



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño y construcción de un sistema automatizado de inspección con ultrasonido-arreglo de fases para el control de calidad de planchas de acero en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas “CIRT”

Amores Álvarez, Erik Sebastián y Espín Quispe, Kevin Adrián

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecatrónico

Ing. Caizalítín Quinaluisa, Edwin Alejandro MSc.

7 de febrero del 2022



**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE INSPECCIÓN CON ULTRASONIDO-ARREGLO DE FASES PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE PLANCHAS DE ACERO EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS HIDRÁULICAS “CIRT”**” fue realizado por los señores **Amores Alvarez, Erik Sebastián y Espín Quispe, Kevin Adrián**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 8 de febrero de 2022

.....
Ing. Caizalítín Quinaluisa, Edwin Alejandro MSc.

C.C.: 0503351397

COPYLEAKS

TESIS_AMORES ERIK_ESPÍN KEVIN_2022.docx

Scanned on: 13:38 February 8, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	191
Words with Minor Changes	63
Paraphrased Words	166
Ommited Words	2615



EDWIN ALEJANDRO
CAIZALITIN
QUINALUISA

Ing. Caizalitin Quinaluisa, Edwin Alejandro MSc.

C.C.: 0503351397



**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Amores Alvarez, Erik Sebastián** con cédula de ciudadanía n°1805062757, y **Espín Quispe, Kevin Adrián**, con cédula de ciudadanía n°0503836959, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE INSPECCIÓN CON ULTRASONIDO-ARREGLO DE FASES PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE PLANCHAS DE ACERO EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS HIDRÁULICAS “CIRT”**”, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 7 de febrero de 2022

Amores Alvarez, Erik Sebastián

C.C.: 1805062757

Espín Quispe, Kevin Adrián

C.C.: 0503836959



**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Amores Alvarez, Erik Sebastián** con cédula de ciudadanía n°1805062757, y **Espín Quispe, Kevin Adrián**, con cédula de ciudadanía n°0503836959, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE INSPECCIÓN CON ULTRASONIDO-ARREGLO DE FASES PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE PLANCHAS DE ACERO EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS HIDRÁULICAS “CIRT”**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 7 de febrero de 2022

Amores Alvarez, Erik Sebastián

C.C.: 1805062757

Espín Quispe, Kevin Adrián

C.C.: 0503836959

Dedicatoria

Dedico el presente proyecto de tesis a mis padres Jorge y Mélida que han estado presentes en cada paso que he dado, que han sido las personas con las que siempre he podido contar a lo largo de toda mi vida, también lo dedico a mis hermanas Valentina y Lissette, que me han brindado su apoyo y cariño permitiéndome tener más fuerza para seguir adelante, no me queda más que decir que no hubiera llegado a ser la persona que soy ahora sin ustedes, los amo mucho.

Erik Sebastián

Dedico este proyecto de titulación con todo el cariño a mis padres Edwin y Doris que gracias a su sacrificio, consejos, aliento y apoyo incondicional he logrado culminar con esta etapa importante en mi vida, y son parte de este logro. A mi hermana Leidy que ha sido parte importante en mi vida, que gracias a su cariño, respaldo y presencia en el día a día con momentos de alegría y emociones me han impulsado a seguir adelante y cumplir todas mis metas.

Kevin Adrián

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE por permitirme adquirir todos los conocimientos que fueron aplicados en la realización del proyecto.

Agradezco al Centro de Investigación y Recuperación de Partes y Turbinas "CIRT" por abrimos las puertas para poder realizar el presente proyecto, y especialmente agradezco al Ing. Marcelo Toapanta por compartirnos sus conocimientos y por brindarnos su apoyo en el desarrollo del mismo.

De igual manera me gustaría agradecer al Ing. Edwin Caizalítín tutor académico del proyecto, que con sus recomendaciones y experiencia nos permitió desarrollarlo de la mejor manera.

Erik Sebastián

Agradezco a Dios por haberme brindado la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida profesional, de igual manera a mi familia que ha sido un pilar fundamental en todo el trascurso de mi vida universitaria, especialmente a mi madre y hermana que me han brindado todo su amor y apoyo incondicional en todo momento, les agradezco de todo corazón.

Un agradecimiento a nuestro tutor de tesis Ing. Edwin Caizalítín por su guía, colaboración y conocimientos aportados en la elaboración de este proyecto de titulación. Un agradecimiento a CIRT CELEP-EP por brindarnos la oportunidad de realizar un proyecto de investigación en sus instalaciones y facilitarnos sus equipos. Finalmente, un agradecimiento especial al Ing. Marcelo Toapanta que ha sido un pilar esencial con sus enseñanzas, consejos y guía durante toda la elaboración de este trabajo.

Kevin Adrián

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación de contenido.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos.....	8
Índice de tablas	12
Índice de figuras	14
Resumen	19
Abstract.....	20
Introducción.....	21
Antecedentes	21
Formulación del problema	24
Objetivos del proyecto	25
<i>Objetivo general</i>	25
<i>Objetivos específicos</i>	25
Justificación e importancia	25
Hipótesis	27
Variables de investigación	27
<i>Variables independientes</i>	27
<i>Variables dependientes</i>	27
Fundamentación teórica	28

Control de calidad en planchas de acero.....	28
Ensayos no destructivos.....	28
<i>Ensayos de ultrasonido.....</i>	<i>29</i>
Ultrasonido arreglo de fases.....	30
<i>Transductores.....</i>	<i>32</i>
<i>Acoplantes para ultrasonido.....</i>	<i>34</i>
<i>Zapatas.....</i>	<i>34</i>
<i>Leyes focales.....</i>	<i>35</i>
<i>Presentación de datos ultrasónicos.....</i>	<i>36</i>
<i>OmniScan MX2.....</i>	<i>39</i>
<i>VersaMOUSE.....</i>	<i>40</i>
<i>Bloques de calibración.....</i>	<i>42</i>
Sistemas automatizados de inspección.....	43
Sistemas de adherencia.....	44
Chumaceras.....	46
Componentes electrónicos.....	47
<i>Arduino Mega.....</i>	<i>47</i>
<i>Motores a pasos.....</i>	<i>48</i>
<i>Controlador DVR8825.....</i>	<i>49</i>
<i>Servomotor.....</i>	<i>50</i>
<i>Pantalla NEXTION NX3224T028.....</i>	<i>51</i>
Diseño del sistema mecánico y electrónico.....	53
Casa de la calidad.....	53
<i>Necesidades del usuario.....</i>	<i>53</i>
<i>Características técnicas.....</i>	<i>54</i>

<i>Matriz QFD</i>	55
Estructura funcional del sistema	56
<i>Función global y despliegue de estructura funcional</i>	57
Arquitectura del Sistema	60
Generación y selección de conceptos	61
<i>Módulo de avance</i>	62
<i>Brazo de inspección</i>	64
<i>Sistema eléctrico y electrónico</i>	67
<i>Interacción con el usuario</i>	68
Diseño mecánico	69
<i>Brazo de inspección</i>	71
<i>Módulo de avance</i>	100
<i>Suministro del medio acoplante acústico para la inspección</i>	129
Diseño eléctrico y electrónico	137
<i>Diseño del circuito de control</i>	137
<i>Diseño del sistema de control</i>	139
<i>Suministro de energía</i>	147
Construcción, pruebas y análisis de resultados	150
Construcción.....	150
<i>Módulo de avance</i>	150
<i>Movimiento de avance y adherencia</i>	153
<i>Brazo de inspección</i>	153
<i>Movimiento del eje de inspección</i>	154
<i>Acople con el accesorio VersaMOUSE</i>	155
<i>Sistema eléctrico y electrónico</i>	156

Suministro de energía	157
Interacción con el usuario.....	158
Sistema automatizado de inspección.....	158
Inspección ultrasónica con la técnica de arreglo de fases.....	159
Equipos, materiales y accesorios utilizados en la inspección	159
Desarrollo de la inspección mediante barrido sectorial (S-scan).....	159
Calibración	165
Configuración del VersaMOUSE.....	169
Pruebas y análisis de resultados.....	169
Pruebas de precisión y exactitud del módulo de avance	170
Pruebas de precisión y exactitud del brazo de inspección	174
Pruebas de orientación del módulo de avance.....	177
Adquisición de datos de inspección en planchas	180
Análisis de costos	182
Conclusiones y recomendaciones	184
Conclusiones	184
Recomendaciones	186
Trabajos futuros.....	187
Bibliografía.....	188
Anexos	196

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Características técnicas del OmniScan MX2</i>	40
Tabla 2	<i>Características técnicas del VersaMOUSE</i>	42
Tabla 3	<i>Características del controlador DVR8825</i>	50
Tabla 4	<i>Características pantalla NEXTION NX3224T028</i>	52
Tabla 5	<i>Necesidades del usuario</i>	53
Tabla 6	<i>Características técnicas</i>	54
Tabla 7	<i>Resultados de la matriz QFD</i>	56
Tabla 8	<i>Sistemas y subsistemas</i>	60
Tabla 9	<i>Filtrado de conceptos de movimiento de avance y adherencia</i>	63
Tabla 10	<i>Selección de conceptos de movimiento de avance y Adherencia</i>	64
Tabla 11	<i>Filtrado de conceptos de movimiento del eje de inspección</i>	65
Tabla 12	<i>Filtrado de conceptos del acople con el accesorio VersaMOUSE</i>	66
Tabla 13	<i>Filtrado de conceptos de la tarjeta de control</i>	67
Tabla 14	<i>Filtrado de conceptos de pantallas TFT</i>	69
Tabla 15	<i>Selección de concepto del material a utilizar</i>	70
Tabla 16	<i>Propiedades mecánicas acero ASTM A36</i>	71
Tabla 17	<i>Masas que interactúan en el mecanismo</i>	74
Tabla 18	<i>Especificaciones técnicas del servomotor MG996R</i>	77
Tabla 19	<i>Análisis mecánico del seguidor del VersaMOUSE</i>	78
Tabla 20	<i>Análisis mecánico del soporte del mecanismo</i>	80
Tabla 21	<i>Datos típicos de tornillo sin fin</i>	86
Tabla 22	<i>Motor a pasos Nema 17 KS42STH40-1204A</i>	92
Tabla 23	<i>Fuerzas magnéticas de la rueda</i>	104
Tabla 24	<i>Pesos del módulo de avance y brazo de inspección</i>	105

Tabla 25	<i>Resultados del análisis mecánico de la pieza lateral</i>	113
Tabla 26	<i>Selección del motor del módulo de avance</i>	118
Tabla 27	<i>Especificaciones técnicas motor a pasos NEMA 17 - engranaje planetario</i> ..	119
Tabla 28	<i>Propiedades mecánicas del nylon 66</i>	127
Tabla 29	<i>Rodamientos IKC</i>	128
Tabla 30	<i>Características técnicas mini bomba R385</i>	137
Tabla 31	<i>Filtrado de conceptos de suministro de energía</i>	148
Tabla 32	<i>Características técnicas de la fuente de alimentación WX-DC2416</i>	149
Tabla 33	<i>Equipos, materiales y accesorios utilizados en la inspección</i>	159
Tabla 34	<i>Configuración del equipo</i>	160
Tabla 35	<i>Tamaño, material y forma de la pieza de ensayo</i>	160
Tabla 36	<i>Parámetros de configuración de la pieza</i>	161
Tabla 37	<i>Parámetros de la sonda</i>	161
Tabla 38	<i>Parámetros de la zapata</i>	162
Tabla 39	<i>Configuración de las leyes focales</i>	164
Tabla 40	<i>Parámetros de configuración de la sonda y zapata</i>	165
Tabla 41	<i>Calibración en sensibilidad</i>	167
Tabla 42	<i>Calibración de velocidad del ultrasonido</i>	168
Tabla 43	<i>Calibración de retardo de zapata</i>	169
Tabla 44	<i>Configuración VersaMOUSE</i>	169
Tabla 45	<i>Datos obtenidos del módulo de avance</i>	171
Tabla 46	<i>Datos del brazo de inspección</i>	175
Tabla 47	<i>Datos de desviación del sistema</i>	178
Tabla 48	<i>Análisis económico del sistema de inspección automático</i>	182

Índice de figuras

Figura 1	<i>Esquema del ensayo de ultrasonidos por impulso-eco</i>	29
Figura 2	<i>Activación de los elementos de una sonda para arreglo de fases</i>	31
Figura 3	<i>Sección transversal de una sonda para arreglo de fases</i>	32
Figura 4	<i>Tipos de sondas construidas para arreglo de fases</i>	33
Figura 5	<i>Parámetros dimensionales de las sondas para arreglo de fases</i>	34
Figura 6	<i>Zapata para sonda de 16 elementos</i>	35
Figura 7	<i>Secuencia de leyes focales</i>	36
Figura 8	<i>Representación de datos A-scan</i>	37
Figura 9	<i>Representación de datos B-scan</i>	37
Figura 10	<i>Representación de datos C-scan</i>	38
Figura 11	<i>Representación de datos S-scan</i>	39
Figura 12	<i>OmniScan MX2</i>	40
Figura 13	<i>VersaMOUSE con una zapata incorporada</i>	41
Figura 14	<i>Soporte de la sonda en sus dos posiciones posibles</i>	41
Figura 15	<i>Bloque de calibración NAVSHIPS cylindrical reflector 304 stainless steel</i>	42
Figura 16	<i>Sistema automatizado de inspección para tuberías AGS-1</i>	43
Figura 17	<i>Mecanismos de adhesión magnética</i>	44
Figura 18	<i>Estructura de una rueda magnética utilizando imanes de neodimio</i>	45
Figura 19	<i>Estructura de una rueda magnética utilizando imanes de ferrita</i>	46
Figura 20	<i>Chumacera</i>	47
Figura 21	<i>Arduino Mega</i>	48
Figura 22	<i>Motor a pasos</i>	49
Figura 23	<i>Controlador DVR 8825 – diagrama de conexión</i>	50
Figura 24	<i>Servomotor</i>	51

Figura 25	<i>Pantalla NEXTION NX3224T028</i>	52
Figura 26	<i>Matriz QFD</i>	55
Figura 27	<i>Simbología - estructura funcional</i>	57
Figura 28	<i>Función global del sistema</i>	58
Figura 29	<i>Estructura funcional del sistema automatizado de inspección</i>	59
Figura 30	<i>Estrategia de inspección</i>	71
Figura 31	<i>Ruedas del encoder del VersaMOUSE</i>	72
Figura 32	<i>Representación del mecanismo tipo leva diseñado</i>	73
Figura 33	<i>Representación del peso a levantar y de los elementos del mecanismo</i>	73
Figura 34	<i>Diagrama de cuerpo libre del mecanismo</i>	74
Figura 35	<i>Servomotor MG996R</i>	76
Figura 36	<i>Fuerzas que actúan en el seguidor</i>	78
Figura 37	<i>Fuerzas que actúan en el soporte del mecanismo</i>	80
Figura 38	<i>Diagrama de implementación de un motor a pasos con un tornillo sin fin</i>	82
Figura 39	<i>Diagrama equivalente para el módulo de inspección</i>	82
Figura 40	<i>Representación de la fuerza externa en el mecanismo</i>	89
Figura 41	<i>Motor paso a paso KS42STH40-1204A</i>	91
Figura 42	<i>Determinación de las fuerzas que actúan en los ejes</i>	92
Figura 43	<i>Fuerzas que actúan en los ejes</i>	94
Figura 44	<i>Diagrama de cuerpo libre del eje</i>	95
Figura 45	<i>Diagrama de fuerzas cortantes</i>	97
Figura 46	<i>Diagrama de momentos flexionantes</i>	97
Figura 47	<i>Diseño de la rueda con imán de ferrita</i>	100
Figura 48	<i>Entorno de análisis de Maxwell 3D Ansys</i>	101
Figura 49	<i>Vectores del flujo magnético: rueda y la superficie ferromagnética</i>	102

Figura 50	<i>Densidad del flujo magnético: rueda y la superficie ferromagnética</i>	103
Figura 51	<i>Diseño del sistema automatizado de inspección</i>	105
Figura 52	<i>Distribución de cargas de la base trasera</i>	106
Figura 53	<i>Diagrama de cargas de la base trasera</i>	107
Figura 54	<i>Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flexionantes</i>	107
Figura 55	<i>Distribución de cargas de la base frontal</i>	109
Figura 56	<i>Diagrama de cargas de la base delantera</i>	110
Figura 57	<i>Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flexionantes</i>	110
Figura 58	<i>Cargas en la pieza lateral de la estructura</i>	112
Figura 59	<i>Diagrama de cuerpo libre</i>	114
Figura 60	<i>Fuerzas que actúan en las ruedas</i>	117
Figura 61	<i>Motor nema 17 - engranaje planetario</i>	119
Figura 62	<i>Distribución de cargas - módulo de avance</i>	120
Figura 63	<i>Diagrama de cuerpo libre de la parte trasera</i>	121
Figura 64	<i>Reacciones en los apoyos - parte trasera</i>	121
Figura 65	<i>Diagrama de fuerzas cortantes y momento flector</i>	122
Figura 66	<i>Dimensiones del eje trasero</i>	123
Figura 67	<i>Barra redonda escalonada a flexión</i>	124
Figura 68	<i>Barra circular escalonada sometida a torsión</i>	125
Figura 69	<i>Representación del suministro de medio acoplante</i>	129
Figura 70	<i>Representación de la película de agua en la inspección</i>	130
Figura 71	<i>Representación de los puntos de análisis en el sistema</i>	132
Figura 72	<i>Mini bomba R385</i>	137
Figura 73	<i>Diagrama esquemático del circuito de control</i>	138
Figura 74	<i>Diseño PCB del circuito de control</i>	138

Figura 75	<i>Circuito de control - visualización 3D</i>	139
Figura 76	<i>Modelo CAD del control remoto</i>	140
Figura 77	<i>Diagrama de flujo de la interfaz de control</i>	141
Figura 78	<i>Diagrama de flujo del modo automático</i>	142
Figura 79	<i>Pantalla de advertencia para enviar el brazo de inspección a home</i>	143
Figura 80	<i>Pantalla de menú principal</i>	143
Figura 81	<i>Pantalla en modo manual</i>	144
Figura 82	<i>Interfaz de modo automático</i>	144
Figura 83	<i>Cambio de velocidades y porcentaje de flujo para el modo automático</i>	145
Figura 84	<i>Pantalla de ejecución del modo automático</i>	146
Figura 85	<i>Interfaz modo libre</i>	146
Figura 86	<i>Fuente de alimentación WX-DC2416</i>	149
Figura 87	<i>Piezas de la estructura del módulo de avance</i>	150
Figura 88	<i>Bases de los motores a paso a paso</i>	151
Figura 89	<i>Cubierta del módulo de inspección</i>	151
Figura 90	<i>Estructura del módulo de avance</i>	152
Figura 91	<i>Módulo de avance</i>	152
Figura 92	<i>Rueda magnética</i>	153
Figura 93	<i>Brazo de inspección - eje x</i>	154
Figura 94	<i>Lateral derecho del brazo de inspección</i>	154
Figura 95	<i>Lateral izquierdo del brazo de inspección</i>	155
Figura 96	<i>Inicio del recorrido del eje de inspección</i>	155
Figura 97	<i>Sistema de acople del accesorio VersaMOUSE</i>	156
Figura 98	<i>Circuito de control del sistema automatizado de inspección</i>	156
Figura 99	<i>Diagrama de alimentación</i>	157

Figura 100	<i>Control remoto</i>	158
Figura 101	<i>Sistema automatizado de inspección</i>	158
Figura 102	<i>Selección del modo de grupo</i>	162
Figura 103	<i>Selección de la sonda y zapata</i>	163
Figura 104	<i>Selección del haz</i>	163
Figura 105	<i>Ángulos de barrido</i>	164
Figura 106	<i>Calibración del equipo</i>	166
Figura 107	<i>Toma de datos del módulo de avance</i>	171
Figura 108	<i>Toma de datos del brazo de inspección</i>	175
Figura 109	<i>Toma de datos de la distancia de desviación del sistema</i>	178
Figura 110	<i>Automatización de la inspección con ultrasonido-arreglo de fases</i>	180
Figura 111	<i>Datos generados durante la inspección</i>	181

Resumen

En el presente trabajo de titulación se realiza el diseño y construcción de un sistema automatizado para la inspección con ultrasonido - arreglo de fases en planchas que serán utilizadas en la recuperación de turbinas y partes industriales en el Centro de Investigación "CIRT". Se parte de la investigación del principio de funcionamiento del ultrasonido - arreglo de fases, el equipo y accesorios disponibles en la empresa.

Después de conocer la inspección manual y revisar la norma CCH 70-4 se procedió al diseño un mecanismo de inspección conformado por una tuerca y un tornillo sin fin acoplado a un motor a pasos, que desplaza el transductor en el eje X (montado en un accesorio con el encoder llamado VersaMOUSE). Se diseña también un módulo de avance que consta de cuatro ruedas magnéticas, dos de ellas acopladas a motores a pasos de alto torque que permiten un desplazamiento preciso en el eje Y. Para el análisis del diseño se calcularon factores de seguridad de las piezas más críticas del sistema. Además, se diseñó un circuito con un Arduino Mega como microcontrolador principal, encargado de accionar lo motores mediante drivers, controlar el flujo de acoplante acústico, elevar/bajar el VersaMOUSE y recibir/enviar información del control remoto que consta de dos palancas, y un HMI con tres modos de operación.

Finalmente, se realizaron pruebas al sistema tomando datos de inspección y mediciones para el cálculo de precisión y exactitud en su desplazamiento por la plancha, validando mediante T-Student que fue posible automatizar el proceso de inspección en planchas de acero utilizando ultrasonido - arreglo de fases.

Palabras clave:

- **SISTEMA DE INSPECCIÓN AUTOMÁTICO**
- **INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO - ARREGLO DE FASES**
- **PLANCHAS DE ACERO**

Abstract

In the present project, the design and construction of an automated system for ultrasound phased array testing in steel plates that will be used in the recovery of turbines and industrial parts in the "CIRT" Research Center is carried out. It starts with the investigation of the operating principle of ultrasound - phased array, the equipment and accessories available in the company. After knowing the manual inspection and reviewing the CCH 70-4 standard, an inspection mechanism was designed consisting of a nut and a worm screw coupled to a stepper motor, which moves the transducer in the X axis (mounted on an accessory with encoder called VersaMOUSE). A crawler was designed as well, consisting of four magnetic wheels, two of them coupled to high torque stepping motors that allow precise movement on the Y axis. For the design analysis, safety factors were calculated for the most critical parts of the system. In addition, a circuit was designed with an Arduino Mega as the main microcontroller, which through drivers control the stepper motors, sets the flow of acoustic couplant, ups/downs the VersaMOUSE and receives/sends information to the remote control that consists of two joysticks, and a HMI with three modes of operation. Finally, the system was test, taking inspection data and measurements for the calculation of precision and accuracy in its movement through the plate, validating through T-Student that it was possible to automate the inspection process in steel plates using ultrasound phased array testing.

Key words:

- **AUTOMATIC INSPECTION SYSTEM**
- **ULTRASOUND PHASED ARRAY TESTING**
- **STEEL PLATES**

Capítulo I

1. Introducción

En el presente capítulo se describe la manera en la que se realizaba las inspecciones en las planchas de acero a ser utilizadas para la elaboración de piezas o partes industriales en el Centro de Investigación “CIRT” y la importancia de realizar este proceso previo a la elaboración de estas. Se plantea el problema a ser resuelto, justificando su importancia, y la razón que motiva a que sea resuelto, además de que se plantean los objetivos que se pretenden alcanzar y formaran parte del proceso.

1.1. Antecedentes

Una de las principales razones por las cuales la tecnología ha ido creciendo a pasos agigantados es porque facilita la vida de los seres humanos, brindando las comodidades necesarias para realizar ciertas actividades que pueden ser tediosas o peligrosas. La inspección de tuberías es de mucha importancia en aplicaciones de transporte de combustible y gas debido al desgaste producido por cargas estáticas y dinámicas del proceso, para esta aplicación se desarrollan robots de inspección interna utilizando mecanismos con ruedas que se aferran a las paredes internas de las tuberías mientras el sensor realiza la inspección respectiva (Ogai & Bhattacharya, 2018).

Existe una gran cantidad de piezas o elementos mecánicos de paredes delgadas en las centrales hidroeléctricas como paneles de turbinas, tuberías y planchas de acero. Su espesor debe cumplir con estrictos requisitos antes y después de un trabajo de mecanizado para garantizar el rendimiento estructural. Entonces, resulta muy importante obtener los espesores tanto de las planchas de acero como de las tuberías, información que serviría para compensar fallas ocasionadas por un proceso de mecanizado y también para evaluar la calidad de este. Actualmente existen varios

métodos para medición indirecta de espesores utilizando sensores de contacto y ópticos, en la medición directa se utiliza los métodos de calibre, corriente parasita y ultrasonido (H. Liu et al., 2019).

Eddyfi Technologies es una empresa que se encuentra en algunos de los países más grandes del mundo, entre ellos Estados Unidos, Inglaterra y China. La empresa desarrolla productos que los llama sistemas de testeo de defectos por ultrasonido automático (Eddyfi Technologies, 2021). En los Países Bajos se encuentra la empresa MME GROUP que tiene un sistema denominado como "*Prueba Ultrasónica Automatizada*", este sistema contiene un detector de defectos por ultrasonidos Olympus. Este transductor se encuentra ubicado en un robot móvil que tiene un panel de control independiente del sistema de testeo (MME Group, 2021). Con sede en Suiza la empresa ROSEN Group dedicada al desarrollo de soluciones para la industria tiene un sistema de testeo de espesores automático, en este caso el material para testear es el encargado de moverse a través de los sensores (Rosen Group, 2021).

Existen varios proyectos de inspección para espesores en metales que han optado por la utilización de un dron. Este dron es el encargado de portar una sonda de pruebas la cual se debe mover por la superficie del material que se desea inspeccionar. El problema que presenta este método de inspección es que no se puede usar una sonda que palpe la superficie, dificultando el sistema de control (Zhang et al., 2018). A continuación, se describe un resumen de los proyectos encontrados:

Investigaciones recientes en el área de análisis de tensión y la predicción de fallas ha concluido que es crucial determinar la presencia de geometrías grandes de corrosión, es así como se ha desarrollado un sistema de mapeo 2.5 D de las superficies de una tubería para poder determinar el espesor de materiales ferromagnéticos. Un

robot es el encargado de recorrer la superficie interna de la tubería debido a que la tubería esta recubierta por concreto. El robot cuenta con cuatro ruedas en la base que le brindan estabilidad y tres ruedas en la parte superior que le permiten un ajuste perfecto a la tubería (Miro et al., 2018).

Para determinar el espesor de tuberías no metálicas se ha utilizado un mecanismo novedoso basado en la reflectometría de microondas y ondas milimétricas. Esta investigación muestra un robot de arrastre de tuberías de línea con un instrumento de reflectometría de microondas de banda K, capaz de escanear por tramos las fallas y posibles pérdidas de material en la pared externa en tuberías de polietileno de alta densidad (Carrigan et al., 2019).

La inspección de espesores en tuberías de suministro de agua potable para las grandes ciudades requiere de un constante monitoreo, ya que muchas de estas tuberías se encuentran envejecidas. Entonces obtener completamente el espesor de pared restante (RWT) de estas tuberías ocasionaría interrupción en el suministro de agua hacia los clientes. Por este motivo se ha desarrollado un sistema novedoso que solo requiere inspeccionar el 20% de la tubería y mediante distribución marginal se obtienen los valores de RWT en un modelo gaussiano tridimensional (Nguyen & Miro, 2020).

En lo que se refiere al proceso de control de calidad de planchas de acero que se lleva a cabo actualmente en el "CIRT", se realiza de manera manual, con un equipo de inspección de ultrasonido por arreglo de fases desarrollado por la empresa Olympus, específicamente el OmniScan MX2. Además, de que el centro de investigación posee una gran gama de accesorios que permite aprovechar en gran medida las ventajas de este equipo. El inspector prepara la superficie a inspeccionar con un medio acoplante (generalmente agua o gel), para después realizar un barrido con el transductor por la

plancha, tomando datos para su posterior interpretación en busca de fallas y discontinuidades.

1.2. Formulación del problema

En el Ecuador en la ciudad de Baños de Agua Santa se encuentra el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales “CIRT” que es parte de CELEC EP HIDROAGOYÁN. En la prestación de servicios para centrales eléctricas y el sector industrial en Ecuador, el centro de investigación se apegó objetivamente a la política del gobierno ecuatoriano sobre cambios en la matriz energética y productiva. El centro utiliza su tecnología y procesos para la investigación y desarrollo de conocimiento en el proceso de recuperación de piezas y partes con el cumplimiento de normas y estándares internacionales.

Actualmente el “CIRT” cuenta con un proceso de inspección de integridad mecánica mediante un método de ensayo no destructivo por ultrasonido. Este procedimiento se realiza de forma manual, lo que hace que la inspección tarde demasiado además de que puede resultar incómodo, sobre todo considerando el tamaño de las planchas de acero utilizados en la empresa.

Además, se pueden analizar varios factores que pueden ocasionar errores en la inspección como son: el mal posicionamiento del transductor sobre la superficie de la plancha, velocidad inadecuada de inspección, inexacta aplicación de lubricante utilizado para la inspección, entre las más importantes. Esto le genera a la empresa pérdidas de tiempo del personal encargado, lo que con el tiempo se traduce en pérdidas económicas (CIRT, 2016).

Por lo tanto, teniendo en cuenta la urgencia de la empresa por contar con un sistema automatizado de inspección en planchas de acero, se propone el desarrollo de

un sistema automatizado para mejorar los tiempos de ejecución de los procesos de inspección y realizar un control de calidad adecuado sobre los materiales.

1.3. Objetivos del proyecto

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y construir un sistema automatizado de inspección con ultrasonido - arreglo de fases para el control de calidad de planchas de acero en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales “CIRT”.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar conceptos sobre dispositivos automatizados, ensayos no destructivos de inspección por ultrasonido - arreglo de fases, funcionamiento, parámetros de calibración, equipos y configuraciones.
- Diseñar un mecanismo que permita automatizar la adquisición de datos en el proceso de inspección con ultrasonido - arreglo de fases.
- Analizar el diseño y seleccionar componentes.
- Construir e implementar un sistema de control capaz de realizar un barrido para la toma de datos de la superficie a inspeccionar.
- Desarrollar pruebas de funcionamiento y adquisición de datos en planchas de acero.

1.4. Justificación e importancia

El centro de investigación “CIRT” entre sus principales características tiene la aplicación de métodos de pruebas e inspección a partir de herramientas de última tecnología para el control de calidad de los materiales utilizados para la recuperación de piezas y partes, permitiéndole estar a la vanguardia en este campo. Siguiendo la línea

de desarrollo tecnológico, se presentó la posibilidad de desarrollar un sistema que automatice la inspección de planchas de acero mediante ultrasonido – arreglo de fases, que surge de la necesidad por parte del personal que realiza la inspección manualmente, ya que puede llegar a ser incómodo considerando que las planchas de inspección pueden ser de un tamaño considerable, lo que dificulta el alcance a ciertas zonas y además de que puede favorecer a mediciones erróneas al no poder posicionar el transductor de manera correcta sobre la superficie del material, aspecto que es de mucha importancia y depende del tipo de acero así como del espesor del mismo.

El desarrollo de este proyecto permitirá realizar de manera precisa la inspección mediante ultrasonido en planchas de acero, a través de la implementación de un sistema automatizado de inspección para realizar un barrido y detectar de forma precisa la presencia de fallas y discontinuidades, además el sistema desarrollado permitirá mantener un correcto posicionamiento del transductor y un flujo constante de un líquido para el acople con el material durante la inspección.

Cabe recalcar que este sistema automatizado reducirá los tiempos de inspección de las superficies, incrementando la eficiencia en la detección de discontinuidades en planchas de acero, que, debido al tamaño y al método de inspección, el cual es riguroso de acuerdo a la velocidad de barrido, lubricación y posicionamiento del transductor, resultan ser objetos de difícil inspección.

Además, se puede mencionar que al desarrollar este proyecto de tesis para una empresa estatal se forma parte del "Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021 Toda una Vida" de Ecuador, específicamente en su eje número dos, Economía al Servicio de la Sociedad.

1.5. Hipótesis

¿El diseño y construcción de un sistema automatizado de inspección con ultrasonido - arreglo de fases permitirá automatizar el control de calidad en planchas de acero en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales "CIRT"?

1.6. Variables de investigación

1.6.1. Variables independientes

Dispositivo automatizado para la inspección con ultrasonido - arreglo de fases.

1.6.2. Variables dependientes

Control de calidad en planchas de acero

Capítulo II

2. Fundamentación teórica

2.1. Control de calidad en planchas de acero

Para las reparaciones de turbinas o elaboración de partes que realiza el centro de investigación "CIRT", es primordial contar con materia prima de excelente calidad, que permita a la empresa cumplir con las rigurosas normas que forman parte del sistema de generación en eléctrica.

Previo a la elaboración de partes o reparación de turbinas es necesario verificar, en este caso la integridad estructural del material a utilizar, por ejemplo, uno de los más utilizados son las planchas de acero, como se puede suponer los procesos de fabricación no son perfectos lo que apertura una posibilidad de que puedan existir fallas y al ser de espesores considerables mucho más.

Para comprobar que las planchas se encuentran en las condiciones adecuadas hay que valerse de métodos no destructivos, con el fin de localizar fallas que puedan afectar el producto final en el cual serán empleados.

2.2. Ensayos no destructivos

Las pruebas no destructivas implican evaluar la utilidad de los materiales de ingeniería sin afectarlos. El objetivo fundamental de la tecnología de evaluación no destructiva es determinar defectos potencialmente importantes, como defectos internos y superficiales. Las pruebas no destructivas se pueden utilizar para analizar fallas existentes y prevenir fallas futuras. Los métodos más utilizados en este campo son la radiografía de rayos x y ultrasonidos (Bilurbina & Iribarren, 2002).

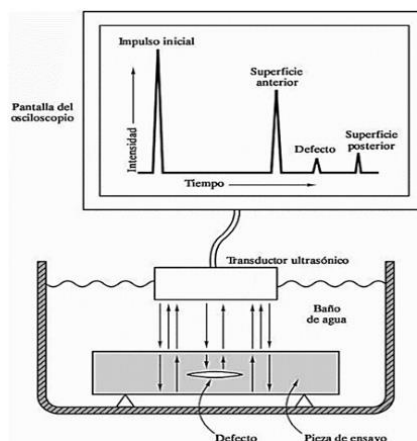
2.2.1. Ensayos de ultrasonido

Los ensayos por ultrasonido se basan en el espectro acústico, con frecuencias muy por encima del rango perceptible del ser humano, que por lo general se encuentran en el intervalo de 1 a 25 MHz. En contraste al caso del método de rayos X, en el ensayo de ultrasonidos las ondas ultrasónicas necesitan un medio para poder transmitirse, a diferencia del método de rayos X que utiliza ondas electromagnéticas que se transmiten en el vacío (Shackelford, 2005).

Las sondas utilizadas para los ensayos están formadas por materiales piezoeléctricos, cuya principal característica es la capacidad de deformarse al aplicar sobre ellos energía eléctrica, además esta característica es reversible, debido a que si el material es deformado permite que el mismo genere una corriente eléctrica, aspecto que es ideal para poder captar la reflexión causada por la diferencia de interfase, al pasar del material de inspección al aire, en el caso de la detección de algún defecto o falla interna (Bilurbina & Iribarren, 2002).

Figura 1

Esquema del ensayo de ultrasonidos por impulso-eco



Nota. Tomado de (Shackelford, 2005)

Los ensayos mediante ultrasonidos son ampliamente utilizados en algunas aplicaciones industriales en materiales como aceros, plásticos, cerámicos entre otros. Pero existen ciertos materiales de ingeniería que no pueden ser testeados mediante equipamiento convencional, como es el caso del papel o la madera (Olympus, 2021c).

Por considerar ciertas limitaciones del ensayo de ultrasonidos, se puede mencionar que se requiere personal capacitado que pueda configurar de manera adecuada el equipo e interpretar los resultados adecuadamente (Olympus, 2021d).

Otro aspecto importante es que puede resultar complicado inspeccionar piezas de geometría compleja, además de que, por la misma naturaleza del ensayo en materiales con una microestructura porosa, existe la posibilidad de la dispersión de las ondas ultrasónicas (Shackelford, 2005).

2.3. Ultrasonido arreglo de fases

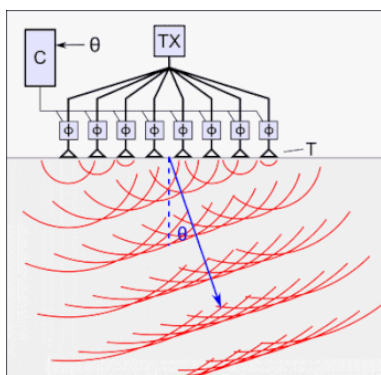
Los instrumentos ultrasónicos comerciales están basados en transductores de un solo elemento que usaban un cristal piezoeléctrico para generar y recibir ondas de sonido, transductores de doble elemento que tenían cristales de transmisión y recepción separados. Esta perspectiva todavía es utilizada por gran parte de equipos comerciales actuales utilizados en la inspección mediante ultrasonidos, diseñados para la detección de fallas y la medición de espesores, sin embargo, los instrumentos que utilizan ultrasonido con arreglo de fases se están volviendo cada vez más importantes para los ensayos no destructivos con ultrasonido (Olympus, 2021e).

