



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE ENSAYOS
A FATIGA AXIAL PARA POLÍMEROS.”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: JORGE BERTONY BONIFAZ PALACIOS

ANDRÉS RAÚL QUEZADA ANDI

DIRECTOR: Ing. MIGUEL ÁNGEL ESCOBAR GUACHAMBALA

Riobamba – Ecuador

2020

© 2020, Jorge Bertony Bonifaz Palacios; & Andrés Raúl Quezada Andi

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, Jorge Bertony Bonifaz Palacios y Andrés Raúl Quezada Andi, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24 de agosto del 2020



Jorge Bertony Bonifaz Palacios
060346580-8



Andrés Raúl Quezada Andi
180372945-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Propuesta Tecnológica **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE ENSAYOS A FATIGA AXIAL PARA POLÍMEROS**, realizado por los señores: **JORGE BERTONY BONIFAZ PALACIOS Y ANDRÉS RAÚL QUEZADA ANDI**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2020-08-24
Ing. Miguel Ángel Escobar Guachambala DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2020-08-24
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2020-08-24

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi esposa Angélica, quien es mi fortaleza para vencer cualquier obstáculo, siempre está a mi lado en las buenas y en las malas, nunca dejo que me rindiera, por eso todos mis logros son suyos también. A mis padres hermanos y sobrinos quienes son pilares fundamentales en mi vida que me acompañaron en este difícil pero hermoso camino, a mi hijo Jorgito que me cuida y me inspira desde el cielo, a mi abuelo Segundo que le hubiera encantado verme convertido en un Ingeniero y espero que lo esté haciendo.

De igual manera a mis compañeros que me brindaron su ayuda y conocimientos

Jorge

Este trabajo está dedicado a las mujeres más importantes de mi vida que son mi madre Juana, mi hija Paula y mi esposa Belén con quienes he recorrido este arduo camino y me han levantado en cada tropiezo. De igual manera a mi tía Lourdes quién también ha sido parte importante de este proceso y me ha brindado su afecto y apoyo incondicional en todo momento, a mi abuelita Carmen quien desde el cielo de seguro estará feliz de verme convertido en un profesional.

Andrés

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento muy especial a mis padres por cuidarme y apoyarme, a mi esposa que durante todos estos años nunca dejo de confiar en que lo iba a lograr, siendo mi mejor amiga, a mi cuñada Tania quien me apoyo en lo económico y emocional para alcanzar mi meta, le estaré en deuda toda mi vida. A mi suegra que fue un gran apoyo ya que estuvo siempre que la necesite. A mis hermanos en especial a Cristian por ser el que cuida de mis padres, en fin, a todas las personas que a lo largo de mi carrera estuvieron presentes en mi vida en el momento indicado con su apoyo para alcanzar mi meta.

Un agradecimiento especial a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por permitirme formarme profesionalmente, al Ing. Miguel Escobar director del Trabajo de Titulación y al Ing. Geovanny Novillo por acompañarnos en el proceso con sus conocimientos y experiencia.

Jorge

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, por apoyarme aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero mencionar a mi madre, mi esposa y mi hija, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo y un abrazo reconfortante para renovar energías.

También quiero agradecer al Ing. Miguel Escobar y al Ing. Geovanny Novillo, quienes con sus conocimientos y apoyo nos guiaron a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscábamos.

Por último, quiero agradecer a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de titulación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su ayuda.

Muchas gracias a todos.

