})	1.6 °C/W
Material	Aluminio


Finalmente, el tiempo de recuperación para el diodo seleccionado es de 500ns; por lo tanto,

una conmutación en la fuente de alimentación tomará 1us. Al tomar en cuenta el tiempo de conmutación para el relé de estado sólido, se concluye que el tiempo total de conmutación en las fuentes de alimentación será de 201us, cumpliendo el requerimiento propuesto en [31].

FUENTE CONMUTADA

La fuente conmutada recibe la energía AC proveniente del generador y la transforma en energía DC. A partir de los componentes seleccionados para el control del robot de inspección de tuberías se determinó que esta fuente debe entregar un voltaje nominal de 24 VDC cuando se encuentre en funcionamiento; además, debe proveer potencia eléctrica hasta 466.94 W. La fuente conmutada seleccionada para esta tarea tiene el código TF800A24K y es fabricada por la compañía SL Power Electronics; sus principales características son presentadas en la tabla 3.24.

Tabla 3.24
FUENTE CONMUTADA


Características generales	
Imagen	
Fabricante	SL Power Electronics
Denominación del fabricante	TF800A24K
Características mecánicas	
Dimensiones	249 mm x 127 mm x 41 mm
Masa	1.70 Kg
Temperatura de operación	-25 °C – 60 °C
Características eléctricas	
Potencia máxima de salida	800 W
Voltaje nominal de salida	24 V
Voltaje de entrada	100 VAC – 240 VAC
Frecuencia de entrada	47 Hz – 63 Hz
Eficiencia	90.5 %

La fuente conmutada seleccionada puede proveer hasta 800W, lo cual permite un factor de seguridad de 1.70.

BATERÍAS

En el caso de que la fuente conmutada se encuentre inoperativa las baterías se encargaran de energizar al móvil. A partir de los requerimientos presentados en los párrafos anteriores estas deben brindar un voltaje de 14,8 VDC, lo que corresponde con la utilización de 4 celdas Li-Po (3.7 VDC por celda) en serie. Además, será necesario colocar múltiples arreglos de 4 celdas en paralelo para brindar un mayor tiempo de autonomía al robot en caso se utilice esta fuente de energía, en la figura 3.19 se muestra el esquema de estas conexiones. Otra característica importante es que las baterías puedan ofrecer un coeficiente de descarga que les permita alcanzar los 31.55 A de forma continua. Las baterías seleccionadas son Ultimate 7.5 fabricadas por Nano-tech, sus principales características son presentadas en la tabla 3.25.

Tabla 3.25
BATERÍAS

Características generales	
Imagen	
Fabricante	Nano - Tech
Denominación del fabricante	Ultimate 7.5
Características mecánicas	
Dimensiones	138.5 mm x 46.5 mm x 24.9 mm
Masa	350 g
Características eléctricas	
Celdas	2S2P
Capacidad de descarga	90 C
Capacidad de carga	2 C
Carga Almacenada	7.5 Ah

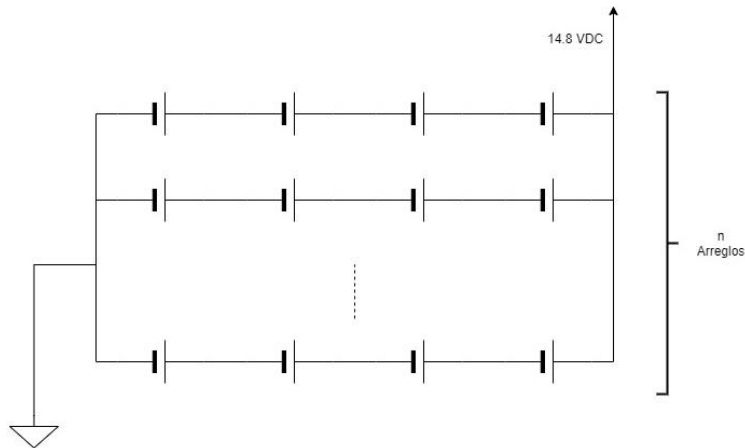


Figura 3.20 Diagrama de baterías. Fuente: Propia.

Durante la realización de una operación de inspección, el robot móvil ingresará hasta 400 metros al interior de la tubería y posteriormente regresará hasta el punto de inicio; por lo tanto, la potencia eléctrica media consumida (P_o) se muestra en (76). Se espera que el robot móvil posea una autonomía (T_o) de hasta 45 minutos cuando se encuentre utilizando las baterías.

$$P_o = \frac{P_{max}}{2} = 233.47 \dots (76)$$

$$A = P_o * T_o \dots (77)$$

$$E = 630.37 \text{ kJ} \dots (78)$$

En (78) se determina la cantidad de energía a proporcionar por las baterías para realizar una operación de inspección con una autonomía de 30 minutos. Las baterías se organizarán como se muestra en la figura 3.20, la energía total del arreglo mostrado se determina a partir de (80).

$$E_b = 7.50 * 3600 * 14.80 * n \dots (79)$$

$$E_b = 399.60 * n \text{ kJ} \dots (80)$$

Finalmente, a partir de (78) y (80) se determinan el valor de “n”

$$n = 1.58 \cong 2 \dots (81)$$

En (81) se concluye que se requerirán 2 pares de baterías para proporcionar una autonomía de 45 minutos como mínimo.

3.2.5 DOMINIO MECÁNICO

En el dominio mecánico del diseño del robot móvil de inspección de tuberías se describirán las principales piezas y mecanismos utilizados para cumplir con los requerimientos solicitados. El robot diseñado debe proteger a los componentes electrónicos seleccionados y transmitir la potencia mecánica de los motores hacia las llantas. En la figura 3.21 se presenta el robot móvil de inspección de tuberías cuyas dimensiones son 980x580x482 mm. Los detalles de las piezas y sus dimensiones son presentados en los planos de ensamblaje y despiece.

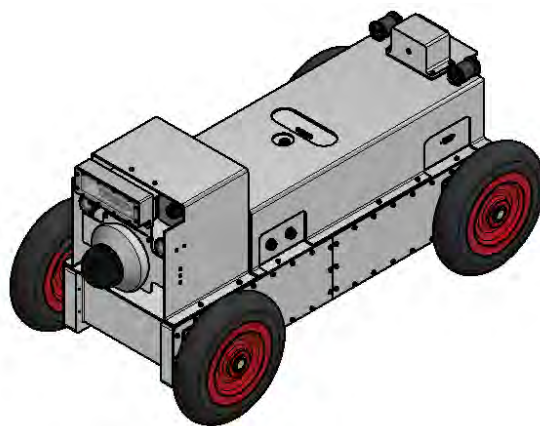


Figura 3.21 Dominio mecánico del robot móvil

El robot móvil diseñado se ensambla a partir de la unión de cuatro partes principales: chasis inferior, chasis superior, sensores delanteros y sensores traseros. Las partes mencionadas, mostradas en la figura 3.22, son ensambladas a través de uniones atornilladas.

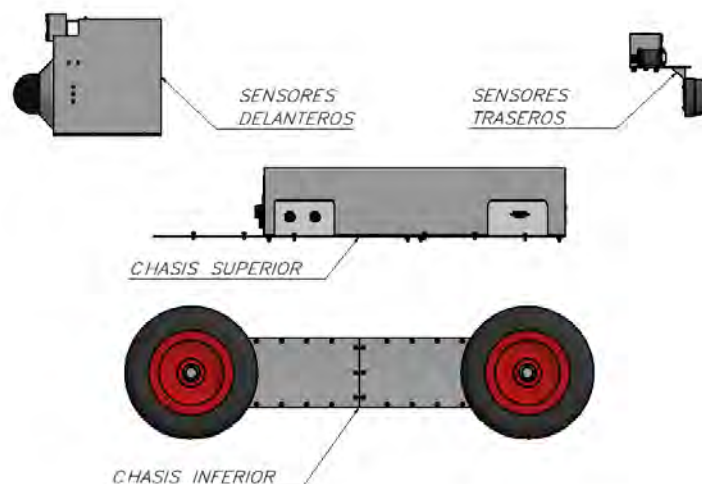


Figura 3.22 Partes del dominio mecánico

CHASIS INFERIOR

En la figura 3.23 se presenta la vista isométrica del sub-ensamble correspondiente al chasis inferior del robot móvil cuyas dimensiones son 482x934x528mm. Dicho sub-ensamble se compone de las llantas, motor-reductores y piezas estructurales que protegen a los actuadores y transmiten la potencia mecánica hacia las llantas.

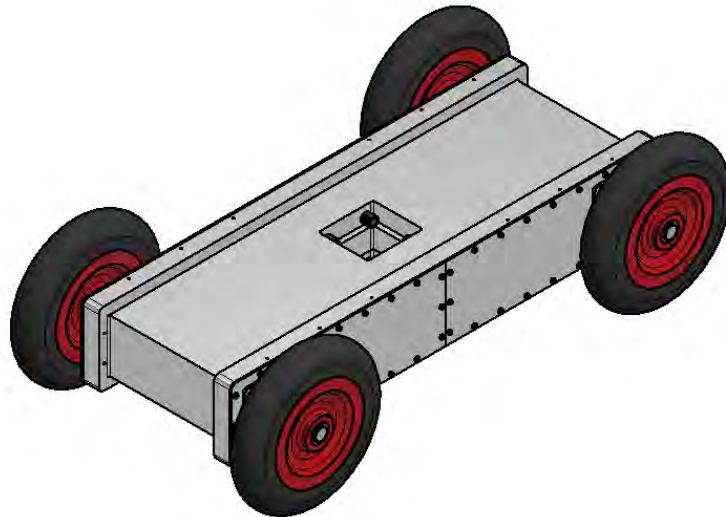


Figura 3.23 Chasis inferior del robot móvil

La rueda se encarga de movilizar al robot móvil y se encuentra acoplado al eje de transmisión a través de una cuña. Para impedir el desplazamiento lateral de la rueda hacia el exterior se utiliza un anillo de retención; mientras que la restricción interna se da por la geometría del eje. La cuña y el eje de transmisión se encuentran fabricados en AISI 304 y los criterios para su dimensionamiento se encuentran en el ANEXO D. En la figura 3.24 se presenta el ensamble de los componentes mencionados.