Cuando se habla de arreglo de fases se tiene dos conceptos, arreglo se refiere al número de elementos individuales que se encuentran en el transductor (generalmente de 16 a 256), mientras que fases se refiere a como estos elementos son secuencialmente activados en un patrón previamente programado con la intención de

lograr una dirección específica del haz, como se muestra en la Figura 2. En el caso de la recepción de la onda reflejo-causada por el cambio de interfaz del medio en el que viaja la onda, se procede de una manera similar, es decir, al llegar a cada uno de los elementos del transductor se procesa para obtener la dirección de un solo haz (Olympus, 2021e).

Figura 2

Activación de los elementos de una sonda para arreglo de fases



Nota. Tomado de (Wikipedia, 2021)

Una de las principales ventajas que ofrece una inspección por arreglo de fases con respecto al método tradicional es la versatilidad para inspeccionar piezas de geometrías complicadas o de difícil acceso, debido a que en lugar de mover la sonda físicamente para poder alcanzar el área de interés, se puede modificar la dirección programando simplemente la activación de los elementos. Debido a la posibilidad de inspección con diversos ángulos aumenta altamente la probabilidad de detección de anomalías.

La mayor desventaja de este método es el costo del equipo necesario para su aplicación, además de que la persona que se vaya a encargar del proceso debe ser

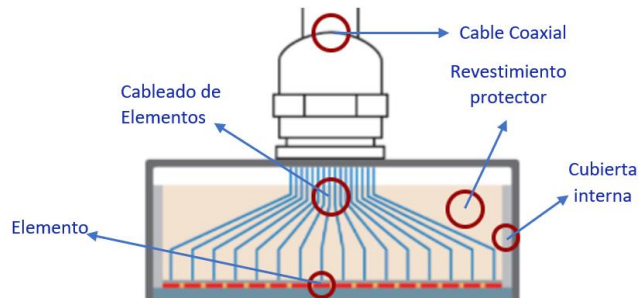
entrenada, pero al contrastar el tiempo recortado necesario para inspeccionar y la flexibilidad que ofrece, el costo es compensado (Olympus, 2021d).

2.3.1. Transductores

Las sondas (transductores) a pesar de que vienen en diferentes formas, tamaños, frecuencias, número de elementos, tienen un aspecto en común, están conformadas de diminutas barras de cerámica piezoeléctrica, que se encuentran cubiertas por un polímero, que a pesar de que pueden ser de difíciles de fabricar permiten que se puedan activar individualmente. En la Figura 3 se puede visualizar como se vería la sección transversal de una sonda para arreglo de fases y las partes que la conforman (Olympus, 2022d).

Figura 3

Sección transversal de una sonda para arreglo de fases

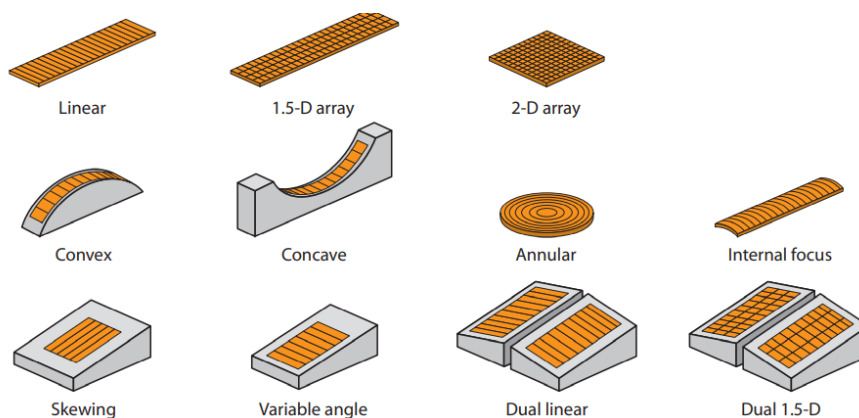


Nota. Tomado de (Olympus, 2022d)

Previamente se mencionó que la disposición de los elementos en la sonda puede variar de acuerdo con el requerimiento de aplicación, pero los arreglos lineales son las sondas para arreglo de fases más utilizadas para aplicaciones industriales. Algunos de los patrones más comunes se presentan en la Figura 4.

Figura 4

Tipos de sondas construidas para arreglo de fases



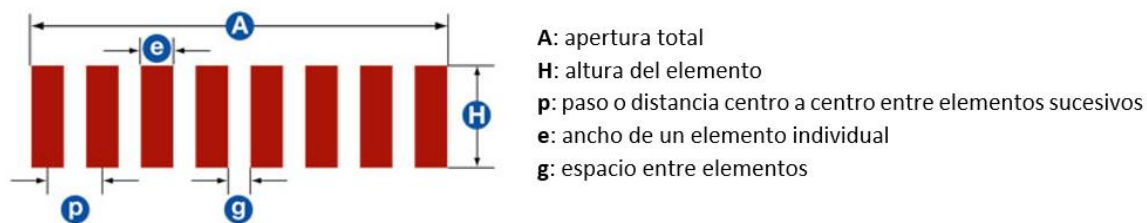
Nota. Tomado de (Olympus, 2022i)

La selección de una sonda puede variar respecto a ciertos parámetros como el tipo, debido a que hay sondas que se pueden utilizar con zapatas, también hay sondas de inmersión y de contacto directo. La frecuencia es otro aspecto a considerar puesto que se debe tomar en cuenta que al igual que con la inspección mediante ultrasonido convencional, la penetración se incrementa a frecuencias bajas mientras que la resolución y nitidez focal aumenta a frecuencias altas (Olympus, 2022f).

Otro aspecto importante es la cantidad y tamaño de los elementos, una mayor cantidad de elementos permite un mejor enfoque y dirección, pero a cambio conlleva un gran coste de procesamiento, debido a que el procesamiento de señales se da por elemento. Para el caso del tamaño, un elemento más delgado permitirá mejorar la modificación del ángulo cuando se refracta el haz acústico generado por la sonda. Como se puede suponer a mayor cantidad de elementos o a mayor tamaño de elemento se consigue una cobertura de área mayor (Olympus, 2022f).

Figura 5

Parámetros dimensionales de las sondas para arreglo de fases



Nota. Tomado de (Olympus, 2022f)

2.3.2. Acoplantes para ultrasonido

Los acoplantes para ultrasonidos son sustancias que permiten la transmisión de energía acústica por la sonda y la pieza que está inspeccionando. Por lo general los acoplantes tienen una viscosidad moderada y no son sustancias tóxicas, comercialmente se trata de geles y pastas. La importancia de esta sustancia surge cuando se sabe que las ondas de ultrasonido no se transmiten bien en el aire, además de que representan una diferencia de impedancia muy grande (lo que hace posible que se pueda detectar defectos al interior de un material), en consecuencia, por más pequeña que sea la separación entre la sonda y la pieza de inspección, se generará una transmisión ineficiente de la energía acústica (IOWA STATE UNIVERSITY, 2022).

Dependiendo de la aplicación es posible utilizar una gran variedad de sustancias, entre ellas agua, aceites automotrices, grasas o geles fijadores de cabello, las limitaciones que presentan surgen por ejemplo al tratar de realizar inspecciones en condiciones de alta temperatura (Olympus, 2022i).

2.3.3. Zapatas

Al uso de sondas de arreglo de fases se puede incorporar una zapata que se utiliza con la intención de transmitir la energía acústica de la sonda al elemento que se

está inspeccionando, de este modo se refracta un ángulo deseado debido a la diferencia de interfases como lo plantea la Ley de Snell (Olympus, 2022g).

Figura 6

Zapata para sonda de 16 elementos



Nota. Tomado de (Olympus, 2022g)

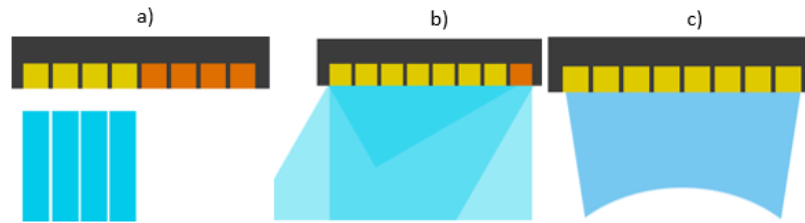
Las zapatas se pueden incluir en la calibración del equipo de inspección permitiendo así que las ondas que salen de la sonda lleguen en el ángulo adecuado a la pieza de inspección, tomado en cuenta la zapata. Además de permitir variar los ángulos la zapata ofrece ciertas ventajas, la principal es la protección de la sonda de rasguños o abrasión además que algunos fabricantes añaden características de disminución de ruido y canales de distribución de acoplante (Olympus, 2022g).

2.3.4. Leyes focales

Se conoce como ley focal a la secuencia programada de activación de elementos en la sonda que es realizada por el equipo de inspección, que permite orientar o enfocar el haz acústico resultante, las opciones de secuencia se muestran en la Figura 7.

Figura 7

Secuencia de leyes focales



Nota. a) Lineal, b) Sectorial c) Enfocada. Adaptado de (Olympus, 2022b)

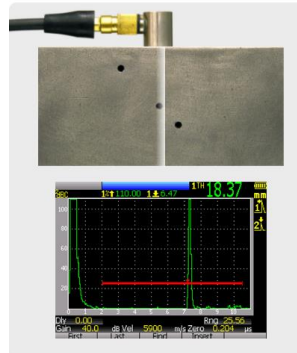
2.3.5. Presentación de datos ultrasónicos

Los equipos que se utilizan para realizar inspecciones mediante ultrasonido convencional y arreglo de fases a partir de ondas de alta frecuencia (que son de naturaleza acústica) pueden examinar la estructura interna del elemento que se está inspeccionando, lo que permite detectar defectos y discontinuidades por ejemplo, pero de nada serviría si no existe una manera adecuada para que el inspector pueda revisar los resultados obtenidos, así que existen diferentes maneras de presentar los datos tomados por la sonda, los mismos que se describen a continuación (Olympus, 2022c).

A-scan. Es la representación más simple de los datos de la forma de onda de ultrasonido, en donde el eje vertical de una cuadrícula representa la amplitud del eco mientras que el eje horizontal representa el tiempo, como se muestra en la Figura 8 (Olympus, 2022a).

Figura 8

Representación de datos A-scan

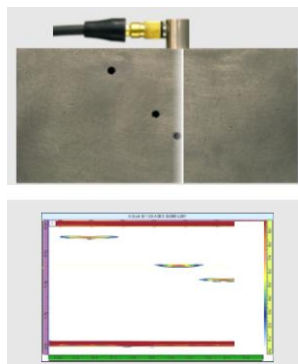


Nota. Tomado de (Olympus, 2022a)

B-scan. Permite medir la profundidad de los defectos que causen reflexión del eco con respecto a la posición inicial de los mismos, por lo general se utilizan para detectar defectos o medir espesores de corrosión. En función del tiempo o de la posición (mediante el uso de codificadores) se realizan las mediciones mientras la sonda avanza en la inspección de la pieza, es así que se puede crear una representación proporcional del defecto, como se muestra en la Figura 9 (Olympus, 2022h).

Figura 9

Representación de datos B-scan

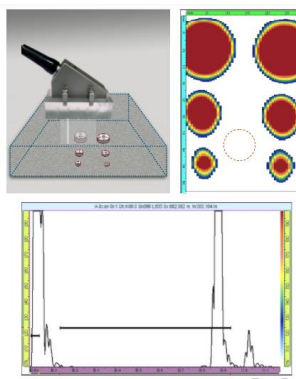


Nota. Tomado de (Olympus, 2022h)

C-scan. Se trata de una presentación de resultados de dos dimensiones, que muestra los resultados como si de una radiografía de rayos x se tratara, para el caso de piezas de estudio planas las imágenes pueden ser generadas en función de las posiciones obtenidas en x y y, para el caso de elementos cilíndricos se puede realizar un seguimiento a partir de posiciones angulares y axiales. Para poder representar los resultados mediante este método con ultrasonido convencional es indispensable contar con codificadores (encoders), pero para el caso de arreglo de fases en lugar de marcar la posición en el eje y por ejemplo, se trazan imágenes respecto a la apertura del haz (Olympus, 2021b).

Figura 10

Representación de datos C-scan



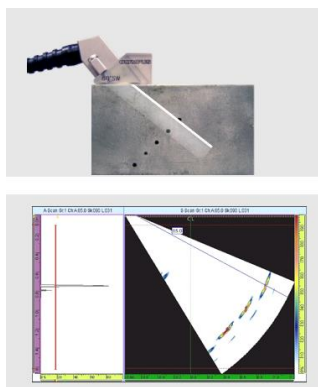
Nota. Tomado de (Olympus, 2021b)

S-scan. También conocido como escaneo sectorial, este método de presentación de resultados es particular de equipos de ultrasonido arreglo de fases, puesto que las gráficas que generan se realizan en base a la inspección mediante un abanico de ángulos dentro de un rango que están delimitado tanto por el usuario como por el tipo de sonda o zapata que se utiliza. Mientras se realiza la inspección en el rango de ángulos en la pantalla se mostrará los defectos que se han detectado, se

visualizan de manera transversal respecto a la pieza que se está inspeccionando como se muestra en la Figura 11 (Olympus, 2022e).

Figura 11

Representación de datos S-scan



Nota. Tomado de (Olympus, 2022e)

2.3.6. **OmniScan MX2**

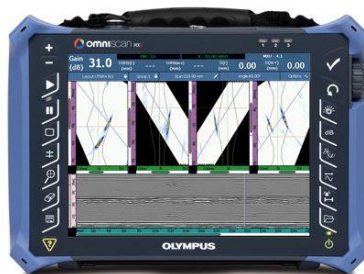
OmniScan MX2 es el equipo de ultrasonido utilizado por el centro de investigaciones “CIRT”, elaborado por la empresa Olympus, se trata de su segunda generación que en su descripción garantiza una alta tasa de adquisición y nuevas características en software que le permitirá ofrecer un mejor rendimiento tanto en la inspección manual como en la inspección automatizada que es el caso de interés. El equipo se puede utilizar para realizar ensayos no destructivos de ultrasonido tanto convencional como de arreglo de fases, con una gran capacidad de procesamiento de datos. Esta versión tiene la ventaja de poder generar reportes además de que permite guardar los resultados de la inspección para su posterior análisis mediante un software especializado llamado OmniPC (Olympus, 2021a).

El equipo fue diseñado con la intención de poder incorporar más accesorios y utilizar de la mejor manera sus capacidades, es por eso que presenta una gran cantidad

de puestos de entradas y salidas estas y algunas otras características importantes se detallan en la Tabla 1.

Figura 12

OmniScan MX2



Nota. Tomado de (Olympus, 2021a)

Tabla 1

Características técnicas del OmniScan MX2

Característica	Valor
Dimensiones	325 mm x 235 mm x 130 mm
Peso	3.2 kg
Puertos USB	3
Encoder	Encoder de 2 ejes, un conector
Pantalla	TFT LCD
Duración de batería	Mínimo 7 horas
Temperatura de operación	-20 °C a 60 °C

Nota. Tomado de (Olympus, 2021a)

2.3.7. VersaMOUSE

Diseñado para escaneos lineales codificados con sondas para ultrasonido arreglo de fases. En una esquina posee un botón que permite utilizarlo para aplicaciones de mapeo bidimensional, para hojas de fibra de carbono y planchas e inspección de corrosión. Posee un soporte que permita el ajuste de cualquier tipo de sonda o zapata con opción de sujeción con el estándar de Olympus IHC, que se trata de

unos agujeros a los laterales de la zapata para que sea sujeta, como se muestra la configuración de la Figura 13 (Olympus, 2016b).

Figura 13

VersaMOUSE con una zapata incorporada



Nota. Tomado de (Olympus, 2016b)

Las ruedas del VersaMOUSE hacen girar un codificador (encoder) lo que permite medir el desplazamiento, además de que presentan una estructura robusta resistente a superficies húmedas. Debido a la disposición de la rueda se puede desplazar la sonda solo en una dirección dependiendo de la posición en la que se coloque el soporte de sonda como se puede observar en la Figura 14. Algunas de las características más importantes se muestran en la Tabla 2.

Figura 14

Soporte de la sonda en sus dos posiciones posibles



Nota. Tomado de (Olympus, 2016b)

Tabla 2*Características técnicas del VersaMOUSE*

Característica	Valor
Longitud	170 mm (Soporte al frente) 80 mm (Soporte a un lado)
Ancho	80 mm (Soporte a un lado) 152 mm (Soporte al frente)
Altura	42 mm
Peso	0.4 kg
Encoder	8.4 pasos/mm
Longitud de cable	2.5 m

Nota. Tomado de (Olympus, 2016b)

2.3.8. Bloques de calibración

Los bloques de calibración conocidos como estándares de referencia que se utilizan cada vez que se realice una inspección por ultrasonido, los bloques vienen disponibles para calibraciones de haz angular y para calibración de espesores. Existen tres materiales que están constituidos por los estándares de calidad de acero inoxidable 304, acero 1018, y aluminio 7075-T6, los fabricantes ofrecen bloques personalizados de otros materiales dependiendo la necesidad (Olympus, 2022k).

Figura 15

Bloque de calibración NAVSHIPS cylindrical reflector 304 stainless steel



Nota. Tomado de (Olympus, 2022j)

Los bloques de calibración son rigurosamente verificados en lo que a sus dimensiones se refiere, ya que son desarrollados con la intención de que cumpla con las tolerancias especificadas por la normativa ASTM (Olympus, 2022k).

2.4. Sistemas automatizados de inspección

Con el paso del tiempo y el perfeccionamiento de los equipos de inspección haciéndolos más potentes, se han desarrollado accesorios que permitan mejorar el proceso de inspección, desde la manera de mostrar los resultados hasta la forma de posicionar defectos de manera correcta sobre la superficie de análisis.

La principal ventaja de los sistemas automatizados es la capacidad que poseen de realizar las inspecciones de manera autónoma, y gracias a que los equipos pueden guardar los datos de inspección es posible analizarlos después de que el sistema termine el proceso de inspección. La necesidad surge además cuando se tiene áreas de inspección demasiado grandes y de difícil acceso, como es el caso de planchas, tuberías y tanques, por lo general los sistemas cuentan con ruedas magnéticas que permite una mejor fijación en la superficie, en el caso de las planchas para evitar el deslizamiento y para el caso de los tanques y tuberías para poder escalar (MME Group, 2021).

Figura 16

Sistema automatizado de inspección para tuberías AGS-1



Nota. Tomado de (FORCE TECHNOLOGY, 2022)

Los sistemas automáticos permiten mejorar la velocidad de adquisición de datos (dependiendo las condiciones de inspección y la aplicación), con una alta posibilidad de

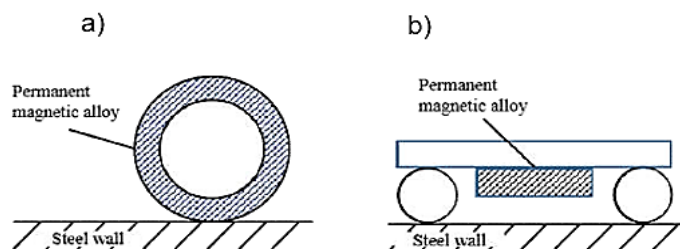
detección al ser más preciso en el desplazamiento ya que se realizará de acuerdo a las capacidades de las sonda a utilizarse (MISTRAS, 2022).

2.5. Sistemas de adherencia

Existe varios mecanismos de adhesión en materiales de acero, los cuales tienen una gran variedad de aplicaciones como robots escaladores, sistemas de inspección de tanques entre otros. Los mecanismos de adhesión se pueden clasificar en dos categorías: contacto directo con ruedas magnéticas y adhesión sin contacto utilizando un bloque magnético. El sistema de adhesión sin contacto puede mantener correctamente estable el dispositivo si es posible mantener la distancia entre el bloque magnético con la superficie de manera constante, por lo cual su implementación es difícil si no se consigue una construcción estable. Por otra parte, el sistema de adhesión directa con ruedas magnéticas permite un movimiento estable con la dificultad en el cambio de dirección, como resultado es idóneo para trayectorias en línea recta. En la Figura 17 se muestra los dos tipos de mecanismos de adhesión presentados (Ishihara, 2017).

Figura 17

Mecanismos de adhesión magnética



Nota. a) Contacto directo b) Sin contacto con el acero. Adaptado de (Ishihara, 2017)

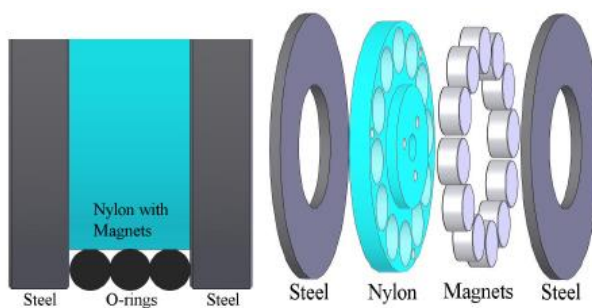
Existe una gran variedad de mecanismos basados en adhesión directa con ruedas magnéticas, donde su principal diferencia radica en el método de construcción,

así como los materiales utilizados. Para lo cual, se describe dos tipos: ruedas magnéticas utilizando imanes de neodimio y ruedas magnéticas utilizando imanes de ferrita.

Las ruedas magnéticas utilizando imanes de neodimio consiste en dos placas circulares de acero, además en la parte central se coloca un arreglo de imanes tomando en cuenta su polaridad con la finalidad de aumentar el campo magnético generado. Los imanes se colocan en una base de nylon y en el borde se coloca anillos de goma para mejorar la fricción entre la rueda y la superficie de rodadura. Los imanes están en contacto con los laterales de acero para conducir el flujo magnético hasta la superficie de trabajo. El flujo magnético varía en relación con la calidad del imán utilizado (Fernández et al., 2010).

Figura 18

Estructura de una rueda magnética utilizando imanes de neodimio



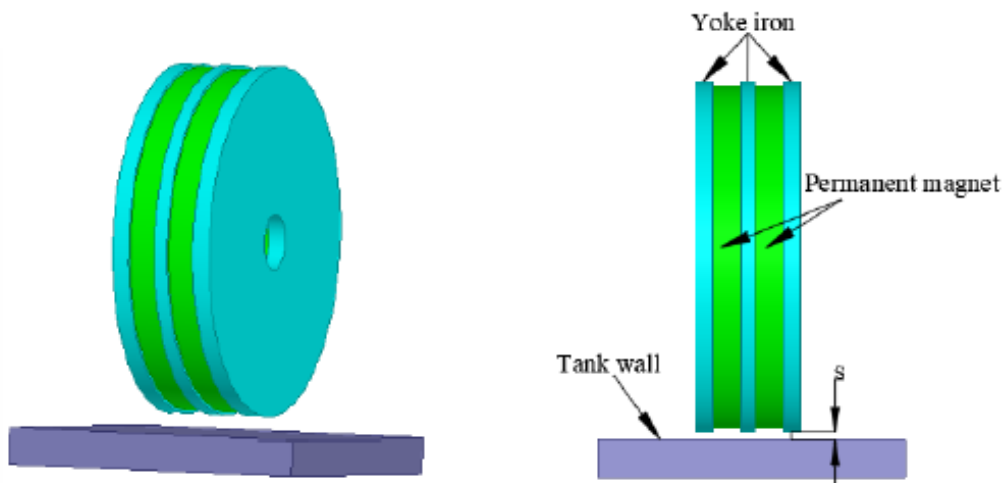
Nota. Tomado de (Fernández et al., 2010)

Las ruedas magnéticas utilizando imanes de ferrita está compuesta por dos o más placas circulares de acero, separadas por imanes permanentes. Al estar en contacto el imán permanente con las placas circulares se maximiza la fuerza de atracción con la superficie. La fuerza de atracción de la rueda está relacionada con la

calidad del imán de ferrita, de igual manera con las dimensiones y espesores de los componentes de las ruedas (Han & Qian, 2020).

Figura 19

Estructura de una rueda magnética utilizando imanes de ferrita



Nota. Tomado de (Han & Qian, 2020)

2.6. Chumaceras

La chumacera es un acoplamiento de un rodamiento de bolas radial, un sello y una carcasa de hierro fundido de alta calidad o acero prensado, que se presenta en varias formas. La superficie exterior del rodamiento y la superficie interna de la carcasa son esféricas, por lo que la unidad se alinea automáticamente. Se proporciona un sello dúplex que consiste en una combinación de un sello de caucho sintético a prueba de aceite y un deflector en ambos lados (NTN Corporation, 2015).

Según el tipo de chumacera, para la instalación sobre el eje se tiene tres métodos que se puede utilizar:

- El anillo interior al eje utilizando los tornillos de fijación en dos lugares.

- El anillo interior tiene el agujero cónico y por medio de un manguito se ajusta al eje.
- El anillo interior se fija al eje por medio de ranuras excéntricas

Figura 20

Chumacera



Nota. Chumacera de pared. Tomado de MASERVEN S.A (MASERVEN S.A., 2022)

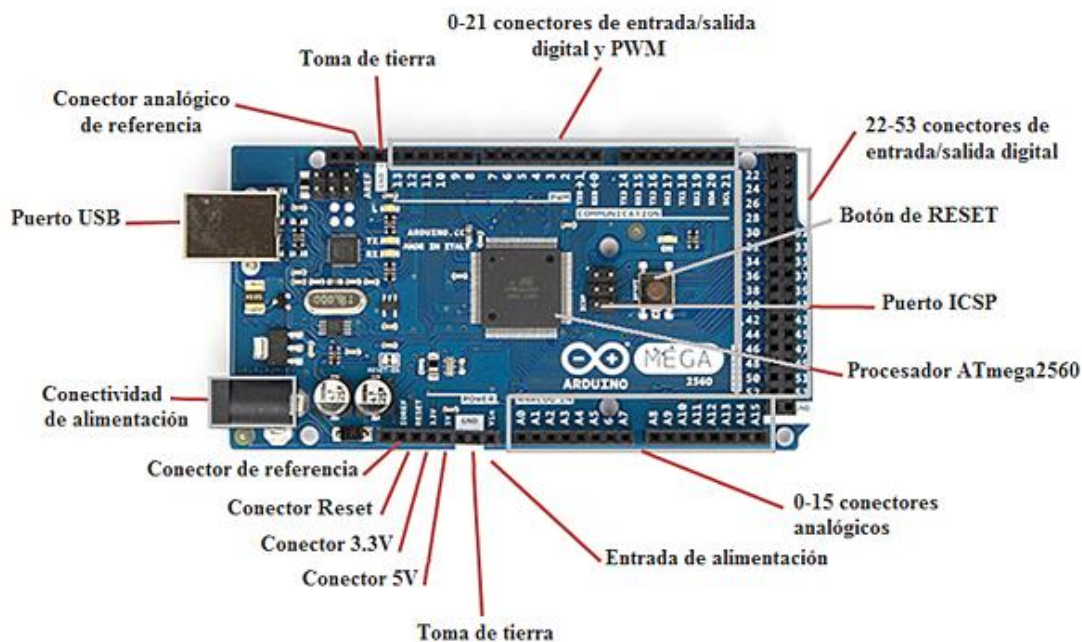
2.7. Componentes electrónicos

2.7.1. *Arduino Mega*

El Arduino Mega 2560 es una placa que dispone de 54 pines de entrada y salida digital, de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM, 16 entradas analógicas, 4 UART que son puertos serie de hardware, un oscilador de cristal con frecuencia de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio (Arduino, 2021).

Figura 21

Arduino Mega



Nota. Arduino Mega pines detallados de entrada y salida. Tomado de ENI (ENI, 2016)

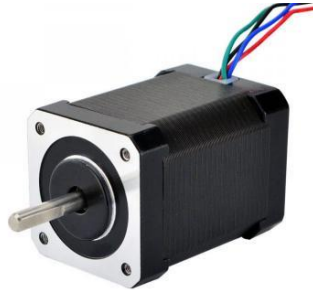
2.7.2. Motores a pasos

Un motor paso a paso convierte la energía eléctrica en potencia mecánica, es un dispositivo electromecánico síncrono sin escobillas que puede dividir la rotación completa en pasos. Al aplicar un motor paso a paso con pulsos de comandos eléctricos en la secuencia adecuada, el eje del motor gira en pasos discretos sin mecanismos de retroalimentación y permite el control preciso de la posición del motor.

Los motores paso a paso están conformados por dos partes principales que son el estator y el rotor compuestos por materiales magnéticos con cuatro y seis polos magnéticos. Además, cuenta con partes secundarias como las tapas fronteras y traseras, núcleo del rotor, cojinetes, núcleo del estator, arandelas corrugadas, eje central, tornillos, otras partes (M. Liu, 2022).

Figura 22

Motor a pasos



Nota. Tomado de (M. Liu, 2022)

2.7.3. Controlador DVR8825

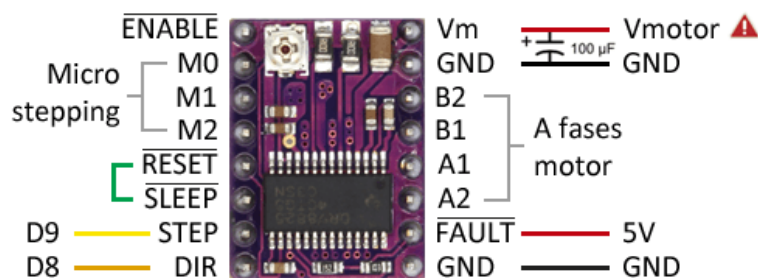
El controlador DVR8825 permite el control de motores a pasos de una manera sencilla a través de un microcontrolador u otro dispositivo de control. Tiene la característica de soportar voltajes elevados e intensidades para los motores, con la posibilidad de limitar el flujo de corriente eléctrica hacia las bobinas. Este es un dispositivo robusto ya que posee varias protecciones contra cortocircuito, sobretensión, sobreintensidad y sobre temperatura. Este controlador es frecuentemente utilizado en aplicaciones relacionadas con la robótica donde se requiere el control individual de sus ruedas y también son utilizados en otras aplicaciones (Llamas, 2016).

En la Tabla 3 se muestran las características principales del controlador DVR8825, así como la fórmula que permite la calibración del controlador con la finalidad de regular la intensidad de corriente eléctrica en los bobinados de los motores a pasos.

Tabla 3*Características del controlador DVR8825*

Característica	Valor
Intensidad máxima	2.5 A
Tensión de operación	3.3 a 5 V
Tensión de alimentación	8 a 35 V
Micro steps	Paso completo
Rs típico	0.1 Ω
Fórmula	$I_{m\acute{a}x} = 2 * V_{ref}$

Nota. Adaptado de (Llamas, 2016)

Figura 23*Controlador DVR 8825 – diagrama de conexión*

Vmotor entre 8 y 35V. Al usar alimentación externa SIEMPRE poner con GND común.

Nota. Tomado de (Llamas, 2016)

2.7.4. Servomotor

Los servomotores son motores de corriente continua, están diseñados para que se muevan en un ángulo fijo que responde a una señal de control y se mantengan en esa posición. Tienen un margen de operación que va entre 0° a 180° o 360° dependiendo la función que se le asigne. Se establece el movimiento que va a realizar mediante una señal de control PWM, en donde el ancho de pulso indica el ángulo que va a adoptar el eje. Está formado por un circuito de control, un motor de CC de imanes

permanentes con un tacómetro integral que proporciona un voltaje de salida proporcional a la velocidad y un circuito de control (PROMETEC, 2017).

Figura 24

Servomotor



Nota. Tomado de (Geek Factory, 2021)

2.7.5. Pantalla NEXTION NX3224T028

Las pantallas NEXTION son una solución para la elaboración de Interfaces Hombre – Máquina (HMI). Estos poseen un procesador integrado y una pantalla táctil con memoria interna para archivos generados con el Software NEXTION Editor. El software permite un desarrollo rápido del diseño de la interfaz mediante todas las herramientas que este proporciona. La comunicación se realiza a través de una comunicación serial TTL, por la cual se puede enviar y recibir valores utilizando cualquier tarjeta de control a través de instrucciones que reconoce la pantalla NEXTION (NEXTION, 2021a).

En la Tabla 4 se muestra las características de la pantalla NEXTION NX3224T028. Donde se muestra la resolución, RAM y otros aspectos importantes.

Tabla 4*Características pantalla NEXTION NX3224T028*

Característica	Valor
Tamaño	85 (largo) × 49,8 (ancho) × 4,6 (alto)
Tensión de funcionamiento	4.75 - 5 V
Comunicación serial	2400,9600 y 115200 bps
Área visual	7,6 mm (largo) × 43,2 mm (ancho)
Resolución	320*240
Vida útil de la retroiluminación (promedio)	>30,000 Horas
Brillo	200 nit
Memoria Flash	4 MB
Memoria RAM	3584 bytes
UCM	48 MHz
Tarjeta SD	Admite una tarjeta Micro SD máxima de 32G
Peso	32 g

Nota. Adaptado de (NEXTION, 2021b)

Figura 25*Pantalla NEXTION NX3224T028*

Nota. Tomado de (NEXTION, 2021b)

Capítulo III

3. Diseño del sistema mecánico y electrónico

El presente capítulo se enfoca en el diseño del sistema mecánico y electrónico, iniciando con la elaboración de una matriz QFD (Quality Function Deployment), para obtener las especificaciones del sistema automatizado de inspección en función de las necesidades del usuario para la correcta selección de cada uno de los sistemas. Además, se analiza los componentes que conforman cada uno de los sistemas.

3.1. Casa de la calidad

Para el desarrollo del sistema automatizado de inspección se utiliza la matriz QFD o casa de la calidad que permite relacionar cada una de las necesidades del usuario y las especificaciones técnicas con la finalidad de satisfacer sus necesidades.

3.1.1. Necesidades del usuario

Las necesidades del usuario indican los requerimientos que necesitan ser satisfechos por el sistema automatizado de inspección, por lo cual se realizó una entrevista al jefe del departamento de calidad del "CIRT". Como resultado mencionó todas las necesidades y requerimientos del sistema, las cuales se muestran en la Tabla 5. Además, se aplica una valoración de las exigencias del usuario en relación con el grado de importancia con puntuaciones del 1 al 5.

Tabla 5

Necesidades del usuario

Núm.	Necesidad	Import.
1	Movimiento sobre planchas	4
2	Precisión en la técnica de inspección	5
3	Interacción intuitiva con el usuario	4
4	Configuración sencilla de la inspección	4
5	Acople con accesorios de OLYMPUS con el sistema de inspección	5

Núm.	Necesidad	Import.
6	Sistema automático de inspección	5
7	Brindar un mejor servicio	3
8	Acoplamiento acústico con agua para la inspección	4
9	Resistente	3
10	Fácil mantenimiento	3

3.1.2. Características técnicas

Se procede a establecer las características técnicas o también conocidas como voz del ingeniero, en otras palabras, son las interpretaciones de manera técnica de las necesidades del usuario, las cuales deben ser medibles y cuantificables. A continuación, se muestra las especificaciones técnicas en la Tabla 6.

Tabla 6

Características técnicas

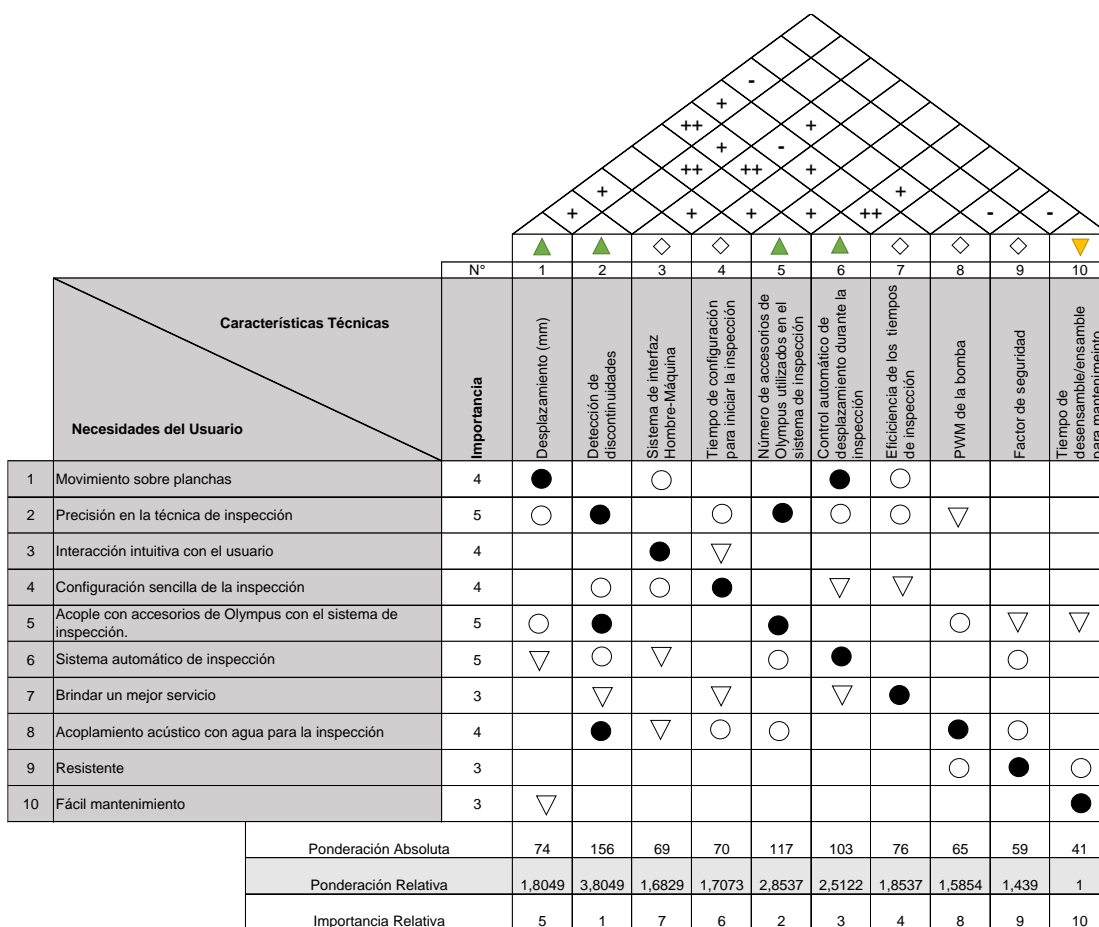
Núm.	Características técnicas
1	Desplazamiento (mm)
2	Detección de discontinuidades
3	Sistema de interfaz Hombre-Máquina
4	Tiempo de configuración para la inspección
5	Número de accesorios de OLYMPUS utilizados en el sistema de inspección
6	Control automático de desplazamiento durante la inspección
7	Eficiencia de los tiempos de inspección
8	PWM de la bomba
9	Factor de seguridad
10	Tiempo de desensamble/ensamble para mantenimiento

3.1.3. Matriz QFD

A continuación, se presenta en la Figura 26 la matriz QFD donde se introduce de manera sistemática las necesidades del usuario y las características técnicas con la finalidad de relacionarlas, de esa manera priorizar la satisfacción de las necesidades en función de su importancia.