Andrés

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
CAPÍTULO II	
2. REVISION DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEORICOS.....	6
2.1 Marco teórico.....	6
2.1.1 <i>Características de los Polímeros</i>	6
2.1.1.1 <i>Los polímeros</i>	6
2.1.2 <i>Propiedades de los Polímeros</i>	7
2.1.3 <i>Fatiga de Polímeros</i>	8
2.2 Estructura de la Máquina.....	11
2.2.1 <i>Mecanismo biela-manivela</i>	11
2.2.2 <i>Mecanismo Prensa Neumática</i>	12
2.2.3 <i>Métodos de diseño</i>	13
2.3 Unidad neumática.....	14
2.3.1 <i>Cilindros neumáticos</i>	14

2.3.2.	<i>Tratamiento del aire</i>	15
2.3.3.	<i>Válvulas distribuidoras</i>	16
2.3.4.	<i>Tubos y racores</i>	17
2.4.	Automatización y Control	18
2.4.1.	<i>Automatización</i>	18
2.4.2	<i>Sistema embebido</i>	20

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	22
3.1.	Diseño conceptual	22
3.1.1.	<i>Determinación de las especificaciones y requerimientos de la máquina</i>	22
3.1.2.	<i>Desarrollo de la función de calidad (QFD)</i>	22
3.1.2.1.	<i>Voz del Usuario</i>	23
3.1.2.2.	<i>Voz del ingeniero</i>	23
3.1.2.3.	<i>Despliegue de la casa de la calidad</i>	24
3.1.3.	<i>Análisis funcional</i>	25
3.1.3.1.	<i>Nivel 0</i>	25
3.1.3.2.	<i>Nivel 1</i>	25
3.1.4.	<i>Desarrollo de las alternativas de solución para el prototipo de máquina</i>	26
3.1.4.1.	<i>Fuente de movimiento y mecanismo que producirá la carga</i>	26
3.1.4.2.	<i>Sistema de Mordazas</i>	29
3.1.4.3.	<i>Sistema de control y monitoreo electrónico</i>	31
3.1.5.	<i>Alternativas de solución</i>	33
3.1.5.1.	<i>Alternativas de solución para cada módulo</i>	34
3.1.6.	<i>Criterios de evaluación del módulo</i>	35
3.1.7.	<i>Diseño de detalle</i>	37
3.2.	Dimensionamiento del sistema neumático	38
3.2.1.	<i>Dimensionamiento del cilindro</i>	40
3.2.2.	<i>Cálculo del Vástago</i>	41

3.2.3.	Elementos complementarios del sistema neumático	43
3.2.3.1.	Electroválvula	44
3.2.3.2.	Tubería neumática	44
3.2.3.3.	Racores y acoples	45
3.2.3.4.	Unidad de mantenimiento neumático	46
3.3.	Análisis de fuerzas y diseño mecánico de componentes	46
3.3.1.	Diseño de los ejes	47
3.3.2.	Diseño del sujetador de ejes	51
3.3.3.	Dimensionamiento del eje de sujeción de las mordazas	54
3.3.4.	Análisis de resistencia de los pernos prisioneros de las mordazas	57
3.3.5.	Análisis de la estructura principal	59
3.3.5.1.	Análisis de la estructura principal a fatiga	61
3.3.5.2.	Análisis de vibraciones la estructura principal	62
3.4.	Selección de elementos eléctricos y electrónicos	63
3.4.1.	Elementos eléctricos	63
3.4.1.1.	Fusible cilíndrico	63
3.4.1.2.	Relé	64
3.4.1.3.	Paro de emergencia	64
3.4.1.4.	Luz piloto	65
3.4.2.	Elementos electrónicos	66
3.4.2.1.	Arduino Nano	66
3.4.2.2.	Sensores Infrarrojos de presencia	67
3.4.2.3.	Sensor LM35	67
3.5.	Funcionamiento del Circuito eléctrico	68
3.5.1.	Etapa de control	69
3.5.1.1.	Adquisición de señal de los sensores	69
3.5.2.	Diseño de la placa PCB	70
3.5.3.	Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario	71
3.5.3.1.	Control del prototipo programación gráfica	72