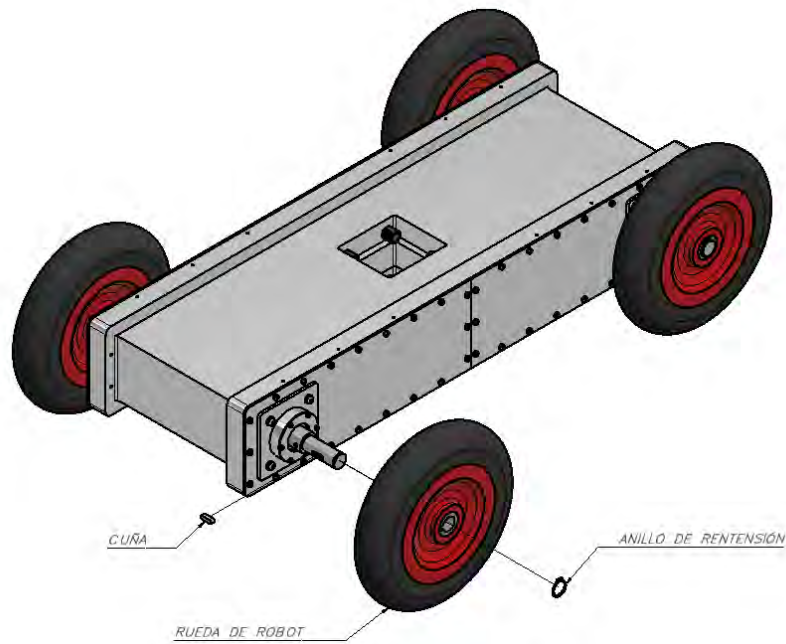


Figura 3.24 Ensamble de las ruedas y eje de transmisión

La rueda del robot se compone una llanta y un acople de transmisión, los cuales conforman una unión soldada; el acople de transmisión posee una ranura en donde encaja la cuña. El material del acople de transmisión es AISI 304 y fue fabricado a partir del proceso de torneado tomando como materia prima un cilindro de 36mm de diámetro y 56mm de altura. En la figura 3.25 se muestra el ensamble de la rueda de robot

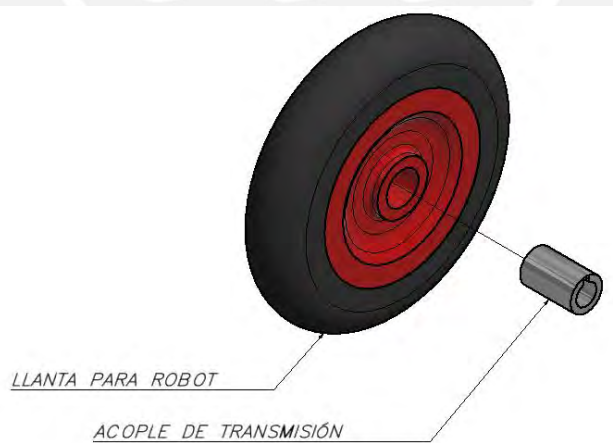


Figura 3.25 Ensamble de la rueda del robot móvil

En la figura 3.26 se muestra el ensamble de las piezas utilizadas para aprisionar al motor-reductor y transmitir la potencia mecánica hacia las ruedas. La cubierta de motor impide el desplazamiento exterior del motor-reductor mientras que el eje de transmisión conduce la

potencia mecánica desde el eje del motor-reductor hacia las ruedas. El soporte para rodamiento aprisiona un rodamiento y soporta las cargas radiales en el eje. La cubierta de motor se fabrica a partir una plancha de aluminio de 3 mm de espesor.

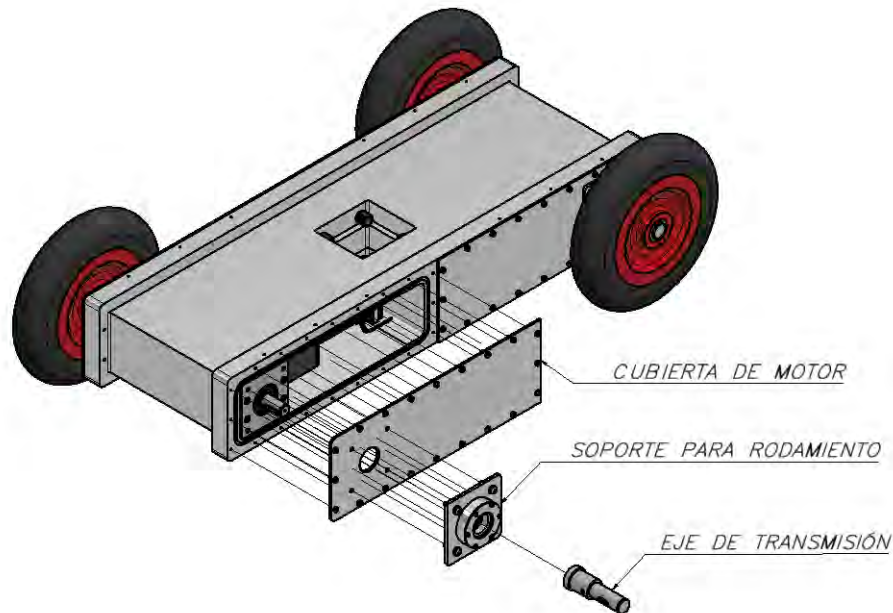


Figura 3.26 Ensamble del aprisionamiento del motor-reductor.

El soporte para rodamiento se compone de una cubierta y una base las cuales son mostradas en la figura 3.27. El rodamiento seleccionado es SKF BS 290. Las piezas base y cubierta para rodamiento se encuentran fabricadas en aluminio laminado AA6061 a partir del proceso de fresado.

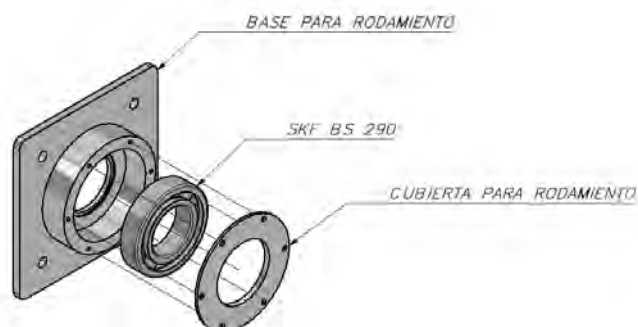


Figura 3.27 Ensamble del soporte para rodamiento

Entre los requerimientos solicitados para el desarrollo del sistema mecánico se requiere que los motores se encuentren protegidos del contacto con líquidos y partículas de polvo, por lo que es

necesario la inclusión de sellados estáticos y dinámicos utilizando O-RINGS'S. En la figura 3.28 se muestra la posición de la ranura para el O-RING A, el cual establece un sello estático entre la cubierta de motor y el chasis base.

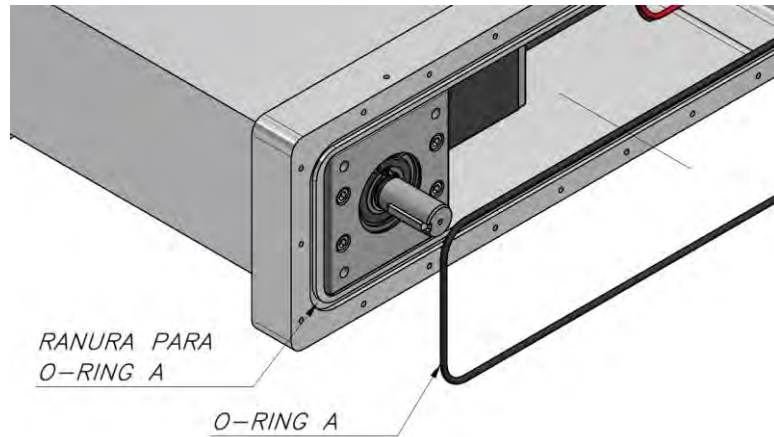


Figura 3.28 Ensamble del sellado estático para motor-reductor

Entre la base del soporte para el rodamiento y la cubierta del motor-reductor se ubica el O-RING B cuya ranura es mostrada en la figura 3.29, dicho O-RING protege la parte externa la unión atornillada entre la base del rodamiento y la cubierta de motor.

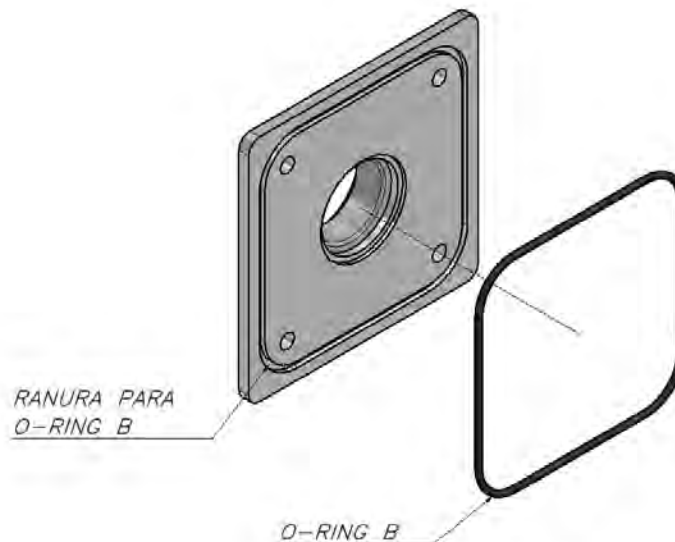


Figura 3.29 Ensamble del sellado estático para el soporte de rodamiento

La transmisión mecánica a través un eje exige la utilización de un sello dinámico el cual es logrado a través del O-RING C, cuya ranura se ubica en la parte externa de la cubierta para motor y es mostrada en la figura 3.30.

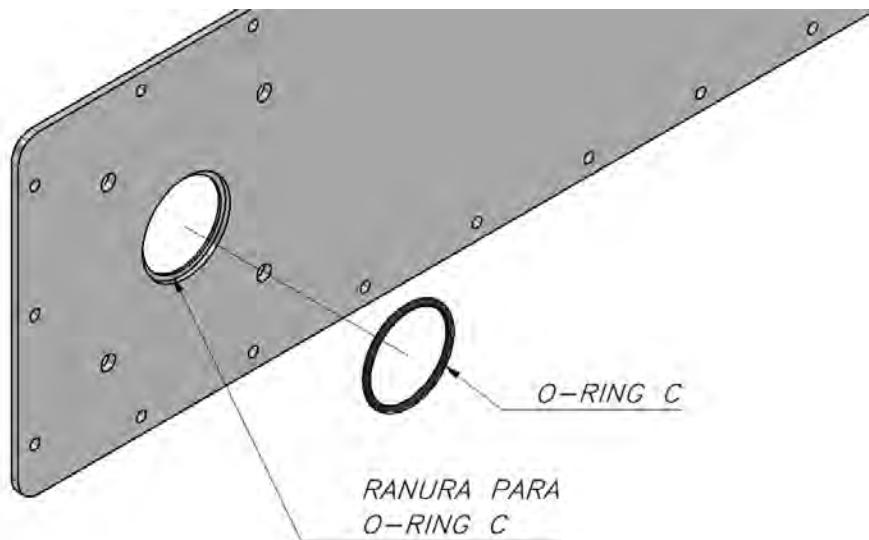


Figura 3.30 Ensamble del sellado dinámico para el eje de transmisión

El detalle de la selección de los O-RING es presentado en el ANEXO C. En la figura 3.31 se muestra el chasis base del robot móvil y los compartimientos en donde los motor-reductores son posicionados y protegidos. El chasis base del robot móviles la estructura con mayores dimensiones (820 x 280 x 140 mm) y se encuentra fabricado a partir del proceso de fundición en duraluminio.