Figura 26

Matriz QFD



En la Tabla 7 se muestra los resultados obtenidos de la Matriz QFD, donde se establece la importancia relativa de mayor a menor de las características técnicas para la elaboración del sistema automatizado de inspección.

Tabla 7*Resultados de la matriz QFD*

Características técnicas	Importancia
Detección de discontinuidades	1
Número de accesorios de Olympus utilizados en el sistema de inspección	2
Control automático de desplazamiento durante la inspección	3
Eficiencia de los tiempos de inspección	4
Desplazamiento (mm)	5
Tiempo de configuración para la inspección	6
Sistema de interfaz Hombre-Máquina	7
PWM de la bomba	8
Factor de seguridad	9
Tiempo de desensamble/ensamble para mantenimiento	10

3.2. Estructura funcional del sistema

Con la intención de explicar y solucionar problemas que tengan que ver con diseño, es de mucha ayuda utilizar el concepto de estructura funcional, que divide el sistema en subsistemas mostrando así las entradas y salidas para cada uno de ellos y sus interacciones entre sí (Riba, 2002).

La intención de la estructura funcional es la consecución de dos objetivos primordiales, el primero es agrupar las funciones del sistema en módulos, lo ideal sería que cada función sea realizada por un módulo. El segundo objetivo es establecer interfases adecuadas entre módulos, es decir mostrar cualquier medio de interacción entre módulos y que se lo pueda representar de la mejor manera cc.

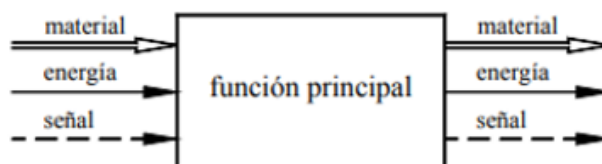
Los símbolos utilizados son los siguientes:

- Funciones: se representa con un rectángulo de línea continua.

- Flujo de material y dirección: se representa con flecha de doble línea continua.
- Flujo de energía y dirección: se representa con flecha de línea continua.
- Flujo de señal y dirección: se representa con flecha de línea discontinua.
- Sistema, subsistema, módulo: polígono de línea entrecortada.

Figura 27

Simbología - estructura funcional



Nota. Tomado de (Riba, 2002)

Las principales funciones del sistema son:

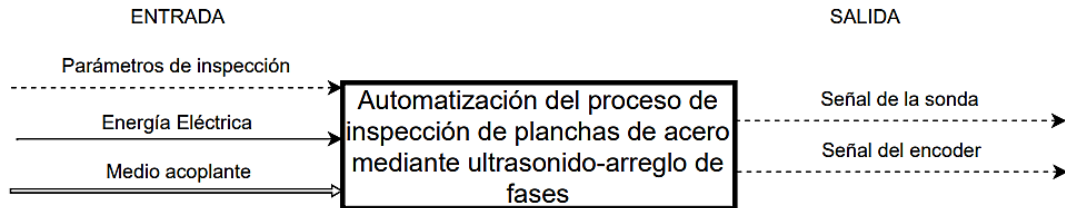
- Recepar los parámetros de inspección a partir de un control.
- Desplazarse con precisión sobre la plancha.
- Realizar un barrido con la sonda utilizando el VersaMOUSE.
- Operar en diferentes modos.
- Mostrar datos de desplazamiento en la pantalla.

3.2.1. Función global y despliegue de estructura funcional

Para empezar, se determina la función global que en este caso es la automatización del proceso de inspección de planchas de acero mediante ultrasonido-arreglo de fases, que se lo representa en la Figura 28.

Figura 28

Función global del sistema



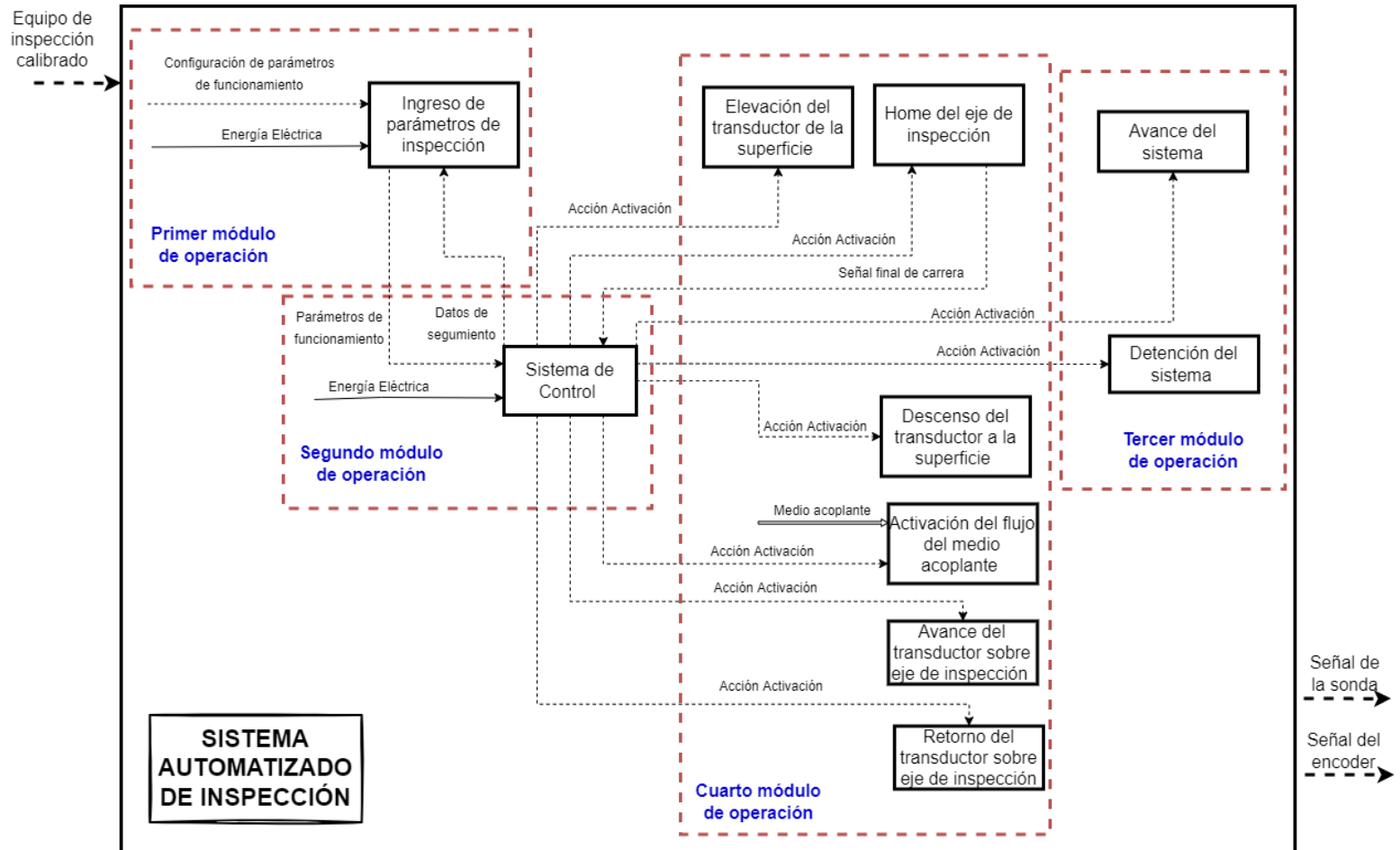
A partir de la función global y de las diferentes funciones que debe cumplir el sistema en general se ha podido clasificar en los siguientes módulos de operación principales como son:

- Ingreso y presentación de parámetros de funcionamiento.
- Control y procesamiento de datos.
- Desplazamiento sobre la plancha.
- Barrido utilizando la sonda acoplada al VersaMOUSE.

Los cuatro módulos de funcionamiento se encuentran detallados en la Figura 29, donde se puede visualizar la interacción entre los mismos, las entradas que requieren para cumplir sus funciones y las salidas que proporcionan.

Figura 29

Estructura funcional del sistema automatizado de inspección



3.3. Arquitectura del Sistema

Mediante los resultados obtenidos de la matriz QFD y la estructura funcional del sistema de inspección, se establece los sistemas y subsistemas del proyecto, de igual manera se adiciona cada una de las funciones que deben realizar, con la finalidad de satisfacer todas las necesidades del usuario.

Adicionalmente, previo a establecer los sistemas y subsistemas, de acuerdo con la información recolectada el sistema de inspección debe poseer dos ejes de movimiento para el escaneo en planchas. Además, considerar varios aspectos importantes como adherencia en superficies húmedas y estabilidad en superficies ferromagnéticas para mantener la sonda paralela a la superficie de inspección con la finalidad de recolectar los datos de manera idónea.

Considerando los puntos mencionados se establece los sistemas y subsistemas del sistema automatizado de inspección en la Tabla 8.

Tabla 8

Sistemas y subsistemas

Núm.	Sistema	Subsistema	Funciones
1	Módulo de avance	Movimiento de avance y adherencia.	Permite el traslape de la sonda, mantiene el sistema de inspección adherido en superficies húmedas y permite estabilidad en superficies ferromagnéticas
		Flujo del medio acoplante	Control de flujo del acoplante acústico entre la sonda y la superficie de inspección

Núm.	Sistema	Subsistema	Funciones
2	Brazo de inspección	Movimiento del eje de inspección	Permite el avance de la sonda en el eje de inspección
		Diseño del acople con el accesorio VersaMOUSE	Mecanismo que permite acoplar y utilizar el accesorio VersaMOUSE para la inspección
3	Sistema eléctrico y electrónico	Tarjeta de control	Contiene la programación para el control de todo el sistema de inspección
		Suministro de energía	Abastece de energía eléctrica
4	Interacción con el usuario	HMI	Permite la selección del modo de operación, establecimiento de parámetros de inspección, y control de la inspección automática
		Control remoto	Permite la manipulación de movimiento cada uno de los ejes de inspección

3.4. Generación y selección de conceptos

La generación y selección de conceptos trata de un proceso que permite evaluar diferentes posibles soluciones para satisfacer las necesidades del usuario y otros criterios impuestos. Como resultado de la comparación entre las características fuertes y débiles de cada uno de los conceptos, y seleccionando uno o más alternativas para su posterior investigación, prueba o desarrollo.

3.4.1. Módulo de avance

Movimiento de avance y adherencia. El subsistema de avance y adherencia tiene dos funcionalidades principales: (a) la primera es realizar un traslape de la sonda en relación con su ancho activo o dimensión transversal de al menos el 10% en base a la NORMA CCH 70-4 (Study group CCH 70-4, 2014), por lo tanto, el avance debe ser constante y realizar un desplazamiento con una resolución en milímetros debido al tamaño de las sondas y (b) la adherencia a superficies húmedas, así como la estabilidad en superficies ferromagnéticas. Esto se debe a que se utiliza una inspección por inmersión, donde el transductor y la pieza a inspeccionar se encuentra total o parcialmente sumergida en acoplante como agua y que además posee otros aditivos, como resultado la plancha se encuentra húmeda y en ocasiones el coeficiente de fricción es mínimo, por esta razón es necesario tener un sistema que permita tener una mayor adherencia a las planchas (Olympus, 2016a).

Con estos preámbulos y de acuerdo con la investigación realizada existe algunas alternativas: ruedas magnéticas utilizando un arreglo de imanes de neodimio, ruedas magnéticas utilizando imanes ferrita y ruedas de caucho con adhesión sin contacto mediante un bloque magnético las cuales se ha descrito en la fundamentación teórica. Se selecciona la mejor alternativa aplicando una matriz de filtrado de conceptos. Para lo cual, se aplica criterios de selección con el siguiente código de evaluación:

- + “mejor que”
- 0 “igual a”
- - “peor que”

Tabla 9*Filtrado de conceptos de movimiento de avance y adherencia*

Criterios de selección	Conceptos		
	Ruedas magnéticas utilizando un arreglo de imanes de neodimio	Ruedas magnéticas utilizando imanes ferrita	Ruedas de caucho y adhesión sin contacto mediante un bloque magnético
Adherencia	+	0	0
Estabilidad	0	+	-
Durabilidad	+	0	0
Flexibilidad de movimiento	+	+	-
Dificultad de manufactura	0	0	+
Peso	0	0	+
Facilidad de mantenimiento	+	+	-
Costo	-	+	0
Suma +	4	4	2
Suma 0	3	4	3
Suma -	1	0	3
Evaluación neta	3	4	-1
Lugar 1	2	1	3
¿Continuar?	Revisar	Si	No

Como resultado de la matriz de filtrado de conceptos de la Tabla 9, dos alternativas son viables: las ruedas utilizando un arreglo de imanes de neodimio y ruedas magnéticas utilizando imanes ferrita. Por tal motivo, es necesario aplicar una matriz de evaluación de conceptos para diferenciar de mejor manera cada una de las alternativas. Además, se aplica un código de evaluación en una escala del 1 al 5, siendo 1 la calificación mínima y 5 la calificación máxima, finalmente se asigna un peso a cada criterio de selección.

Tabla 10*Selección de conceptos de movimiento de avance y adherencia*

Criterios de selección	Conceptos				
	Ruedas magnéticas utilizando un arreglo de imanes de neodimio			Ruedas magnéticas utilizando imanes ferrita	
	Peso	Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada
Adherencia en superficies húmedas	15%	4	0,60	3	0,45
Estabilidad	15%	3	0,45	5	0,75
Durabilidad	10%	4	0,40	3	0,30
Flexibilidad de movimiento	5%	3	0,15	4	0,20
Dificultad de manufactura	10%	3	0,30	3	0,30
Requiere una configuración específica	10%	4	0,40	2	0,20
Peso	5%	3	0,15	4	0,20
Facilidad de mantenimiento	5%	3	0,15	4	0,20
Fuerza del campo magnético	10%	4	0,40	2	0,20
Costo	15%	2	0,30	5	0,75
	Total		3,30	3,55	
	Lugar		2	1	
	¿Continuar?		No	Desarrollar	

Como resultado de la selección de conceptos, la mejor alternativa son las ruedas magnéticas utilizando imanes ferrita, que ayudan a tener una mejor adherencia en superficies húmedas y estabilidad en superficies ferromagnéticas.

3.4.2. Brazo de inspección

Movimiento del eje de inspección. El brazo de inspección es el encargado de realizar el barrido con la sonda para la adquisición de datos de la superficie a inspeccionar. Además, se encuentra el mecanismo de acople con el accesorio VersaMOUSE de OLYMPUS, por tal motivo debe ser resistente y tener precisión en el

avance de la sonda. De modo que se realiza un filtrado de conceptos para definir la mejor alternativa de diseño.

Las alternativas propuestas son: movimiento con correa, movimiento con tornillo sin fin y movimiento con cadena. Además, se establece varios criterios para la selección de concepto de la Tabla 11.

Tabla 11

Filtrado de conceptos de movimiento del eje de inspección

Criterios de selección	Conceptos		
	Movimiento con correa	Movimiento con tornillo sin fin	Movimiento con cadena
Control de posición	0	0	0
Transmisión de movimiento	0	+	+
Durabilidad	-	+	+
Capacidad de carga	0	+	+
Económico	0	0	-
Facilidad de manufactura	0	+	-
Facilidad de mantenimiento	0	+	0
Suma +	0	5	3
Suma 0	6	2	2
Suma -	1	0	2
Evaluación neta	-1	5	1
Lugar 1	3	1	2
¿Continuar?	No	Si	No

De acuerdo con el filtrado de conceptos de la Tabla 11, la alternativa más favorable es la utilización de un mecanismo de movimiento con tornillo sin fin y tuerca, con la finalidad de tener un excelente control de la posición y capacidad de carga para poder trasladar el mecanismo de acople del accesorio VersaMOUSE.

Diseño del acople con el accesorio VersaMOUSE. El acople con el accesorio VersaMOUSE tiene varios aspectos a considerar en relación con su funcionalidad, un

punto importante es que este accesorio posee un encoder en una rueda que permite visualizar el recorrido del eje de inspección directamente en el equipo de inspección OMNISCAN MX2. De manera que para efectuar un barrido es necesario levantar el accesorio de la superficie de inspección para realizar un traslape, seguido se debe descender el accesorio hasta que las ruedas y la sonda entren en contacto con la superficie. Como resultado, se debe añadir un mecanismo que permita realizar el proceso mencionado anteriormente, así como el acople del accesorio (Olympus, 2016b).

Se establece dos alternativas para el acople del VersaMOUSE las cuales son: eje con motor a pasos utilizando un tornillo sin fin y un mecanismo con servomotor para el diseño del acople con el accesorio VersaMOUSE.

Tabla 12

Filtrado de conceptos del acople con el accesorio VersaMOUSE

Criterios de selección	Conceptos	
	Eje con motor a pasos y tornillo sin fin	Mecanismo con servomotor (leva)
Capacidad de carga	0	0
Rango de elevación/descenso	+	0
Peso	+	0
Compacto	0	+
Facilidad de manufactura	0	+
Facilidad de control	0	+
No requiere componentes extras	-	+
Menor consumo de energía	0	+
Suma +	2	5
Suma 0	5	3
Suma –	1	0
Evaluación neta	1	5
Lugar 1	2	1
¿Continuar?	No	Si

De acuerdo con el resultado de la matriz de filtrado de la Tabla 12, se concluye que el mecanismo tipo leva utilizando un servomotor es viable debido a aspectos importantes como la facilidad de control, consumo de energía, que sea más compacto y finalmente debido a que la distancia de elevación/descenso del accesorio es mínima, resulta una alternativa muy favorable.

3.4.3. Sistema eléctrico y electrónico

Tarjeta de control. La tarjeta de control es la encargada de realizar las operaciones de cada una de las funcionalidades del sistema automático de inspección, este debe controlar drivers de motores a pasos, servomotores, poseer entradas analógicas, puertos de comunicación por lo cual se realiza un filtrado de las siguientes tarjetas de control: raspberry pico, Arduino Mega y Arduino UNO. Al mismo tiempo se establece los siguientes criterios de selección: disponibilidad, velocidad de operación, puertos de comunicación serial, memoria, comunidad, compatibilidad, entradas/salidas digitales y análogas.

Tabla 13

Filtrado de conceptos de la tarjeta de control

Criterios de selección	Conceptos		
	Tarjetas de control		
	Raspberry pico	Arduino Mega	Arduino UNO
Disponibilidad	-	+	+
Velocidad de operación	+	0	0
Envío de datos por comunicación serial.	0	0	0
Memoria	+	0	-
Comunidad	-	+	+
Compatibilidad	0	+	+
Entradas/salidas digitales y análogas.	0	+	0
Suma +	2	4	3
Suma 0	3	3	3
Suma -	2	0	1

Criterios de selección	Conceptos		
	Tarjetas de control		
	Raspberry pico	Arduino Mega	Arduino UNO
Evaluación neta	0	4	2
Lugar 1	3	1	2
¿Continuar?	No	Si	No

Como resultado de la matriz de filtrado de la Tabla 13 de conceptos de tarjetas de control se selecciona el microcontrolador Arduino Mega que tiene una gran compatibilidad con la mayor parte de elementos electrónicos en relación con el voltaje de operación, entradas y salidas.

3.4.4. Interacción con el usuario

Interfaz Hombre - Máquina. El diseño de la Interfaz Hombre – Máquina (HMI) es muy importante, ya que permite el control de cada uno de los parámetros del sistema automático de inspección, así como la visualización del desplazamiento de cada uno de los ejes, su trayectoria, el control del flujo de acoplante, la configuración para el inicio de la inspección y muchos otros aspectos.

Se realiza una matriz de filtrado con las siguientes alternativas: pantalla touch Tft 2.8" HX8347D, pantalla touch NEXTION 2.8", pantalla touch Tft SPI ILI9341 2.8". Se establece criterios de aceptación como disponibilidad, facilidad de comunicación, programación, compatibilidad y costo.

Tabla 14*Filtrado de conceptos de pantallas TFT*

Criterios de selección	Conceptos		
	Pantallas		
	Pantalla touch Tft 2.8" HX8347D	Pantalla touch NEXTION 2.8"	Pantalla touch Tft SPI ILI9341 2.8"
Disponibilidad	0	0	0
Facilidad de comunicación	0	+	0
Comunidad	0	+	0
Programación	0	+	-
Compatibilidad	+	+	0
Costo	+	0	+
Suma +	2	4	1
Suma 0	4	0	4
Suma -	0	0	1
Evaluación neta	2	4	0
Lugar 1	2	1	3
¿Continuar?	No	Si	No

De acuerdo con la Tabla 14 la alternativa seleccionada es la pantalla touch NEXTION de 2.8". Esta alternativa es muy favorable, ya que la conexión y comunicación con la tarjeta de control es más sencilla que las otras alternativas, también la programación es más sencilla, ya que posee un software que permite un diseño intuitivo y sencillo a la vez. Además, de poseer una gran comunidad acerca de la implementación de las pantallas NETXION.

3.5. Diseño mecánico

En la siguiente sección se representa el diseño mecánico de cada uno de los módulos y subsistemas del proyecto, a través de la aplicación de métodos de prototipado rápido como modelado 3D, simulaciones de movimiento de mecanismos y complementado con análisis CAE en el estudio de la integridad de la estructura del sistema, y otros componentes.

Para empezar el diseño se analiza varias alternativas del material a utilizar como aluminio, acero estructural y acero inoxidable. Para lo cual se estable los siguientes criterios de selección: propiedades mecánicas, disponibilidad, facilidad de manufactura, peso y costo. Para la selección de las alternativas se establece una tabla de selección de conceptos utilizando pesos en cada criterio como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15

Selección de concepto del material a utilizar

Criterios de selección	Conceptos						
	Aluminio			Acero estructural		Acero inoxidable	
	Peso	Calif.	Eval. ponderada	Calif.	Eval. ponderada	Calif.	Eval. ponderada
Propiedades mecánicas	15%	3	0,45	3	0,45	4	0,60
Disponibilidad	30%	3	0,90	5	1,50	3	0,90
Facilidad de manufactura	30%	3	0,90	4	1,20	4	1,20
Peso	10%	4	0,40	3	0,30	3	0,30
Costo	15%	3	0,45	4	0,30	2	0,30
	Total		3,10		3,75		3,30
	Lugar		3		1		2
	¿Continuar?		No		No		Si

La alternativa más idónea a utilizar es un acero estructural y de acuerdo con la disponibilidad del material se utiliza un acero estructural ASTM A36. En la Tabla 16 se muestra sus propiedades mecánicas.

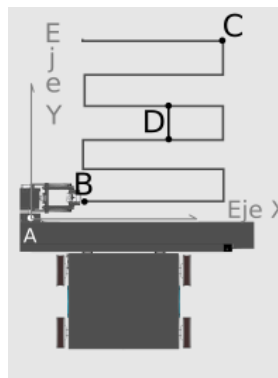
Tabla 16*Propiedades mecánicas acero ASTM A36*

Propiedad	Valor
Módulo de elasticidad	200 <i>GPa</i>
Resistencia última	400 <i>MPa</i>
Resistencia a la fluencia	248 <i>MPa</i>

Nota. Tomado de (R. L. Mott, 2009)

3.5.1. Brazo de inspección

Diseño del acople con el accesorio VersaMOUSE. Para poder aprovechar de mejor manera los accesorios disponibles, se utiliza el VersaMOUSE, que además de proporcionar un ajuste adecuado para la sonda y la superficie de inspección, incluye un encoder, el mismo que permitirá presentar los resultados de inspección respecto a ubicación en lugar de respecto al tiempo.

Figura 30*Estrategia de inspección*

La estrategia de inspección se muestra en la Figura 30 consiste en desplazar la sonda desde el punto B hasta C, inspeccionando de manera paralela al eje de inspección (eje x) permitiendo así que las ruedas del encoder (Figura 31) del VersaMOUSE marquen la posición en el OmniScan MX2, el inconveniente surge al

momento de avanzar en la inspección una distancia D al siguiente tramo en el eje de avance (eje y), puesto que las ruedas del VersaMOUSE se desplazan solo en una dirección.

Figura 31

Ruedas del encoder del VersaMOUSE

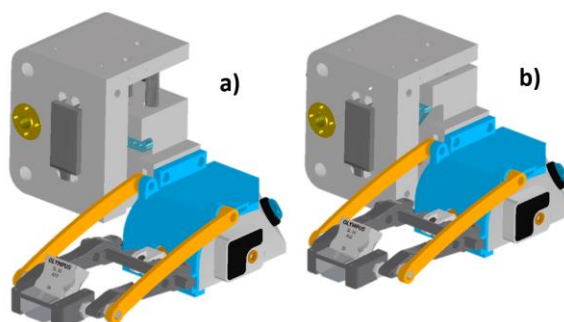


La propuesta de la estrategia de inspección debe ser automatizada, considerando aspectos importantes como la elevación/descenso del accesorio para el posterior avance de este. Es crucial además detener el movimiento del eje de inspección completamente antes de la elevación o descenso con la finalidad de evitar que el encoder del VersaMOUSE marque una posición donde la sonda no está tomando datos.

Selección del motor. El diseño desarrollado se muestra en la Figura 32 , la leva está conformada por un brazo de aluminio acoplado a un servo motor, que al momento de girar elevará el seguidor. En el seguidor se montará el VersaMOUSE para que pueda ser levantado.

Figura 32

Representación del mecanismo tipo leva diseñado

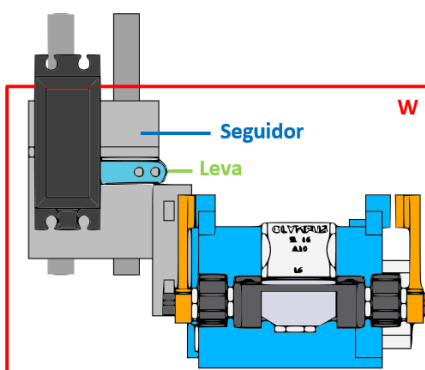


Nota. a) Descenso b) Elevación

Es necesario calcular la fuerza requerida para levantar la carga que representa el seguidor y el VersaMOUSE, cuyo peso viene representado por la letra W . Ambos se muestran encerrados en un recuadro rojo en la Figura 33.

Figura 33

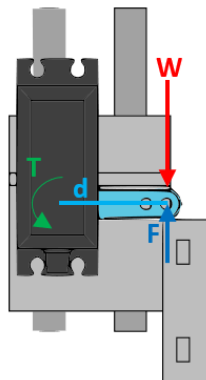
Representación del peso a levantar y de los elementos del mecanismo



Considerando el peso W se puede realizar un diagrama de cuerpo libre donde se puede visualizar las fuerzas que interactúan en el mecanismo, para posteriormente calcular el torque requerido por parte del motor.

Figura 34

Diagrama de cuerpo libre del mecanismo



Para realizar los cálculos son necesarios los datos de las masas de los cuerpos que interactúan en el mecanismo, los mismos se encuentra detallados en la Tabla 17.

Tabla 17

Masas que interactúan en el mecanismo

Ítem	Componente	Representación	Valor
1	VersaMOUSE	m_v	0.400 kg
2	Seguidor	m_s	0.093 kg
3	Soporte del mecanismo	m_m	0.307 kg
4	Tornillo sin fin	$m_{tornillo}$	0.187 kg
5	Carga extra	m_e	0.700 kg

Para poder determinar el torque requerido por el motor para que funcione el mecanismo, primero es necesario calcular la fuerza F , a partir del diagrama de cuerpo libre de la Figura 34:

$$\sum F_y = 0$$

$$F - W = 0$$

$$F = W$$

W no es más que el peso que se calcula mediante la (1):

$$W = m \cdot g \quad (1)$$

Donde la masa m va a ser el resultado de sumar las masas del VersaMOUSE y del seguidor, se ha decidido considerar una carga extra debida al líquido acoplante (agua), manguera y los cables utilizados en el proceso, por lo tanto, reemplazando en la Ecuación (1):

$$W = F = m \cdot g$$

$$F = (m_V + m_s + m_e) \cdot g$$

$$F = (0.4 + 0.093 + 0.7) \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 11.70 \text{ N}$$

El torque necesario para levantar este peso se calcula a partir de Ecuación (2).

$$T = F \cdot d \quad (2)$$

Donde T es el torque del motor necesario y d es la distancia entre el centro del eje del motor y el extremo del brazo del acople que actuará como leva, que en este caso es 24 mm, reemplazando en la Ecuación (2) se obtiene:

$$T = 11.70 \text{ N} \cdot 0.024 \text{ m}$$

$$T = 0.281 \text{ Nm}$$

Por lo general el torque en el eje de los servomotores se expresa en $\text{kgf} \cdot \text{cm}$, así que para conversión de unidades se tiene:

$$T = 0.281 \text{ N m} \cdot \frac{1 \text{ kgf}}{9.81 \text{ N}} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$$

$$T = 2.86 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

El torque del motor a seleccionar debe ser de mínimo $2.86 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$, hay que considerar que existe la opción de acoplar sondas y zapatas de mayor tamaño (en el caso de que sean adquiridas por la empresa en un futuro), por lo tanto se ha decidido seleccionar un motor con un torque mayor, tomando en cuenta además que la estructura interna del servo motor seleccionado es más robusta, al contar con un sistema de reducción mediante engranes metálicos, contrastando con las opciones de menor torque cuyos engranes son construidos en plástico. De este modo se puede garantizar más fiabilidad al funcionamiento del mecanismo, evitando posibles daños inmediatos o a corto plazo al tratarse de un mecanismo de funcionamiento continuo.

El servomotor seleccionado es el MG996R el mismo que se muestra en la Figura 35 sus características se detallan en la Tabla 18, la principal característica de interés es el torque, que a 6 V es de $11 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$.

Figura 35

Servomotor MG996R



Nota. Tomado de (TowerPro, 2022)

Tabla 18*Especificaciones técnicas del servomotor MG996R*

Característica	Valor
Peso	55 gr
Torque	11 kgf·cm
Velocidad	0.14 s/60°
Voltaje de operación	4.8 V – 7.2 V
Corriente	0.5 A - 0.9 A
Temperatura de funcionamiento	0 °C - 55 °C

Nota. Tomado de TowerPro Online Shop. Tomado de (TowerPro, 2022)

Análisis del acople con el accesorio VersaMOUSE. El acople del accesorio VersaMOUSE posee dos partes: el soporte del mecanismo; y el mecanismo de elevación y descenso (seguidor). En la primera parte se realiza el análisis del seguidor, se considera que el VersaMOUSE posee dos componentes horquilla principales que son: el cuerpo del VersaMOUSE con un peso de $m_{cv} = 0.3 \text{ kg}$ y la ajustable $m_h = 0.1 \text{ kg}$. Además, en la Tabla 17 se considera una carga extra $m_e = 0.7 \text{ kg}$ de los componentes que se incorporan en el VersaMOUSE. Considerando los pesos mencionados la distribución de cargas en el mecanismo de elevación y descenso se muestra en la Figura 36.

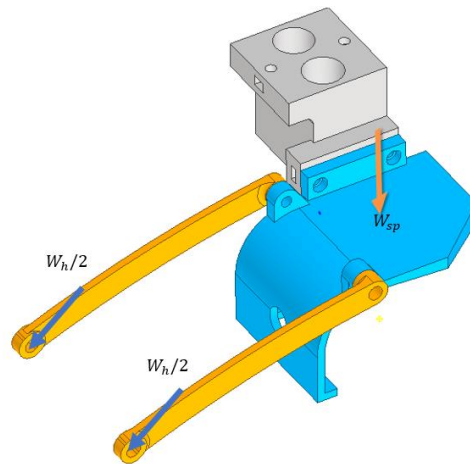
Se calcula las fuerzas que actúan en el seguidor.

$$W_{sp} = (m_{cv} + m_e)g = (0.3\text{kg} + 0.7\text{kg})(9.81\text{m/s}^2) = 9.8\text{N}$$

$$W_h = m_h * g = 0.1\text{kg} * 9.81\text{m/s}^2 = 0.98\text{N}$$

Figura 36

Fuerzas que actúan en el seguidor

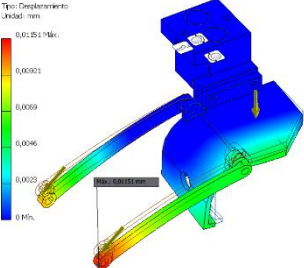
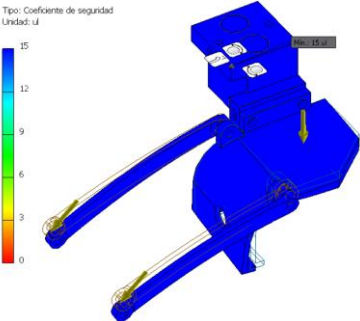


En la Tabla 19 se muestra los resultados del análisis de elementos finitos utilizando el Software Inventor. Además, se establece como material de construcción el PET-G, el cual posee unas excelentes características mecánicas como resistencia al desgaste, fuerte resistencia ante impactos, resistencia a agentes oxidantes y una gran resistencia mecánica. (Filament2Print, 2019)

Tabla 19

Análisis mecánico del seguidor del VersaMOUSE

Figura	Análisis	Resultado
<p>Resultado del análisis de elementos finitos de tensión de Von Mises. Se muestra un modelo 3D del seguidor con una escala de color que indica los niveles de tensión. La leyenda indica: Tipo: Tensión de Von Mises, Unidad: MPa. Los valores de la escala son: 0,019n, 0,122, 0,2441, 0,3661, 0,4881, 0,6101 Mbar.</p>	Tensión de Von Mises	$\sigma_{max} = 0.6 \text{ MPa}$

Figura	Análisis	Resultado
	Desplazamiento	$y_{max} = 0.011 \text{ mm}$
	Coeficiente de seguridad	$N = 15$

De acuerdo con la Tabla 19 la deflexión máxima es de 0.011 mm y un factor de seguridad de 15, de acuerdo con el libro de Robert Mott, para cargas estáticas el factor de seguridad deber ser mayor a 2, como resultado se tiene un diseño seguro.

En la se muestra la distribución de las cargas que actúan en el soporte del mecanismo como el peso del mecanismo de elevación y descenso (seguidor) con todos sus componentes mostrados en la Tabla 17 y el peso del servo m_{servo} de la Tabla 18.

Se calcula la fuerza que actúa en el soporte del mecanismo mediante la Ecuación (3).

$$W_{sm} = (m_v + m_s + m_e + m_{servo}) * g \quad (3)$$

$$W_{sm} = (0.4kg + 0.093kg + 0.7kg + 0.055kg)(9.81m/s^2) = 12.44 \text{ N}$$

Figura 37

Fuerzas que actúan en el soporte del mecanismo

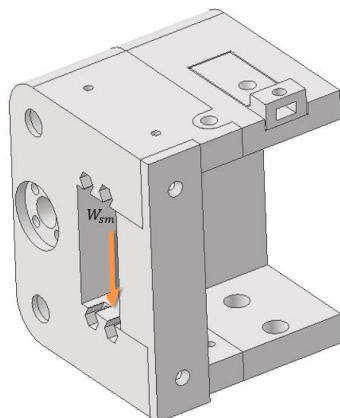
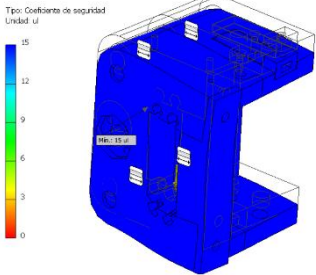


Tabla 20

Análisis mecánico del soporte del mecanismo

Figura	Análisis	Resultado
	Tensión de Von Mises	$\sigma_{max} = 0.1529 MPa$
	Desplazamiento	$y_{max} = 9.22 \times 10^{-5} mm$

Figura	Análisis	Resultado
	Coeficiente de seguridad	$N = 15$

De acuerdo con la Tabla 20 la deflexión máxima es de $9.22 \times 10^{-5} \text{ mm}$ y el factor de seguridad es 15, de acuerdo con el libro de Robert Mott, para cargas estáticas el factor de seguridad debe ser mayor a 2 por lo tanto el diseño es seguro.