3.6.	Construcción y Montaje	76
3.6.1.	Método de construcción	76
3.6.1.1.	<i>Elementos de construcción</i>	77
3.6.1.2.	<i>Operaciones y tiempos de construcción para el sistema estructural</i>	78
3.6.1.3.	<i>Operaciones y tiempos de construcción para el sistema de sujeción</i>	79
3.6.1.4.	<i>Operaciones y tiempos de montaje para el sistema neumático y de control</i>	80
3.6.2.	Montaje de la máquina de ensayos a fatiga axial de polímeros	80
3.6.2.1.	<i>Diagrama de flujo del montaje</i>	81
3.6.3.	Tiempo total de construcción y montaje	81
3.7.	Manual de operación y mantenimiento	82
3.7.1.	<i>Manual de operación de la máquina</i>	82
3.7.2.	<i>Instrucciones de funcionamiento</i>	82
3.7.3.	<i>Manual de mantenimiento de la máquina</i>	94
3.8.	Análisis de costos	94
3.8.1.	<i>Costo directo</i>	94
3.8.2.	<i>Costos indirectos</i>	97
3.8.3.	<i>Costo total</i>	97

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS	99
4.1.	Pruebas de funcionamiento	99
4.1.1.	<i>Pruebas de funcionamiento al vacío</i>	99
4.1.2.	<i>Pruebas de funcionamiento en carga</i>	100
4.1.3.	<i>Probetas ensayadas</i>	101
4.2.	Discusión de resultados	101
4.2.1.	<i>Comparación de resultados obtenidos</i>	102
4.2.2.	<i>Efectividad del funcionamiento</i>	103
4.3.	Guía de ensayo	105
	CONCLUSIONES	113

RECOMENDACIONES..... 114

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2. Clasificación de polímeros	6
Tabla 2-2. Clasificación de polímeros	11
Tabla 1-3. Ventajas y desventajas del mecanismo biela, manivela, corredera.	27
Tabla 2-3. Ventajas y desventajas del sistema de cilindro hidráulico.	28
Tabla 3-3. Ventajas y desventajas del sistema de cilindro neumático.....	29
Tabla 4-3. Ventajas y desventajas de las mordazas de acción lateral de tornillo	30
Tabla 5-3. Ventajas y desventajas de la mordaza neumática de acción lateral	31
Tabla 6-3. Ventajas y desventajas de la mordaza de acción de cuña	31
Tabla 7-3. Ventajas y desventajas del Arduino UNO	32
Tabla 8-3. Ventajas y desventajas de la Raspberry Pi	33
Tabla 9-3. Ventajas y desventajas del PLC	33
Tabla 10-3. Componentes de las diferentes alternativas de solución	34
Tabla 11-3. Evaluación de las alternativas de solución	35
Tabla 12-3. Evaluación del peso específico de cada criterio	35
Tabla 13-3. Evaluación de soluciones respecto del criterio Capacidad	36
Tabla 14-3. Evaluación de soluciones respecto del criterio Costo	36
Tabla 15-3. Evaluación de soluciones respecto del criterio Mantenimiento	36
Tabla 16-3. Evaluación de soluciones respecto del criterio Eficiencia	37
Tabla 17-3. Soluciones de las alternativas.....	37
Tabla 18-3. Recomendaciones de geometría de probetas de tracción	38
Tabla 19-3. Fuerzas teóricas en cilindros de doble efecto	41
Tabla 20-3. Especificaciones técnicas de la electroválvula 5/2 monoestable	44
Tabla 21-3. Especificaciones técnicas de la tubería neumática.....	45
Tabla 22-3. Especificaciones técnicas de los elementos de unión neumáticos	45
Tabla 23-3. Especificaciones técnicas de la unidad de mantenimiento neumática.....	46
Tabla 24-3. Parámetros para el análisis de la estructura	60
Tabla 25-3. Propiedad del estudio a fatiga.	61
Tabla 26-3. Propiedad del estudio a fatiga.	62
Tabla 27-3. Resultados del estudio de frecuencias.	63
Tabla 28-3. Especificaciones del fusible y base.	64
Tabla 29-3. Especificaciones del pulsador	65
Tabla 30-3. Especificaciones técnicas de la luz piloto verde.....	65
Tabla 31-3. Especificaciones de Arduino	66
Tabla 32-3. Especificaciones del sensor infrarrojo	67