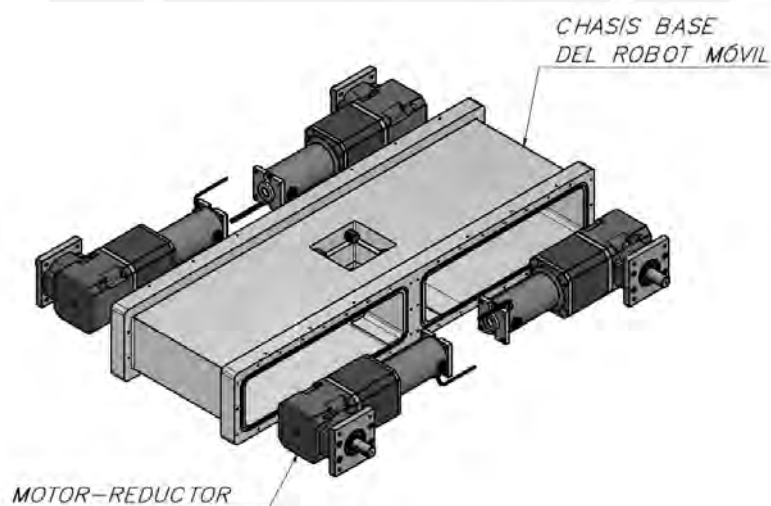


Figura 3.31 Ensamble de los motor-reductores en el chasis base

Los cables de los moto-reductores pasan a través de conectores conocidos como “penetrators”, los cuales con componentes comerciales que utilizan un O-RING para lograr un sellado estático. En la figura 3.32 se presenta su ubicación en el chasis base.

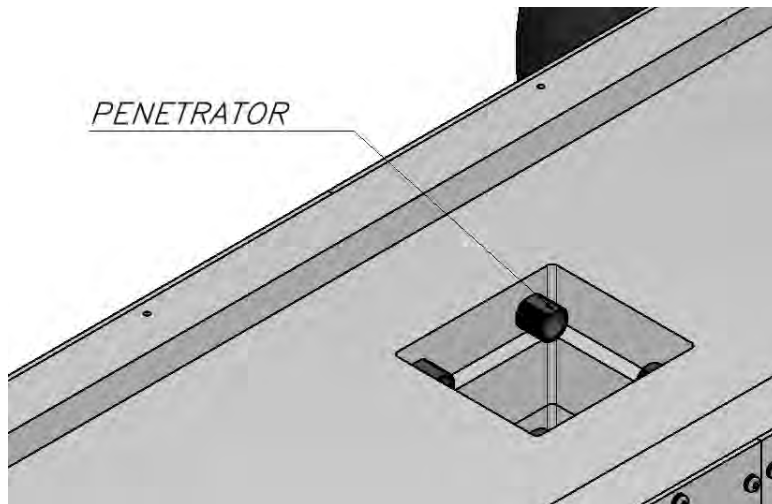


Figura 3.32 Ubicación de los penetrator en el chasis base

CHASIS SUPERIOR

El chasis superior del robot móvil contiene las cajas electrónicas y las piezas estructurales que permiten acoplarlas al chasis inferior. En la figura 3.33 se presentan las partes principales en el chasis superior. La base electrónica, fabricada en aluminio laminado de 3 mm de espesor, permite posicionar a las cajas electrónica de energía y de control a través de uniones atornilladas, mientras que la cubierta electrónica las protege de choques con elementos externos.

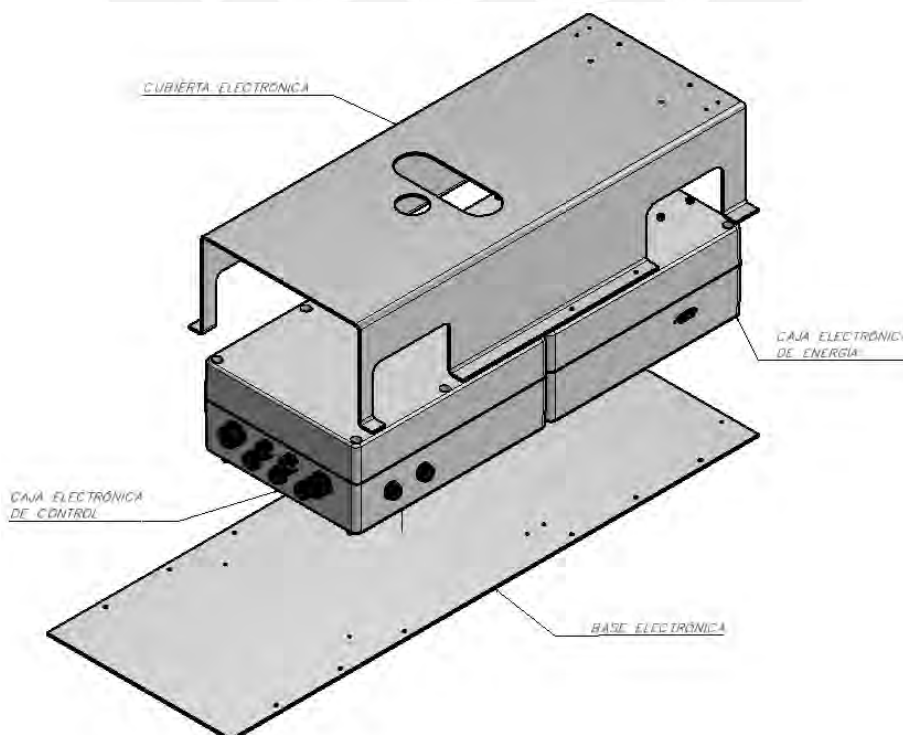



Figura 3.33 Partes principales del chasis superior

Las cajas electrónicas de control y de energía deben proteger a los componentes electrónicos del contacto con el agua y partículas de polvo; para lograr dicho objetivo se seleccionaron las cajas electrónicas con denominación 155YA2GY, las cuales son fabricadas por Hammond Manufacturing, cuyas características son mostradas en la tabla 3.26.

Tabla 3.26
CAJA ELECTRÓNICA

Imagen	
Código	1554YA2GY
Fabricante	Hammond Manufacturing
Dimensiones	300 x 240 x 120 mm
Peso	1.47 kg
Material	Policarbonato
Grado de protección	IP68

La caja electrónica de energía contiene a la fuente conmutada, las baterías, relé de estado sólido y diodos; en la figura 3.34 se muestra la distribución de dichos componentes.

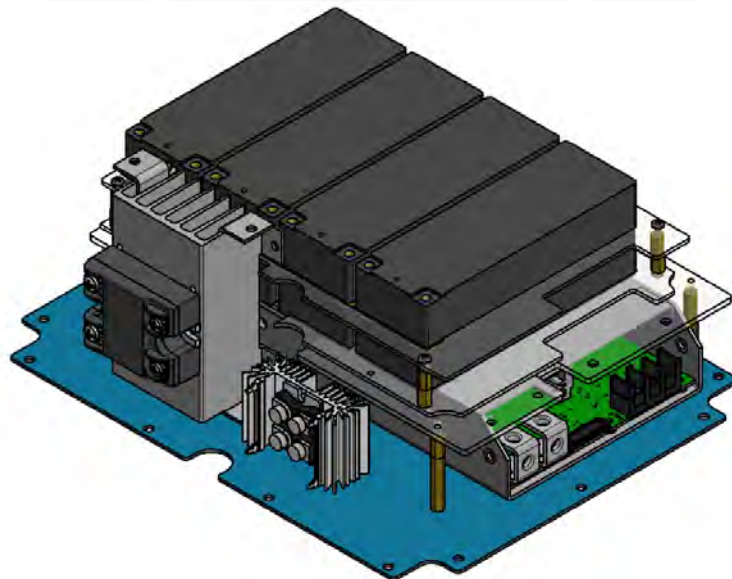


Figura 3.34 Distribución de elementos en la caja electrónica de energía

En la caja electrónica de energía se utilizan dos conectores 680S7W2103L401; de los cuales

uno de ellos recibe la energía y la señal de comunicación proveniente de la estación de control; mientras que el segundo se encarga de transmitir el voltaje en corriente continua y la señal de comunicación a la caja electrónica de control. En la figura 3.35 se presenta la ubicación de dichos conectores; mientras que en la tabla 3.27 se presentan sus características principales.

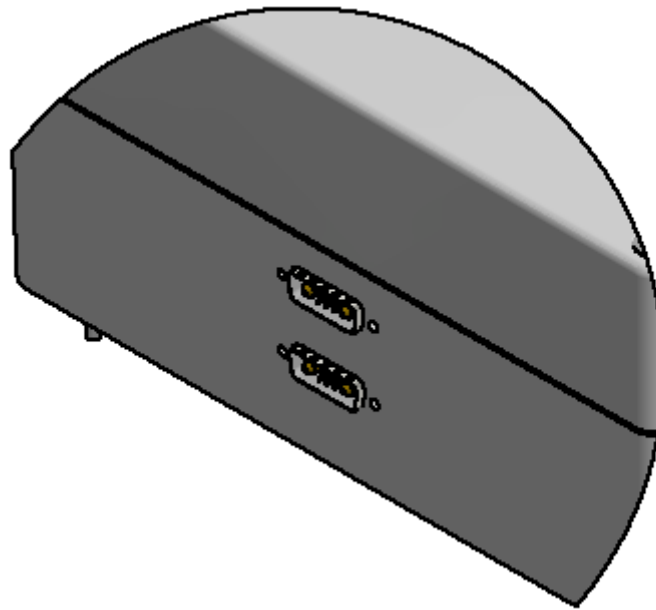


Figura 3.35 Ubicación de los conectores en la caja electrónica de energía

Tabla 3.27
CONECTOR DE SEÑALES Y POTENCIA

Imagen	
Código	680S7W2103L401
Fabricante	NorComp
Lineas de señales	5
Lineas de potencia	2
Material	Aleación de cobre
Grado de protección	IP67

La caja electrónica de control contiene al ordenador, enrutador, reguladores de voltaje, microcontrolador, módulo de comunicación y controladores de motor; en la figura 3.36 se presenta su distribución interna.

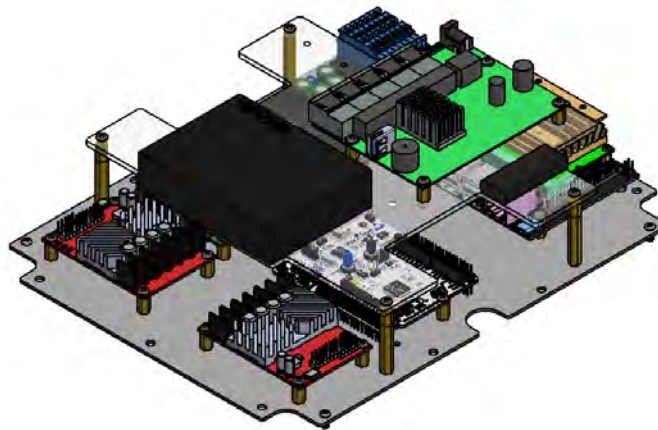







Figura 3.36 Distribución de componentes en la caja electrónica de control

La tabla 3.28 presenta los conectores a utilizar en la caja electrónica de control para la conexión con los sensores y actuadores del robot móvil; mientras que en la figura 3.37 se muestra la distribución de dichos componentes en la caja electrónica de control.