Movimiento del eje de inspección. En función a los resultados de la Tabla 11 de selección de conceptos, la alternativa seleccionada se refiere a la implementación de un sistema de movimiento a través de un tornillo sin fin. Para poder proporcionar movimiento a este mecanismo se ha decidido utilizar un motor a pasos por su facilidad de control mediante drivers y además por su precisión en el desplazamiento.

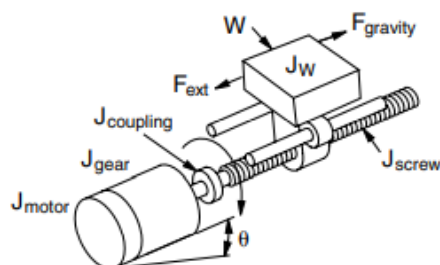
Para seleccionar el motor a pasos más adecuado para el mecanismo de tornillo sin fin, se ha tomado como base el proceso de selección propuesto por el manual de motores a pasos de la tienda Automation Direct en su línea Sure Step. El manual que se encuentra en el Anexo 1 sugiere un proceso para la selección de un motor a pasos considerando la naturaleza del proceso para el cual va a ser utilizado, entre algunas opciones presenta mecanismos de transmisión de movimiento como piñón cremallera, engranes, tornillo sin fin, poleas y cadenas.

El proceso para realizar los cálculos para la selección del motor adecuado se describirá a continuación.

Primero es necesario tomar en cuenta las variables que afectan al proceso, las mismas que en el catálogo tomado de ejemplo lo presentan como se muestra en la Figura 38, para el caso del módulo de inspección se realiza un diagrama equivalente, el mismo que se muestra en la Figura 39.

Figura 38

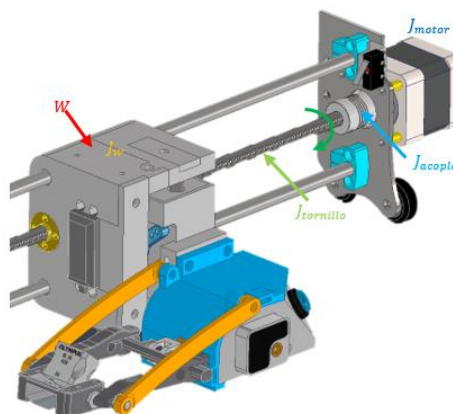
Diagrama de implementación de un motor a pasos con un tornillo sin fin



Nota. Tomado de stepping systems user manual de Automation Direct.

Figura 39

Diagrama equivalente para el módulo de inspección



Primero es necesario conocer el peso W que va a ser trasladado mediante el tornillo sin fin, que se calcula a partir de la suma de todas las masas m que se describen en la Tabla 17 a excepción de la masa del tornillo sin fin.

$$W = m \cdot g \quad (4)$$

$$W = (m_V + m_S + m_m + m_e) \cdot g$$

$$W = (0.4 + 0.093 + 0.307 + 0.7) \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W = 14.72 \text{ N}$$

En este punto es necesario conocer la velocidad a la que se desea que se desplace la carga a través del tornillo sin fin, hay que considerar que esta velocidad es la misma a la que se va a realizar la inspección de la plancha, con base en la norma CAHIER DES CHARGES SPECIFICATION FOR INSPECTION OF STEEL CASTINGS FOR HYDRAULIC MACHINES CCH 70-4, en su apartado TECHNICAL SPECIFICATION FOR ULTRASONIC TESTING UT 70-4, declara que la velocidad deberá ser la adecuada de acuerdo a las condiciones de inspección, y que de ninguna manera podrá exceder los 150 mm/s. En base al enunciado de la norma y la velocidad aproximada a la que se realizan las pruebas manualmente en la empresa, se ha determinado que la inspección se realice a una velocidad de 20 mm/s. (Study group CCH 70-4, 2014)

Al determinar la velocidad de inspección de 20 mm/s, con una resolución de al menos 1 mm (para evitar saltos permitiendo un movimiento más suave de la sonda sobre la superficie ya que la posición en el OmniScan MX2 vendrá dada por el encoder incorporado en el VersaMOUSE), con un tornillo sin fin con un paso de 8 mm/rev. Además de que por lo general los motores a pasos se pueden encontrar con una resolución de 200 pasos/rev, se puede calcular la resolución del mecanismo de la con la Ecuación (5):

$$\text{resolución} = \frac{\text{desplazamiento por revolucion de tornillo}}{\text{pasos por revolucion del motor}} \quad (5)$$

$$resolución = \frac{8 \text{ mm/rev}}{200 \text{ pasos/rev}}$$

$$resolución = 0.04 \text{ mm/paso}$$

Una resolución de 0.04 mm/paso es suficientemente buena, ya que la resolución base que se requería era de 1 mm/paso .

Para calcular el torque es necesaria la velocidad angular, que se puede calcular con la Ecuación (6):

$$\omega = \frac{v_L}{P} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{20 \text{ mm/s}}{8 \text{ mm/rev}}$$

$$\omega = 2.5 \text{ rev/s}$$

$$\omega = 2.5 \text{ rev/s} \cdot 60 \text{ s/min}$$

$$\omega = 150 \text{ RPM}$$

Donde ω es la velocidad angular calculada del motor, v_L velocidad lineal y P paso del tornillo sin fin en mm/rev .

El control de la posición de los motores a pasos se realizará mediante pulsos, cada pulso (entiéndase como pulso un valor de voltaje de 5 V durante un periodo de tiempo) permite el avance de un paso del motor, para la velocidad requerida se calcula la variación de tiempo necesaria para un pulso mediante la Ecuación (7):

$$\Delta_{time} = \frac{(\omega \cdot \text{pasos por revolucion del motor})^{-1}}{2} \quad (7)$$

$$\Delta_{time} = \frac{(2.5 \text{ rev/s} \cdot 200 \text{ pasos/rev})^{-1}}{2}$$

$$\Delta_{time} = \frac{(500 \text{ pasos/s})^{-1}}{2}$$

$$\Delta_{time} = \frac{0.002 \text{ s/pasos}}{2}$$

$$\Delta_{time} = 0.001 \text{ s/pasos} \rightarrow 1 \text{ ms/pasos}$$

Δ_{time} : tiempo de duración de un pulso para el paso del motor a la velocidad calculada.

Para determinar el torque se parte del cálculo de la inercia total respecto al motor, que no es más que la suma de todas las inercias y se refleja en la Ecuación (8) :

$$J_{total} = J_{motor} + J_{reductor} + \left(\frac{(J_{acople} + J_{tornillo} + J_W)}{i^2} \right) \quad (8)$$

En donde J_{total} es la inercia total respecto al motor, J_{motor} es la inercia del rotor del motor, $J_{reductor}$ es la inercia de la caja reductora del motor, J_{acople} es la inercia del acople del motor y el eje, $J_{tornillo}$ es la inercia del tornillo sin fin y J_W es la inercia de la carga a desplazar.

Para determinar la inercia de la carga J_W , se utiliza la Ecuación (9):

$$J_W = \frac{W}{g \cdot e} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot P} \right)^2 \quad (9)$$

En donde:

- e : eficiencia del tornillo sin fin
- P : paso del tornillo sin fin en mm/rev

Tabla 21

Datos típicos de tornillo sin fin

Datos típicos de tornillo sin fin			
Material	$e =$ eficiencia	Material:	$\mu =$ coeficiente de fricción
Tuerca de bolas	0.90	Acero sobre acero	0.58
Tuerca de plástico	0.65	Acero sobre acero (lubricado)	0.15
Tuerca de metal	0.40	Teflón sobre acero	0.04

Nota. Tomado de stepping systems user manual de Automation Direct.

Datos típicos de tornillos sin fin se muestran en la Tabla 21, donde se puede obtener la eficiencia de del tornillo sin fin funcionando con una tuerca de metálica $e = 0.4$, reemplazando en la Ecuación (9) se tiene:

$$J_W = \frac{1.5 \text{ kg}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.4} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \frac{\text{rad}}{\text{rev}} \cdot \frac{1}{0.008 \frac{\text{m}}{\text{m}}}} \right)^2$$

$$J_W = 6.197 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

La inercia del tornillo sin fin está dada por la Ecuación (10):

$$J_{\text{tornillo}} = \frac{m_{\text{tornillo}} \cdot r^2}{2 \cdot g} \quad (10)$$

En donde:

r : radio del tornillo sin fin

m_{tornillo} : masa del tornillo sin fin

El diámetro del tornillo sin fin es de 8 mm, por lo tanto $r = 4 \text{ mm}$ la masa del tornillo se encuentra en la Tabla 17, reemplazando en la Ecuación (10) se tiene:

$$J_{\text{tornillo}} = \frac{0.187 \text{ kg} \cdot \left(\frac{4}{1000} \text{ m} \right)^2}{2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$J_{\text{tornillo}} = \frac{0.187 \text{ kg} \cdot \left(\frac{4}{1000} \text{ m}\right)^2}{2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$J_{\text{tornillo}} = 1.527 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

La inercia total se calcula a partir de las inercias previamente calculadas, a excepción de la inercia del rotor del motor que se añadirá después de seleccionar el mismo, y la inercia del acople, que debido a su reducido tamaño y peso proporciona un valor despreciable, es así que se tiene:

$$J_{\text{total}} = J_{\text{motor}} + \frac{(J_{\text{acople}} + J_{\text{tornillo}} + J_W)}{i^2} \quad (11)$$

$$J_{\text{total}} = 0 + \frac{(0 + 1.527 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 + 6.197 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)}{(1)^2}$$

$$J_{\text{total}} = 7.724 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

El torque requerido para acelerar la inercia T_{acel} , sin la inercia del rotor es:

$$T_{\text{acel}} = J_{\text{total}} \cdot \left(\frac{\omega}{\Delta_{\text{time}}}\right) \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (12)$$

$$T_{\text{acel}} = 7.724 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 \cdot \left(\frac{150 \frac{\text{rev}}{\text{min}}}{0.001 \text{ s}}\right) \cdot \frac{2\pi \text{ rad} \cdot 1 \text{ min}}{1 \text{ rev} \cdot 60 \text{ s}}$$

$$T_{\text{acel}} = 0.012 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Para determinar el par de funcionamiento, es necesario calcular la fuerza total requerida para mover la carga después de vencer la inercia con la Ecuación (13):

$$F_{\text{total}} = F_{\text{ext}} + F_{\text{fricción}} + F_{\text{gravedad}} \quad (13)$$

Donde

- F_{total} : fuerza total que actúa sobre la pieza a desplazar

- $F_{gravedad}$: fuerza debida a la inclinación del eje del motor
- $F_{fricción}$: fuerza de fricción
- F_{ext} : fuerza externa que actúa sobre la pieza montada en el tornillo
sin fin

Para obtener la fuerza total F_{total} , son necesarias otras fuerzas, por ejemplo $F_{gravedad} = 0$, debido que el eje del motor no está inclinado.

La fuerza externa F_{ext} , si está presente, es una fuerza que se opone al paso de la sonda por la superficie de inspección, es una fuerza de rozamiento entre la sonda y la plancha como se muestra en la Figura 40 y se calcula con la Ecuación (14):

$$F_{ext} = \mu_{p-a} \cdot W \quad (14)$$

El coeficiente de rozamiento entre plástico y acero μ_{p-a} tiene un valor de 0.4 (Engineering-abc, 2017).

Reemplazando los datos en la Ecuación (14):

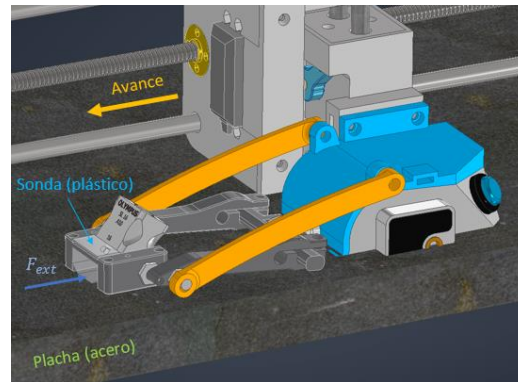
$$F_{ext} = \mu_{p-a} \cdot W$$

$$F_{ext} = 0.4 \cdot 1.5 \text{ kg}$$

$$F_{ext} = 0.6 \text{ kg}$$

Figura 40

Representación de la fuerza externa en el mecanismo



La última fuerza necesaria es $F_{fricción}$, que es la fuerza que se opone al movimiento de la carga por parte de los ejes guía, en la Tabla 21 se puede determinar un coeficiente de fricción entre acero y acero lubricado de $\mu = 0.15$ y con un ángulo de inclinación de $\theta = 0^\circ$, se puede calcular mediante la Ecuación (15):

$$F_{fricción} = \mu \cdot W \cdot \cos \theta \quad (15)$$

$$F_{fricción} = 0.15 \cdot 1.5 \text{ kg} \cdot \cos 0^\circ$$

$$F_{fricción} = 0.225 \text{ kg}$$

Al reemplazar los valores calculados en la Ecuación (13), se tiene:

$$F_{total} = 0.6 \text{ kg} + 0.225 \text{ kg} + 0$$

$$F_{total} = 0.825 \text{ kg}$$

Se calcula el torque de funcionamiento mediante la Ecuación (16):

$$T_{fun} = \frac{F_{total}}{2 \cdot \pi \cdot P} + T_{precarga} \quad (16)$$

Donde T_{carga} es el ajuste previo que se le puede dar al tipo de tuercas de bolas específicamente.

Debido a que no se está utilizando tuercas de bolas $T_{precarga} = 0$, reemplazando los datos en la Ecuación (16) se obtiene:

$$T_{fun} = \frac{\frac{0.825}{2 \cdot \pi \frac{rad}{rev} \cdot \frac{1 rev}{8 mm} \cdot \frac{1000 mm}{1 m}} + 0}{1}$$

$$T_{fun} = 0.0011 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Finalmente se calcula el mínimo torque requerido T_{motor} , que es el par motor requerido antes de que se haya elegido un motor e incluido la inercia:

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{run} \quad (17)$$

$$T_{motor} = 0.012 \text{ kg} \cdot \text{m} + 0.0011 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$T_{motor} = 0.013 \text{ kg} \cdot \text{m} \rightarrow 12.929 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

El torque requerido es de $12.929 \text{ N} \cdot \text{cm}$, previo a añadir la inercia del rotor, se puede seleccionar un motor Nema 17 y comprobar si al añadir la inercia del rotor el motor todavía puede mover la carga.

Después de probar con distintos motores se ha decidido seleccionar el KS42STH40-1204A que es un motor Nema 17 con una inercia de rotor de $54 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ ($5.5045 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$) y con un torque de 0.4 Nm .

Recalculando el torque requerido con la inercia de rotor $J_{motor} = 5.5045 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$, se tiene:

$$J_{total} = 7.724 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 + 5.5045 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

$$J_{total} = 13.23 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

Es necesario recalcular el torque de aceleración T_{acel} :

$$T_{acel} = J_{total} \cdot \left(\frac{\omega}{\Delta_{time}} \right) \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (18)$$

$$T_{acel} = 13.23 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 \cdot \left(\frac{150 \frac{\text{rev}}{\text{min}}}{0.001 \text{ s}} \right) \cdot \frac{2\pi \text{ rad} \cdot 1 \text{ min}}{1 \text{ rev} \cdot 60 \text{ s}}$$

$$T_{acel} = 0.021 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Finalmente se recalcula el mínimo torque requerido T_{motor} debido a la variación del torque de aceleración, mediante la Ecuación (19):

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{run} \quad (19)$$

$$T_{motor} = 0.021 \text{ kg} \cdot \text{m} + 0.0011 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$T_{motor} = 0.022 \text{ kg} \cdot \text{m} \rightarrow 22.064 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

El torque requerido final es de $22.064 \text{ N} \cdot \text{cm}$ y el motor KS42STH40-1204A que se muestra en la Figura 41, si se lo puede utilizar ya que tiene un torque de $40 \text{ N} \cdot \text{cm}$, algunas de sus características más importantes se encuentran en la Tabla 22.

Figura 41

Motor paso a paso KS42STH40-1204A



Nota. Tomado de (Shopee, 2022)

Tabla 22

Motor a pasos Nema 17 KS42STH40-1204A

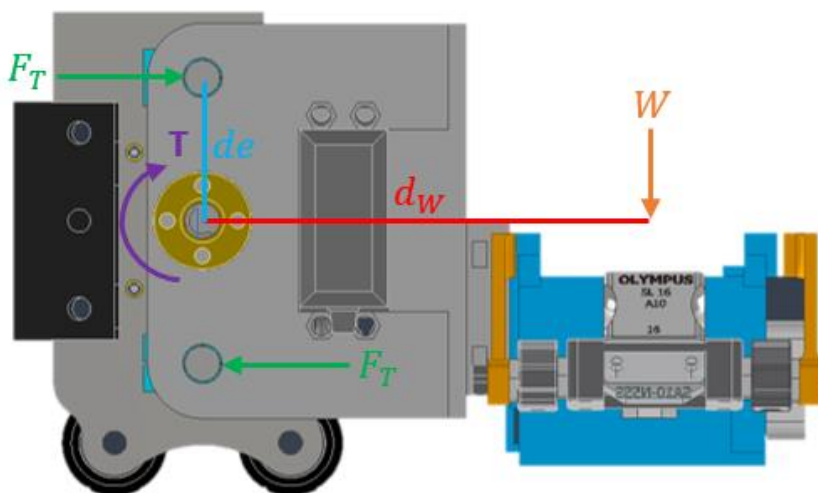
Característica	Valor
Tipo de motor	Bipolar Stepper
Ángulo de paso	1.8 grados
Torque	0.4 Nm
Corriente nominal/fase	1.2 A
Resistencia de fase	3 Ohms
Inductancia	4.5 mH

Nota. Tomado de (Shopee, 2022)

Diseño de los ejes guía del módulo de inspección. Los ejes se encargan de facilitar el desplazamiento de la carga en la trayectoria, evitando que el peso sea soportado por el tornillo sin fin, se planteó utilizar dos ejes para evitar la tendencia a girar a causa de la carga descentrada del VersaMOUSE, que causaría flexión en el torillo sin fin en otro eje como se muestra en la Figura 42.

Figura 42

Determinación de las fuerzas que actúan en los ejes



Para calcular la fuerza causada por la carga descentrada, se empieza por calcular el torque que actúa sobre la pieza e intenta hacerla girar. Debido a que la

geometría resultante de la pieza y el VersaMOUSE es complicada no se puede determinar una distribución exacta del peso, por lo tanto, se va a considerar que el peso se concentra en el punto medio de la posición del VersaMOUSE, asumiendo así un valor de $d_W = 100 \text{ mm}$.

El peso W , se obtuvo para la selección del motor a pasos, por lo tanto, se puede calcular el torque con la Ecuación (20):

$$T = W \cdot d_W \quad (20)$$

$$T = 14.72 \text{ N} \cdot \left(\frac{100}{1000}\right) \text{ m}$$

$$T = 14.72 \text{ N} \cdot \left(\frac{100}{1000}\right) \text{ m}$$

$$T = 1.472 \text{ Nm}$$

Para calcular F_T , se basa en el principio de torque y de la distancia $d_e = 32.5 \text{ mm}$ que es la distancia entre cada uno de los ejes guía y el eje de giro (tornillo sin fin), para calcular la fuerza se parte de la Ecuación (21):

$$T = F_T \cdot d_e \quad (21)$$

Despejando F_T de la Ecuación (21) y reemplazando valores se tiene:

$$F_T = \frac{T}{d_e}$$

$$F_T = \frac{1.47 \text{ Nm}}{\left(\frac{32.5}{1000}\right) \text{ m}}$$

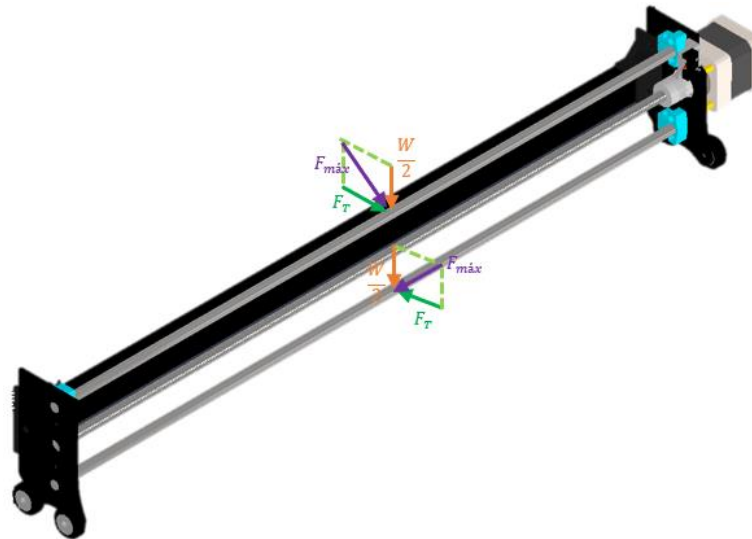
$$F_T = 45.23 \text{ N}$$

Las fuerzas que actúan sobre los ejes están representadas en la Figura 43, donde se puede observar que el peso al ser soportado por los dos ejes se dividiría, pero

en el caso de las fuerzas causadas por la carga descentrada son las mismas en los dos ejes guías, pero en sentidos opuestos.

Figura 43

Fuerzas que actúan en los ejes



A partir del peso W y de la fuerza provocada por el torque F_T se puede calcular una fuerza máxima de acción $F_{máx}$ sobre cada uno de los ejes, debido a que se trata de fuerzas en diferentes líneas de acción, pero perpendiculares es posible obtener una resultante, además de que las fuerzas causan esfuerzos flexionantes y no es necesario obtener los resultados por separados, por lo tanto, para se calcula la resultante con la Ecuación (22):

$$F_{máx} = \sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + F_T^2} \quad (22)$$

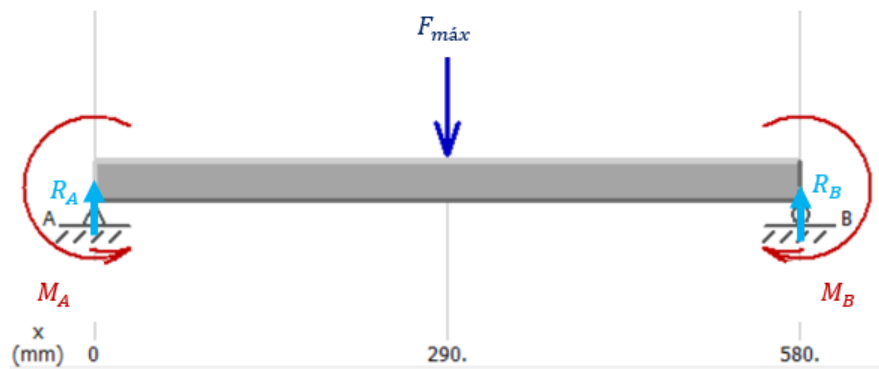
$$F_{máx} = \sqrt{\left(\frac{14.7}{2}\right)^2 + 45.23^2}$$

$$F_{máx} = 45.82 \text{ N}$$

Debido a la fijación de los ejes a la estructura, se los puede considerar como vigas con doble empotramiento, considerando que los esfuerzos máximos surgen cuando la carga se encuentra en el centro de la viga se procede a calcular las reacciones tanto fuerzas como momentos que se observan en el diagrama de cuerpo libre de la Figura 44.

Figura 44

Diagrama de cuerpo libre del eje



El primer paso es calcular las reacciones, la carga al encontrarse en el centro de la viga hace que las reacciones sean iguales, por lo tanto, al asumir que el eje y del diagrama de cuerpo libre es positivo hacia arriba, se realiza una sumatoria de fuerzas en y a continuación:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A - F_{máx} + R_B = 0$$

Al ser simétrico se sabe que $R_A = R_B$, por lo tanto:

$$2 \cdot R_A = F_{máx}$$

$$R_A = \frac{F_{máx}}{2}$$

$$R_A = \frac{45.82 \text{ N}}{2}$$

$$R_A = 22.91 \text{ N}$$

$$R_B = 22.91 \text{ N}$$

Una viga doblemente empotrada se puede resolver mediante el método de la fórmula ya que resolverlo de manera tradicional puede llevar un largo procedimiento que se puede evitar sabiendo que una viga con doble empotramiento con una carga puntual es un caso de estudio común, en base a las fórmulas revisadas el libro “Resistencia de Materiales” de Rober L. Mott (Anexo 2), los momentos reacción se calculan con la Ecuación (23): (R. L. Mott, 2009)

$$M_A = M_B = \frac{PL}{8} \quad (23)$$

Donde P es la fuerza, L es la longitud de la viga, por lo tanto, reemplazando en la Ecuación (23) se tiene:

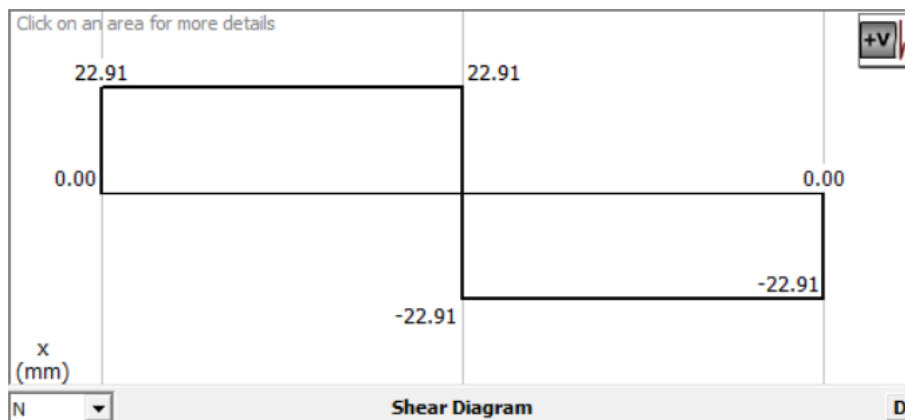
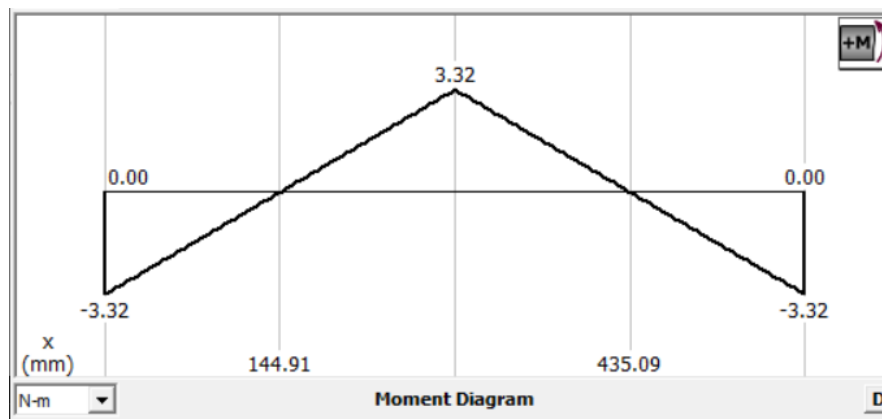
$$M_A = \frac{F_{m\acute{a}x} \cdot \frac{580}{1000} \text{ m}}{8}$$

$$M_A = \frac{45.82 \text{ N} \cdot \frac{580}{1000} \text{ mm}}{8}$$

$$M_A = 3.32 \text{ Nm}$$

$$M_B = 3.32 \text{ Nm}$$

Los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flexionantes se muestran en la Figura 45 y Figura 46, respectivamente. A partir del diagrama de momento flexionante se determina que el momento flexionante máximo $M_{m\acute{a}x} = 3.32 \text{ Nm}$ sobre el eje guía.

Figura 45*Diagrama de fuerzas cortantes***Figura 46***Diagrama de momentos flexionantes*

Esfuerzos normales debido a momentos flexionantes se calculan mediante la Ecuación (24):

$$\sigma_c = \frac{M \cdot c}{I} \quad (24)$$

Donde:

- M : es el momento flexionante máximo que soporta la viga

- c : es la distancia desde el centroide a la fibra más cercana de la sección transversal de la viga
- I : es la inercia de la sección transversal de la viga

La viga en este caso se trata de una varilla de 8 mm de diámetro y reemplazando en la Ecuación (24), se obtiene:

$$\sigma_c = \frac{M \cdot c}{I}$$

$$\sigma_c = \frac{M \cdot c}{\frac{\pi \cdot D^2}{64}}$$

$$\sigma_c = \frac{3.32 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \frac{4}{1000} \text{ m}}{\frac{\pi \cdot \left(\frac{8}{1000} \text{ m}\right)^4}{64}}$$

$$\sigma_c = 66.05 \text{ MPa}$$

Para los ejes se pretende utilizar un acero cromado, específicamente el AISI 4140, que presenta una gran resistencia al desgaste y a la corrosión además de que su acabado superficial permite reducir la fricción, aspecto que es ideal para la aplicación en el módulo de inspección (PROVEIN, 2020).

La resistencia a la cadencia del acero AISI 4140 es $S_y = 414 \text{ MPa}$, se obtuvo del libro Resistencia de Materiales de la tabla que se encuentra en el Anexo 3 que en su apartado de tablas el autor Robert Mott proporciona las características de algunos aceros, entre ellos del AISI 4140. A partir de este dato es posible calcular un factor de seguridad N , que con base en el libro de Robert Mott para cargas estáticas el factor de seguridad debe ser mayor a 2. El factor de seguridad se calcula con la Ecuación (25) :

$$N = \frac{S_y}{\sigma_c} \quad (25)$$

$$N = \frac{414 \text{ MPa}}{66.05 \text{ MPa}}$$

$$N = 6.27$$

Como el factor de seguridad calculado es mayor a 2 para cargas estáticas el diseño es seguro (R. L. Mott, 2009).

Después de diseñar respecto a esfuerzo flexionante es necesario verificar que la flexión máxima este dentro de los límites de la flexión recomendada, que según el libro de Robert Mott para la parte general de una maquina $y_{m\acute{a}x}/L = 0.0005$ a 0.003 , donde $y_{m\acute{a}x}$ es la flexión máxima calculada para el diseño (R. L. Mott, 2009).

Para calcular la flexión máxima se puede utilizar la fórmula de flexión máxima del Anexo 2, al igual que con los momentos reacción, para una viga doblemente empotrada se calcula mediante la Ecuación (26).

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{PL^3}{193EI} \quad (26)$$

En este punto para la fórmula es necesario definir E que es el módulo de elasticidad del material, en el caso de los aceros $E = 207 \text{ GPa}$ obtenido del libro de Robert Mott del Anexo 3 y reemplazando valores en la Ecuación (26) se obtiene:

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{45.82 \text{ N} \cdot \left(\frac{580}{1000} \text{ m}\right)^3}{193 \cdot 207 \cdot 10^9 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{8}{1000} \text{ m}\right)^4}{64}\right)}$$

$$y_{m\acute{a}x} = -1.11 \text{ mm}$$

La razón entre la flexión máxima y la longitud de la viga se calcula a continuación:

$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{L} = \frac{1.11 \text{ mm}}{580 \text{ mm}}$$

$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{L} = 0.00191$$

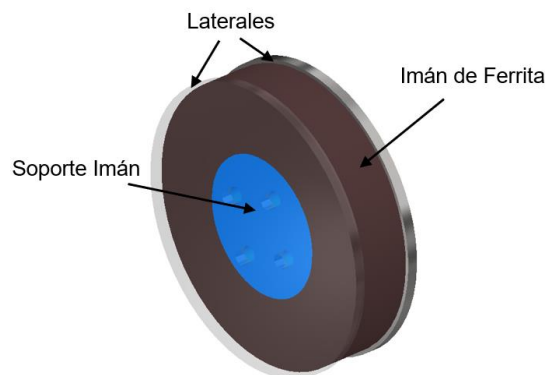
La razón obtenida es de 0.00191, que es menor que 0.003 que es el valor máximo aceptable, por lo tanto, se ha verificado que la viga puede utilizarse como parte general de una máquina.

3.5.2. Módulo de avance

Movimiento de avance y adherencia. De acuerdo con la selección de conceptos la alternativa más idónea son las ruedas utilizando Imanes de ferrita, con la finalidad de mejorar la adherencia. A continuación, se observa el diseño de las ruedas utilizando un software CAD/CAE Inventor. (Cai et al., 2017)

Figura 47

Diseño de la rueda con imán de ferrita



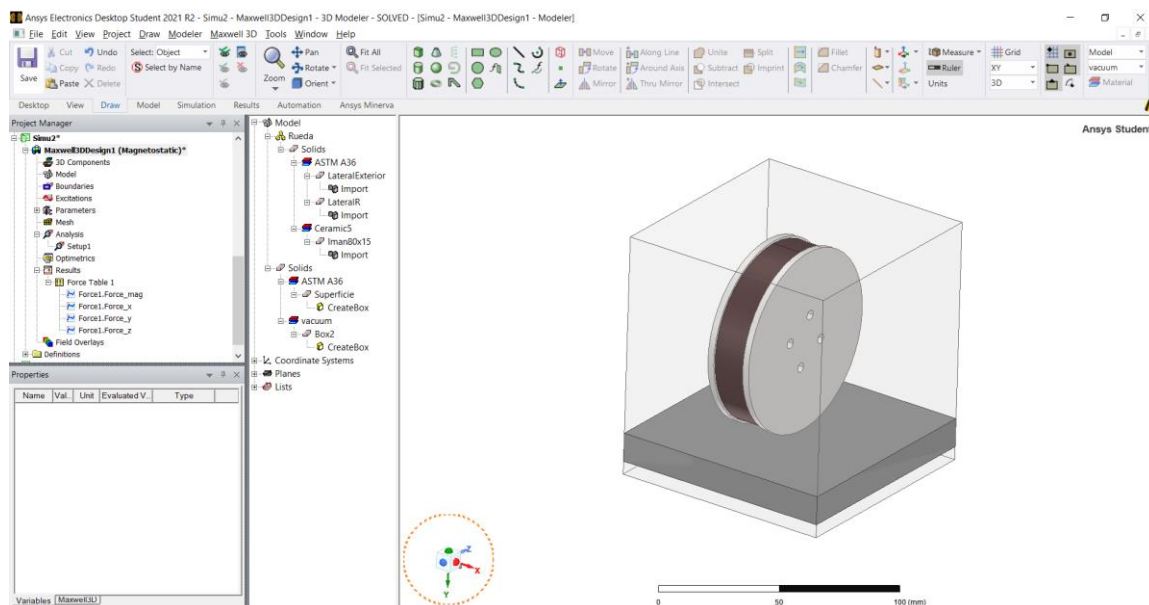
La rueda está compuesta por los siguientes componentes: a) Dos placas de 3mm de acero ASTM A36, b) Imán de ferrita de calidad C5 y c) soporte de imán. Como

resultado al estar la rueda en contacto con una superficie ferromagnética crea una fuerza de atracción entre la placa y la rueda, debido a ello es necesario calcular esta fuerza de atracción.

Análisis de elementos finitos para obtener la densidad de flujo y la fuerza magnética de la rueda con la superficie ferromagnética. Al aplicar un método de análisis de elementos finitos se calcula la densidad de flujo magnético de la rueda y la superficie ferromagnética, así como la fuerza de atracción mediante el software Ansys Electronics Student. En el software se activa la categoría de Ansys Maxwell que permite realizar un análisis 2D o 3D. En este apartado se analiza la rueda en un ambiente 3D, por lo que es necesario importar el modelo 3D de la rueda, crear una superficie sólida que simule una plancha y además un bloque que contenga el entorno como se muestra en la Figura 48 (Cai et al., 2017).