Tabla 33-3. Especificaciones del sensor LM35	67
Tabla 34-3. Máquinas utilizadas.....	76
Tabla 35-3. Herramientas	77
Tabla 36-3. Elementos de construcción.....	77
Tabla 37-3. Operaciones y tiempos de construcción del sistema estructural	78
Tabla 38-3. Operaciones y tiempos de construcción del sistema de sujeción	79
Tabla 39-3. Operaciones y tiempos de construcción del sistema neumático y de control	80
Tabla 40-3. Montaje de la máquina	80
Tabla 41-3. Tiempo de construcción y montaje.....	81
Tabla 42-3. Manual de operaciones.....	82
Tabla 43-3. Instrucciones de funcionamiento	83
Tabla 44-3. Fuerza del cilindro neumático en función de la presión y el material a ensayar	93
Tabla 45-3. Mantenimiento preventivo de la máquina	94
Tabla 46-3. Costos materiales metal mecánicos	95
Tabla 47-3. Costos materiales eléctricos y electrónicos	95
Tabla 48-3. Costos materiales neumáticos	96
Tabla 49-3. Costos mano de obra	96
Tabla 50-3. Costos de probetas de PLA (Impresión 3D) para pruebas	96
Tabla 51-3. Costo de equipos y herramientas	96
Tabla 52-3. Total de costos directos	97
Tabla 53-3. Costos indirectos	97
Tabla 54-3. Costo total	98
Tabla 1-4. Pruebas de funcionamiento al vacío	99
Tabla 2-4. Parámetros de entrada para prueba	100
Tabla 3-4. Señales de entrada y salida.....	100
Tabla 4-4. Pruebas de funcionamiento con carga	101
Tabla 5-4. Probetas ensayadas.....	101
Tabla 6-4. Muestras de 6 probetas a una frecuencia de 0.25 Hz	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Mecanismo biela-manivela.....	12
Figura 2-2. Prensa neumática.....	12
Figura 3-2. Ciclo básico de diseño.....	13
Figura 4-2. Cilindro de simple efecto.....	14
Figura 5-2. Cilindro de doble acción.....	15
Figura 6-2. Unidad de mantenimiento.....	15
Figura 7-2. Válvula de 5 vías y 2 posiciones.....	16
Figura 8-2. Válvula distribuidora 5/2 de bobina simple.	16
Figura 9-2. Tipos de tubos.....	17
Figura 10-2. Tipos de racores.....	18
Figura 11-2. Microcontroladores.....	18
Figura 12-2. Arduino nano.....	19
Figura 13-2. Interfaz de LabVIEW.....	19
Figura 14-2. Placa base.....	20
Figura 15-2. Sensor LM35.....	21
Figura 16-2. Sensor Sharp.....	21
Figura 1-3. Matriz QFD (Casa de la calidad).....	24
Figura 2-3. Función principal de la máquina de ensayos a fatiga axial.	25
Figura 3-3. Módulos de funcionamiento de la máquina.	25
Figura 4-3. Mecanismo biela-manivela-corredera.....	26
Figura 5-3. Sistema Hidráulico con cilindro de doble efecto.....	27
Figura 6-3. Sistema Neumático con cilindro de doble efecto.	28
Figura 7-3. Mordaza de acción lateral de tornillo.....	30
Figura 8-3. Mordaza Neumática de acción lateral.....	30
Figura 9-3. Mordaza de acción de cuña.....	31
Figura 10-3. Arduino UNO.....	32
Figura 11-3. Raspberry Pi 4.....	32
Figura 12-3. PLC Siemens S7 1200.....	33
Figura 13-3. Matriz morfológica.....	34
Figura 14-3. Diseño de detalle del prototipo.....	38
Figura 15-3. Extremo empotrado y el otro libre.....	42
Figura 16-3. Diagrama del circuito neumático.....	43
Figura 17-3. Unidad de mantenimiento neumática.....	46
Figura 18-3. Dimensiones de las probetas de ensayo en mm.....	47