Tabla 3.28
CONECTORES EN LA CAJA ELECTRÓNICA DE CONTROL

Componente a conectar	Conector seleccionado	Fabricante	Imagen
Cámara PTZ Servomotor - señal	RCP-5SPFFH-TCU7001	Amphenol LTW	
Cámara de profundidad Cámara posterior	17-240001	Conec	
Servomotor – Energía Motor DC	4182 – 2PG – 300	SwitchCraft	
Luces LED	4182 - 4PG – 300	SwitchCraft	
RPLIDAR	4382-6PG-3ES	SwitchCraft	

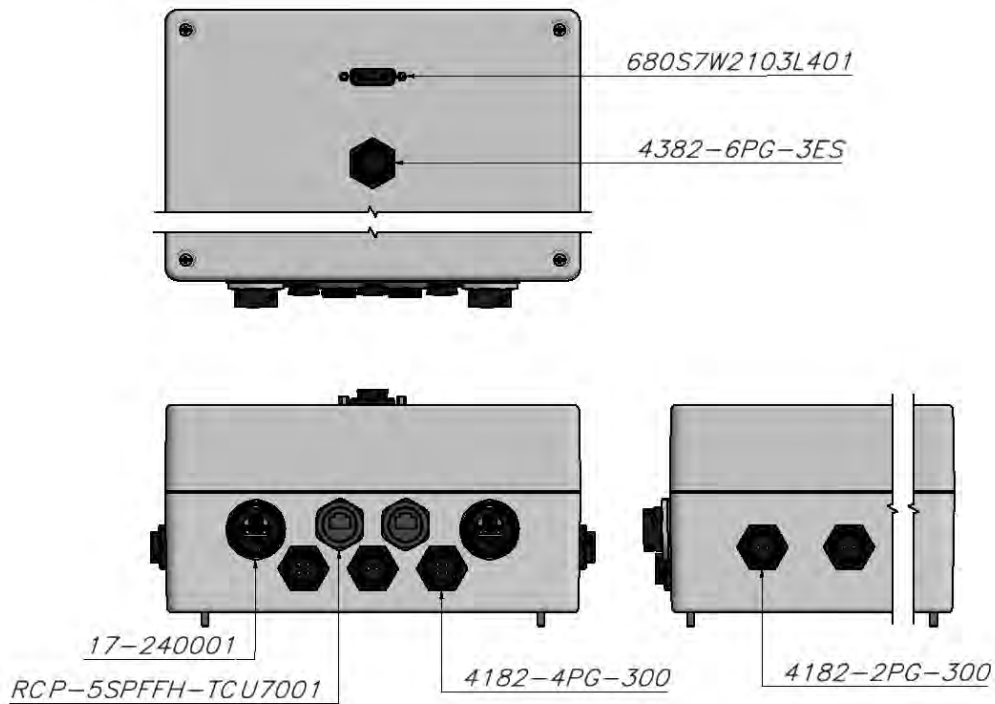


Figura 3.37 Ubicación de los conectores en la caja electrónica de control

SENSORES DELANTEROS

La parte delantera del robot móvil se encuentra equipada con dos sensores; la cámara PTZ y la cámara de profundidad. En la figura 3.38 se muestra el ensamble de la parte delantera. Las luces delanteras se ubican en los laterales y se fijan con tornillos M3x10.

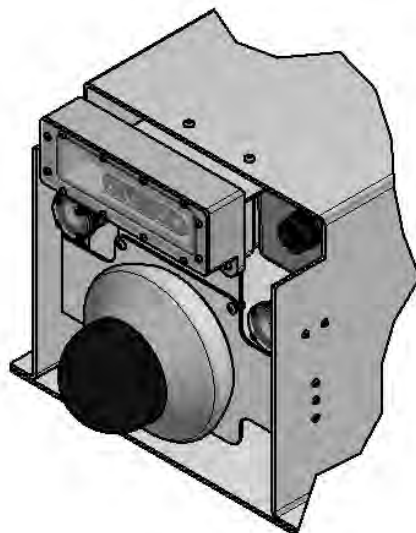


Figura 3.38 Sensores en la parte delantera del robot móvil

La parte delantera cuenta con una estructura de soporte para los sensores equipados; dicha estructura se encuentra ensamblada a partir de piezas fabricadas en aluminio laminado con

espesor de 3mm. La cámara PTZ se une directamente con este soporte ya que de acuerdo a la tabla 3.6, este componente posee un grado de protección IP68.

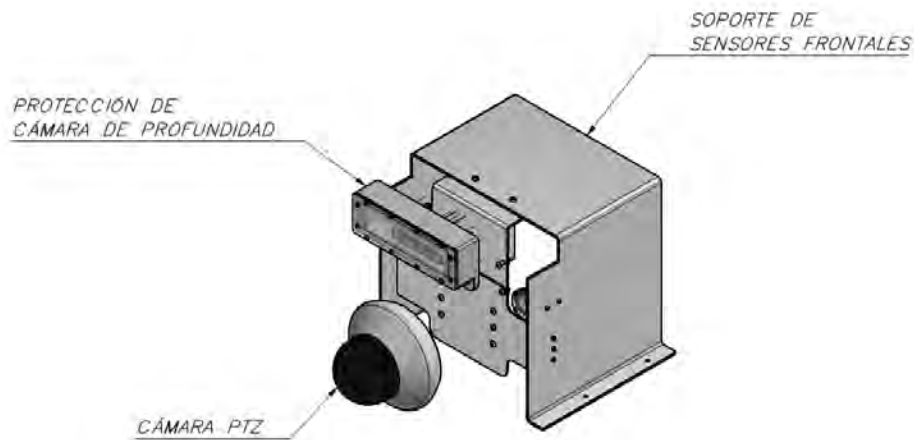


Figura 3.39 Componentes de la parte delantera del robot móvil

El soporte para los sensores se compone de un soporte para la cámara de profundidad; un soporte para la cámara PTZ y la estructura base. Todas las piezas mencionadas se ensamblan a partir de uniones atornilladas; el detalle de este ensamble es mostrado en la figura 3.40.

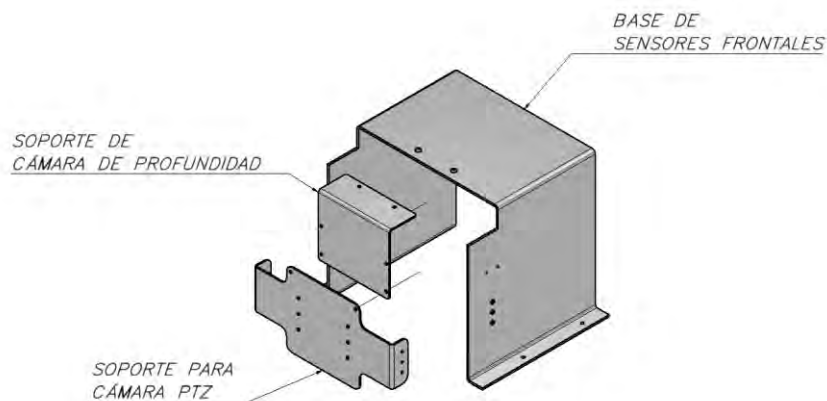


Figura 3.40 Componentes del soporte de sensores delanteros

De acuerdo a las características de la cámara de profundidad, esta no cuenta con protección ante el contacto con líquidos o partículas de polvo, por lo que será necesario utilizar un mecanismo de protección. En la figura 3.41 se detallan los componentes que aseguran la protección de la cámara de profundidad; se utiliza un sellado estático con el O-RING D, el cual es deformado gracias al visor y su unión atornillada con la estructura de protección.

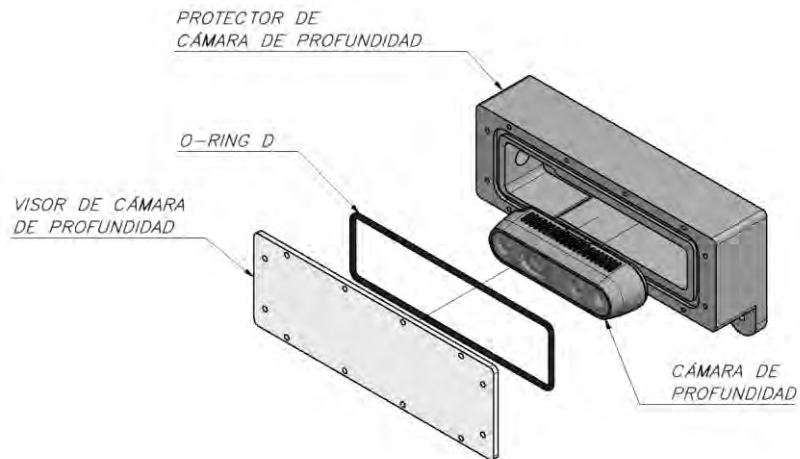


Figura 3.41 Componentes para la protección de la cámara de profundidad

SENSORES TRASEROS

En la parte posterior del robot móvil se encuentran integrados las luces traseras, una cámara y el sensor lidar 2D. En la figura 3.42 se presenta el detalle del ensamble de los componentes equipados en la parte posterior del robot móvil.

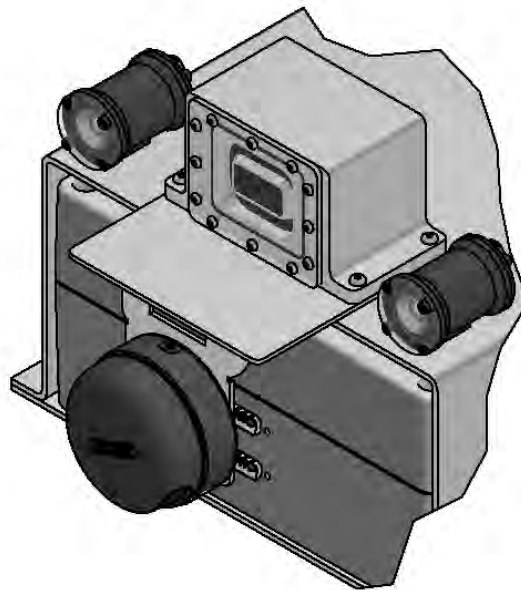


Figura 3.42 Sensores en la parte posterior del robot móvil

Las luces posteriores se encuentran adheridas a través de uniones atornilladas con la cubierta electrónica, así como se muestra en la figura 3.43.

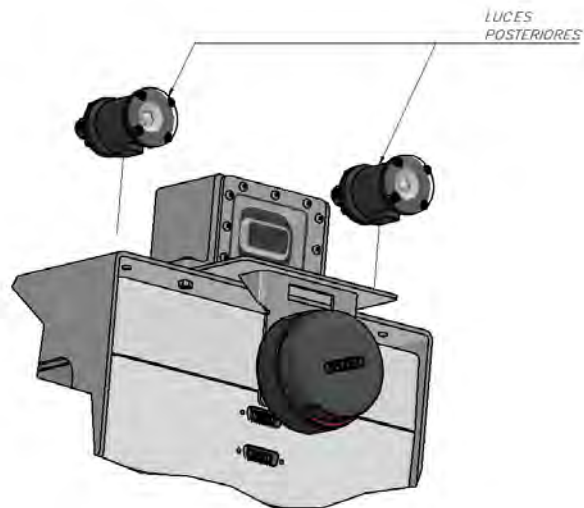


Figura 3.43 Ensamble de las luces posteriores

El lidar 2D y la protección de la cámara trasera se encuentran ensamblados al soporte a través de uniones atornilladas como se muestra en la figura 3.44.