Figura 48

Entorno de análisis de Maxwell 3D Ansys



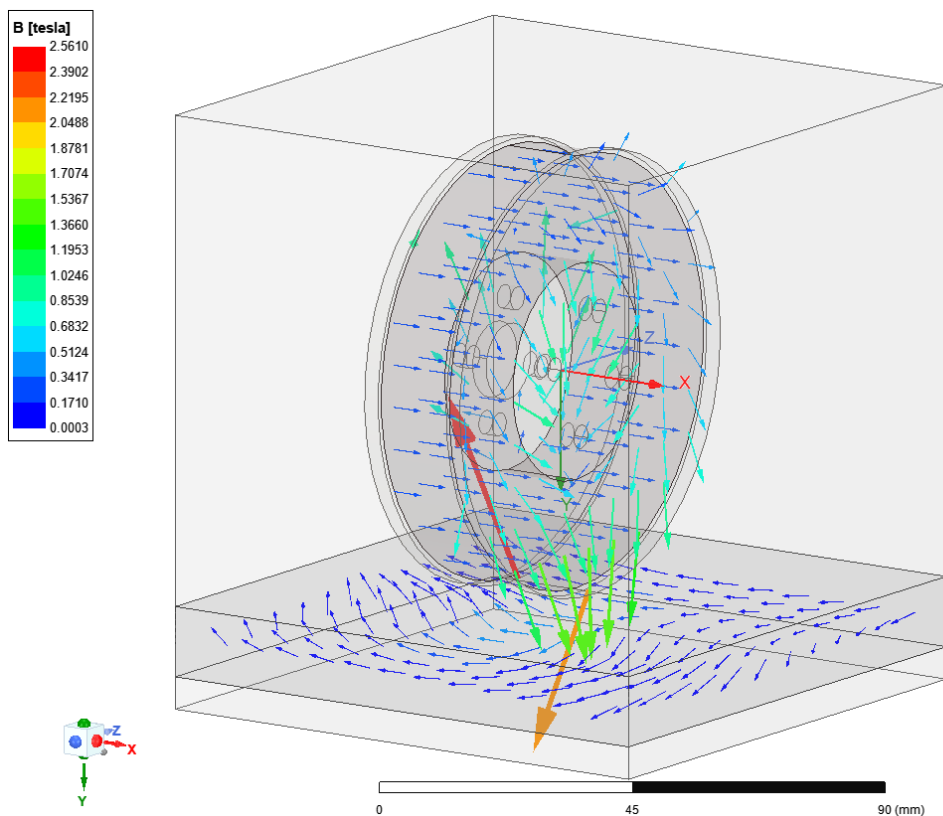
Para el análisis es necesario seguir una serie de pasos mostrados a continuación:

1. Asignar el material de los componentes de la rueda.
2. Establecimiento de los parámetros a analizar (Fuerza).
3. Generar una mallado de todos los elementos de la rueda.
4. Ejecutar el análisis.

Como resultado se observa la interacción del campo magnético generado por el imán de ferrita con las placas laterales de Acero ASTM A36 y de la misma manera con la superficie ferromagnética, en la Figura 49 se visualiza los vectores del flujo magnético en todos los elementos.

Figura 49

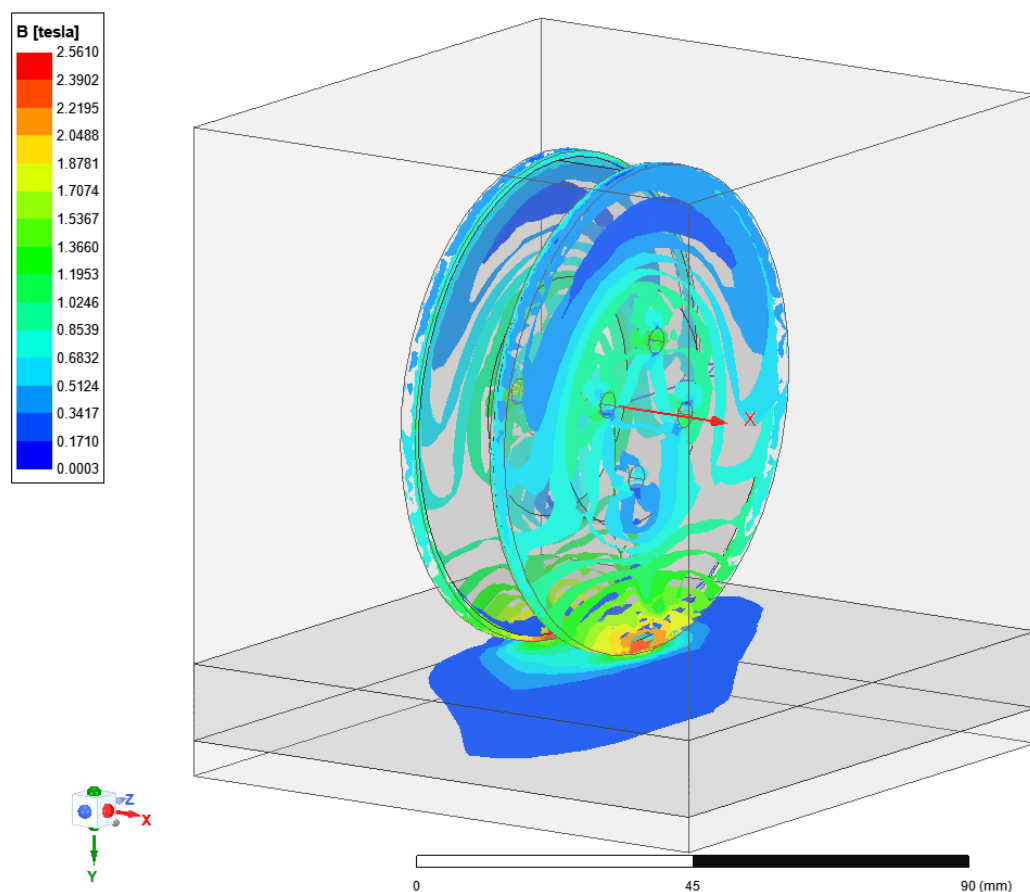
Vectores del flujo magnético: rueda y la superficie ferromagnética



De manera semejante en la Figura 50 se presenta el magnitud del flujo magnético en las placas laterales y en la superficie ferromagnética, donde claramente se observa el mayor flujo magnético generado entre el punto de contacto de las placas laterales y la superficie ferromagnética.

Figura 50

Densidad del flujo magnético: rueda y la superficie ferromagnética



Nota. Se muestra la interacción que existe entre la magnitud de la densidad del flujo magnético generada por los imanes con las placas circulares de la rueda y la superficie ferromagnética (plancha).

De esta manera el software calcula la fuerza magnética generada en la rueda de cada uno de sus ejes, estos datos se pueden visualizar en la Tabla 23. La mayor fuerza

se encuentra en el eje Y que se encuentra en contacto con la superficie ferromagnética y permite aumentar la adherencia del sistema de inspección.

Tabla 23

Fuerzas magnéticas de la rueda

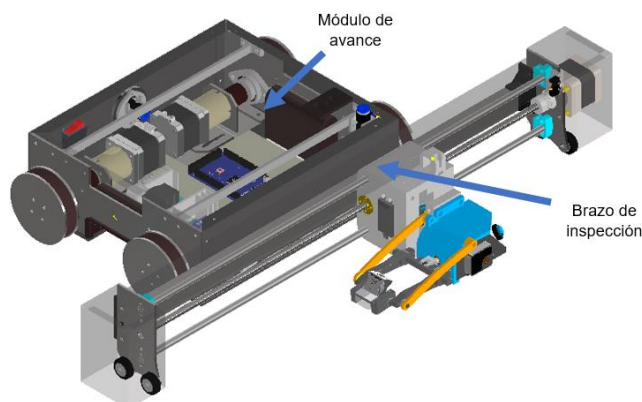
Fuerza	Valor	Unidades
Fuerza magnética	142.064	Newton
Fuerza X	74.9	mNewton
Fuerza Y	142.06	Newtons
Fuerza Z	-12.38	mNewton

Diseño estructural del módulo de avance. El diseño del módulo de avance debe considerar varias características como la resistencia, robustez, área, tamaño y entre otros aspectos importantes necesarios para el correcto funcionamiento del sistema automatizado de inspección, por tal motivo se diseñó previamente utilizando el software CAD/CAE Inventor.

En el interior de este módulo se encuentra el sistema de eléctrica y electrónica, así como el control del medio acoplante por lo cual se establece un tamaño interno suficiente para los sistemas y subsistemas mencionados. El diseño del sistema automatizado de inspección se muestra en la Figura 51.

Figura 51

Diseño del sistema automatizado de inspección



El diseño del módulo de avance está compuesto por varias piezas obtenidas mediante un proceso de corte laser, seguido de un proceso de doblado de algunas piezas para conseguir un ensamblaje sencillo y resistente de la estructura principal del sistema automatizado de inspección. Para la elaboración de las piezas de la estructura se utiliza una plancha de 3mm de espesor para evitar la deflexión de las piezas.

De acuerdo con el diseño CAD del módulo de avance y brazo de inspección al asignar el material se obtuvo los siguientes pesos mostrados en la Tabla 24.

Tabla 24

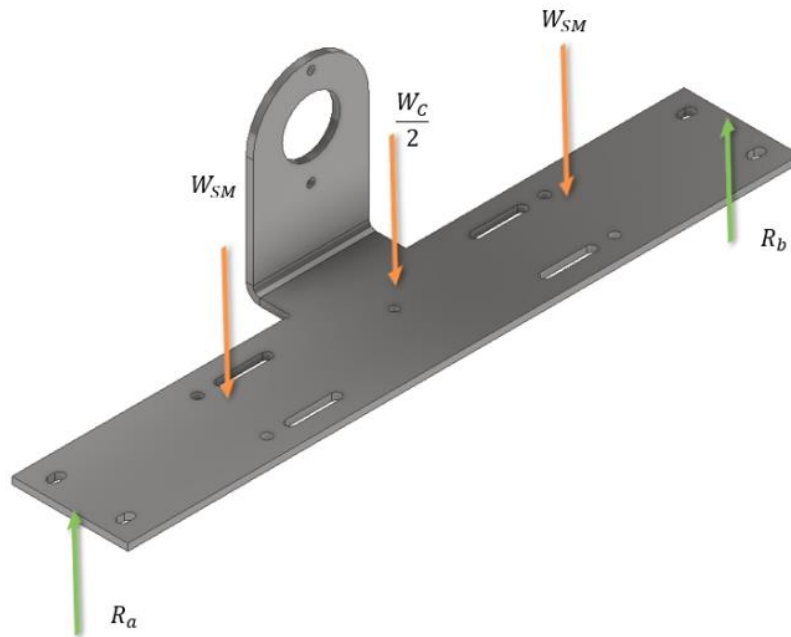
Pesos del módulo de avance y brazo de inspección

Ítem	Cantidad	Componente	Representación	Valor
1	2	Lateral	m_L	0.457 kg
2	2	Soporte motor	m_{SM}	0.093 kg
3	1	Base trasera	m_{BT}	0.418 kg
4	1	Base frontal	m_{BF}	0.439 kg
5	2	Soporte unión	m_{SU}	0.116 kg
6	1	Carcasa	m_{CZ}	0.995 kg
7	1	Brazo de inspección	m_B	4.214 kg
8	1	Carga extra	m_c	4 kg

Análisis mecánico de la base trasera

Figura 52

Distribución de cargas de la base trasera



La carga W_{SM} esta dada de la sumatoria de la carga del soporte del motor m_s y de acuerdo con el CAD realizado en Inventor el peso de motor m_m tiene un valor aproximado de 600 gr.

$$W_{Sm} = W_s + W_m \quad (27)$$

$$W_{Sm} = m_s \cdot g + m_m \cdot g = 0.093kg \cdot 9.81m/s^2 + 0.6kg \cdot 9.81m/s^2 = 6.79 N$$

$$W_c = m_c \cdot g = 4kg \cdot 9.81m/s^2 = 39.24 N$$

Figura 53

Diagrama de cargas de la base trasera

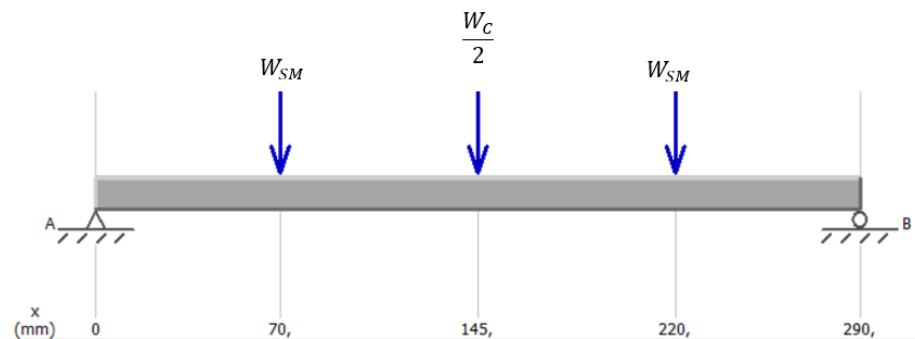
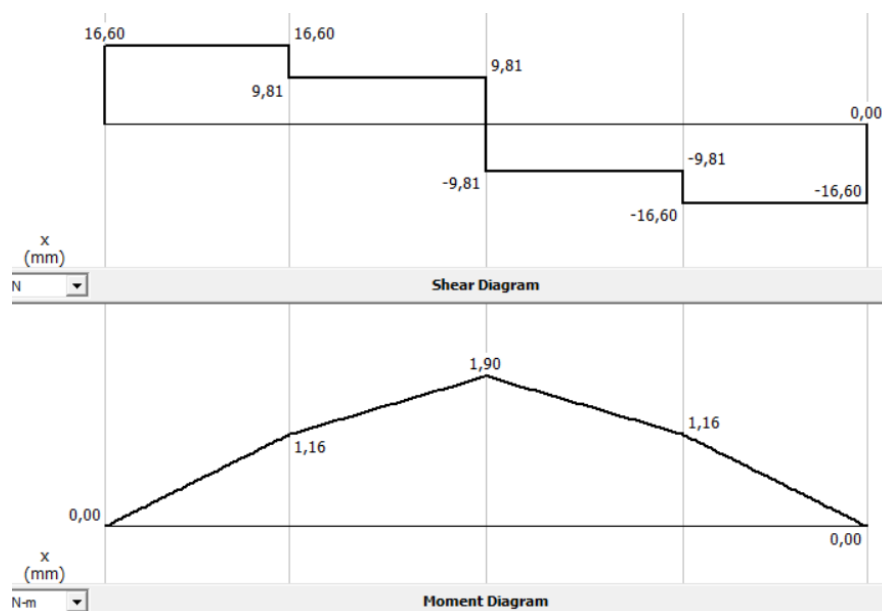


Figura 54

Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flexionantes



Se obtiene las siguientes reacciones R_a y R_b :

$$R_a = 16.6N \quad R_b = -16.6N$$

$$M_{max} = 1.9Nm$$

En función del momento máximo se calcula el esfuerzo a flexión mediante la Ecuación (24):

$$\sigma_c = \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma_c = \frac{M \cdot h/2}{\frac{bh^3}{12}}$$

$$\sigma_c = \frac{6M}{bh^2} = \frac{6 \cdot 1.9Nm}{0.05m \cdot (0.003m)^2} = 25MPa$$

Según el libro de Resistencia de materiales de Robert Mott para cargas estáticas el factor de seguridad debe ser mayor a 2. (R. L. Mott, 2009)

Se calcula el esfuerzo de diseño con la Ecuación (28).

$$\sigma_d = \frac{Sy}{N} \tag{28}$$

$$\sigma_d = \frac{248MPa}{2} = 124MPa$$

$$\sigma_d > \sigma_c$$

Como el esfuerzo de diseño σ_d es mayor al esfuerzo calculado σ_c , se concluye que el diseño es correcto.

Se calcula la flexión máxima producida en la base trasera con la Ecuación (29):

$$y_{max} = -\frac{PL^3}{48EI} \tag{29}$$

$$y_{max} = -\frac{PL^3}{48E \frac{bh^3}{12}}$$

$$y_{max} = -\frac{PL^3}{4Ebh^3}$$

$$y_{max} = -\frac{19.62 \cdot (0.29m)^3}{4 \cdot 200GPa \cdot 0.05m \cdot (0.003m)^3} = 4.43 \times 10^{-4}m = 0.443 \text{ mm}$$

La razón entre la flexión máxima y la longitud de la base trasera se calcula a continuación:

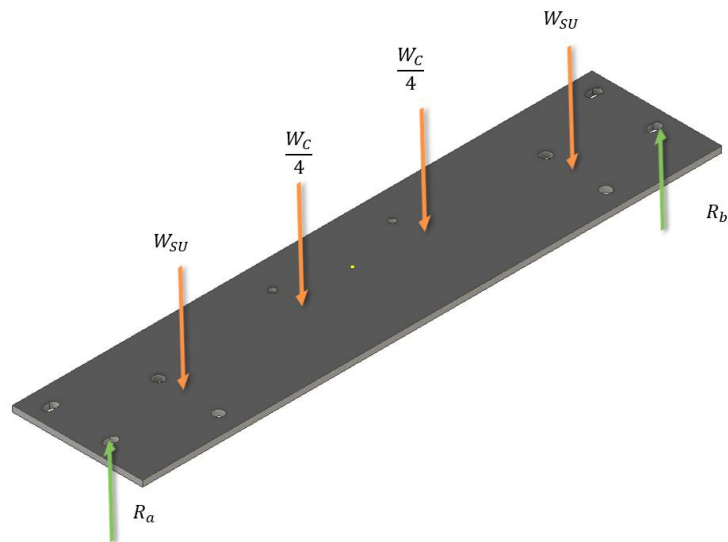
$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{L} = \frac{0.443 \text{ mm}}{290 \text{ mm}}$$

$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{L} = 0.0015$$

La razón obtenida es de 0.0015, que es menor que 0.003 que es el valor máximo aceptable, por lo tanto, se ha verificado que la base trasera puede utilizarse como parte general de una máquina. (R. L. Mott, 2009)

Figura 55

Distribución de cargas de la base frontal



Se calcula la fuerza de los soportes de unión:

$$W_{SU} = m_{SU} \cdot g = 0.116kg \cdot 9.81m/s^2 = 1.14 \text{ N}$$

Figura 56

Diagrama de cargas de la base delantera

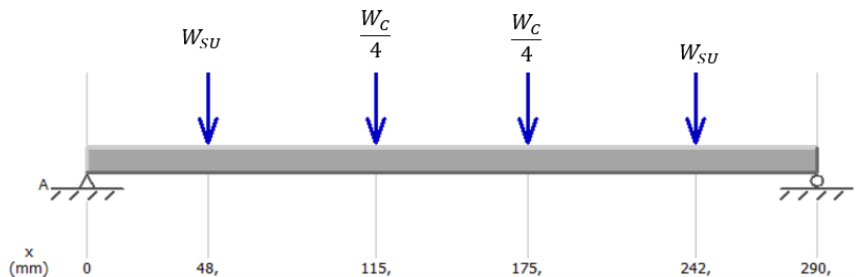
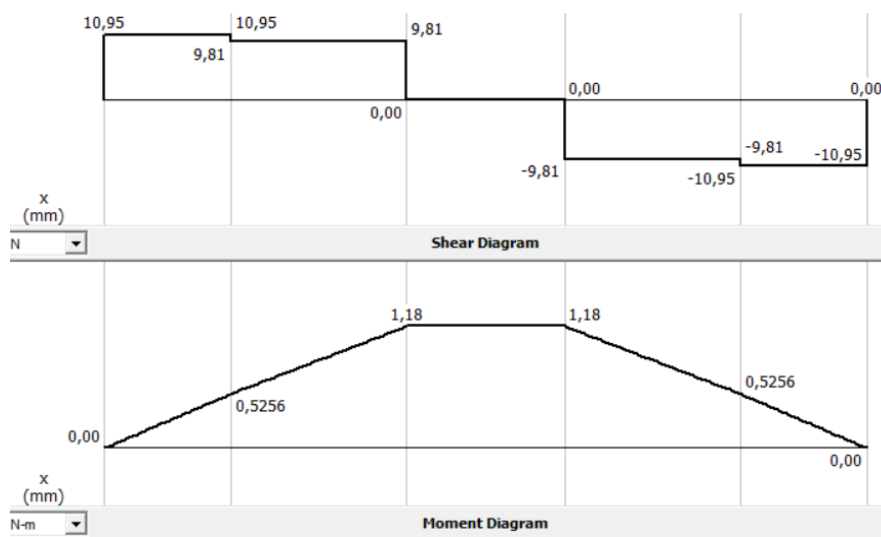


Figura 57

Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flexionantes



Se obtiene las siguientes reacciones R_a y R_b :

$$R_a = 10.95N \quad R_b = -10.95N$$

$$M_{max} = 1.18Nm$$

En función del momento máximo se calcula el esfuerzo a flexión mediante la Ecuación (24):

$$\sigma_c = \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma_c = \frac{M \cdot h/2}{\frac{bh^3}{12}}$$

$$\sigma_c = \frac{6M}{bh^2} = \frac{6 \cdot 1.18Nm}{0.065m \cdot (0.003m)^2} = 12.1MPa$$

Según el libro de Resistencia de materiales de Robert Mott para cargas estáticas el factor de seguridad debe ser mayor a 2. (R. L. Mott, 2009)

Se calcula el esfuerzo de diseño con la Ecuación (28):

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N}$$

$$\sigma_d = \frac{248MPa}{2} = 124MPa$$

$$\sigma_d > \sigma_c$$

Como el esfuerzo de diseño σ_d es mayor al esfuerzo calculado σ_c , se concluye que el diseño es correcto.

Cálculo de la flexión máxima:

$$y_{max} = -\frac{PL^3}{48EI}$$

$$y_{max} = -\frac{PL^3}{4Ebh^3}$$

$$y_{max} = -\frac{9.81N \cdot (0.29m)^3}{4 \cdot 200GPa \cdot 0.065m \cdot (0.003m)^3} = 1.7 \times 10^{-4}m = 0.17 \text{ mm}$$

La razón entre la flexión máxima y la longitud de la base trasera se calcula a continuación:

$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{L} = \frac{0.17 \text{ mm}}{290 \text{ mm}}$$

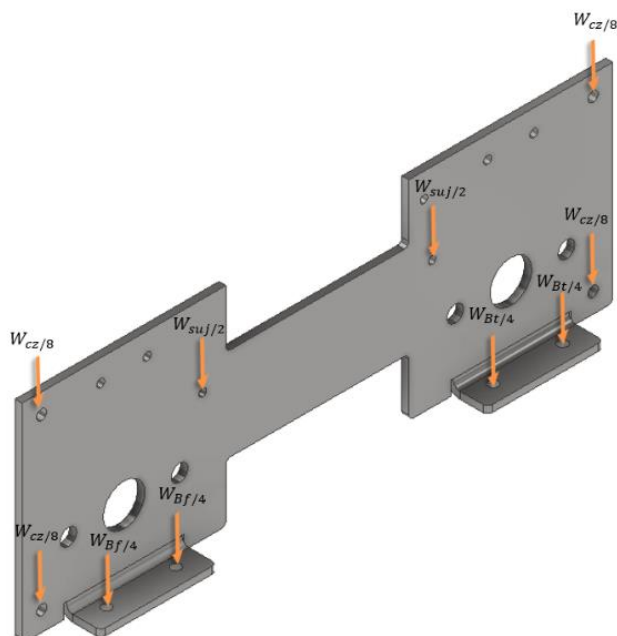
$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{L} = 0.00058$$

La raz3n obtenida es de 0.00058, que es menor que 0.003 que es el valor máximo aceptable, por lo tanto, se ha verificado que la base delantera puede utilizarse como parte general de una máquina. (R. L. Mott, 2009)

Laterales de la estructura del m3dulo de avance. Para el análisis mecánico de los componentes laterales se utiliza el m3todo de elementos finitos del Software CAD/CAE Inventor. Se aplica este m3todo debido a la geometría compleja de la pieza y a la facilidad de colocar las cargas que actúan en la misma para evaluar el diseño. Las cargas en los laterales son las mismas ya que la distribuci3n de carga debe ser similar, por tal raz3n se analiza solo una pieza lateral. Las cargas que actúan en la pieza se muestran en la Figura 58.

Figura 58

Cargas en la pieza lateral de la estructura



Para el análisis de la pieza se obtiene el valor de cada una de las cargas, las cuales se muestran a continuación.

$$W_{cz} = m_{cz} \cdot g = 0.995kg \cdot 9.81m/s^2 = 9.76 N$$

$$W_{suj} = m_{suj} \cdot g = 0.015kg \cdot 9.81m/s^2 = 0.147 N$$

$$W_{Bf} = \left(2 \cdot m_{SU} + \frac{m_c}{2} + m_{BF}\right) \cdot g = 2.671kg \cdot 9.81m/s^2 = 26.2 N$$

$$W_{Bt} = \left(m_s + m_m + \frac{m_c}{2} + m_{BT}\right) \cdot g = 3.8kg \cdot 9.81m/s^2 = 37.31 N$$

Tabla 25

Resultados del análisis mecánico de la pieza lateral

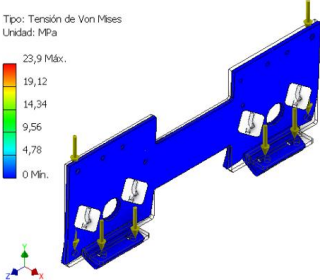
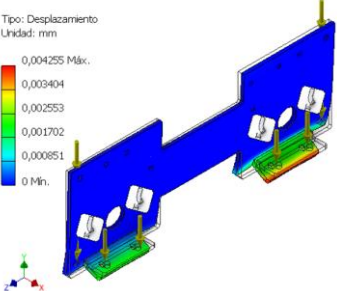
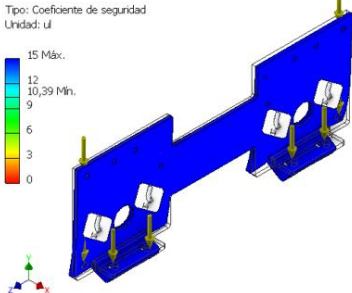
Figura	Análisis	Resultado
	Tensión de Von Mises	$\sigma_{max} = 23.9MPa$
	Desplazamiento	$y_{max} = 0.004255 mm$

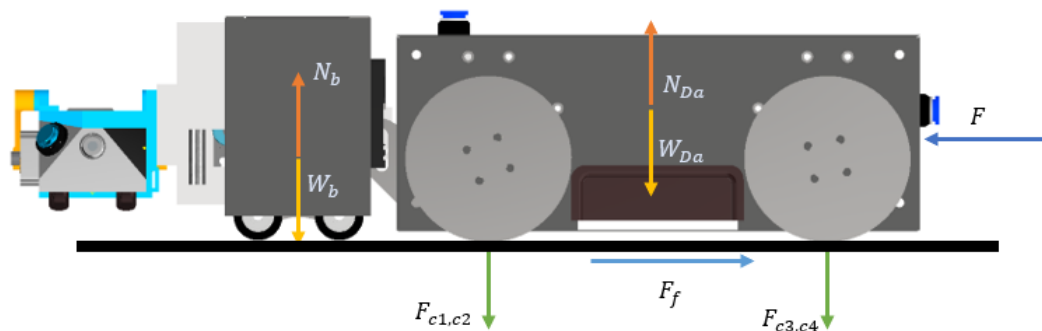
Figura	Análisis	Resultado
	Coficiente de seguridad	$N = 10.39$

De la Tabla 25 se obtiene parámetros de diseño importantes como la deflexión máxima de 0.004255 mm y el coeficiente de seguridad es de 10.39 y de acuerdo con el libro de Robert Mott, para cargas estáticas el factor de seguridad debe ser mayor a 2 por lo tanto el diseño es seguro (R. L. Mott, 2009).

Cálculo del motor del módulo de avance. En la Figura 59 se muestra el diagrama de cuerpo libre de todo del sistema automatizado de inspección, compuesto de dos partes principales: módulo de avance W_a y el brazo de inspección W_b . Además, actúan fuerzas de atracción de cada uno de los imanes F_{c1} , F_{c2} , F_{c3} y F_{c4} .

Figura 59

Diagrama de cuerpo libre



Se considera que la fuerza de fricción F_f esta compuesta de dos fuerzas de fricción F_{f1} y F_{f2} , ya que las ruedas del módulo de avance poseen un coeficiente de fricción de acero sobre acero $\mu_{c2} = 0.15$ (Aname, 2022).

El brazo de escáner utiliza ruedas que están hechas con un material llamado Delrin, el cual tiene un coeficiente de fricción sobre acero de $\mu_{c1} = 0.3$ (Fluorten S.R.L, 2022).

El peso W_{ma} es la sumatoria de la estructura del módulo de avance de la Tabla 24 con un total de $m_e = 3.184 \text{ kg}$ y la carga extra de $m_c = 4 \text{ kg}$.

$$W_{Ma} = W_e + W_c \quad (30)$$

$$W_{Ma} = m_e \cdot g + m_c \cdot g$$

$$W_{Ma} = 3.184 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 + 4 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W_{Ma} = 70.48 \text{ N}$$

Además, se establece a la carga extra un factor de carga del 20% considerando los pesos de las ruedas y ejes que son necesarios para el cálculo del torque del motor mediante la Ecuación (31):

$$W_{Da} = W_e + W_c \quad (31)$$

$$W_{Da} = m_e \cdot g + m_c \cdot g \cdot F_{carga}$$

$$W_{Da} = 3.184 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 + 4 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 1.2$$

$$W_{Da} = 77.97 \text{ N}$$

Analizando las fuerzas del eje y por cuerpos separados se obtiene:

$$\sum Fy_1 = 0$$

$$N_b - W_b = 0$$

$$N_b = W_b$$

$$\sum Fy_2 = 0$$

$$N_a - F_{c1} - F_{c2} - F_{c3} - F_{c4} - W_{Da} = 0$$

$$N_a = F_{c1} + F_{c2} + F_{c3} + F_{c4} + W_{Da}$$

Analizando la sumatoria de fuerzas del eje x de los dos cuerpos se obtiene:

$$\sum Fx = 0$$

$$F_f - F = 0$$

$$F_f = F$$

$$F_r = F_{f1} + F_{f2}$$

$$F_r = \mu_{c1} \cdot N_b + \mu_{c2} \cdot N_{Da}$$

$$F_r = \mu_{c1} \cdot W_b + \mu_{c2} \cdot (F_{c1} + F_{c2} + F_{c3} + F_{c4} + W_{Da})$$

Considerando que $F_{c1} = F_{c2} = F_{c3} = F_{c4}$ se obtiene:

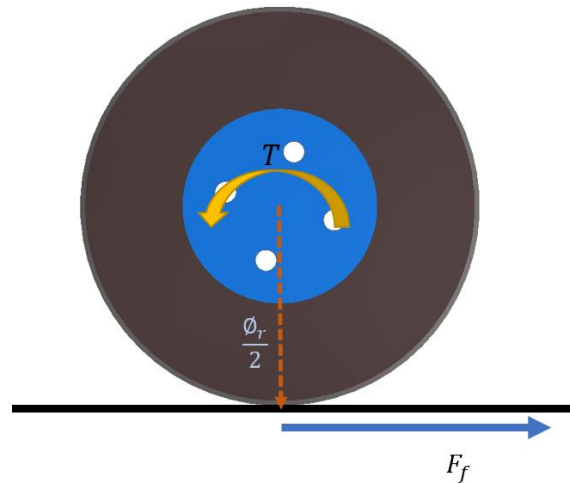
$$F_r = 0.3 \cdot 3.5kg \cdot 9.81m/s^2 + 0.15 \cdot (4 \cdot 142.06N + 77.97N)$$

$$F_r = 107.232 N$$

Torque del motor

Figura 60

Fuerzas que actúan en las ruedas



El torque está definido por la Ecuación (32):

$$T = F_f \cdot \frac{\phi_r}{2} \quad (32)$$

$$T = 107.232N \cdot \frac{0.082m}{2}$$

$$T = 4.4Nm$$

El torque obtenido se divide para el numero de motores implementados como se muestra en la Ecuación (33):

$$T_{rueda} = \frac{T}{2} \quad (33)$$

$$T_{rueda} = \frac{4.40 Nm}{2}$$

$$T_{rueda} = 2.2 Nm$$

Un aspecto importante para la selección del motor es la importancia del control de desplazamiento, ya que el avance de este módulo está dado por la distancia de traspale (mm) del transductor. Con estas consideraciones se presentan las siguientes alternativas de motores a pasos considerando que el torque debe ser mayor al torque calculado. Además, los criterios de selección más importantes son: torque, resolución, consumo y peso mostrados en la Tabla 26 de selección de componentes.

Tabla 26

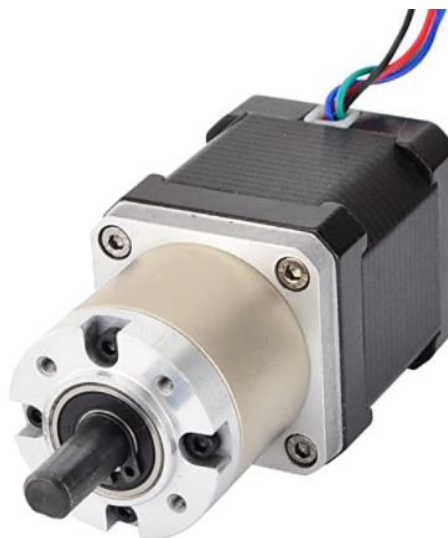
Selección del motor del módulo de avance

Criterios de selección	Conceptos						
	Motor a paso Nema 17 con engranaje planetario 27:1 3Nm			Motor a pasos Nema 23 3Nm		STEPPERONLINE Motor paso a paso CNC Nema 23 de alto par de torsión 3Nm	
	Peso	Calif.	Eval. Ponderada	Calif.	Eval. Ponderada	Calif.	Eval. Ponderada
Torque	20%	3	0,60	3	0,60	3	0,60
Resolución	15%	4	0,60	3	0,45	3	0,45
Disponibilidad	10%	3	0,30	3	0,30	3	0,30
Eficiencia	10%	3	0,30	4	0,40	4	0,40
Consumo	15%	5	0,75	2	0,30	2	0,30
Peso	20%	4	0,80	2	0,40	2	0,40
Costo	10%	3	0,30	4	0,40	3	0,30
	Total		3,65		2,85		2,75
	Lugar		1		2		3
	¿Continuar?		Si		No		No

De acuerdo con la Tabla 26 se selecciona el motor a pasos Nema 17 con engranaje planetario como la alternativa más idónea, debido a varios aspectos importantes como son el peso y el torque, conjuntamente se muestra las especificaciones técnicas en del motor en la Tabla 27.

Figura 61

Motor nema 17 - engranaje planetario



Nota. Tomado de (STEPPERONLINE, 2020)

Tabla 27

Especificaciones técnicas motor a pasos NEMA 17 - engranaje planetario

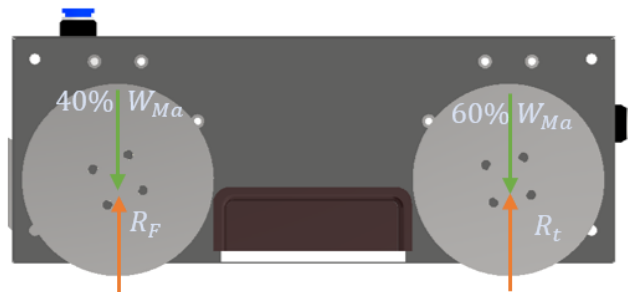
Característica	Valor
Motor a pasos Nema 17	
Tipo de motor	Bipolar Stepper
Ángulo de paso	0.067 grados
Torque	3 Nm
Corriente nominal/fase	1.68 A
Resistencia de fase	1.65 Ohms
Inductancia	2.8mH
Caja - engranaje planetario	
Relación de engranajes	26.84:1
Eficiencia	81%
Momento permisible	5 Nm
Carga máxima eje Axial	50 N
Carga máxima eje Radial	100 N

Nota. Adaptado de (STEPPERONLINE, 2020)

Eje de transmisión de movimiento motor – rueda. Para el diseño de los ejes primero se realiza un análisis de la distribución del peso del módulo de avance mediante el CAD realizado en Inventor, en el cual presenta que existe una distribución entre la parte frontal y trasera del 40 y 60 por ciento del peso respectivamente. En la Figura 62 se muestra la distribución de peso, donde las ruedas traseras soportan una mayor carga.

Figura 62

Distribución de cargas - módulo de avance



De acuerdo con el resultado de la Ecuación (30) valor de la carga del módulo de avance W_{Ma} es $70.48N$. Por lo tanto, se calcula las fuerzas que actúan en la parte delantera W_{Maf} y trasera W_{Mat} del módulo de avance.

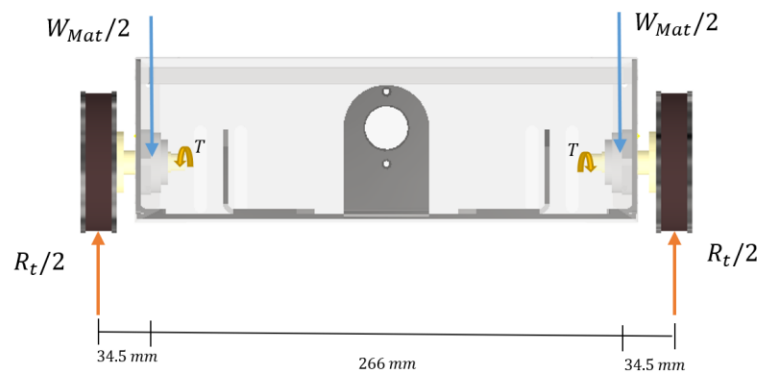
$$W_{Maf} = 40\% \cdot W_{Ma} = 40\% \cdot 70.48N = 28.192N$$

$$W_{Mat} = 60\% \cdot W_{Ma} = 60\% \cdot 70.48N = 42.288N$$

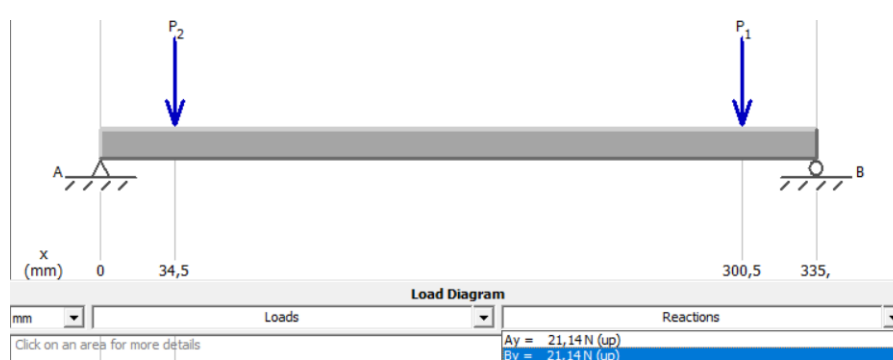
Se inicia con el cálculo de la parte trasera, en la Figura 63 se muestra el diagrama de cuerpo libre con la fuerza calculada anteriormente, la reacción de las ruedas y adicionalmente torque del motor de $3Nm$ de acuerdo con la Tabla 27 que actúa en cada eje.