Figura 19-3. Eje de marco de mordaza móvil.....	47
Figura 20-3. Esfuerzos repetidos.....	49
Figura 21-3. Sujetador de ejes.....	51
Figura 22-3. Fuerzas en el sujetador de ejes.....	51
Figura 23-3. Mordaza.....	55
Figura 24-3. Diagrama de fuerzas actuantes sobre los pernos.....	57
Figura 25-3. Estructura principal de la máquina.....	60
Figura 26-3. Resultados del análisis en SAP 2000.....	61
Figura 27-3. Estudio de fatiga.....	62
Figura 28-3. Estudio de frecuencias.....	63
Figura 29-3. Relé de 5V.....	64
Figura 30-3. Circuito eléctrico.....	68
Figura 31-3. Esquema para la adquisición de señal de los sensores.....	69
Figura 32-3. Diseño de la placa PCB.....	70
Figura 33-3. Placa PCB.....	70
Figura 34-3. Ventana principal de la interfaz gráfica de usuario.....	71
Figura 40-3. Diagrama de flujo del montaje de la máquina.....	81
Figura 1-4. Probeta de PLA antes de ser ensayada.....	103
Figura 2-4. Probeta de PLA después de ser ensayada.....	103
Figura 3-4. Falla frágil debido a fatiga.....	104

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2. Curva S-N	9
Gráfico 2-2. Curva S-N características	10
Gráfico 1-3. Estructura de la programación en LabVIEW 1	72
Gráfico 2-3. Esquema de programación del estado de inicialización.....	73
Gráfico 3-3. Esquema de programación del estado de espera.....	74
Gráfico 4-3. Esquema de programación del estado de ensayo.....	75
Gráfico 5-3. Esquema de programación del estado de cerrar.....	76
Gráfico 1-4. Curva S-N del PLA en prototipo neumático.....	102
Gráfico 2-4. Curva S-N del PLA-BaSO ₄ en prototipo comparado	103

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS

ANEXO B: FACTOR DE SUPERFICIE

ANEXO C: FACTOR DE TAMAÑO

ANEXO D: FACTOR DE TEMPERATURA

ANEXO E: FACTOR DE CONFIABILIDAD

ANEXO F: TUBO RECTANGULAR ESTRUCTURAL

ANEXO G: MOMENTOS Y DEFLEXIÓN DE VIGAS

ANEXO H: CONCENTRADORES DE ESFUERZOS KT

ANEXO I: SENSIBILIDAD A LA MUESCA

ANEXO J: PROPIEDADES MECÁNICAS DE PERNOS CLASE MÉTRICAS

ANEXO K: DIÁMETROS Y ÁREAS DE ROSCAS MÉTRICAS

RESUMEN

El presente trabajo trata del diseño y construcción de un prototipo de máquina para ensayar fatiga axial en polímeros. Se empleó el método de análisis de alternativas, así se obtuvo la mejor solución que garantiza ensayos de fatiga axial precisos en cuanto a carga aplicada a la probeta y número de ciclos de vida se trate. Funciona por medio de un sistema accionado por un cilindro neumático, que genera el movimiento de dos ejes en paralelo, con ayuda de una mordaza fija y una móvil que sujetan la probeta de polímero exponiéndola a tracción cada vez que se repite el ciclo de funcionamiento, cuando se activa uno de los sensores de distancia Sharp situado en la parte inferior, comienza el conteo de ciclos a una misma frecuencia y con carga constante, mientras la carga se aplica repetidamente al polímero analizado se realizan tomas de datos de temperatura con ayuda de un sensor LM35, cuando ocurre la falla del material polimérico se activa el segundo sensor Sharp el cual da la orden de parar el funcionamiento del sistema. La adquisición de datos del ensayo se hace por medio de un Arduino nano conectado al computador en una interfaz de software programado, la cual tiene detalles gráficos amigables con el usuario, la comunicación entre sensores, la toma de datos y el reporte de resultados se logró con ayuda de librerías del programa. Se usó softwares especializados en este campo. Siguiendo las recomendaciones de la Norma ASTM 3479 se realizaron seis ensayos en probetas iguales, expuestas a una misma frecuencia y a diferentes cargas, analizando los resultados se presentaron fracturas por fatiga, se concluyó que el prototipo funciona, se recomienda una mejora con la ayuda de sensores industriales que aportaran una mejor toma de datos.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA>, <DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN>, <MÁQUINA DE ENSAYOS>, <FATIGA AXIAL>, <POLÍMEROS>