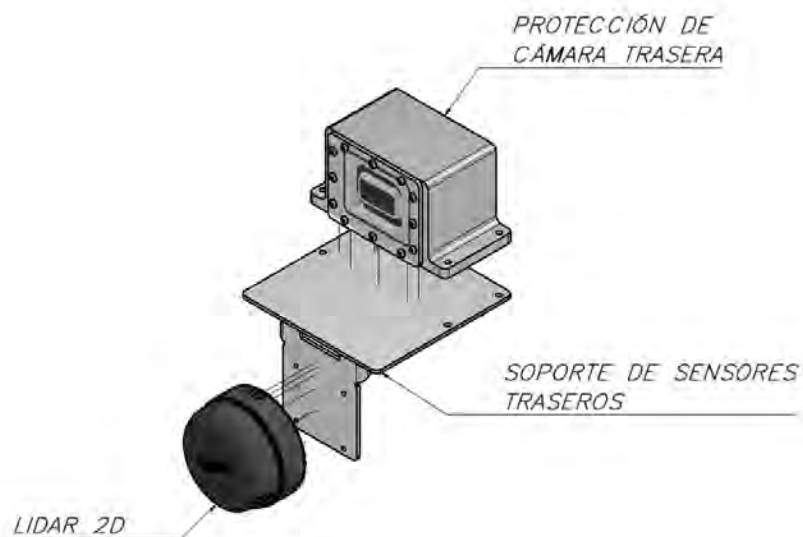


Figura 3.44 Ensamble de los sensores posteriores

La cámara trasera debe protegerse a partir de la utilización del O-RING E, el cual es aprisionado entre la estructura protectora y el visor a través de uniones atornilladas como se muestra en la figura 3.45.

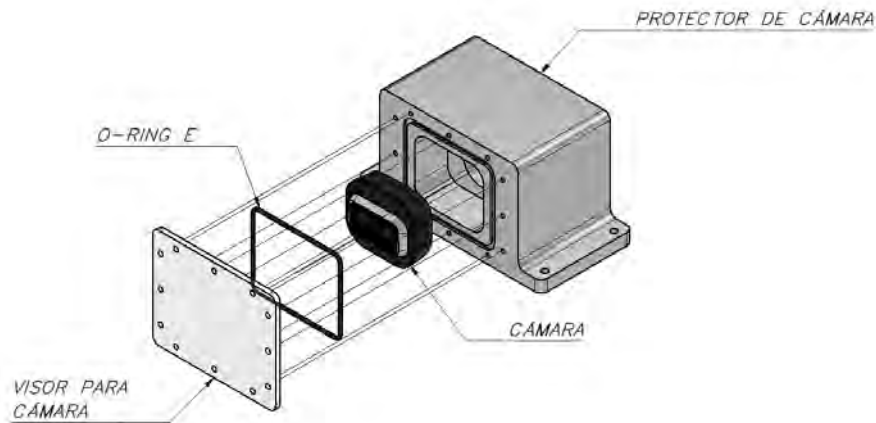


Figura 3.45 Ensamble de los componentes de protección de la cámara trasera

Finalmente, el soporte de los sensores posteriores se ensambla a partir de la unión soldada de las piezas mostradas en la figura 3.46.

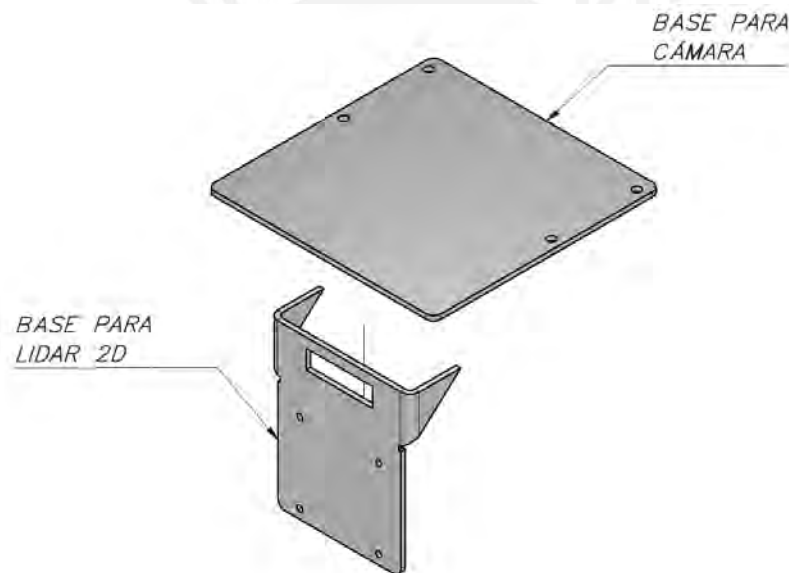


Figura 3.46 Ensamble del soporte de sensores posteriores.

3.2.6 DOMINIO DE CONTROL

El sistema de inspección de tuberías se compone de una estación de control y un robot móvil, los cuales se comunican a través de un cable de conexión que se extiende hasta 400m. En la presente sección se detalla el funcionamiento de ambas partes a partir de sus respectivos diagramas de flujo, los cuales serán ejecutados por cada uno de los procesadores presentes. Finalmente, se presentará la interfaz gráfica desarrollada para la adquisición de la información y control de los parámetros del robot móvil.

FUNCIONAMIENTO GENERAL

Para ejecutar con éxito un proceso de inspección de tuberías, el robot móvil debe ubicarse en el ingreso del ducto a inspeccionar, mientras que la estación de control es implementada en la parte externa del ingreso al ducto; en la figura 3.47 se presenta el inicio del desarrollo de un proceso de inspección.



Figura 3.47 Operario en la estación de control (figura izquierda). Robot ingresando al ducto (figura derecha)

El operador de la estación de control se comunica con la interfaz gráfica a través de un “gamepad”, en donde los controles ejecutan acciones motrices en el robot móvil como avanzar, retroceder y rotar sobre su propio eje; además también se controlan parámetros como la intensidad luminosa y velocidad de movimiento. Finalmente, el robot móvil transmite video en tiempo real hacia la interfaz gráfica. En la figura 3.48 se muestran las principales acciones del robot móvil codificadas en el “gamepad” de la estación de control.

ESTACIÓN DE CONTROL

La estación de control cuenta con un ordenador como procesador de información, el cual ejecuta la interfaz gráfica en donde se reciben las instrucciones del operador a través del *gamepad*, las cuales son transmitidas hacia el robot móvil a través del cable de conexión. En la figura 3.48 se presenta la codificación de las acciones del robot en el *gamepad*.



Figura 3.48 Controles en el gamepad

Adicionalmente la estación de control debe recibir el video en tiempo real desde el robot móvil y la información de los sensores equipados en el robot que aseguren su correcto funcionamiento. El diagrama de flujo de la estación de control es mostrado en la figura 3.49; la comunicación con el robot móvil se logra a partir de la utilización de “sockets”, mientras que la división de tareas en procesos e hilos elimina la presencia de retardos y permite la transmisión del video en tiempo real con una resolución de 1080 x 720. Los sensores almacenan la información en la memoria interna del robot móvil y transmiten un indicador por ciclo de almacenamiento lo que le informa al operario que la información se está almacenando de forma apropiada. Las señales “A”, “B”, “C” y “D” representan la transmisión de información entre los diferentes diagramas de flujo. Las señales “A” y “B” son imágenes transmitidas desde el ordenador del robot móvil hasta la estación de control; la señal “C” es una cadena de texto que proviene del robot móvil con información relacionada al nivel de batería, velocidad de avance y estado del nivel de iluminación; y la señal “D” es una cadena de texto que codifica los comandos enviados desde la interfaz gráfica por el operario.

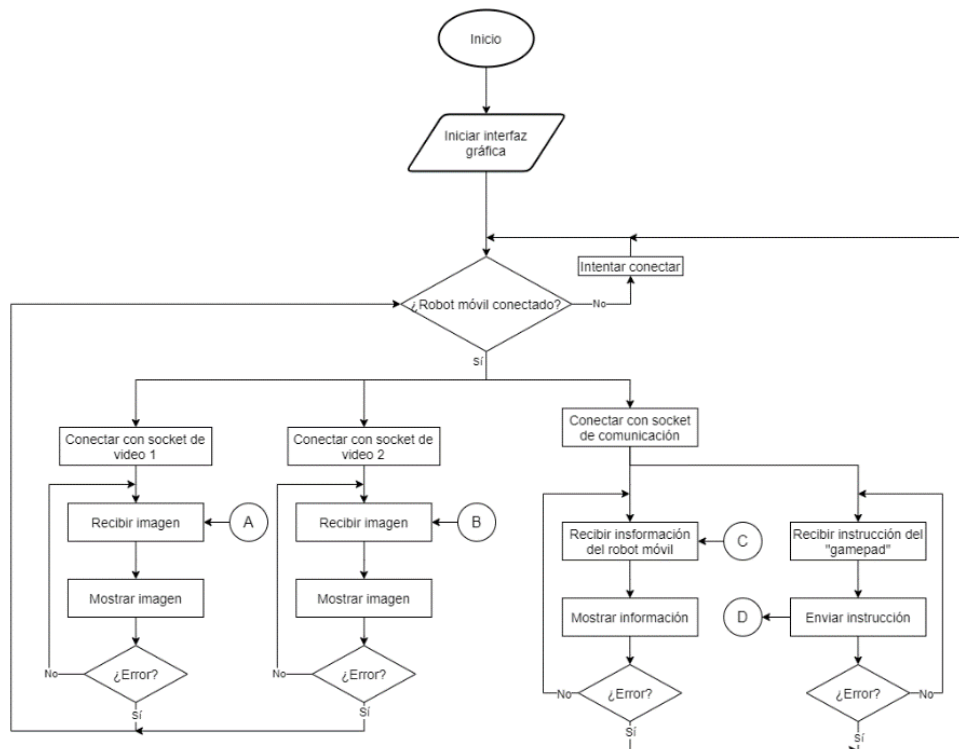


Figura 3.49 Diagrama de flujo de la estación de control

En la figura 3.50 se muestra la interfaz gráfica implementada; con la transmisión de video para cada cámara en la parte superior y la información de los sensores y parámetros del robot en la parte inferior



Figura 3.50 Interfaz de control implementada en el ordenador de la estación de control

ROBOT MÓVIL

En el robot móvil se cuenta con dos procesadores, un ordenador (Jetson Nano) y un microcontrolador (Nucleo F410RB) los cuales fueron seleccionados en la sección 3.2.3. El ordenador se conecta a través del módulo de comunicación con la estación de control, mientras que la conexión con el microcontrolador es a través de un puerto serial USB. El ordenador al

interior del robot móvil recibe las instrucciones cinemáticas del robot móvil de la estación de control a través de la señal “D” y las transmite hacia el microcontrolador a través de la señal “F” para que las pueda ejecutar. El microcontrolador lee los parámetros de velocidad y nivel de batería y los transmite hacia el ordenador como la señal “E” para que posteriormente sean enviadas a la estación de control a través de la señal “C”. Los sensores, conectados directamente al ordenador, almacenan su información en la memoria interna del robot móvil y añaden el indicador apropiado a la trama (señal “C”) que se envía hacia la estación de control; dicha trama contiene información de los principales parámetros del robot móvil y es ilustrada en la tabla 3.29.