Figura 63

Diagrama de cuerpo libre de la parte trasera

**Figura 64**

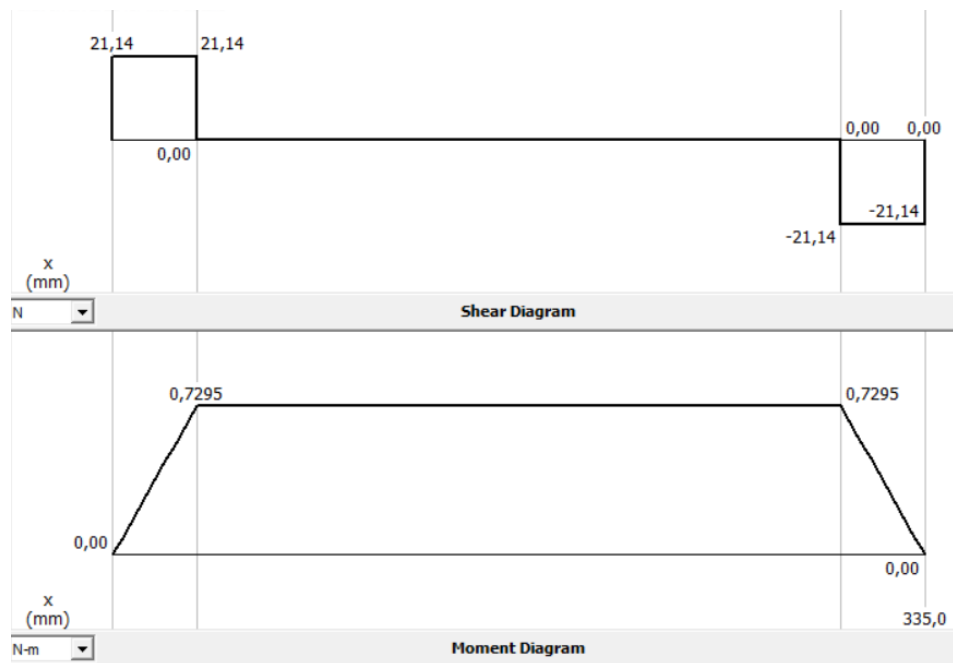
Reacciones en los apoyos - parte trasera



Las cargas que actúan son iguales, por tal motivo el valor de las reacciones son las mismas con un valor de 24.14N

Figura 65

Diagrama de fuerzas cortantes y momento flector



De acuerdo con la Figura 65 el momento flector en los ejes son los mismos con un valor de $M = 0.7295 \text{ Nm}$. Además, en cada eje actúa un torque $T = 3 \text{ Nm}$.

Para el análisis se tiene un momento que produce un esfuerzo normal a flexión y el torque genera un esfuerzo cortante, por tal razón se aplica la teoría de falla de esfuerzo cortante máximo. Además, el eje posee concentradores de esfuerzos situados en los cambios de sección o diámetro, por lo cual se aplica factores de concentradores de esfuerzos en la teoría de falla de esfuerzo cortante máximo. (Mott, 1996)

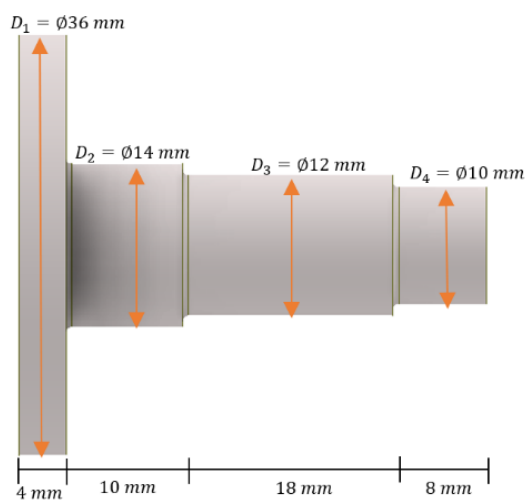
$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sqrt{(k_{tB} \cdot M)^2 + (k_{tT} \cdot T)^2}}{Z_p} \quad (34)$$

Donde $\tau_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo cortante máximo, M momento flexionante, T par de Torsión, k_{tB} factor de concentración de esfuerzos a flexión, k_{tT} factor de concentración de esfuerzos a torsión y Z_p el módulo de sección.

En la Figura 66 muestra el diseño realizado de los ejes traseros. Para el diseño se considera un diámetro inicial grande D_1 suficiente para el acople con las ruedas utilizando pernos. Además, los diámetros D_3 y D_4 se establece en función a tamaños estándares de rodamientos y acoples entre el motor y el eje.

Figura 66

Dimensiones del eje trasero



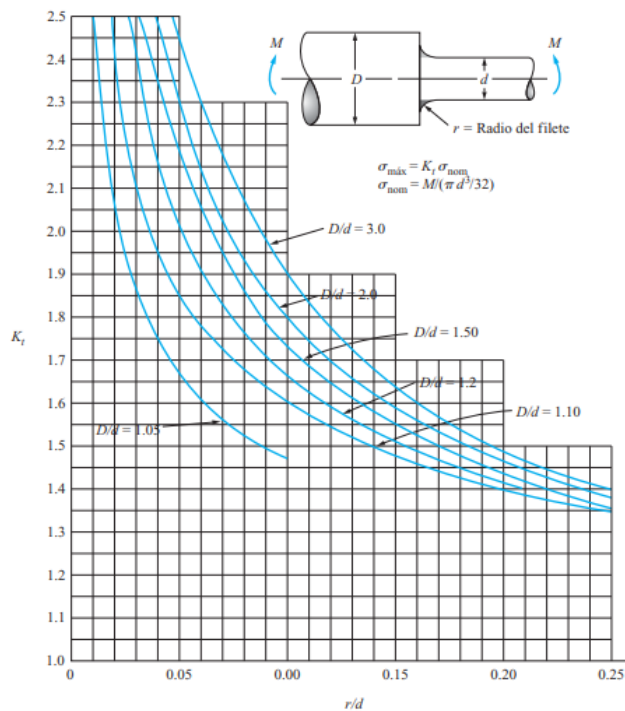
En el D_3 de cada eje se coloca un rodamiento, en el cual actúa la fuerza $W_{mat}/2$ de la Figura 63. En consecuencia, se analiza el diseño del eje propuesto en ese punto, tomando en cuenta el cambio de sección entre del D_2 y D_3 . Finalmente, se utilizando un radio de redondeo $r = 1.8 \text{ mm}$ para que la concentración de esfuerzos sea mínima. En consecuencia, se procede con el cálculo de los concentradores de esfuerzos k_{tB} y k_{tT} .

$$\frac{r}{d} = \frac{1.8 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 0.15$$

$$\frac{D}{d} = \frac{14\text{mm}}{12\text{mm}} = 1.16$$

Figura 67

Barra redonda escalonada a flexión



Nota. Tomado de (R. L. Mott, 2009)

De acuerdo con la Figura 67, y realizando una interpolación se tiene:

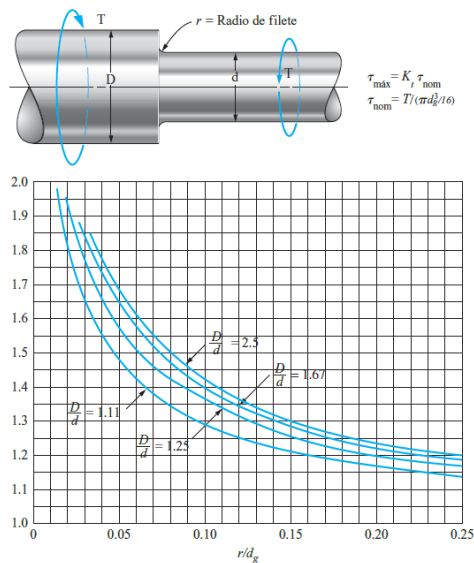
$$\frac{x - 1.47}{1.16 - 1.1} = \frac{1.52 - 1.47}{1.2 - 1.1}$$

$$x = 1.5$$

Se obtiene un $k_{tB} = 1.5$ del proceso de interpolación para un $D/d = 1.16$.

Figura 68

Barra circular escalonada sometida a torsión



Nota. Tomado de (R. L. Mott, 2009)

De acuerdo con la Figura 68, y realizando una interpolación se tiene:

$$\frac{x - 1.21}{1.16 - 1.11} = \frac{1.25 - 1.21}{1.25 - 1.11}$$

$$x = 1.22$$

Se obtiene un $k_{tT} = 1.22$ del proceso de interpolación para un $D/d = 1.16$.

Se calcula Z_p de la sección circular del eje con la Ecuación (35):

$$Z_p = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \tag{35}$$

$$Z_p = \frac{\pi \cdot (0.012\text{m})^3}{16} = 3.4 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Reemplazando los datos en la Ecuación (34) se obtiene:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sqrt{(1.5 \cdot 0.7295 \text{ Nm})^2 + (1.22 \cdot 3 \text{ Nm})^2}}{3.4 \times 10^{-7} \text{ m}^3}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 11.23 \text{ MPa}$$

Para ejes sometidos a flexi3n y torsi3n, el esfuerzo de dise1o se calcula con el esfuerzo cortante m1ximo permisible mediante la Ecuaci3n (36) (R. L. Mott, 2009).

$$\tau_d = \frac{S_{ys}}{N} \quad (36)$$

Si $\tau_{m\acute{a}x} = \tau_d$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{S_{ys}}{N}$$

Donde S_{ys} representa la resistencia a la cedencia del material a cortante. Si $S_{ys} = 0.5 * S_y$, donde S_y es la resistencia a la cedencia a tensi3n del material. Adem1s, despejando el factor de seguridad.

$$N = \frac{0.5S_y}{\tau_{m\acute{a}x}} \quad (37)$$

Existen varios tipos de aceros para el dise1o de ejes donde el S_y supera los 200 MPa, pero adem1s existen otros materiales con buenas propiedades mec1nicas relacionadas con la tenacidad y resistencia a la fatiga como el nylon, con la alternativa de mejorar sus propiedades mec1nicas con la adici3n de un porcentaje de fibra de vidrio o de carbono. (Riba Romeva, 2008)

En la Tabla 28 se muestra las propiedades mec1nicas del Nylon 66, donde el $S_y = 90 \text{ MPa}$.

Tabla 28*Propiedades mecánicas del nylon 66*

Propiedad	Valor
Módulo de elasticidad	2.3 GPa
Resistencia última a tracción	93.1 MPa
Resistencia a la cedencia a tracción	90 MPa
Resistencia a la fluencia a flexión	120 MPa
Coefficiente de Poisson	0.4

Nota. Adaptado de (MatWeb, 2022)

El eje está expuesto a una carga invertida y repetida, es decir a esfuerzos a fatiga, por tal motivo de acuerdo con el libro de Robert Mott se debe emplear un factor de seguridad recomendado de $N = 4$ (R. L. Mott, 2009).

Calculando el factor de seguridad con la Ecuación (37) y utilizando como material el Nylon, se obtiene:

$$N = \frac{0.5 \cdot 90 \text{ MPa}}{11.23 \text{ MPa}}$$

$$N = 4,01$$

Como resultado, al ser el factor de seguridad $N = 4.01$, se puede utilizar el Nylon 66 como material de los ejes del módulo de avance.

Selección de chumaceras. En cada uno de los ejes se coloca un rodamiento en la sección donde el diámetro es $D_3 = 12 \text{ mm}$, además la carga estática máxima que debe soportar el rodamiento es de $24.14N$. En función de los datos mencionados se busca rodamientos disponibles en la industria del país, de igual manera que los rodamientos permitan una fijación al eje.

Tabla 29*Rodamientos IKC*

Rodamientos No.	Dimensiones mm		Capacidad de carga dinámica N	Capacidad de carga estática N	Peso Kg
	Diámetro interior	Diámetro exterior			
K000	10	26	4606	1906	0.02
K001	12	28	5096	2401	0.03
K002	15	32	5586	2842	0.05
K003	17	35	5978	3283	0.05

Nota. Adaptado de (IKC, 2021)

De acuerdo con la Tabla 29, se selecciona el rodamiento K001 en función del diámetro, además la carga estática que soporta es de 2401 N, por lo tanto, soporta la carga calculada de 24.14 N. Para el cálculo del tiempo de vida del rodamiento de acuerdo con el libro de se calcula con la Ecuación (38):

$$L_p = K_R \left(\frac{C}{P} \right)^3 \quad (38)$$

Donde L_p es la vida expresada en millones de revoluciones, K_R es el factor de Weibull que expresa el porcentaje de falla, C es la carga dinámica básica y P es la carga constante aplicada.

En la Tabla 29, para el rodamiento K001 se tiene una carga dinámica básica $C = 5096N$, y la carga constante aplicada que debe soportar es de 24.14 N. Con un porcentaje de falla de 5% de acuerdo con la Tabla 7-5 (Anexo 4) del libro de (Norton, 2011) se tiene un $K_R = 0.62$, reemplazando en la Ecuación (38) se obtiene:

$$L_p = 0.62 \left(\frac{5096N}{24.14N} \right)^3$$

El tiempo de vida de los rodamientos seleccionados es de:

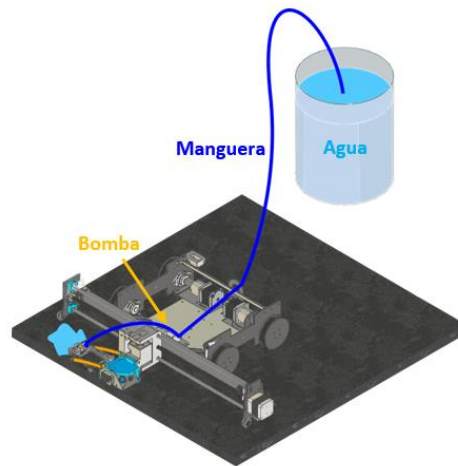
$$L_p = 5.83 \times 10^6 \text{ millones de revoluciones}$$

3.5.3. Suministro del medio acoplante acústico para la inspección

Para poder proporcionar a la sonda de un medio acoplante que permita la propagación de las ondas ultrasónicas a la plancha, se va a utilizar agua, la misma que se ha decidido que sea suministrada por una bomba, el sistema funcionaria como se muestra en la Figura 69.

Figura 69

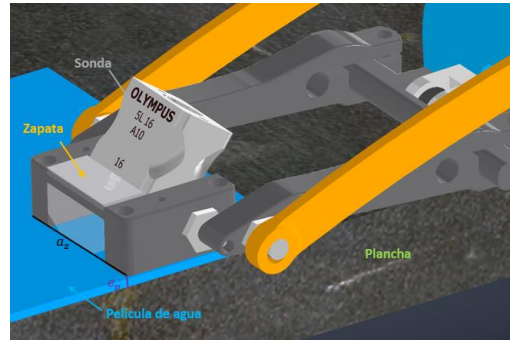
Representación del suministro de medio acoplante



No se encontró alguna norma que especifique la cantidad necesaria de acoplante para poder realizar una inspección mediante ultrasonido, por lo que se supone que el líquido acoplante deberá ser suministrado de tal manera que las imágenes que se tomen sean las más adecuadas. Para evitar cualquier problema con el acoplante en caso de que se necesite mucho o poco se ha decidido proporcionar un rango de control de flujo respecto al trabajo de la bomba, no obstante, es necesario conocer un flujo objetivo para poder seleccionar la bomba, el mismo se va a calcular a partir de la velocidad a la que se va a mover la sonda y el tamaño de la misma.

Figura 70

Representación de la película de agua en la inspección



El desplazamiento neto de la sonda transversalmente es de $L = 500 \text{ mm}$, además si se tiene el ancho de la zapata de $a_z = 40 \text{ mm}$ y un espesor estimado de la película de agua de $e_p = 2 \text{ mm}$ (Figura 70), se puede calcular el volumen de agua requerido para un tramo V_{tramo} , de la mediante la Ecuación (39):

$$V_{tramo} = L \cdot a_z \cdot e_p \quad (39)$$

$$V_{tramo} = 500 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm}$$

$$V_{tramo} = 40000 \text{ mm}^3$$

Mediante cálculos de igual manera se puede determinar en cuanto tiempo es necesario el volumen por tramo v_{tramo} , si se sabe la distancia del tramo L y la velocidad lineal a la que se va a mover $v_L = 20 \text{ mm/s}$, el tiempo por tramo t_{tramo} a obtenerse sería:

$$t_{tramo} = \frac{L}{v_L} \quad (40)$$

$$t_{tramo} = \frac{500 \text{ mm}}{20 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}$$

$$t_{tramo} = \frac{500 \text{ mm}}{20 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}$$

$$t_{tramo} = 25 \text{ s}$$

A partir de los datos calculados se puede calcular el caudal requerido de la bomba Q mediante la Ecuación (41):

$$Q = \frac{V_{tramo}}{t_{tramo}} \quad (41)$$

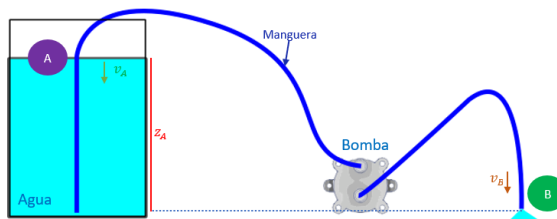
$$Q = \frac{40000 \text{ mm}^3}{25 \text{ s}}$$

$$Q = 1600 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \rightarrow 1.6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Para calcular la potencia de la bomba se utiliza la Ecuación General de la Energía obtenida del libro de Mecánica de Fluidos de Robert Mott en su sexta edición, que lo maneja como una extensión de la ecuación de Bernoulli, debido a que entre algunas de las condiciones para poder aplicarla están el hecho de que en el sistema de análisis no pueden existir ni turbinas ni bombas en el sistema y además que no debe existir pérdidas de energía por rozamiento del fluido en la tubería, aspectos que si se pueden considerar en la Ecuación General de la Energía. El cálculo se realiza respecto a dos puntos de referencia del sistema, los mismos que se muestra en la Figura 71 (R. Mott, 2006).

Figura 71

Representación de los puntos de análisis en el sistema



La ecuación de la energía para los dos puntos de referencia A y B se igualan considerando las pérdidas debidas al rozamiento del líquido y la tubería h_L y la ganancia de energía debida a la bomba h_A , por lo tanto, mediante la Ecuación (42) se obtiene:

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{v_B^2}{2g} \quad (42)$$

La variable P representa la presión en el punto de análisis, v la velocidad del fluido, y z la diferencia del altura del fluido respecto a un punto de referencia, cada una de las variables señaladas con subíndices A o B indican el punto de análisis, en el caso de γ es el peso específico del agua a $20\text{ }^\circ\text{C}$ es $\gamma = 9790 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$, se obtuvo de la tabla del Anexo 5 y g es la gravedad (R. Mott, 2006).

En el punto A la presión $P_A = 0$ al tratarse de un recipiente sin tapa, la velocidad $v_A = 0$, debido a que la velocidad a la que se mueve el líquido es muy pequeña al tener un recipiente con un diámetro mucho mayor al de la manguera ($D_m = 4\text{ mm}$) y $z_A = 1\text{ m}$, si se considera que hay una diferencia de un metro entre el punto de salida del agua y el nivel de agua del recipiente.

En el punto B la presión P_B hay que calcularla puesto que el agua tiene que levantar la sonda para poder formar la película de agua, la velocidad v_B , se puede

calcular de igual manera en función del caudal, para el caso de z_B , es cero al considerarlo como punto de referencia.

Con las consideraciones previamente detalladas se procede a reemplazar los valores obtenidos en la Ecuación (42):

$$\frac{0}{\gamma} + 1m + \frac{0^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_B}{\gamma} + 0 + \frac{v_B^2}{2g} \quad (43)$$

De la Ecuación (43) es necesario despejar h_A que es la energía que aporta la bomba al sistema:

$$h_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + h_L - 1m$$

Para calcular la presión en el punto B, se toma el peso que debe levantar la presión de agua, que previamente se calculó para la selección del servomotor, se considera ese peso puesto que el acople del VersaMOUSE y la sonda tiene como intermediario un resorte, el mismo que al aplicarse presión sobre el VersaMOUSE permite que la zapata se pegue a la superficie de la plancha.

Por la definición de presión se sabe que se trata de una fuerza que se aplica sobre un área determinada, en este caso la fuerza es el peso W y el área es de la sección de la manguera por donde viaja el fluido A_m , por lo tanto, se tiene:

$$P_B = \frac{W}{A_m} \quad (44)$$

$$P_B = \frac{11.70 \text{ N}}{\pi \cdot \left(\frac{D_m}{2}\right)^2}$$

$$P_B = \frac{11.70 \text{ N}}{\pi \cdot \left(\frac{4}{2 * 1000} \text{ m}\right)^2}$$

$$P_B = 9.311 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Para calcular la velocidad del fluido en el punto B se toma el caudal Q sabiendo que:

$$Q = A_m \cdot v_B \quad (45)$$

Al despejar v_B de la Ecuación (45) y reemplazando los valores se consigue:

$$v_B = \frac{Q}{A_m}$$

$$v_B = \frac{1.6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \cdot \left(\frac{4}{2 \cdot 1000} \text{ m}\right)^2}$$

$$v_B = 0.127 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para calcular la energía perdida debido a rozamiento h_L se procede con la siguiente Ecuación (46):

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (46)$$

Donde f es el factor de fricción del líquido y la manguera que hay que calcular, L es la longitud de la tubería que en este caso es de $L = 5 \text{ m}$, v es la velocidad del fluido, para el caso es de v_B .

Para seleccionar un método de cálculo del factor de fricción es necesario primero saber si el fluido es laminar o turbulento, aspecto que se conoce a partir del cálculo del número de Reynolds mediante la Ecuación (47):

$$NR = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (47)$$

La variable por definir es ν_c que es la viscosidad cinemática del fluido, que se obtiene mediante tablas. Para el caso del agua la viscosidad cinemática a 20 °C es $\nu_c = 1.02 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (R. Mott, 2006).

Reemplazando los valores en la Ecuación (47):

$$NR = \frac{v_B \cdot D_m}{1.02 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$NR = \frac{0.127 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{4}{1000} \text{m}}{1.02 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$NR = 498.03$$

Si el número de Reynolds es menor que 2000, el flujo será laminar, que es el caso al tener un valor de $NR = 498.03$. (R. Mott, 2006)

Al tratarse de un flujo laminar la fórmula para el cálculo del factor de fricción es:

$$f = \frac{64}{NR} \quad (48)$$

$$f = \frac{64}{498.03}$$

$$f = 0.129$$

Ahora es posible calcular las pérdidas por rozamiento reemplazando datos en la Ecuación (46) se tiene:

$$h_L = 0.129 \cdot \frac{5\text{m}}{\frac{4}{1000} \text{m}} \cdot \frac{\left(0.127 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$h_L = 0.133 \text{ m}$$

Calculando la energía que proporciona la bomba al sistema h_A con la Ecuación (49) se obtiene:

$$h_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + h_L - 1m \quad (49)$$

$$h_A = \frac{9.311 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{9790 \frac{N}{m^2}} + \frac{\left(0.127 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}} + 0.133 - 1m$$

$$h_A = 94.236 \frac{Nm}{N}$$

La interpretación del resultado es que la bomba suministra 94.236 Nm de energía a cada newton de agua, para calcular la potencia de la bomba P_B que se transmite al agua, debe determinarse cuántos newtons de este fluido pasan por la bomba en un lapso dado de tiempo, a lo que se denomina flujo de peso, que se calcula como producto del peso específico del fluido y el caudal al que circula, se lo obtiene mediante la Ecuación (50):

$$P_A = h_A \cdot \gamma \cdot Q \quad (50)$$

$$P_A = 94.236 m \cdot 9790 \frac{N}{m^3} \cdot 1.3 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

$$P_A = 1.48 W$$

La bomba para seleccionar debe tener una potencia mínima de 1.48 W, revisando las opciones del mercado se ha decidido seleccionar la Mini Bomba R385 (Figura 72), que puede proporcionar según sus datos una potencia de 6 W, que resulta adecuado para poder realizar un control de flujo de la bomba y se pueda aumentar el caudal en caso de montar en el sistema una zapata más grande. Otro factor determinante fue el tiempo de vida en funcionamiento continuo que para el caso es de 2500 horas, algunas más de sus características se presentan en la Tabla 30.

Figura 72*Mini bomba R385*

Nota. Tomado de la tienda en línea AV Electronics (Electronics, 2022)

Tabla 30*Características técnicas mini bomba R385*

Característica	Valor
Tipo de motor	Motor DC
Voltaje nominal	12 V
Potencia	6 W
Corriente	0.5 – 0.7 A
Vida útil	2500 H

Nota. Tomado de AV Electronics (Electronics, 2022)

3.6. Diseño eléctrico y electrónico**3.6.1. Diseño del circuito de control**

El diseño del circuito de control se realizó en el software Proteus, en la Figura 73 se muestra el diagrama esquemático con todos los componentes de control y potencia del sistema automatizado de inspección. También, se muestra el diseño de la placa PCB en la Figura 74.

Figura 73

Diagrama esquemático del circuito de control

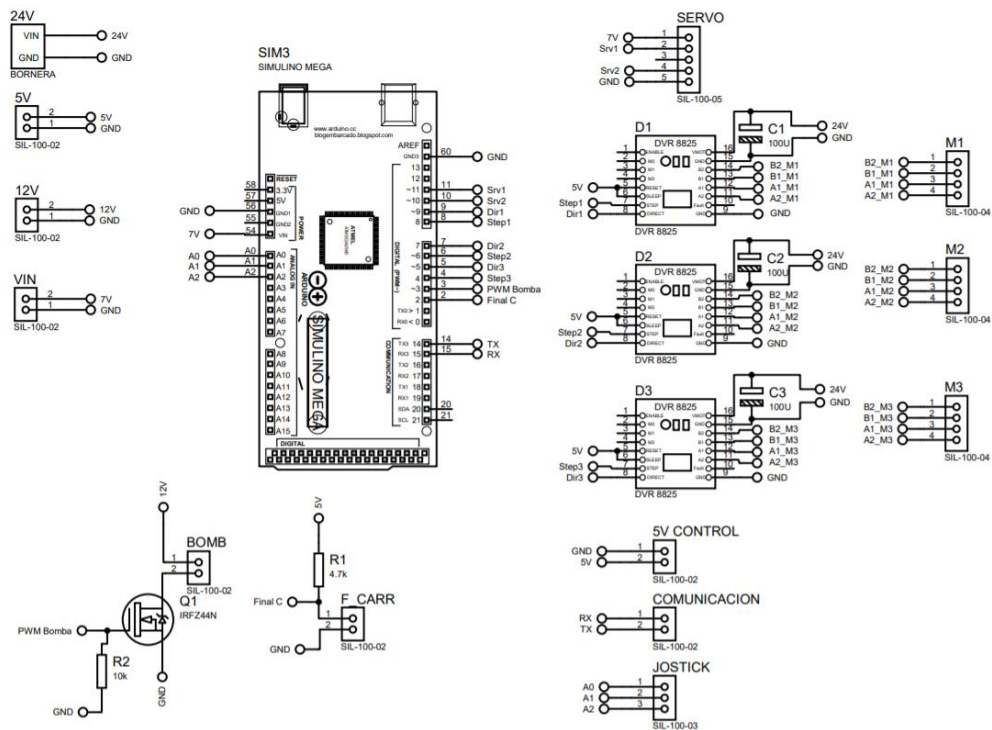
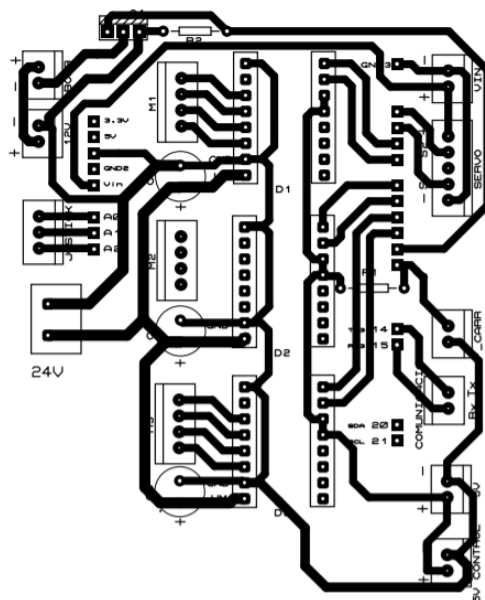


Figura 74

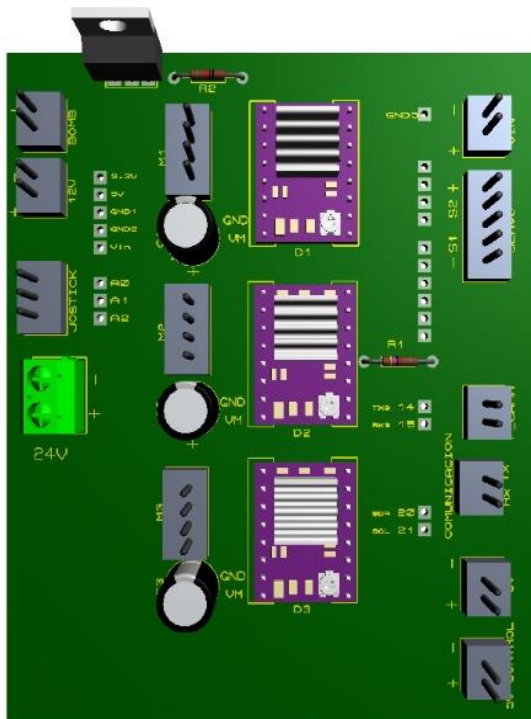
Diseño PCB del circuito de control



En la Figura 75 se muestra el circuito de control en una visualización 3D, que permite conocer la disposición de cada uno de los elementos electrónicos que componen el circuito.

Figura 75

Circuito de control - visualización 3D



3.6.2. Diseño del sistema de control

El Sistema automatizado de inspección va a ser controlado por un control remoto (Figura 76), el mismo que está conformado por dos palancas de mando (joysticks) y una pantalla táctil. Para facilitar el control se realizó un interfaz humano maquina (HMI por sus siglas en ingles) en la pantalla a partir del software que proporciona la marca NEXTION. La propuesta es la navegación por una serie de pantallas que podrán proporcionar al usuario varias funciones de control sobre el sistema. La primera opción es para realizar una inspección manual, la siguiente es para

que la inspección se realice de manera automática y finalmente una opción libre que permitirá al usuario un mayor control sobre las funciones que puede cumplir el sistema.

Figura 76

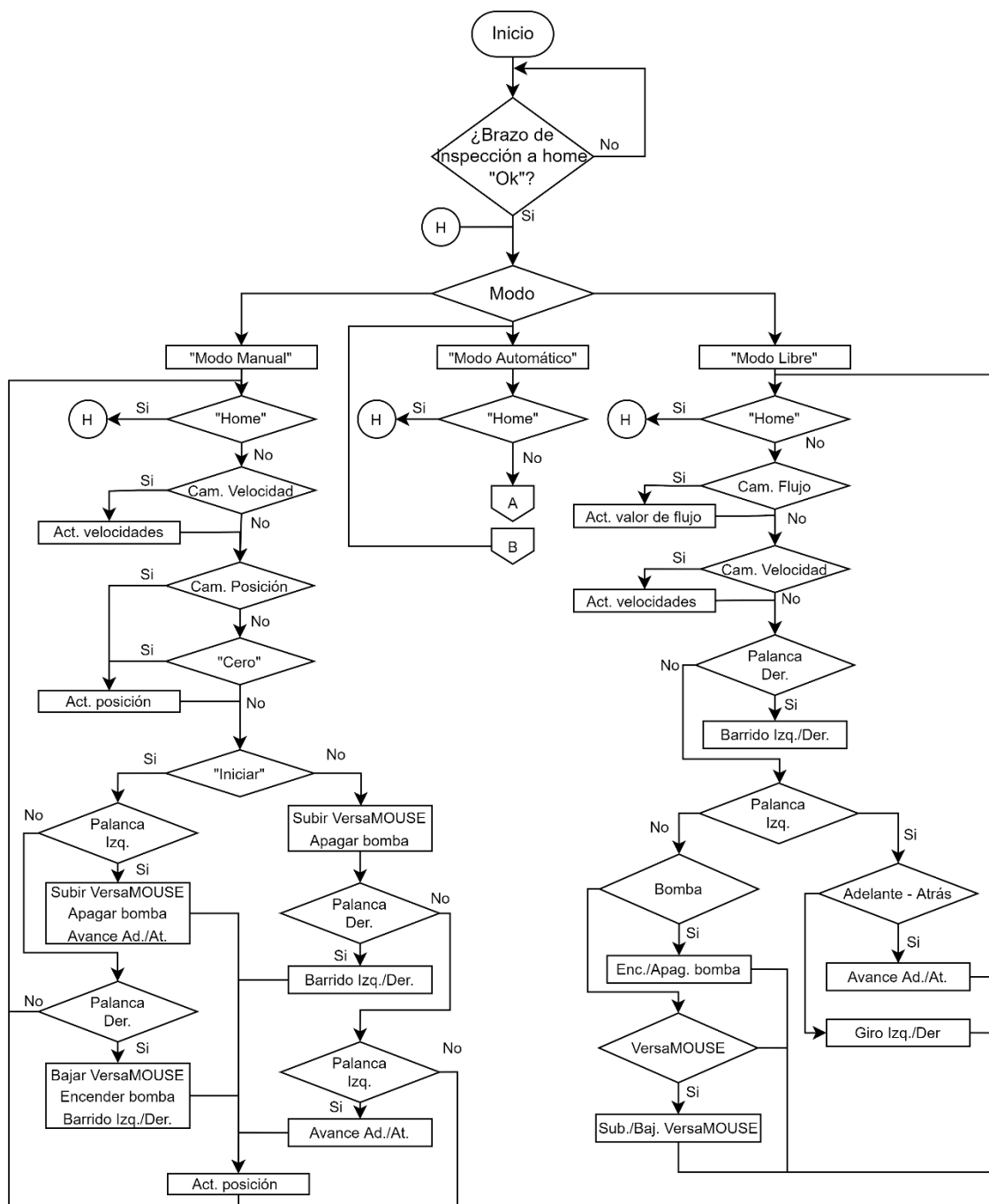
Modelo CAD del control remoto



En la Figura 77 se muestra el diagrama de flujo sobre el funcionamiento general del sistema en los diferentes modos. Cada vez que se realiza alguna acción en la pantalla esta se comunica mediante comunicación serial con el Arduino Mega, permitiendo así el funcionamiento del sistema.

Figura 77

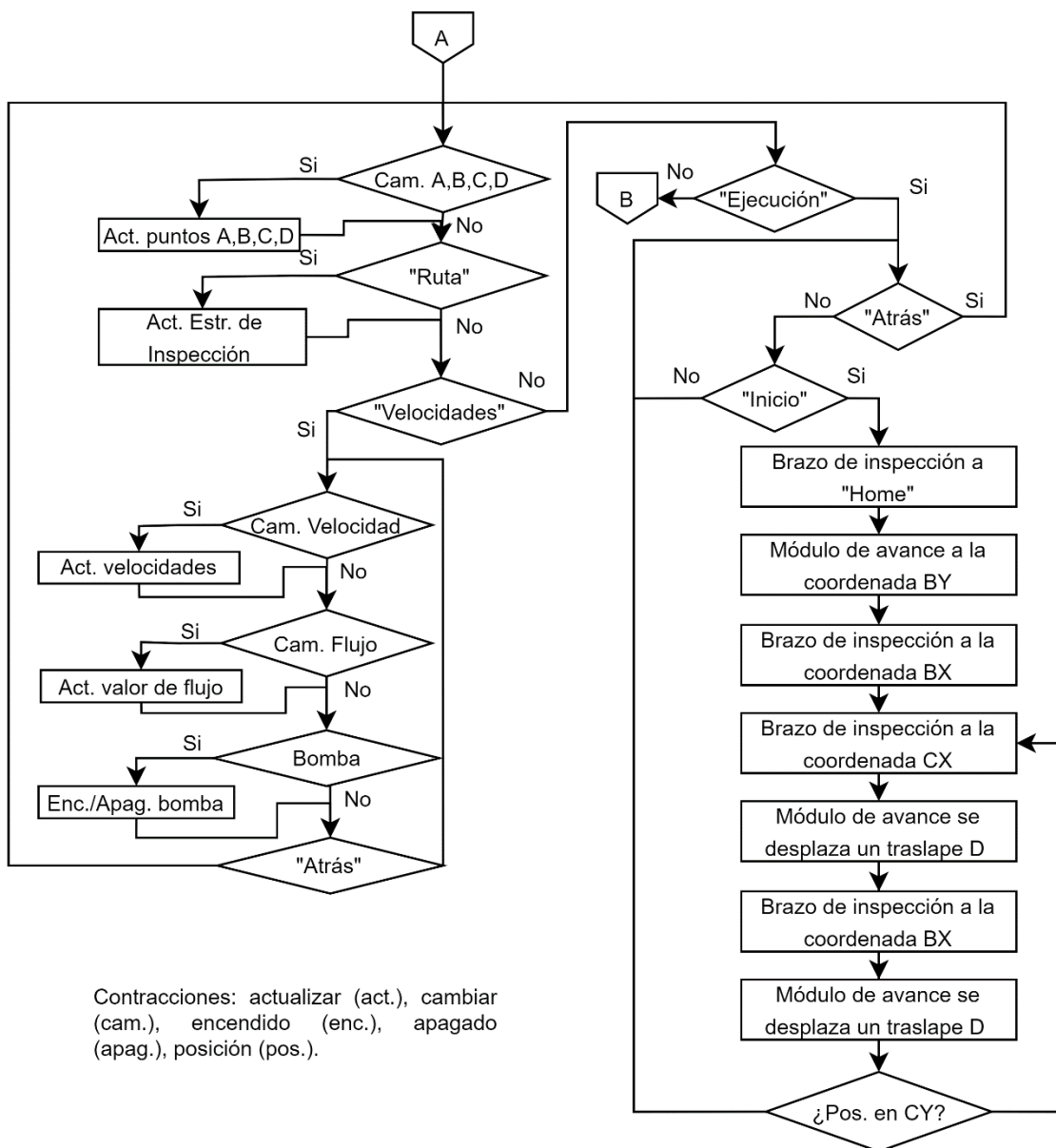
Diagrama de flujo de la interfaz de control



Contracciones: actualizar (act.), cambiar (cam.), izquierda/o (izq.), derecha/o (der), adelante (ad.), atrás (at.), encendido (enc.), apagado (apag.), posición (pos.) y estrategia (estr.).