ABSTRACT

The present work deals with the design and construction of a machine prototype to test axial fatigue in polymers. The alternative analysis method was used, thus obtaining the best solution that guarantees accurate axial fatigue tests in terms of load applied to the specimen and number of life cycles in question. It works by means of a system activated by a pneumatic cylinder, which generates the movement of two axes in parallel, with the help of a fixed and a mobile clamp that hold the polymer specimen, exposing it to traction each time the operating cycle is repeated. When one of the Sharp distance sensors located in the lower part is activated, the cycle count begins at the same frequency and with a constant load, while the load is repeatedly applied to the analyzed polymer, temperature data are taken with the help of a LM35 sensor, when the failure of the polymeric material occurs, the second Sharp sensor is activated, which gives the order to stop the operation of the system. The acquisition of test data is done through an Arduino nano connected to the computer in a programmed software interface, which has user-friendly graphic details, communication between sensors, data collection and results reporting was achieved. With the help of program libraries. Specialized software was used in this field. Following the recommendations of the ASTM 3479 Standard, six tests were carried out on the same specimens, exposed to the same frequency and different loads, analyzing the results, fatigue fractures were presented, it was concluded that the prototype works, an improvement with the help of sensors is recommended. Industries that provide better data collection. Keywords: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCE>, <DESIGN AND CONSTRUCTION>, <TESTING MACHINE>, <AXIAL FATIGUE>, <POLYMERS>

INTRODUCCIÓN

Los polímeros son materiales que se crean de la combinación de cerámicos, plásticos y metales, según la aplicación que sea requerida tendrán diferentes propiedades, En la actualidad los polímeros son usados en casi todos los campos laborales del mundo. Por tal motivo para saber que polímero es necesario en cada uso que se le vaya a dar, se debe tomar en cuenta su composición química, sus propiedades físicas, mecánicas, también es importante verificar su resistencia a los esfuerzos que va a estar expuesto al momento de su aplicación. Ha medida que es mayor la utilización de polímeros en la ingeniería en los últimos años, se ha dado mayor atención a su rendimiento y comportamiento en condiciones de carga cíclica, la falla se presentara en los polímeros a niveles de tensión mucho menores de lo que soportan bajo condiciones de carga monótona; y, si es el caso de una tensión dada de forma alterna, la falla se dará en menos tiempo que una ruptura por fluencia para una tensión constante de igual magnitud. Por este motivo, es de gran interés tecnológico un aumento en la resistencia de los polímeros al fallo por motivos de fatiga. Para ello, es necesario una mejor comprensión de los mecanismos existentes en el fallo por fatiga en los polímeros. De igual forma es necesario el conocimiento y comprensión de factores externos que intervienen en este tipo de fracturas, tales como el rango del factor de intensidad de la carga, la frecuencia, la temperatura, la condición del medio ambiente y de algunas variables importantes del material, como la estructura del polímero (Sauer et al., 1980, p.1). El interés de la industria por ir desarrollando nuevas clases de polímeros parte del alto rendimiento que estos tienen, además de que no se corroen y ayudan a mejorar las propiedades de los metales cuando se los une (Grellmann et al .,2014, p.12).