Tabla 3.29
TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN

Trama general	“OAXB2375V055LD0LT1S345”	La trama general contiene la información de estado del robot móvil y es transmitida a través del socket de comunicación hacia la interfaz gráfica
Indicador de batería	B2375	La batería se indica con una “B” al iniciar el dato; y ocupa 4 bytes, en donde los dos primeros son la parte entera mientras que los dos últimos son la parte decimal. Este valor esta expresado en voltaje
Indicador de velocidad	V055	La velocidad del robot móvil se indica con una “V” al inicio del dato. Este dato ocupa 3 bytes de información, en donde representan el porcentaje de la velocidad del robot móvil
Indicador de luces delanteras	LD1	Las luces delanteras utilizan “LD” como indicador y un byte que indica el estado de las luces; en donde “1” representa a las luces encendidas y “0” representa a las luces apagadas
Indicador de luces traseras	LD0	Las luces traseras utilizan “LT” como indicador y un byte que indica el estado de las luces; en donde “1” representa a las luces encendidas y “0” representa a las luces apagadas
Indicador de los sensores	S345	El estado de los sensores es indicado con la letra “S” seguido de un contador, el cual es un valor entero y representa los ciclos de almacenamiento logrados.

Las cámaras son conectadas directamente al ordenador del robot móvil, por lo que este dispositivo se encarga de codificar el video en tiempo real y transmitirlo a la estación de control a través de las señales “A” y “B”. El diagrama de flujo del programa ejecutado en el ordenador del robot es mostrado en la figura 3.51; mientras que el diagrama de flujo del microcontrolador se presenta en la figura 3.52.

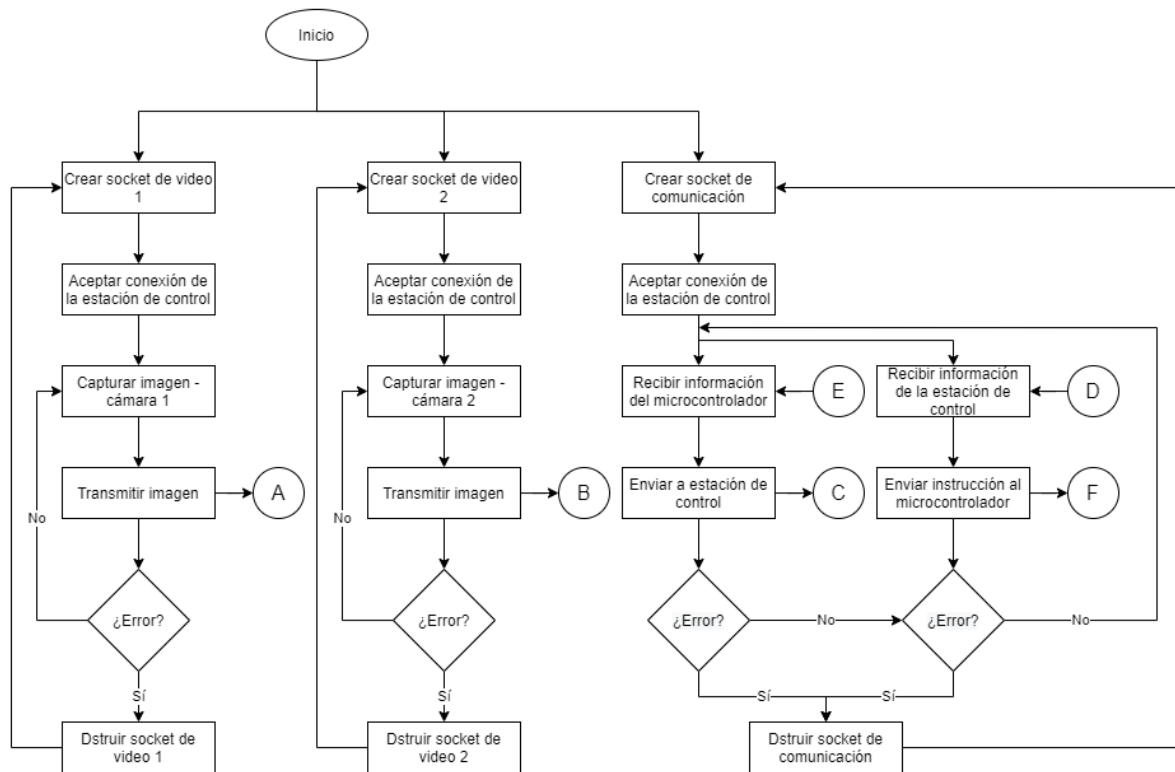


Figura 3.51 Diagrama de flujo del ordenador del robot móvil

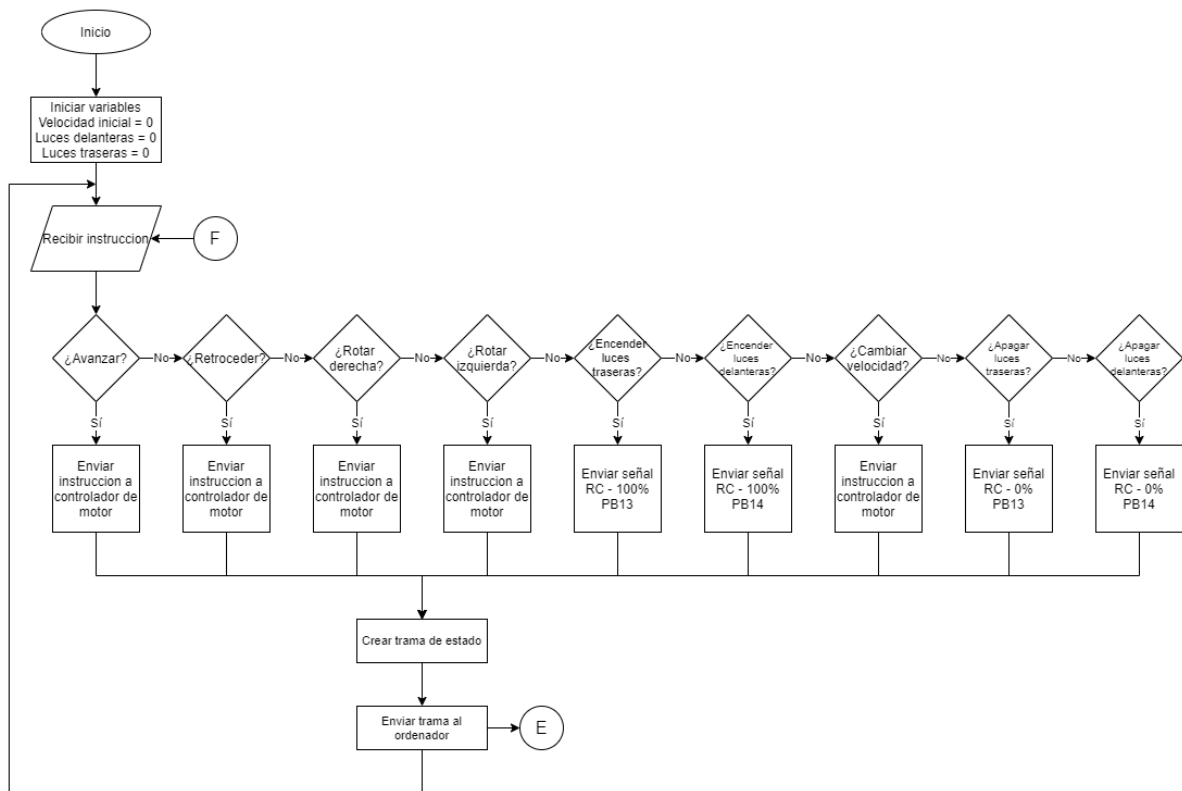


Figura 3.52 Diagrama de flujo del microcontrolador del robot móvil

CAPÍTULO 4

PLANOS Y ESTIMACIÓN DE COSTOS

En el presente capítulo se presenta la lista de planos de ensamble y despiece de las piezas diseñadas para el robot móvil y la lista de planos esquemáticos de los dominios electrónico y energético.

Asimismo, en las secciones siguientes se muestra el detalle de los costos de los componentes a utilizar y las piezas mecánicas a fabricar para la estación de control y robot móvil. Los costos totales se distribuyen en costos de diseño, sección en la que se detalla el tiempo dedicado para el desarrollo de la presente tesis, así como la asignación de un costo para esta tarea; costos de los componentes electrónicos, en el cual se muestran los precios de los componentes electrónicos a adquirir con su respectivo proveedor; y costos del dominio mecánico, sección que integra los costos de fabricación y los costos del material a utilizar para cada una de las piezas diseñadas. Finalmente, en la sección 4.4 se muestra el costo total del sistema desarrollado.

4.1 RELACIÓN DE PLANOS MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS

El sistema integral se compone de dos partes principales: una estación de control y un robot móvil. En la tabla 4.1 se listan los planos principales del sistema con sus respectivos códigos y tamaño. El dominio mecánico del robot móvil propuesto se divide en cuatro partes diferentes: el chasis inferior (A2-E002), cuya lista de planos de despiece es mostrada en la tabla 4.2; el chasis superior (A3-E003), cuya lista de planos de despiece es mostrada en la tabla 4.3; sensores traseros (A2-E004) y sensores delanteros (A2-E005), cuya lista de planos de despiece son mostrados en la tabla 4.4; además el plano A3-D001 muestra el detalle de la base de los sensores frontales. El plano de ensamble del sistema integrado tiene el código A2-E001 y posee un tamaño “A2”.

Tabla 4.1

PLANOS PRINCIPALES

Nro	Descripción	Código ID	Tamaño
1	Robot de inspección de tuberías	A2-E001	A2
2	Chasis inferior	A2-E002	A2
3	Chasis superior	A3-E003	A3
4	Sensores traseros	A2-E004	A2
5	Sensores delanteros	A2-E005	A2
6	Base de sensores frontales	A3-D001	A3

Tabla 4.2

PLANOS DEL CHASIS INFERIOR

Nro	Descripción	Código ID	Tamaño
1	Chasis base de robot móvil	A1-D002	A1
2	Eje de transmisión	A4-D003	A4
3	Base para rodamiento	A3-D004	A3
4	Cubierta para rodamiento	A3-D005	A3
5	Cubierta para motor	A3-D006	A3

Tabla 4.3

PLANOS DEL CHASIS SUPERIOR

Nro	Descripción	Código ID	Tamaño
1	Base electrónica	A3-D007	A3
2	Cubierta electrónica	A3-D008	A3

Tabla 4.4

PLANOS PARA LOS SENSORES TRASEROS - DELANTEROS

Nro	Descripción	Código ID	Tamaño
1	Protector de cámara trasera	A3-D009	A3
2	Soporte de sensores traseros	A3-E006	A3
3	Base para lidar 2D	A3-D010	A3
4	Base para cámara	A3-D011	A3
5	Base para cámara PTZ	A3-D012	A3
6	Base para cámara de profundidad	A3-D013	A3
7	Protección para cámara de profundidad	A3-D014	A3

La lista de planos esquemáticos del dominio electrónico y energético son mostrados en la tabla 4.5 con su respectivo código y tamaño. El plano A3-E007 muestra las conexiones entre los componentes del dominio electrónico; mientras que el plano A4-E008 presenta las conexiones de los componentes del dominio energético.