Figura 78

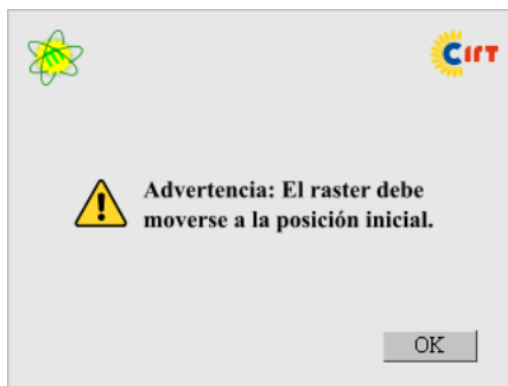
Diagrama de flujo del modo automático



Como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 77, la interfaz de control se inicia enviando el brazo de inspección a "home", que se refiere a la posición inicial para poder tener noción del control de desplazamiento sobre el eje x, se parte de una advertencia para que el usuario acepte que se ejecute la acción, la pantalla se muestra en la Figura 79.

Figura 79

Pantalla de advertencia para enviar el brazo de inspección a home



Cuando el sistema se encuentra en home, se avanza hacia la pantalla del menú principal en donde se muestra en los diferentes modos de operación del sistema para que el usuario pueda escoger, la pantalla de menú se muestra en la Figura 80.

Figura 80

Pantalla de menú principal

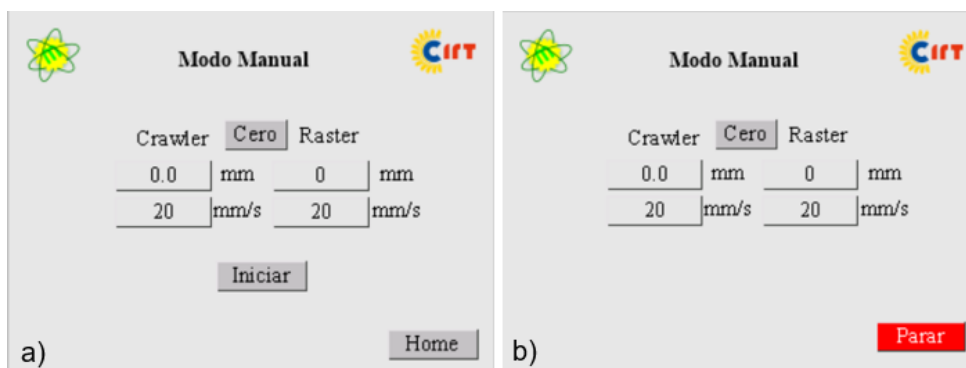


Al acceder al modo manual se encontraran las funciones que se muestran en la Figura 81 a), en donde se puede manejar dos estados, el primero es para posicionar la sonda mediante las palancas en el lugar deseado, y después de presionar “Iniciar” además de poder movilizar la sonda, al mover la palanca para barrido (palanca derecha), se activará el flujo de acoplante y se bajará la sonda a la superficie de la

plancha, cabe recalcar que en este modo se actualiza la posición de la sonda constantemente, en caso de ser necesario mediante el botón “Cero” se asignará la posición de la sonda en eje x y y a cero, el estado de la interfaz iniciada la inspección se muestra en la Figura 81 b).

Figura 81

Pantalla en modo manual

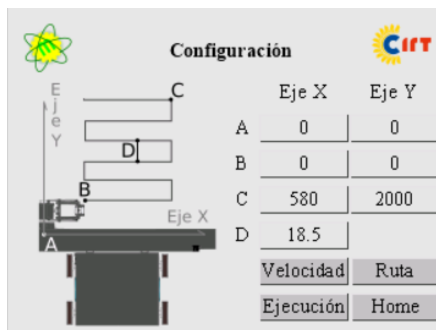


Nota. a) Posicionamiento b) Inspección

Al acceder al modo automático se encuentra la interfaz de la Figura 82, en donde se puede configurar los parámetros de la inspección, principalmente puntos de inicio B, final C y el desplazamiento por etapa (traslape) D, además se muestra un diagrama de cómo procesa los puntos el sistema.

Figura 82

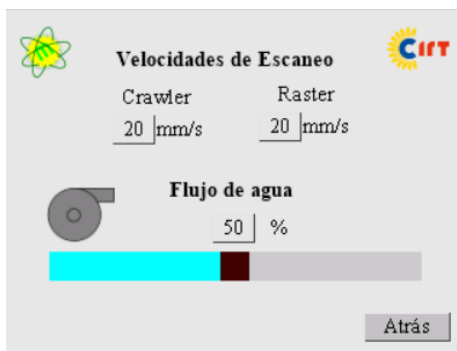
Interfaz de modo automático



Mediante el botón de “Ruta”, se puede escoger otra estrategia de inspección, opción que será agregada por el inspector en caso de necesitarlo ya que para los elementos disponibles actualmente la estrategia de inspección propuesta es la más adecuada. La opción de “Velocidad” permite al usuario acceder a una pantalla donde se puede variar las velocidades y el porcentaje de flujo de acoplante a utilizarse para la ejecución de la inspección automática, en el caso de la imagen se trata de un botón que permite encender la bomba para probar verificar el flujo, ya que la bomba se activará solo en el proceso, la interfaz se puede visualizar en la Figura 83.

Figura 83

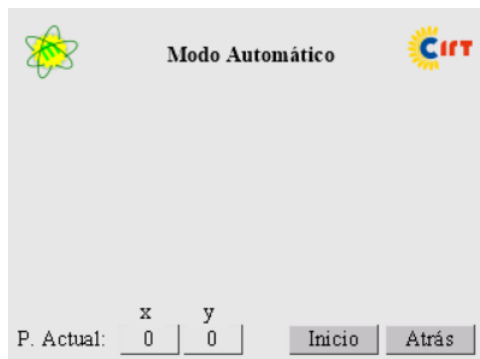
Cambio de velocidades y porcentaje de flujo para el modo automático



El botón “Ejecución” de la Figura 82 permite pasar a la pantalla para ejecución del modo automático (Figura 84), en donde se podrá visualizar el patrón mediante el cual la sonda realiza la inspección sobre la plancha, y donde se podrá visualizar además la posición de la sonda, cuando se pulsa “Inicio” empieza el ciclo del funcionamiento del modo automático, como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 78.

Figura 84

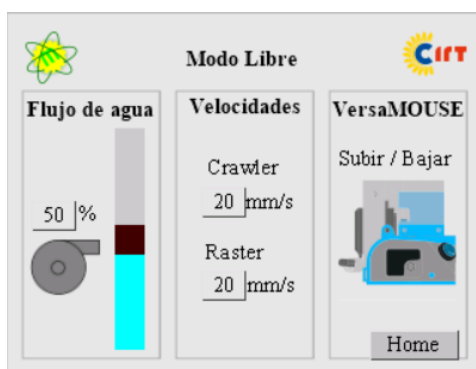
Pantalla de ejecución del modo automático



Al ingresar al modo libre se encontrará la pantalla de la Figura 85, en donde además de las opciones presentes en “Velocidad” (Figura 83), se encuentra la posibilidad de subir o bajar el VersaMOUSE. En este modo a la posibilidad de realizar un barrido de izquierda a derecha mediante la palanca izquierda y mover el módulo de avance adelante y atrás mediante la palanca izquierda (modo manual) se suma la opción de girar el módulo de avance mediante la palanca izquierda moviéndola de lado a lado. A diferencia de los modos manual y automático en este caso no se muestra la posición.

Figura 85

Interfaz modo libre



3.6.3. Suministro de energía

Para determinar el suministro de energía del sistema automatizado de inspección se realiza un cálculo de la potencia requerida de todos los componentes de control y potencia para el correcto funcionamiento del sistema (Rodríguez, 2020).

En la Ecuación (51) se muestra la fórmula aplicada para el cálculo de la potencia considerando los componentes del sistema automatizado de inspección.

$$P_T = P_{motA} + P_{motInsp.} + P_{Servo} + P_{Bomba} + P_{Arduino} + P_{CirtDeControl} + P_{pantalla} \quad (51)$$

Donde P_T es la potencia total requerida del sistema, P_{motA} se refiere a la potencia máxima de los dos motores del módulo de avance, $P_{motInsp.}$ representa el consumo del motor del brazo de inspección, P_{Servo} es la potencia máxima del servo del sistema de acople con el accesorio VersaMOUSE, P_{Bomba} representa la potencia de la bomba para el control del medio acoplante, $P_{Arduino}$ es la potencia del microcontrolador Arduino Mega, $P_{CirtDeControl}$ incorpora la potencia de todos los componentes de control y potencia, y $P_{pantalla}$ trata de la potencia de la pantalla NEXTION del control del sistema.

$$P_{motorA} = 2 \cdot V_{motorA} \cdot I_{motorA} = 2 \cdot 2.8V \cdot \left(2 \cdot 1.68 \frac{A}{fase}\right) = 18.82 W$$

$$P_{motorInsp.} = V_{motorInsp.} \cdot I_{motorInsp.} = 2V \cdot \left(2 \cdot 1.2 \frac{A}{fase}\right) = 4.8 W$$

$$P_T = 18.82W + 4.8W + 6.48W + 9W + 0.644W + 10.92W + 0.45W$$

$$P_T = 51.114 W$$

Dentro de los aspectos a considerar para la selección del suministro de energía se considera que el tiempo de operación del sistema automatizado de inspección es

indefinido. Por lo cual, se establece dos posibles alternativas: fuente de poder y baterías. De la misma manera, se aplica los siguientes criterios de selección: durabilidad, capacidad, costo y tamaño.

Tabla 31

Filtrado de conceptos de suministro de energía

Criterios de selección	Conceptos	
	Fuente de poder	Baterías
Durabilidad	+	-
Capacidad	+	0
Costo	0	-
Tamaño	+	0
Peso	0	-
Suma +	3	0
Suma 0	2	2
Suma -	0	3
Evaluación neta	3	-3
Lugar 1	1	2
¿Continuar?	Si	No

En la Tabla 31 se muestra los resultados de la matriz de filtrado para la selección del suministro de energía, dando como resultado la implementación de una fuente de poder, esta alternativa se adecua correctamente a todos los requerimientos establecidos, además muestra una mejor capacidad en relación con voltaje y corriente necesarios para todos los componentes del sistema, así como el tiempo de operación de este.

De acuerdo con la potencia de consumo obtenida, se selecciona una fuente de alimentación que satisfaga la demanda de energía eléctrica de los componentes del sistema automatizado, también se toma en cuenta los voltajes de operación de los dispositivos dando como resultado la selección de la fuente de alimentación mostrada en la Figura 86, con sus especificaciones técnicas en la Tabla 32 donde muestra las

protecciones que posee como sobrecarga, sobre voltaje, exceso de temperatura y protección contra corto circuito que aseguran el correcto funcionamiento y protección del sistema automatizado de inspección.

Figura 86

Fuente de alimentación WX-DC2416



Nota. Tomado de (Guangzhou Daring Industry Co. Ltd, 2021)

Tabla 32

Características técnicas de la fuente de alimentación WX-DC2416

Característica	Valor
Voltaje de entrada	100 – 240 VAC
Frecuencia de operación	47-63 Hz
Voltaje de salida	24 V DC
Corriente de salida	6 A
Potencia nominal	150 W
Eficiencia	82%
Protecciones	Sobrecarga 150 - 200 %
	Sobre Voltaje 115 – 135 %
	Protección contra cortocircuito
	Exceso de temperatura 100°C ± 5°C

Nota. Tomado de (Guangzhou Daring Industry Co. Ltd, 2021)

Capítulo IV

4. Construcción, pruebas y análisis de resultados

En el presente apartado se muestra el proceso de construcción del sistema automatizado de inspección y de los diferentes módulos que los componen. También, se ejecuta el proceso de calibración del equipo OmniScan Mx2. Finalmente, se realiza una serie de pruebas para validar el correcto funcionamiento del sistema.

4.1. Construcción

4.1.1. Módulo de avance

Las piezas para la estructura del módulo de avance, las ruedas y los laterales del brazo de inspección se construyeron a partir de una plancha de acero ASTM A36 de 3 mm de espesor. El proceso de corte se realiza mediante una cortadora laser y los dobleces con una dobladora CNC para una mayor precisión ejecutado en algunas piezas como se muestra en la Figura 87.

Figura 87

Piezas de la estructura del módulo de avance



En la Figura 88 se muestra el ensamble de los motores paso a paso en las bases construidas, lo cual permite estar alineados a una misma altura. Todas las piezas

fueron diseñadas con herramientas de chapa metálica en el software Inventor, donde se considera el alargamiento de las piezas en los dobleces realizados.

Figura 88

Bases de los motores a paso a paso



Para la elaboración de la cubierta se utilizó una chapa de acero galvanizado de 0.45 mm de espesor. El cual protege al módulo de inspección y todos los componentes internos.

Figura 89

Cubierta del módulo de inspección



En la Figura 90 se muestra el ensamble del chasis del módulo de avance, además en los laterales se muestra las chumaceras de pared para sujetar los ejes de las ruedas. La estructura es muy robusta para evitar que las ruedas estén descentradas y asegurar una trayectoria recta en el movimiento de avance del módulo.

Figura 90

Estructura del módulo de avance



El módulo de avance contiene el sistema de control de todo el sistema automatizado de inspección. Además, se encuentra el suministro de energía y el subsistema que permite el suministro del flujo de acoplante, el cual se encuentra perfectamente aislado con la finalidad de proteger los otros sistemas internos.

Figura 91

Módulo de avance



4.1.2. Movimiento de avance y adherencia

Las ruedas están construidas por dos placas circulares, e internamente posee un imán de ferrita. La rueda está sujeta al eje por medio de 4 pernos como se muestra en la Figura 92, esto permite que la rueda se encuentre correctamente alineada y no exista una excentricidad con el eje.

Figura 92

Rueda magnética



4.1.3. Brazo de inspección

El brazo de inspección mostrada en la Figura 93, permite realizar el barrido de la inspección considerado como el eje x del sistema automatizado de inspección, el cual posee una longitud de movimiento de 500 mm, además posee cuatro ruedas de un material llamando Dirlon que es muy resistente al desgaste, lo que permite que el sistema este correctamente nivelado en relación con la superficie de inspección.

Figura 93

Brazo de inspección - eje x



4.1.4. Movimiento del eje de inspección

En el lado derecho del brazo de inspección se encuentran los soportes de los ejes cromados que permiten la estabilidad del acople del VersaMOUSE, la chumacera del eje roscado y las ruedas que estabilizan el brazo de inspección con la superficie.

Figura 94

Lateral derecho del brazo de inspección



En la Figura 95 se muestra la parte lateral izquierda del brazo de inspección el cual está compuesto por los soportes de los ejes, las ruedas, el final de carrera y el motor a pasos que controla el desplazamiento del acople del VersaMOUSE para la realización del barrido de inspección.

Figura 95

Lateral izquierdo del brazo de inspección



4.1.5. Acople con el accesorio VersaMOUSE

En la Figura 96 se muestra el home del eje de inspección. El acople del VersaMOUSE pulsa el final de carrera con el cual se establece el punto inicial para el desplazamiento del acople con una distancia máxima de 500 mm.

Figura 96

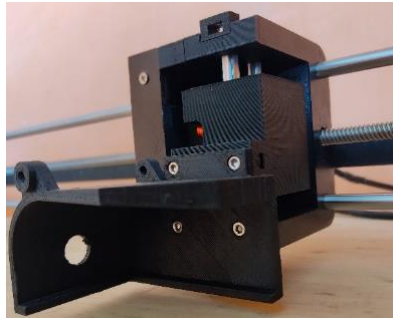
Inicio del recorrido del eje de inspección



Para la construcción del acople del VersaMOUSE de la Figura 97 se realizó a través de impresión 3D, utilizando como material PET-G, el cual posee excelentes características mecánicas. Además, el ensamble es muy sencillo entre el acople y el VersaMOUSE y el tiempo de ensamble es corto.

Figura 97

Sistema de acople del accesorio VersaMOUSE



4.1.6. Sistema eléctrico y electrónico

En la Figura 98 se muestra el circuito de control, con todos los componentes que controlan cada uno de los aspectos del funcionamiento del sistema automatizado de inspección. Además, la placa posee etiquetas de cada uno de los componentes, así como de las entradas y salidas del circuito. Al mismo tiempo, con la finalidad de facilitar el ensamble se utiliza conectores Molex que permiten la correcta conexión de cada uno de los componentes en el circuito de control.

Figura 98

Circuito de control del sistema automatizado de inspección

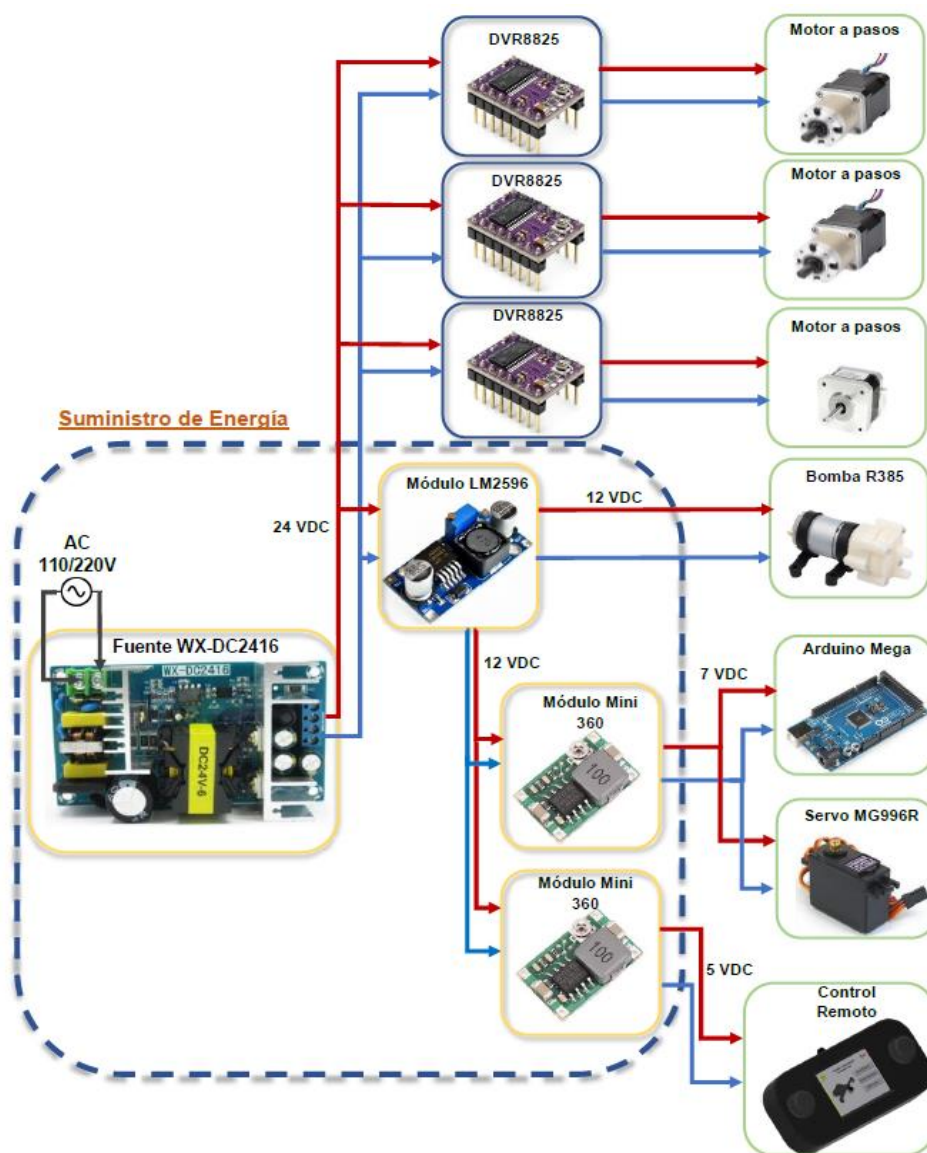


4.1.7. Suministro de energía

En la Figura 99 se muestra el diagrama de alimentación donde se observa los componentes que conforman el suministro de energía y los voltajes de alimentación de todo del sistema automatizado de inspección.

Figura 99

Diagrama de alimentación



4.1.8. Interacción con el usuario

El control remoto mostrado en la Figura 100 está compuesto por dos joysticks que controlan el movimiento del módulo de avance y del brazo de inspección respectivamente, además posee una pantalla táctil que presenta una interfaz hombre – máquina que genera una interacción sencilla e intuitiva con el usuario.

Figura 100

Control remoto



4.1.9. Sistema automatizado de inspección

En la Figura 101 se muestra el sistema automatizado de inspección que permite el desplazamiento en planchas de acero para realizar inspecciones con ultrasonido – arreglo de fases.

Figura 101

Sistema automatizado de inspección



4.2. Inspección ultrasónica con la técnica de arreglo de fases

4.2.1. Equipos, materiales y accesorios utilizados en la inspección

Como primera instancia para la inspección se establece los equipos, materiales y accesorios utilizados en la inspección. La cual se refleja en la Tabla 33.

Tabla 33

Equipos, materiales y accesorios utilizados en la inspección

Tipo	Nombre
Equipo	Detector de defectos multitecnológico OmniScan MX2, marca Olympus
Accesorios	Sistema automatizado de inspección
	VersaMOUSE
	Horquilla PA ajustable
	Cable de codificador de 2.5 m
	Zapata SA10-N55S
	Sonda 5L16-A10
Acoplante	Cable micro coaxial de 2.5m con conexión para OmniScan PA
	Gel acoplante ultrasonido – magnaflux Ultragel
Bloque de calibración	Agua
Materiales	Bloque de reflectores cilíndricos NAVSHIPS con taladros de 1.2 mm. Olympus. Serie Nro. 1021 16
	Placa de acero al Carbono A36 de 1200 de ancho x 2400 de largo y 25 mm de espesor
	Regla métrica

4.2.2. Desarrollo de la inspección mediante barrido sectorial (S-scan)

Ajustes generales. Se realiza el siguiente procedimiento para ingreso de parámetros de ajuste y configuración del equipo OmniScan MX2:

5. Conectar la sonda phased array en el conector PA del equipo.
6. Encender el equipo presionando la tecla de encendido.
7. En el menú principal seleccionar **Setup > New > Save** as. En la ventana que se abre, seleccionar **File name**; se introduce un nombre deseado para el archivo de configuración y seleccionar **Save**.

8. Realizar la configuración en ultrasonido convencional. En el menú principal seleccionar UT Settings y realizar la configuración de la Tabla 34.

Tabla 34

Configuración del equipo.

Menú	Submenú	Parámetros	Valor	
UT Settings	General	Gain (dB)	Se actualizan según configuración	
		Range (mm)		
		Wedge delay (μ s)		
		Velocity (m/s)		
	Pulser	Energy (V)	Low 40	
		PW (ns)	Auto acq.	
		Rate	Optimum	
	Receiver	Filter	BP 5MHz (2.5-8MHz)	
		Rectifier	FW	
		Video filter	On	
		Averaging	1	
		Reject (%)	0	
		Beam	Beam delay (μ s)	0.00
			Gain offset (dB)	0.00
	Advanced	Ref. Amplitude (%)	80.0	
		Set ref. (80.0 %)	--	
		Reference (dB)	Off	
Points Qty.		320		
Sum gain (dB)		Auto		

Configuración de la pieza. Se establece en la Tabla 35 el tamaño, material y forma de la pieza de ensayo. En este caso se trata de una plancha de acero ASTM A36.

Tabla 35

Tamaño, material y forma de la pieza de ensayo

Parámetros de la pieza		
Material	Acero al carbono ASTM A36	
Tipo de muestra	Placa/Plancha	
	Tubo	
	Espesor:	25.4 mm
	Tamaño de placa:	1220 x 2440 mm

Se ingresa los parámetros de la pieza en el equipo de inspección OmniScan MX2 aplicando el siguiente proceso:

1. Seleccionar Wizard > Part & Weld > Start para iniciar con el asistente del submenú Part & Weld.
2. En el submenú Part & Weld se debe ingresar los valores en los parámetros respectivos mostrados en la Tabla 36:

Tabla 36

Parámetros de configuración de la pieza

Menú	Submenú	Parámetros	Valor
Wizard	Part & Weld	Thickness (mm)	25.40 mm
		Material	Steel, Mild
		Specimen type	Plate
		Weld	None

Configuración de sonda y zapata. En la Tabla 37 y Tabla 38 se muestra los parámetros de la sonda y zapata respectivamente, utilizadas para la examinación de la pieza a inspeccionar.

Tabla 37

Parámetros de la sonda

Parámetros de la sonda			
Nro. de parte:	5L16-A10	Marca:	Olympus
Frecuencia:	5Hz	Tipo de array:	Lineal x
Nro. elementos:	16		
Pitch:	0.6 mm		Anular
Apertura activa:	9.6 mm		Matricial
Elevación:	10 mm		
Dimensiones externas			
	L:		23 mm
	W:		16 mm
	H:		20 mm

Nota. Adaptado de (Olympus, 2022i)

Tabla 38

Parámetros de la zapata

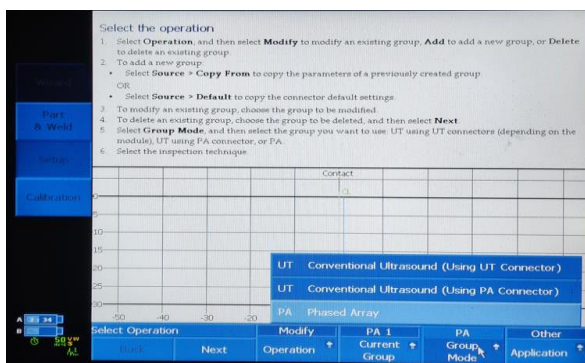
Parámetros de la zapata				
Nro. de parte:	SA10-N55S	Marca:	Olympus	
Tipo de probeta:	A10	Tipo de sonda:	De corte (S)	x
Ángulo refractado:	16		Longitudinal	
Barrido recomendado:	0.6 mm		(L)	
Orientación de la sonda:	9.6 mm	Barrido recomendado:	De 40° a 70°	
Dimensiones externas				
L:	23 mm			
W:	23 mm			
H:	14 mm			

Nota. Adaptado de (Olympus, 2022i).

En la Figura 102 se muestra la selección de modo de grupo Phased Array (PA), para realizar una inspección mediante la técnica de arreglo de fases.

Figura 102

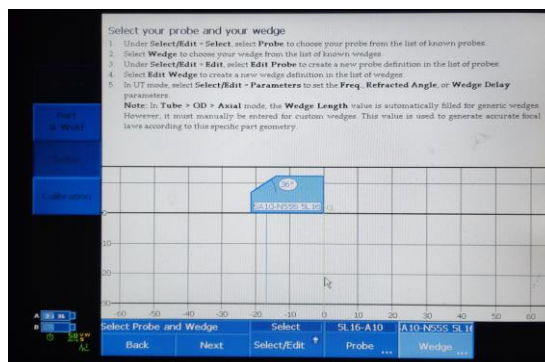
Selección del modo de grupo



Una parte primordial, es la correcta selección de la sonda y zapata que se utiliza, ya que todas las configuraciones se realizan en función de las características de estos dos accesorios. En la Figura 103 se muestra el proceso de selección de la sonda 5L16-A10 y la zapata A10-N55S 5L16.

Figura 103

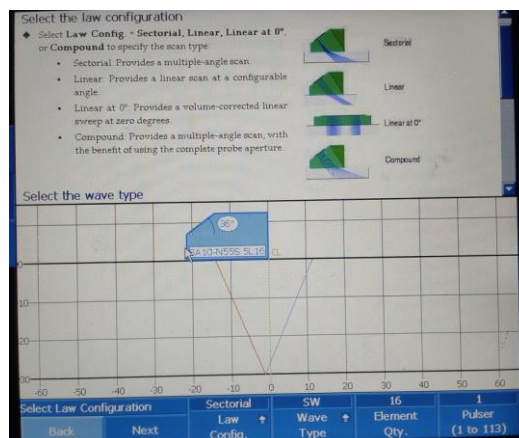
Selección de la sonda y zapata



Para la generación del haz de ultrasonido se selecciona dependiendo el tipo de inspección a realizar, así como los resultados deseados. Para este caso se selecciona un haz sectorial, que permite la generación de múltiples ángulos de escaneo. Además, se seleccionó un tipo de onda transversal y se utiliza todos los 16 elementos que contiene la sonda.

Figura 104

Selección del haz

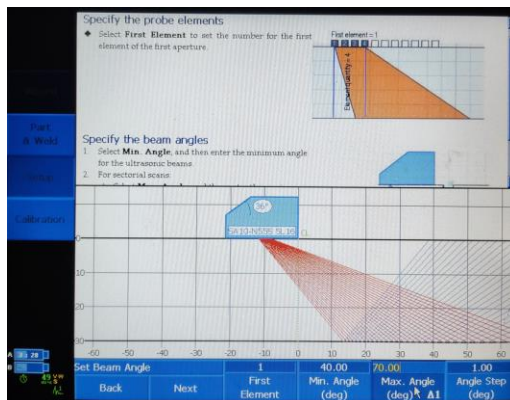


Una gran ventaja del escaneo sectorial es la posibilidad de generar un abanico de ángulos para la inspección, que ayuda a tener una mayor detectabilidad de fallas o discontinuidades de la pieza. La configuración del abanico de ángulos generados se

relaciona con el tipo de zapata utilizada y de acuerdo con la Tabla 38, el rango de ángulos recomendados es de 40° a 70°. En la Figura 105 se visualiza el abanico de ángulos generados por la sonda.

Figura 105

Ángulos de barrido



En la Tabla 39 se muestra todos los valores de configuración relacionado con las leyes focales para inspección por ultrasonido - arreglo de fase.

Tabla 39

Configuración de las leyes focales

Tipo		Sonda		Zapata	
X	PA TOFD	Serie:	A10	Serie:	SA10
		Modelo:	5L16-A10	Modelo:	SA10- N55S
UT					
Skew angle		Barrido		Ángulo	
	0°		Lineal	Inicial:	40°
X	90°	X	Sectorial	Final:	70°
	180°		Compuesto	Paso:	1°
	270°		Simple		
Elementos		Enfoque			
Primero:	1	Dist:	50		
Último:	16	Piernas	1		
Paso:	1				
Cantidad:	16	Profundidad		X	
		Camino sónico			

En la Tabla 40 se muestra todos los parámetros de configuración de la sonda y zapata en el equipo OmniScan MX2.

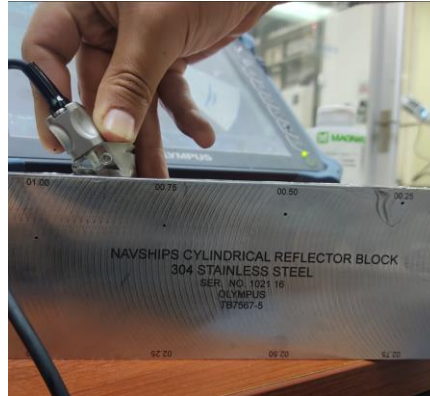
Tabla 40

Parámetros de configuración de la sonda y zapata

Menú	Submenú	Etapá	Parámetros	Valor		
Wizard	Setup	Select operation	Operation	Modify		
			Current group	PA 1		
			Group mode	PA		
		Select probe and wedge	application	Weld		
			select/edit	Select		
			Probe auto	5L16-A10		
			Wedge	SA10-N55S 5L16		
		Select law configuration	General law	Law config	Sectorial	
				Element Qty.	16	
				Pulser (1 to 113)	1	
				Select bean angle	First element	1
					Min. Angle (deg)	40
					Max. Angle (deg)	70
					Angle step (deg)	1
				Focus depth (mm)	50.00	
Skew (deg.)	Left (90°)					
Index offset (mm)	0					
Scan offset (mm)	0					

4.2.3. Calibración


Antes del proceso de inspección es necesario realizar diferentes calibraciones del equipo utilizando la sonda, zapata, gel acoplante y el bloque de reflectores cilíndricos NAVSHIPS para la calibración del equipo en profundidad como se muestra en la Figura 106.

Figura 106*Calibración del equipo*

Calibración en sensibilidad del ultrasonido. En la calibración de sensibilidad se toma como referencia el agujero a 0.75 in de profundidad desde la superficie del bloque de calibración NAVSHIPS. Se establece la referencia de amplitud y el abanico de ángulos para la inspección, seguido en la ventana del A-Scan se busca el máximo pico de la señal modificando la posición de la compuerta para su visualización. Una vez encontrado se establece el pico a una referencia del 80%.

Después, se desplaza suavemente la sonda hacia delante y hacia atrás sobre el bloque de calibración, pasando por el reflector para que genere una envolvente de señal uniforme con una amplitud máxima inferior al valor de la Ref. Amplitude (%). De ser necesario se calibra nuevamente hasta encontrar la ganancia adecuada Gain (dB) para que la señal del reflector se encuentre dentro de la referencia de la amplitud. En la Tabla 41 se muestra los parámetros utilizados en la calibración de sensibilidad.

Tabla 41*Calibración en sensibilidad.*

Modo	Parámetro	Valor	Resultado
Sensibility	Ref.	80%	
	Amplitude (%)		
	Tolerance (%)	5% (valor por defecto)	
	First angle (°)	40°	
	Last angle (°)	70°	
	Start (mm)	Ajustable en función de la señal del agujero	
	With (mm)		
	Threshold (%)	10%	
	Gain(dB)	Colocando a una referencia del 80% se obtiene una ganancia de 25.2(dB)	


Calibración en velocidad del ultrasonido. El objetivo de la calibración de la velocidad de propagación acústica es medir la velocidad real de las ondas de ultrasonido en el material bajo inspección. El bloque de calibración debe contar con dos reflectores conocidos para lo cual se utiliza el bloque de calibración NAVSHIPS de la Figura 106.

En la calibración de velocidad se coloca la distancia en profundidad de dos reflectores. Después, se busca el máximo pico de la señal en la profundidad 1 ajustando los parámetros Start (mm) y Range (mm) obteniendo la posición del reflector, de igual manera se repite el proceso con el reflector de la profundidad 2. Como resultado, la

velocidad del ultrasonido esta calibrada. Los parámetros utilizados en la calibración de velocidad de ultrasonido se muestran en la Tabla 42.

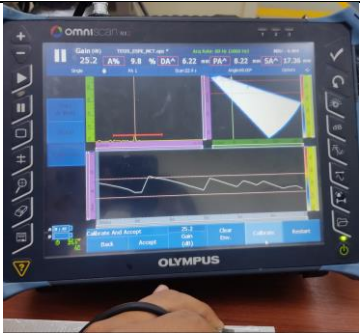
Tabla 42

Calibración de velocidad del ultrasonido

Modo	Parámetro	Valor	Resultado
Velocity	Depth 1 (mm)	6.35 mm (0.25 in)	
	Depth 2 (mm)	19.05 mm (0.75 in)	
	Angle (°)	55 °	
	Start (mm)	Ajustable en función	
	With (mm)	de cada señal del agujero	
	Threshold (%)	10%	

Calibración de retardo de zapata. Para la calibración del retardo de zapata en este caso se aplica para todas las leyes focales. Una vez establecido los parámetros se desplaza la sonda hacia delante y atrás sobre el reflector de calibración para generar una envolvente que se encuentre dentro de los valores de tolerancia. Si la calibración es correcta la envolvente se encuentra dentro de las dos líneas rojas mostrada en la figura de la Tabla 43.