Tabla 4.5

PLANOS ESQUEMÁTICOS

Nro	Descripción	Código ID	Tamaño
1	Dominio electrónico	A1-E007	A1
2	Dominio energético	A4-E008	A4

4.2 COSTOS DE LA ESTACIÓN DE CONTROL

La estación de control es la encargada de monitorear y controlar el avance del robot móvil durante un proceso de inspección. En la sección 3.1.2 se describieron los componentes que la conforman y en la tabla 4.6 se presentan los costos requeridos para la adquisición de cada uno de estos componentes. Los datos económicos de los componentes a adquirir son presentados en el ANEXO E. Para simplificar la estimación del costo total del desarrollo de esta parte, el costo final se multiplicará por el factor de 1.5, considerando un 30% como costos de envío y

20% como costos de importación; el costo final es mostrado en la tabla 4.6.

Tabla 4.6
COSTOS DE LA ESTACIÓN DE CONTROL

Nro	Componente	Descripción	Costo (PEN)	Cantidad	Costo Final (PEN)
1	Ordenador	Toughbook CF-54	6361.65	1	6361.65
2	Gamepad	Logitech F310	97.00	1	97.00
3	Cable de conexión	1x2x12 AWG 1x2x26 AWG	29960.00	1	29960.00
4	Generador eléctrico	EG1000	750.00	1	750.00
5	Mesa de trabajo	Fabricación propia	5905.20	1	5905.20
Total					43073.85

4.3 COSTOS DEL ROBOT MÓVIL

4.3.1 COSTOS DE DISEÑO

La presente tesis fue desarrollada en un plazo de 12 meses, entre febrero del 2019 y enero del 2020, los cuales comprendieron el desarrollo de los sistemas mecánico, electrónico y de sensores. Adicionalmente, durante este periodo de tiempo se desarrolló la investigación correspondiente al estado del arte y se realizaron los cálculos requeridos para la selección de componentes que aseguren un apropiado funcionamiento del sistema. La remuneración establecida para el autor del presente trabajo fue de S./ 1000 mensuales durante 12 meses (tabla 4.7), obteniendo S./ 12 000 como costo de diseño.

Tabla 4.7
COSTOS DE DISEÑO

Nro	Descripción	Costo (PEN)	Cantidad	Costo Final (PEN)
1	Diseño del sistema de inspección de tuberías	1000.00	12	12000.00
Total				12000.00

4.3.2 COSTO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Los componentes electrónicos del robot de inspección de tuberías fueron mostrados en las secciones 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 y 3.2.4; los costos asociados a los sensores, actuadores y componentes del dominio electrónico son mostrados en la tabla 4.8, mientras que los costos de

los componentes del dominio energético son mostrados en la tabla 4.9. Los precios son presentados en nuevos soles (PEN), las fuentes de estos valores se encuentran en el ANEXO E. El costo final los componentes electrónicos es de S/ 29 694.92. Para simplificar la estimación del costo total, el costo final se multiplicará por el factor de 1.5, considerando un 30% como costos de envío y 20% como costos de importación; este dato es mostrado en la tabla 4.16.

Tabla 4.8

COSTOS DE ACTUADORES, SENSORES Y DEL DOMINIO ELECTRÓNICO

Nro	Descripción	Costo(PEN)	Cantidad	Costo Final(PEN)
1	Groschopp - 62656	1428.17	4	5712.69
2	BasicMicro - Roboclaw 2x30	502.30	2	1004.60
3	Hebi Robotics - X5-9	10050.00	1	10050.00
4	Blue Robotics - Lumen Light	703.50	2	1407.00
5	STMicroelectronics - F410RB	46.33	1	46.33
6	Nvidia - Jetson Nano	422.87	1	422.87
7	Hikvision - DS-2DE2A404IW-DE3	637.69	1	637.69
8	Microsoft - HD-3000	73.30	1	73.70
9	Intel - RealSense D435i	904.50	1	904.50
10	Slamtec - RPLIDAR A2M8	1082.72	1	1082.72
11	Tupavco - TEX-100	763.80	1	763.80
12	MikroTik - Hex S	227.77	1	227.77
13	XL4016	40.00	1	40.00
14	UC3843	30.00	1	30.00
Total				22403.67

Tabla 4.9

COSTOS DE COMPONENTES DEL DOMINIO ENERGÉTICO

Nro	Descripción	Costo(PEN)	Cantidad	Costo Final(PEN)
1	Crydom - D1D60	390.38	1	390.38
2	Global Power - GSXD060A006S1-D3	60.17	1	60.17
3	Mean Weel - RSP-750-24	654.86	1	654.86
4	Turnigy nano-tech 7500 mAh	232.19	24	5572.52
5	ESwitch - PVA6LRE21231	43.32	1	43.32
Total				6721.25

Los costos de la tarjeta electrónica utilizada para la distribución energética y detallada en el dominio electrónico son mostrados en la tabla 4.10.

Tabla 4.10

COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN Y TARJETAS ELECTRÓNICAS

Nro	Descripción	Costo(PEN)	Cantidad	Costo Final(PEN)
1	Tarjetas electrónicas	220.00	1	220.00
2	Costos de implementación	350.00	1	350.00
Total				570.00

4.3.3 COSTOS DEL DOMINIO MECÁNICO

El dominio mecánico del robot móvil de inspección de tuberías fue descrito en la sección 3.2.5 y la relación de planos de despiece para cada una de las piezas fue presentado en la sección 4.1. Los costos de fabricación para cada pieza y el valor del material utilizado son mostrados en las tablas 4.11, 4.12 y 4.13. Asimismo, en el ANEXO E se adjuntan las proformas recibidas por el proveedor consultado. Las piezas mecánicas a fabricar son desarrolladas a partir de procesos de mecanizado y manufactura en chapa metálica, los cuales son brindados al interior del territorio nacional; por lo tanto, los costos mostrados se encuentran en Nuevos Soles (PEN).

Tabla 4.11

COSTOS DE FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS DEL CHASIS INFERIOR

Nro	Pieza	Costo Unitario (PEN)	Cantidad	Costo Total(PEN)
1	Chasis base del robot móvil	8000.00	1	8000.00
2	Cubierta para motor	100.00	4	400.00
3	Eje de transmisión	360.00	4	1440.00
4	Cubierta para rodamiento	80.00	4	320.00
5	Base para rodamiento	115.00	1	460.00
Total				10620.00

Tabla 4.12

COSTOS DE FABRICACIÓN DEL CHASIS SUPERIOR

Nro	Pieza	Costo Unitario (PEN)	Cantidad	Costo Total (PEN)
1	Base electrónica	320.00	1	320.00
2	Cubierta electrónica	300.00	1	300.00
Total				620.00

Tabla 4.13
COSTOS DE FABRICACIÓN PARA LOS SENSORES DELANTEROS - TRASEROS

Nro	Pieza	Costo Unitario (PEN)	Cantidad	Costo Total(PEN)
1	Protector de cámara trasera	340.00	1	340.00
2	Soporte de sensores traseros	65.00	1	65.00
3	Base para lidar 2D	150.00	1	150.00
4	Base para cámara	150.00	1	150.00
5	Base para cámara PTZ	140.00	1	140.00
6	Base para cámara de profundidad	170.00	1	170.00
7	Protección cámara de profundidad	530.00	1	530.00
Total				1536.00

Tabla 4.14
COSTOS DE ENSAMBLE Y PRUEBAS

Nro	Pieza	Costo Unitario (PEN)	Cantidad	Costo Total (PEN)
1	Ensamble del robot móvil	200.00	10	2000.00
2	Pruebas del robot móvil	200.00	5	1000.00
Total				3000.00

En la tabla 4.15 se muestran los componentes mecánicos adicionales no listados en las tablas anteriores. La mayoría de estos componentes fueron adquiridos a través de importaciones; por lo tanto, el costo total será multiplicado por un factor de 1.5 considerando un 30% como costos de envío y 20% como costos de importación.

Tabla 4.15
COSTOS DE COMPONENTES ADICIONALES

Nro	Descripción	Componente	Costo (PEN)	Cantidad	Costo Total (PEN)
1	Caja Electrónica	1554XAGY	105.66	2	211.32
2	Conector Señal-Potencia	680S7W2103L401	36.75	8	294.00
3	Conector RJ45 Hembra	RCP-5SPFFH-TCU7001	33.40	2	66.80
4	Conector USB - 3.0	17-240001	38.02	2	76.05
5	Prensaestopa	17-200121	26.30	2	52.60
6	Conector de 2 terminales-M	4182-2PG-300	23.38	5	116.92
7	Conector de 2 terminales-H	3182-2SG-3DC	40.40	5	202.01
8	Conector de 4 terminales-M	4182-4PG-300	37.29	2	74.57
9	Conector de 4 terminales-H	3182-4SG-530	59.86	2	119.73
10	Conector de 6 terminales-M	4382-6PG-3ES	47.54	1	47.54
11	Conector de 6 terminales-H	3382-6SG-528	67.97	1	67.97
12	Juegos de llantas	Rubber	8267.80	1	8267.80
13	Juego de llantas	Steel carbide	13223.10	1	13223.10
14	Rodamientos	SKF BS 290	200	4	800.00

15	Tornillos	-	300.00	1	300.00
16	Base de sensores frontales	-	200.00	1	200.00
17	Cables	-	200.00	1	200.00
18	Manufactura para acrílico	-	200.00	1	200.00
19	Espaciadores	-	200.00	1	200.00
Total					24,669.77

4.4 COSTO TOTAL DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS

En la tabla 4.16 se muestra el resumen general de la estimación de los costos para el desarrollo del robot de inspección de tuberías, tomando en cuenta los costos presentados en las secciones anteriores. El costo total para el desarrollo del sistema integral es S/ 143 935.82.