Tabla 43*Calibración de retardo de zapata*

Modo	Parámetro	Valor	Resultado
Wedge Delay	Apply To	All angles	
	Gain ()	25.2 (dB)	

4.2.4. Configuración del VersaMOUSE

Para la inspección se establece los parámetros de configuración del accesorio VersaMOUSE. Existen varias posibles configuraciones, pero para el tipo de barrido propuesto se establece la configuración mostrada en la Tabla 44 que permite el aumento de la distancia recorrida del encoder indiferentemente si el movimiento es hacia adelante o hacia atrás.

Tabla 44*Configuración VersaMOUSE*

Menú	Submenú	Parámetro	Valor
Scan	Encoder	Type	Up
		Resolution	2.1 steps/mm

4.3. Pruebas y análisis de resultados

El proceso de automatización se cumple cuando a partir del sistema es posible realizar la inspección de manera autónoma, y parte importante de la automatización es que posterior a la toma de datos el inspector pueda analizarlos y localizar las fallas o

defectos en el objeto de prueba, que en este caso es la plancha, aspecto que es posible gracias a la utilización del VersaMOUSE que es el encargado de registrar la posición en el equipo.

Debido a la naturaleza del proceso se ha determinado que una opción viable de validación de la hipótesis es mediante la validación del sistema a partir de pruebas que impacten directamente al proceso de toma de datos en el proceso de inspección, y en este caso se trata de la exactitud y precisión del desplazamiento del sistema sobre la plancha.

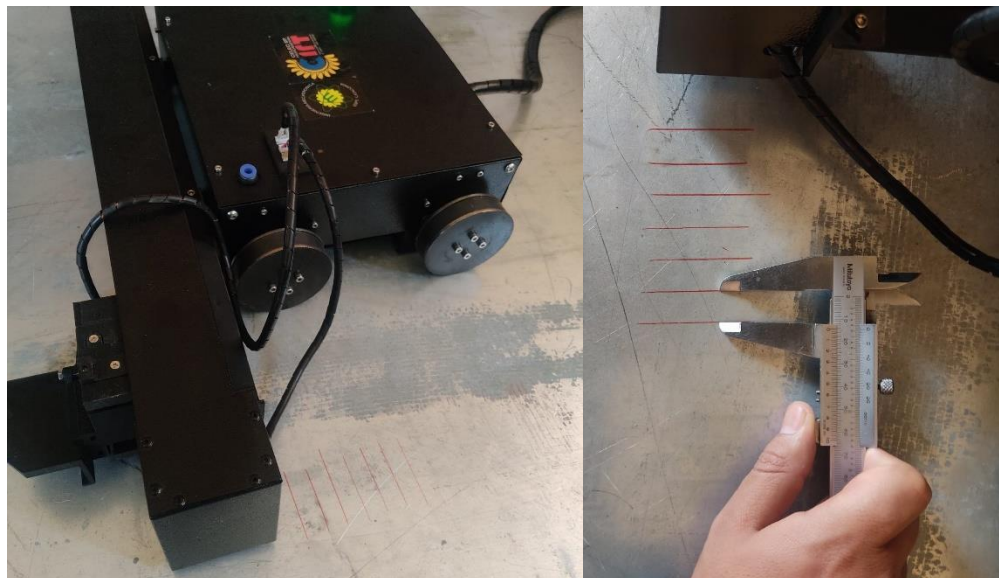
4.3.1. Pruebas de precisión y exactitud del módulo de avance

El módulo de avance es el encargado de desplazar el brazo de inspección en dirección del eje y, es decir permite realizar el traslape de la sonda para realizar los barridos necesarios hasta completar el área de la plancha que debe ser inspeccionada.

Metodología de toma de datos. Se ajustó una velocidad aproximada del módulo de avance de 20 mm/s y se probó con un desplazamiento repetitivo de 15 mm , que es el valor del traslape a utilizar con la sonda disponible en la empresa cuyos datos se describen en la Tabla 37. Los valores de desplazamiento se marcaron en la plancha de prueba y fueron medidos con la ayuda de un calibrador como se muestra en la Figura 107. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 45.

Figura 107

Toma de datos del módulo de avance



Nota. (Izquierda) Marcas de desplazamiento. (Derecha) Medición del traslape.

Tabla 45

Datos obtenidos del módulo de avance

Dato	Medición [mm]	Error [mm]
1	14,5	0,5
2	15	0
3	15,2	-0,2
4	14,9	0,1
5	15	0
6	14,7	0,3
7	15,5	-0,5
8	15,1	-0,1
9	14,6	0,4
10	15,2	-0,2

Exactitud. La exactitud e no es más que el desfase que tienen los datos con respecto al valor aceptado y puede ser calculado a partir de la Ecuación (52) (Gutiérrez & De la Vara, 2009):

$$e = \bar{x} - \mu \quad (52)$$

En donde \bar{x} es la media aritmética y μ es el valor aceptado.

El valor de la media aritmética se puede calcular a partir de la Ecuación (53), en donde n es el número de datos y x_i es el valor de la muestra en dicho dato.

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^n x_i}{n} \quad (53)$$

Reemplazando valores en la Ecuación (53) se obtiene:

$$\bar{x} = \frac{149.7}{10}$$

$$\bar{x} = 14.97 \text{ mm}$$

Al reemplazar en la Ecuación (52) se obtiene el valor del porcentaje de error determinado.

$$e = 14.97 - 15$$

$$e = -0.03 \text{ mm}$$

Precisión. El concepto de precisión se relaciona a que tan dispersos se encuentran los valores respecto al valor de referencia y se puede determinar con el cálculo de la desviación estándar S mediante la Ecuación (54) (Ortiz & Paredes, 2021).

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (54)$$

$$S = \sqrt{\frac{0.841}{9}}$$

$$S = 0.31 \text{ mm}$$

Validación de resultados por el método T-Student. Mediante el procedimiento estadístico T-Student, se procede a validar la precisión y exactitud del módulo de avance, dado el caso de que hay que plantear la hipótesis nula respecto a un valor específico, se debe aplicar una prueba bilateral en donde la hipótesis nula H_0 y la hipótesis alternativa H_1 se plantean de la siguiente manera:

H_0 los valores obtenidos en las pruebas son iguales al valor de referencia

$$H_0 \rightarrow \mu = 15 \text{ mm}$$

H_1 los valores obtenidos en las pruebas no son iguales al valor de referencia

$$H_1 \rightarrow \mu \neq 15 \text{ mm}$$

En este punto es necesario calcular el valor T mediante la Ecuación (55).

$$T = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (55)$$

$$T = \frac{14.97 - 15}{\frac{0.31}{\sqrt{10}}}$$

$$T = -0.306$$

Para obtener un valor T-Student con una confianza del 90% y con 9 grados de libertad ($n - 1$) se utiliza la tabla T-Student que se encuentra en el Anexo 6, y se obtiene un valor de $t_\alpha = 1.3830$

$$-t_\alpha < T < t_\alpha$$

$$-1.3830 < -0.306 < 1.3830$$

Con un nivel de confianza del 90% se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa permitiendo asegurar que el módulo de avance tiene un error de desplazamiento aceptable.

4.3.2. Pruebas de precisión y exactitud del brazo de inspección

El brazo de inspección es el encargado de realizar el barrido o para efectos prácticos, es el encargado de movilizar el VersaMOUSE (montado con la sonda) sobre la superficie de la plancha en el eje x o eje de inspección. En primer lugar, se realizó pruebas solamente del desplazamiento del acople del VersaMOUSE, en si se probó la precisión del tornillo sin fin y se obtuvieron excelentes resultados, al no encontrar fallas en el mecanismo se optó por probarlo directamente con el equipo de inspección, ya que lo más importante es que el desplazamiento que se tiene físicamente se encuentre en el equipo de inspección.

Metodología de toma de datos. La metodología de toma de datos consiste en tomar medidas del desplazamiento del VersaMOUSE sobre el eje de inspección. Las pruebas fueron realizadas a una velocidad de inspección aproximada de 20 mm/s , la distancia de desplazamiento fue de 500 mm, comparando la posición real con la que se reflejaba en el equipo de escaneo OmniScan MX2 en la variable "Scan" como se observa a la izquierda de la Figura 108, puesto que es el valor de la posición con la que se van a guardar los datos de inspección en el equipo y representará el valor a tomar en cuenta por el inspector cuando realice el análisis de los datos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 46.

Figura 108

Toma de datos del brazo de inspección



Nota. (Izquierda) Variable “Scan” en el OmniScan MX2. (Derecha) Medición del recorrido del brazo de inspección.

Tabla 46

Datos del brazo de inspección

Dato	Medición [mm]	Error [mm]
1	500.91	0.91
2	503.28	3.28
3	494.33	-5.67
4	498.06	-1.94
5	502.14	2.14
6	497.52	-2.48
7	506.03	6.03
8	501.45	1.45
9	499.67	-0.33
10	500.89	0.89

Porcentaje de exactitud. Al igual que con el módulo de avance se procede a calcular el porcentaje de exactitud a partir de la ecuación para lo cual es necesario primero conocer la media aritmética con la Ecuación (53).

Media aritmética:

$$\bar{x} = \frac{5004.28}{10}$$

$$\bar{x} = 500.428 \text{ mm}$$

Porcentaje de error determinado se calcula mediante la Ecuación (52):

$$e = 500.428 - 500$$

$$e = 0.428 \text{ mm}$$

Precisión. Para determinar qué tan dispersos se encuentran los datos se calculará la desviación estándar de los datos de la prueba mediante la Ecuación (54).

$$S = \sqrt{\frac{97.593}{9}}$$

$$S = 3.292 \text{ mm}$$

Validación de resultados por el método T-Student. Mediante el procedimiento estadístico T-Student, se procede a validar la precisión y exactitud del brazo de inspección, dado el caso de que hay que plantear la hipótesis nula respecto a un valor específico, se debe aplicar una prueba bilateral en donde la hipótesis nula H_0 y la hipótesis alternativa H_1 se plantean de la siguiente manera:

H_0 los valores obtenidos en las pruebas son iguales al valor de referencia

$$H_0 \rightarrow \mu = 500 \text{ mm}$$

H_1 los valores obtenidos en las pruebas no son iguales al valor de referencia

$$H_1 \rightarrow \mu \neq 500 \text{ mm}$$

En este punto es necesario calcular el valor T mediante la Ecuación (55).

$$T = \frac{500.482 - 500}{\frac{3.292}{\sqrt{10}}}$$

$$T = 0.463$$

Para obtener un valor T-Student con una confianza del 90% y con 9 grados de libertad ($n - 1$) se utiliza la tabla T-Student que se encuentra en el Anexo 6, y se obtiene un valor de $t_\alpha = 1.3830$

$$-t_\alpha < T < t_\alpha$$

$$-1.3830 < 0.4630 < 1.3830$$

Con un nivel de confianza del 90% se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa permitiendo asegurar que el brazo de inspección tiene un error de desplazamiento aceptable.

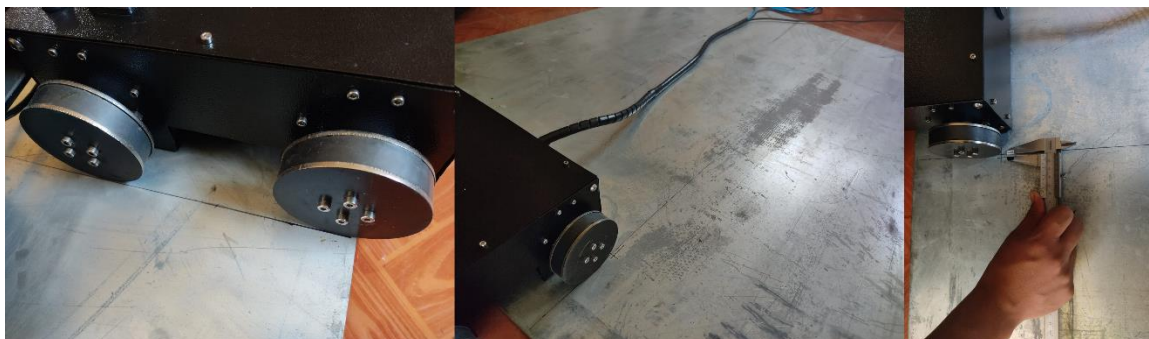
4.3.3. Pruebas de orientación del módulo de avance

Debido a la necesidad de que el sistema se mueva en línea recta es de vital importancia verificar su comportamiento en este aspecto, ya que si presenta ángulos de desviación muy grandes podría dificultar la ubicación de defectos y discontinuidades en la plancha.

Metodología de toma de datos. Para poder realizar mediciones de la desviación del sistema en una trayectoria recta, se ha empezado por trazar una línea para que el sistema recorra una longitud de 2000 mm y al final se ha medido la diferencia de distancia entre la línea trazada y el mismo punto en la posición de llegada, permitiendo calcular a partir del Teorema de Pitágoras el ángulo de desviación de la trayectoria. En la Figura 109 se puede visualizar el entorno de prueba y en la Tabla 47 los resultados obtenidos.

Figura 109

Toma de datos de la distancia de desviación del sistema



Nota. (Izquierda) Inicio del desplazamiento. (Centro) Final del desplazamiento.

(Derecha) Medición de la desviación.

Tabla 47

Datos de desviación del sistema

Dato	Medición [mm]	Ángulo [°]
1	6	0.17
2	3	0.09
3	5	0.14
4	2	0.06
5	0	0.00
6	3	0.09
7	-5	-0.14
8	2	0.06
9	0	0.00
10	-1	-0.03
11	-1	-0.03
12	2	0.06
13	3	0.09
14	-2	-0.06
15	2	0.06
16	0	0.00
17	-3	-0.09
18	1	0.03
19	0	0.00
20	-4	-0.11

Validación de resultados por el método T-Student. Para validar las pruebas se va a utilizar el método de T-Student bilateral ya que se quiere verificar si los valores pertenecen estadísticamente al valor base, en primer lugar, se plantea hipótesis nula H_0 y la hipótesis alternativa H_1 .

H_0 los valores obtenidos en las pruebas son iguales al valor de referencia

$$H_0 \rightarrow \mu = 0^\circ$$

H_1 los valores obtenidos en las pruebas no son iguales al valor de referencia

$$H_1 \rightarrow \mu \neq 0^\circ$$

Para poder calcular el valor de T es necesario obtener de los datos la media y la desviación estándar, los mismo que se calculan a partir de las Ecuación (53) y Ecuación (54) respectivamente.

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{0.4583}{20}$$

$$\bar{x} = 0.0229^\circ$$

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{0.1176}{19}}$$

$$S = 0.0787$$

Reemplazando en la Ecuación (55) para obtener el valor de T .

$$T = \frac{0.0229 - 0}{\frac{0.0787}{\sqrt{20}}}$$

$$T = 1.301$$

Para obtener un valor T-Student con una confianza del 90% y con 19 grados de libertad ($n - 1$) se utiliza la tabla T-Student que se encuentra en el Anexo 6, y se obtiene un valor de $t_\alpha = 1.3277$

$$-t_\alpha < T < t_\alpha$$

$$-1.3277 < 1.301 < 1.3277$$

Con un nivel de confianza del 90% se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa permitiendo asegurar que el sistema tiene una desviación en su ángulo de orientación aceptable.

4.4. Adquisición de datos de inspección en planchas

En la Figura 110 se muestra el funcionamiento del sistema automatizado de inspección en modo automático. Al mismo tiempo, controla el flujo de acoplante (agua) para el acople acústico entre la sonda y la superficie a inspeccionar. Es necesario resaltar que el accesorio VersaMOUSE mejora la estabilidad de la sonda y la mantiene paralela a la superficie de inspección, lo cual asevera una inspección correcta.

Figura 110

Automatización de la inspección con ultrasonido-arreglo de fases

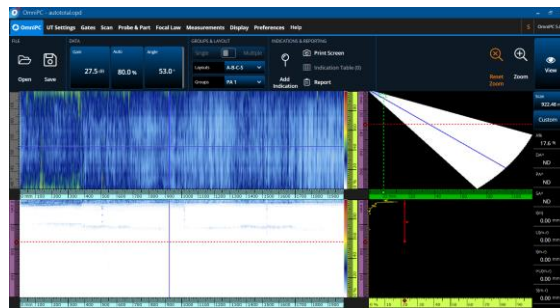


Nota. (Izquierda) Inicio de la inspección. (Derecha) Finalización de la inspección

Un aspecto importante es el almacenamiento de los datos de inspección generados en relación con la distancia recorrida por el eje de inspección, de este modo el inspector luego de un análisis e interpretación de los datos obtenidos pueda localizar la falla o discontinuidad en la plancha de ser el caso que exista. Cabe destacar que el análisis de los datos se puede realizar en el equipo OmniScan MX2 o a través del software especializado llamado OmniPC como se muestra en la Figura 111.

Figura 111

Datos generados durante la inspección



Después de verificar mediante el método estadístico T-Student bilateral, los datos obtenidos en las pruebas se consideran aceptables con relación al valor de referencia respecto al desplazamiento del brazo de inspección y del módulo de avance, y de la misma manera haber comprobado que el ángulo de orientación del sistema no varía considerablemente, se puede asegurar que el sistema se desplaza de manera correcta sobre la plancha; además con el sistema en funcionamiento se obtiene una correcta adquisición de datos de inspección por parte del equipo, es posible afirmar que: El diseño y construcción de un sistema automatizado de inspección con ultrasonido - arreglo de fases permite automatizar el control de calidad en planchas de acero.

4.5. Análisis de costos

En la Tabla 48 se detallan los materiales mecánicos eléctricos y electrónicos utilizados para la construcción del sistema automatizado de inspección.

Tabla 48

Análisis económico del sistema de inspección automático

Lista de materiales				
#	Descripción	Precio u.	Cantidad	Total
1	Acople flexible de 5 a 8 mm	\$ 4.00	1	\$ 4.00
2	Acoples	\$ 4.00	2	\$ 8.00
3	Amarras	\$ 0.15	2	\$ 0.30
4	Angulo	\$ 2.00	2	\$ 4.00
5	Anticorrosivo negro	\$ 2.15	1	\$ 2.15
6	Barniz	\$ 2.20	1	\$ 2.20
7	Bomba R385 90	\$ 8.00	1	\$ 8.00
8	Cable 5 metros 2 hilos	\$ 0.50	5	\$ 2.50
9	Cable UTP flexible	\$ 2.93	1	\$ 2.93
10	Carcaza metálica	\$ 50.00	1	\$ 50.00
11	Chumacera 12 mm	\$ 6.75	4	\$ 27.00
12	Chumacera 8 mm	\$ 3.50	1	\$ 3.50
13	Conectores	\$ 0.40	3	\$ 1.20
14	Corte MDF	\$ 2.30	1	\$ 2.30
15	Eje cromado 8 MM	\$ 12.50	2	\$ 25.00
16	Eje nylon 1,5 in	\$ 7.00	1	\$ 7.00
17	Enchufe	\$ 1.00	1	\$ 1.00
18	Imanes	\$ 3.00	4	\$ 12.00
19	Interruptor	\$ 1.20	1	\$ 1.20
20	Módulo joystick	\$ 3.00	3	\$ 9.00
21	Lija	\$ 0.50	1	\$ 0.50
22	Luz piloto	\$ 1.40	1	\$ 1.40
23	Mecanizado eje	\$ 18.00	1	\$ 18.00
24	Mini final de carrera switch	\$ 0.50	2	\$ 1.00
25	Driver DVR8825	\$ 3.25	3	\$ 9.75
26	Motores 2	\$ 41.75	2	\$ 83.50
27	Pantalla NEXTION 2.8"	\$ 42.00	1	\$ 42.00
28	Pernos allen	\$ 18.10	1	\$ 18.10
29	Piedra de pulir taladro	\$ 2.30	1	\$ 2.30
30	Placa PCB	\$ 8.50	1	\$ 8.50
31	Plancha galvanizada 0.45 mm	\$ 23.74	1	\$ 23.74

Lista de materiales				
#	Descripción	Precio u.	Cantidad	Total
32	Reductor 8 a 6 mm	\$ 1.00	2	\$ 2.00
33	Regulador LM296	\$ 2.25	1	\$ 2.25
34	Regulador mini360	\$ 1.50	2	\$ 3.00
35	Rieles para interruptor	\$ 0.15	2	\$ 0.30
36	Acople servomotor	\$ 2.50	4	\$ 10.00
37	Rodamientos lineales 8mm	\$ 2.75	3	\$ 8.25
38	Rollo de PET - G	\$ 20.00	1	\$ 20.00
39	Ruedas 625 zz	\$ 4.00	4	\$ 16.00
40	Servo MG996	\$ 13.00	1	\$ 13.00
41	Thinner	\$ 2.35	1	\$ 2.35
42	Tornillo 60 cm y tuerca 4 entradas	\$ 23.50	1	\$ 23.50
43	Tornillos	\$ 0.02	28	\$ 0.56
44	Tubo 6 mm	\$ 3.81	1	\$ 3.81
45	Tubo 8 mm	\$ 2.20	1	\$ 2.20
46	Zócalos y espadines	\$ 4.00	1	\$ 4.00
47	Motor Nema 17 KS42STH40	\$ 17.00	1	\$ 17.00
48	Fuente de alimentación de 24V 6A	\$ 18.00	1	\$ 18.00
TOTAL=				\$ 528.29

Capítulo V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un sistema automatizado de inspección con ultrasonido - arreglo de fases para el control de calidad de planchas de acero en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas "CIRT.
- Se realizaron pruebas tomando datos de desplazamiento tanto del módulo de avance como del brazo de inspección, con la intención de calcular la precisión y exactitud respecto a estos datos, obteniendo para el módulo de avance una precisión de 0.31 mm y una exactitud de -0.3 mm , mientras que para el brazo de inspección se obtuvo una precisión de 3.29 mm y una exactitud de 0.43 mm . Se realizó una tercera prueba tomando datos para el cálculo del ángulo de desviación del sistema en trayectorias rectas obteniendo una tendencia a desviación 0.
- El sistema de automatización fue diseñado específicamente para trayectorias rectas, con la finalidad de que el inspector luego de un análisis e interpretación de los datos obtenidos pueda localizar la falla o discontinuidad, considerando la plancha como un plano cartesiano cuyo origen es el punto inicial de la inspección.
- Se diseñó un mecanismo conformado por un tornillo sin fin y una tuerca encargado de trasladar el VersaMOUSE junto con la sonda a través de la plancha (eje x), para que la sonda tome los datos de inspección mientras que el encoder del VersaMOUSE tome datos de desplazamiento, y debido a que las ruedas del encoder solo pueden moverse en un eje fue necesario implementar

otro mecanismo, esta vez tipo leva para poder levantar el VersaMOUSE y permitir el desplazamiento del sistema en el eje y, a todo este módulo se lo llamó Brazo de Inspección.

- Se diseñó un módulo de avance (eje y) que desplaza todo el sistema automatizado de inspección y se encarga del traslape de al menos el 10% del ancho activo o dimensión transversal de la sonda de acuerdo con la norma CCH 70-4, como resultado se seleccionó un motor a pasos de alto torque para un control del traslape en milímetros de la sonda con la finalidad de abarcar toda el área a inspeccionar.
- Para el módulo de avance se seleccionó un sistema de movimiento conformado por cuatro ruedas magnéticas utilizando imanes de ferrita que poseen una excelente fuerza de adherencia en superficies ferromagnéticas, como resultado mejora la estabilidad y posicionamiento de la sonda durante la inspección.
- La baja velocidad y la adherencia de las ruedas magnéticas contribuye a tener una alta precisión y exactitud.
- Se analizó el diseño mecánico en las piezas más críticas, en elementos de forma simple como es el caso de los ejes guía y las bases del módulo de avance, se realizaron cálculos del factor de seguridad verificando que fue mayor a 2, al igual que se verificó que se encontrara dentro del rango de deflexión máxima, mientras que para los ejes de las ruedas se calculó un factor de seguridad mayor a 4 al tratarse de cargas repetidas. Además, para las piezas críticas y de forma compleja el análisis se realizó mediante CAE, comprobando que la carcasa de sujeción del VersaMOUSE y el soporte del mecanismo de la leva posean un factor de seguridad superior a 2.

- El control remoto diseñado permite al usuario interactuar con el sistema mediante una pantalla táctil de cuya interfaz gráfica facilita la configuración y visualización de los diferentes parámetros del proceso, y además a partir de la incorporación de palancas se pudo hacer que el desplazamiento del sistema sea más intuitivo.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda antes de iniciar cualquier modo de inspección, encender la bomba para que pueda fluir el acoplante en la tubería ya que, debido a la longitud de esta, tardaría en llegar a la zapata y se obtendría datos erróneos.
- Se sugiere realizar una limpieza previa del área a inspeccionar para que la toma de datos se realice de manera óptima y de igual manera un correcto desplazamiento del sistema.
- Es necesario mediante la bomba drenar los residuos de acoplante de la tubería y al mismo tiempo secar las ruedas para evitar su oxidación antes de almacenar el sistema automatizado de inspección.
- Es recomendable verificar que el cable de la sonda este lo suficientemente suelto para que el sistema se pueda desplazar libremente, al ser de tan solo 2.5 m, se limita al ser sujetado al sistema.
- Es posible mejorar el rendimiento del sistema incrementando la frecuencia de procesamiento.
- Verificar el correcto acople del VersaMOUSE con el sistema automatizado de inspección antes de realizar cualquier movimiento, ya que podría generar daños. Para lo cual se puede utilizar el modo libre que permite el control individual de

todos los aspectos del sistema con la finalidad de comprobar su correcta funcionalidad.

- Para una inspección óptima se recomienda utilizar las configuraciones establecidas por defecto en la interfaz de usuario, resultado de una serie de pruebas del funcionamiento del sistema.

5.3. Trabajos futuros

- El diseño propuesto se puede escalar a un diseño más compacto para su desplazamiento en superficies circulares (tuberías) y superficies irregulares como turbinas hidráulicas con la finalidad de realizar inspecciones de manera autónoma y al mismo tiempo segura para el inspector.
- Para la construcción de las ruedas se puede utilizar imanes con mejores características magnéticas acompañadas de un sistema de transmisión de movimiento con la finalidad de escalar e inspeccionar en superficies que se encuentren a diferentes grados de inclinación inclusive en superficies verticales.

Bibliografía

Aname. (2022). *MEDIDORES COEFICIENTE ESTATIVO Y CINÉTICO FRICCIÓN*.

<https://www.medidafuerzaytorsion.com/index.php/es/equipos-de-medicion/category/52-medida-de-friccion>

Bilurbina, L., & Iribarren, J. (2002). *Diseño de equipos e instalaciones* (1.^a ed.). Edicions UPC.

Cai, J., He, K., Fang, H., Chen, H., Hu, S., & Zhou, W. (2017). The design of permanent-magnetic wheeled wall-climbing robot. *2017 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2017, July*, 604-608.

<https://doi.org/10.1109/ICInfA.2017.8078979>

Carrigan, T. D., Forrest, B. E., Andem, H. N., Gui, K., Johnson, L., Hibbert, J. E., Lennox, B., & Sloan, R. (2019). Nondestructive Testing of Nonmetallic Pipelines Using Microwave Reflectometry on an In-Line Inspection Robot. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *68*(2), 586-594.

<https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2847780>

CIRT. (2016). *Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales*. <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/cirt>

Eddyfi Technologies. (2021, enero 11). *Eddyfi Technologies*.

<https://www.eddyfi.com/en/product/scanners>

Electronics, A. (2022). *Mini Bomba de Agua de Membrana R385 - AV Electronics*.

<https://avelectronics.cc/producto/mini-bomba-de-agua-sumergible-de-membrana-r385/>

- Engineering-abc. (2017). *Coefficient of friction, Rolling resistance, Air resistance, Aerodynamics*. Tribology-ABC. <https://www.tribology-abc.com/abc/cof.htm%0Awww.tribology?abc.com>
- ENI. (2016). *Arduino - Aprender a desarrollar para crear objetos inteligentes - Arduino Mega | Ediciones ENI*. <https://www.ediciones-eni.com/open/mediabook.aspx?idR=8d182e726219b5c89e24125beb9c5494>
- Fernández, R., González, E., Feliú, V., & Rodríguez, A. G. (2010). A wall climbing robot for tank inspection. An autonomous prototype. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 1424-1429. <https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675473>
- Filament2Print. (2019). *¿Qué es el PETG?* https://filament2print.com/es/blog/49_petg.html
- Fluorten S.R.L. (2022). *DELRIN (POM)*. <http://www.fluorten.com.ar/index.php/es/materiales-es/derlin-es/13-materiales/20-nylon>
- FORCE TECHNOLOGY. (2022). *Automated ultrasonic inspection equipment for storage tanks and pipes*. <https://forcetechnology.com/en/services/non-destructive-testing-ndt/automated-ultrasonic-inspection-equipment-pscan>
- Geek Factory. (2021). *MG90S Tower Pro micro servo motor metálico - Geek Factory*. <https://www.geekfactory.mx/tienda/robotica/motores-actuadores-servos-y-accesorios/mg90s-tower-pro-micro-servo-motor-metalico/>
- Guangzhou During Industry Co. Ltd. (2021). *Ac To Dc 24v 150w Switching Power Supply For Industrial Power Module* . <https://gzduring.en.alibaba.com/product/60683006985->

805706091/ac_to_dc_24v_150w_switching_power_supply_for_industrial_power_module.html?spm=a2700.shop_pl.41413.26.1e73542a38mvTd

Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2009). *Control Estadístico De Calidad y Seis Sigma* (2.^a ed.). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Han, T., & Qian, R. (2020). Analysis of the Wheel-wall Gap and Its Influence on Magnetic Force for Wheeled Wall-climbing Robot Adsorbed on the Cylindrical Tank. *Proceedings of 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, ITNEC 2020, Itnec*, 889-893.
<https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9084740>

IKC. (2021). *Made in China - IKC Bearing Co.* https://es.made-in-china.com/co_ikc-bearing/product_K001-Insert-Bearing-of-12mm-Bore-K002-K003-K004-K005-K006_ehghrnrg.html

IOWA STATE UNIVERSITY. (2022). *Nondestructive Evaluation Techniques : Ultrasound.* <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/Couplant.xhtml>

Ishihara, H. (2017). Basic study on wall climbing robot with magnetic passive wheels. *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2017*, 1964-1969. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8016119>

Liu, H., Wang, Y., Lian, M., Zhang, T., & Liu, B. (2019). Thickness measurement using ultrasonic scanning method for large aerospace thin-walled parts. *2019 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2019 - Proceedings*, 243-247. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869663>

Liu, M. (2022). *STEPPERONLINE* . <https://www.omc-stepperonline.com/what-is-a->

stepper-motor

Llamas, L. (2016). *Motores paso a paso con Arduino y driver A4988 o DRV8825*.

<https://www.luisllamas.es/motores-paso-paso-arduino-driver-a4988-drv8825/>

MASERVEN S.A. (2022). *MASERVEN S.A. - CHUMACERA PARED*.

<http://maserven.com/productos/detalle/chumacera-pared-2h-inox>

MatWeb. (2022). *Resumen de materiales para Nylon 66/6*.

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=26386631ec1b49eeba62c80a49730dc4>

Miro, J. V., Hunt, D., Ulapane, N., & Behrens, M. (2018). *Towards Automatic Robotic*

NDT Dense Mapping for Pipeline Integrity Inspection (pp. 319-333). Springer,

Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67361-5_21

MISTRAS. (2022). *Automated Ultrasonics – AUT Inspections | MISTRAS Group*.

<https://www.mistrasgroup.com/how-we-help/field-inspections/advanced-ndt/automated-ultrasonic-testing/>

MME Group. (2021, enero 11). *MME Group*. [https://www.mme-group.com/advanced-](https://www.mme-group.com/advanced-ndt/automated-ut/)

[ndt/automated-ut/](https://www.mme-group.com/advanced-ndt/automated-ut/)

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (6.^a ed.). PEARSON PRENTICE HALL.

Mott, R. L. (2009). *Resistencia de materiales* (5.^a ed.). PEARSON PRENTICE HALL.

NEXTION. (2021a). *Nextion*. <https://nextion.tech/>

NEXTION. (2021b). *NX3224T028 - Nextion*. <https://nextion.tech/datasheets/nx3224t028/>

Nguyen, L., & Miro, J. V. (2020). Efficient Evaluation of Remaining Wall Thickness in

Corroded Water Pipes Using Pulsed Eddy Current Data. *IEEE Sensors Journal*,

20(23), 14465-14473. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3007868>

Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas. Un enfoque integrado* (4.^a ed.). PEARSON PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA S.A.

NTN Corporation. (2015). *Ball and Roller Bearings* . https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-05/ntn_ball-and-roller-bearings_en.pdf

Ogai, H., & Bhattacharya, B. (2018). Pipe Inspection Robots for Gas and Oil Pipelines. En *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering* (Vol. 89, pp. 13-43). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-81-322-3751-8_2

Olympus. (2016a, mayo). *MapROVER: escáner biaxial motorizado*. [https://www.olympus-ims.com/es/scanners/maprover/#!/cms\[focus\]=cmsContent13311](https://www.olympus-ims.com/es/scanners/maprover/#!/cms[focus]=cmsContent13311)

Olympus. (2016b, agosto). *VersaMOUSE | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/es/versamouse/>

Olympus. (2021a). *OmniScan MX2 Phased Array Flaw Detector*. <https://www.olympus-ims.com/en/omniscan-mx2/>

Olympus. (2021b). *Phased Array C-Scan | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumentation/pa-cscan/>

Olympus. (2021c). *Ultrasonic Testing FAQs*. <https://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-testing-faqs/>

Olympus. (2021d). *What are the advantages?* <https://www.olympus-ims.com/pl/ndt-tutorials/intro/advantages/>

Olympus. (2021e). *What is a Phased Array? | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/intro/what-is-a-phased-array/>

ims.com/en/ndt-tutorials/intro/whatispa/

Olympus. (2022a). *A-Scan Data | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumentation/ascan/>

Olympus. (2022b). *Focal Law Sequencing | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/generating/calculator/>

Olympus. (2022c). *Imaging Basics - Introduction | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumentation/intro/>

Olympus. (2022d). *Inside a Phased Array Transducer | Olympus IMS*.
<https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/inside/>

Olympus. (2022e). *Phased Array Sectorial Scans | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumentation/pa-scan/>

Olympus. (2022f). *Phased Array Transducer Characteristics | Olympus IMS*.
<https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/>

Olympus. (2022g). *Phased Array Wedges | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-definitions/wedges/>

Olympus. (2022h). *Single Value B-Scan | Olympus IMS*. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumentation/bscan/>

Olympus. (2022i). *Suelas (zapatillas)*. [https://www.olympus-ims.com/es/probes/wedges/#!cms\[focus\]=cmsContent10957](https://www.olympus-ims.com/es/probes/wedges/#!cms[focus]=cmsContent10957)

Olympus. (2022j). *TB7567-5*. <https://www.olympus-ims.com/es/shop/item/269-productId.570435478.html>

Olympus. (2022k). *Test Blocks*. <https://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic->

transducers/testblocks/#!cms[focus]=cmsContent10935

Olympus. (2022). *Ultrasonic Couplants*. <https://www.olympus-ims.com/en/applications/ultrasonic-couplant/>

Ortiz, L., & Paredes, R. (2021). *Diseño y construcción de una celda robotizada de clasificación de objetos en movimiento por medio de un robot paralelo tipo delta mediante visión artificial y redes neuronales para el Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Arm.* Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

PROMETEC. (2017). *Conociendo los Servos*. <https://www.prometec.net/servos/>

PROVEIN. (2020). *EJES CROMADOS - PROVEIN WEB*.

<https://avelectronics.cc/producto/mini-bomba-de-agua-sumergible-de-membrana-r385/>

Riba, C. (2002). *Diseño concurrente* (1.^a ed.). Edicions UPC.

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36754/9788498800746.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Riba Romeva, C. (2008). *POLITEXT / INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA*.

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36844/9788498804065.pdf>

Rodríguez, J. C. (2020). *Diseño y construcción de una plataforma omnidireccional para evaluar controladores modernos en el seguimiento de trayectoria utilizando visión artificial*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Rosen Group. (2021). *Rosen Group*. [https://www.rosen-](https://www.rosen-group.com/global/solutions/products/product/plate-inspection-systems.html)

[group.com/global/solutions/products/product/plate-inspection-systems.html](https://www.rosen-group.com/global/solutions/products/product/plate-inspection-systems.html)

Shackelford, J. (2005). *Introducción a La ciencia de materiales para ingenieros* (6.^a ed.). PEARSON PRENTICE HALL.

Shopee. (2022). *Jual Nema 17 KS42STH40 Stepper motor for 3D printers or CNC Indonesia*|Shopee Indonesia. <https://shopee.co.id/Nema-17-KS42STH40-Stepper-motor-for-3D-printers-or-CNC-i.183181788.6316869896>

Study group CCH 70-4. (2014). *SPECIFICATION FOR INSPECTION OF STEEL CASTINGS FOR HYDRAULIC MACHINES CCH 70-4* (Vol. 4).

TowerPro. (2022). *MG996R*. <https://www.towerpro.com.tw/product/mg996r/>

Wikipedia. (2021, mayo). *Phased array ultrasonics*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array_ultrasonics

Zhang, D., Watson, R., Dobie, G., MacLeod, C., & Pierce, G. (2018). Autonomous Ultrasonic Inspection Using Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2018-October*.
<https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2018.8579727>

Anexos