Tabla 4.16
COSTO ESTIMADO TOTAL

Nro	Componente	Subtotal
1	Costos de diseño	12,000.00
2	Estación de control	34,610.78
3	Dominio electrónico y energético	44,542.38
4	Dominio mecánico	15,778.00
5	Componentes adicionales	37,004.66
TOTAL		143,935.82

CONCLUSIONES

- Se propuso y se diseñó un sistema de inspección de tuberías, el cual consta de una estación de control y un robot móvil, que a su vez se encuentran conectados de forma alámbrica.
- La estación de control propuesta se compone de cuatro partes principales: un ordenador, un generador eléctrico, un tambor con cable y un “gamepad”. El cable utilizado para la conexión con el robot móvil cumple el requerimiento propuesto disipando 188 W de energía eléctrica cuando el robot alcance los 400m de inspección
- El robot móvil propuesto se encuentra dividido en dos partes desmontables: el sistema motriz y el sistema electrónico y de sensores. Cada una de las partes mencionadas tiene un peso inferior de 40kg, lo cual permite que cada parte pueda ser transportada por dos personas sin sufrir problemas de ergonomía.
- Los motores seleccionados proporcionan la potencia mecánica suficiente para inspeccionar hasta 400m al interior de una tubería; además cuentan con una “caja de engranajes” del tipo “ángulo recto”, lo cual permite que el chasis del robot diseñado posea un ancho máximo de 501.20mm y permita la inspección de tuberías de 650mm de diámetro como mínimo. La característica “Back drivable” de la “caja de engranajes” del motor DC permite la rotación libre de la rueda lo cual hace posible recuperar el robot móvil en caso este se quede sin energía eléctrica. El chasis que protege a los motores seleccionados utiliza un mecanismo de sellado a partir de O-RING’S estáticos y dinámicos; los cuales fueron seleccionados a partir de la guía “Parker O-ring Handbook” [32]. Los componentes electrónicos se encuentran protegidos por cajas electrónicas con grado de protección IP68.
- La autonomía del sistema de inspección de tuberías propuesto es de 6 horas al utilizar las baterías y el generador eléctrico en conjunto.
- El costo estimado para el diseño e implementación de la solución presentada es de 143 935.82 Nuevos Soles (PEN); el cual al ser convertido a dólares americanos (USD) con un

tipo de cambio de 3.35, se obtiene 42 965.92 USD. Al comparar el costo obtenido con el valor de los robots de inspección de tuberías comerciales (tabla 1.1), se observa que el sistema de inspección de tuberías propuesto tiene un costo promedio; sin embargo, la distancia de inspección, autonomía y sensores incluidos son superiores a los presentados en los modelos comerciales.



RECOMENDACIONES

En trabajos futuros se recomienda la utilización de mecanismos de suspensión en el sistema móvil, con el objetivo poder utilizar el robot en diferentes procesos de inspección como cuevas, ductos de diferentes geometrías, o terrenos hostiles para el ser humano.

En la presente tesis el objetivo del desarrollo se centró en el diseño mecánico y electrónico de un sistema de inspección de tuberías; dejando abierta la posibilidad del desarrollo de los algoritmos de reconstrucción tridimensional a través de los sensores descritos en el presente trabajo.

La experimentación de conexiones inalámbricas incrementaría las distancias de inspección y reduciría el consume energético en los robots móviles. El material de las tuberías es un factor importante para lograr dicho objetivo, ya que esta debe ser capaz de transmitir ondas electromagnéticas a través de su superficie.

Finalmente, la implementación de algoritmos de navegación autónoma podría mejorar la capacidad de operación del robot logrando que este pueda realizar inspecciones programadas de forma automática.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] LA REPÚBLICA
2018 “Junín: Ingeniero y obrero mueren al inhalar gases tóxicos en mina abandonada en Jauja”. La República. Lima, 28 de agosto. Consulta: 15 de mayo del 2019
<https://larepublica.pe/sociedad/1307164-junin-ingeniero-obrero-mueren-inhalar-gases-toxicos-mina-abandonada-provincia-jauja/>
- [2] EP MUNDO
2018 “Muere dentro de una tubería un trabajador de Hidrocapital”. EP MUNDO. Caracas, 31 de marzo. Consulta: 16 de mayo del 2019
<https://epmundo.com/2018/muere-dentro-de-una-tuberia-un-trabajador-de-hidrocapital-foto/>
- [3] EL COMERCIO
2019 “San Juan de Lurigancho: Reportan inundación por tubería de desagüe rota”. El Comercio. Lima, 13 de enero. Consulta: 16 de mayo del 2019.
<https://larepublica.pe/sociedad/2020/01/12/aniego-sjl-rotura-de-tuberia-causo-inundaciones-en-san-juan-de-lurigancho-video/>
- [4] EL COMERCIO
2019 “Vivienda sobre SJL: “Tubería se deforma por mala colocación””. El Comercio. Lima, 18 de enero. Consulta: 17 de mayo del 2019
<https://elcomercio.pe/lima/sucesos/vivienda-san-juan-lurigancho-tuberia-deformo-mala-colocacion-aniego-noticia-598766-noticia/>
- [5] DIARIO CORREO
2017 “SEDAPAL: Inspector descubre conexiones clandestinas de grandes empresas y será despedido”. Diario Correo. Lima, 14 de agosto. Consulta: 20 de mayo del 2019.
<https://diariocorreo.pe/peru/sedapal-inspector-descubre-conexiones-clandestinas-de->

- [6] DIARIO CORREO
2017 “SEDAPAL pierde 28% de su facturación por tuberías rotas y redes clandestinas”.
Diario Correo. Lima, 6 de junio. Consulta: 21 de mayo del 2019.
<https://diariocorreo.pe/economia/sedapal-pierde-28-de-su-facturacion-por-tuberias-rotas-y-redes-clandestinas-754359/>
- [7] TAMURA, Yasuto; KANAI, Ichirota; YAMADA, Kasuki and LIM, Hun-ok
2016 “Development of pipe inspection robot using ring-type laser”. 16th International
Conference on Control, Automation and Systems. Gyeongju, 16-19 de octubre, pp.
211-214
- [8] ZHONG, Hai-jian; LING, Zhang-wei; MIAO, Cun-jian; GUO, Wei-can; TANG, Ping
2017 “A New Robot-Based System for In-Pipe Ultrasonic Inspection of Pressure Pipelines”.
Far East NDT New Technology and Application Forum. Xi’an, 22-24 de junio, pp.
246-250
- [9] LIM, Hun-ok y OHKI, Taku
2009 “Development of pipe inspection robot”. ICCAS-SICE. Fukuoka, 18-21 de Agosto, pp.
5717-5721.
- [10] PVC SANITARIA
2016 Catálogo Nro. 20053, Tubos y accesorios de PVC SANITARIA
- [11] PARK, Jun; WHAN, Jeong; KIM, Hyoungkwon; CHEOL, Seong; GYEONG, Dae; AHN,
Kitak; MOO, Sung; MOON, Hyungpil y RYEOL, Hyouk.
2013 “Development of the untethered in-pipe inspection robot for natural gas pipelines”.
10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. Jeju,
31 de noviembre, pp. 55-58

- [12] KAWAGUCHI, K; YOSHIDA, I; KURUMATANI, H; KIKUTA, T y YAMADA, Y.
1995 “Internal pipe inspection robot”. Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, 21-27 de mayo, pp. 857-862
- [13] ÉKES, Csaba y NEDUCZA, Borislav.
2012 “Pipe condition assessments using Pipe Penetrating Radar”. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar. Shanghai, 4-8 de junio, pp. 840-843
- [14] SIEGWART, Roland y NOURBASKHSH, Illah
2004 “Locomotion”. Introduction to mobile robots. Massachusetts: The MIT Press, pp 47-88
- [15] SIEGWART, Roland y NOURBASKHSH, Illah
2004 “Mobile Robot Kinematics”. Introduction to mobile robots. Massachusetts: The MIT Press, pp 47-88
- [16] WILDI, Theodore
2007 “Motores de corriente directa (cd)”. Máquinas eléctricas y sistemas de potencia. México D.F: Pearson Education, pp 96-119
- [17] INTEL REALSENSE
Beginner’s guide to depth. Consulta: 22 de diciembre del 2019.
URL: <https://www.intelrealsense.com/beginners-guide-to-depth/>
- [18] LiDAR UK
How does LiDAR work. Consulta: 22 de diciembre del 2019.
URL: <http://www.lidar-uk.com/how-lidar-works/>
- [19] HIKVISION
DS-2DE2A404IW-DE3. Consulta: 24 de diciembre del 2019.
URL: <https://www.hikvision.com/es-la/Products/PTZ/DE-line-Network-PTZ/4-Megapixel->

[series/IR/DS-2DE2A204IW-DE3\(2.8-12MM\)](#)

- [20] DEEP TREKKER
DT320 Mini crawler base. Consulta: 24 de diciembre del 2019.
URL: <https://www.deeptrekker.com/shop/products/dt320-mini-crawler-lite>
- [21] CANADIAN CENTER FOR OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY
2011 “Office ergonomics program”. Office ergonomics. Hamilton: CCOHS, pp. 21-76
- [22] PANASONIC
TOUGHBOOK 54. Consulta: 10 de junio del 2019
URL: <https://na.panasonic.com/us/computers-tablets-handhelds/computers/laptops/toughbook-54>
- [23] LOGITECH
F310. Consulta: 10 de junio del 2019.
URL: <https://www.logitechg.com/es-es/products/gamepads/f310-gamepad.html>
- [24] HONDA
EG1000 – 1kV. Consulta: 11 de junio del 2019
URL: <https://pf.honda.com.pe/producto/eg1000-1kv/>
- [25] BLUE ROBOTICS
FATHOM Slim ROV tether (by the meter). Consulta: 12 de junio del 2019
URL: <https://bluerobotics.com/store/cables-connectors/cables/cab-nbpuf-1utp-26awg/>
- [26] DEEP TREKKER
Powered reel. Consulta: 24 de diciembre del 2019.
URL: <https://www.deeptrekker.com/shop/products/powered-reel>
- [27] SEDAPAL
Plan maestro de los sistemas de agua potable y alcantarillado. Consulta: 12 de junio del 2019

URL:http://www.sedapal.com.pe/Contenido/gdi_pmo/ANEXOS/Anexo%20B%20Modelamiento%20Hidraulico%20Alc.PDF

- [28] JOHNSON, Alan y STOREY, Randall
2000 Frictional behavior of a polyurethane rubber sliding on concrete: Analysis of a slip and fail accident. Technology, Law and Insurance. Lousville, 2000, vol 5, pp. 111-116
- [29] THE ENGINEERING TOOLBOX
Friction and Friction Coefficients. Consulta: 15 de junio del 2019
URL: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- [30] MINSA
2007 RM N° 706-2007-MINSA. Reglamento de condiciones de iluminación en ambientes de trabajo. Lima, 6 de setiembre. Consulta: 26 de diciembre del 2019.
URL: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/249285-706-2007-minsa>
- [31] SHAN-MIN, Gu y MING-ZHI, He
2012 “The new dual input DC power supply system”. 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai, 27-29 de marzo, pp. 1-4
- [32] HANNIFIN, Parker
2018 Parker O-ring Handbook. Cleveland: Parker. Consulta: 15 de noviembre del 2019.
URL:<https://www.parker.com/Literature/O-Ring%20Division%20Literature/ORD%205700.pdf>
- [33] FIBERSCOPE.NET
STORMER S300 Pipe crawler. Consulta: 25 de febrero del 2021.
URL: <https://www.fiberscope.net/pipe-crawler-robot-stormer.html>
- [34] SHENZHEN SROD INDUSTRIAL

SINGA300 Pipe robot crawler. Consulta: 01 de marzo del 2019.

URL: <https://szans.en.alibaba.com/>

- [35] ELSHAZLY, Osama; ABO-ISMAIL, Ahmed; ABBAS, Hossam y ZYADA, Zakarya
2014 “Skid steering mobile robot modeling and control”. 2014 UKACC International
Conference on Control. Loughborough, UK, 9-11 de julio, pp. 62-67

- [36] KHAN ACADEMY

Friction review. Consulta: 01 de marzo del 2021.

URL: <https://www.khanacademy.org/science/high-school-physics/two-dimensional-motion-2/friction/a/friction-ap-physics-1>