Los ensayos de fatiga de campo tipo S-N nos indican qué relación existe entre número de ciclos, y el nivel de carga constante para medir la vida a fatiga de una probeta que se desea caracterizar. En este tipo de campo para materiales compuestos vienen usándose diferentes tipos de ecuaciones, como empíricas y otras dadas según las propiedades del material, que común mente siguen a ecuaciones hiperbólicas y también a ecuaciones lineales, y están dadas en escala natural, logarítmica o semilogarítmica (Montesano et al., 2009, p.148). Siguiendo el punto de vista del diseño, es de mucha importancia saber la forma y lo detalles de la curva S-N, con el fin de predecir la vida útil del material, ya que la mayoría de modelos lo logran en base a estudios de acumulación de daño, utilizando como información base a este campo. Pero no se pueden analizar para cada nivel distinto de carga como, por ejemplo, los resultados de estudios de fatiga de amplitud constante, ya que darían resultados incongruentes, tanto estadística y experimentalmente. En consecuencia, se debe establecer un modelo analítico para el campo S-N, que permita analizar datos de todos los de los niveles simultáneamente (López et al.,2001, p.1).

La temperatura también es un factor muy importante que se debe tomar en cuenta a la hora de analizar falla por fatiga en los polímeros, ya que con este análisis térmico se conseguirá entender por qué se produce un cambio en las propiedades debido a la movilidad interna de las moléculas. Una de las aplicaciones más extendidas es la determinación de la temperatura de transición vítrea de este grupo de materiales (Carrascal et al., 2008, p.2). Estudiar la fatiga y por ende las fallas que esta producen son sumamente importante para la ingeniería, ya que los elementos de máquinas no solo están sometidos a fallas estáticas, sino que también estas cargas que varían con el tiempo cíclicamente. Las fallas por fatiga ocurren con tensiones de valores menores a las de tensión máxima e incluso en ocasiones son menores a las de fluencia. La importancia del análisis de este fenómeno es que estas fallas se producen sin que se pueda apreciar deformaciones, a veces se muestran de forma instantánea, esto implica pérdidas grandes en los equipos y a veces son un riesgo para la integridad humana (Guamaquispe., 2013, p.23).

Los ensayos de fatiga en el Ecuador son utilizados para definir propiedades mecánicas y físicas de distintos materiales, en este caso de los polímeros específicamente, con el estudio de esto se puede predecir la vida útil de componentes en una máquina, para así poder realizar mantenimientos preventivos y cambios de dichas piezas fatigadas de los sistemas y así poder alargar la vida útil de un equipo. Para el estudio de fatiga axial se pueden crear algunos prototipos se han dado los casos de máquinas de Tipo universal de ensayos y en este caso un equipo para ensayos con accionamiento neumático.

En la ciudad de Riobamba es la primera propuesta de una máquina de ensayos de fatiga axial en polímeros con accionamiento de un sistema neumático se tiene mucha expectativa de obtener resultados muy buenos y así apoyar a que se realicen estudios de gran variedad de polímeros, sobre todo en el campo educativo

CAPÍTULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

Durante los últimos años el uso de polímeros a nivel mundial ha extendido sus aplicaciones debido a los avances tecnológicos e investigaciones propuestas, en donde actualmente se puede observar su aplicación en estructuras aeronáuticas, energía renovable, sistemas de tubería de aceite, industria automotriz y marítima todo esto debido a su mayor grado de rigidez y relaciones de resistencia - peso en comparación con otros materiales más comunes como son el acero o aluminio (Selmy et al., 2017, p.15).

Los polímeros están ampliamente expuestos a cargas dinámicas durante su vida útil de servicio. El fallo debido a la fatiga puede ser considerado uno de los más comunes tipos de falla en materiales poliméricos. El objeto de estudiar el fallo debido a fatiga de componentes para ingeniería está relacionado con el hecho de que el fallo podría ocurrir a niveles de esfuerzo menores que los necesarios para producir falla estática (Tomita et al., 2001, p.17).

La caracterización del comportamiento a fatiga de los materiales poliméricos y su respectivo análisis de falla se puede dirigir a través de pruebas experimentales, modelos numéricos y teóricos. El estudio experimental de la fatiga consume una gran cantidad de tiempo, pero es la técnica preferida y más realista que existe. La mayoría de los ensayos de fatiga de materiales poliméricos se realizan con un método de cargas uniaxial tanto tracción/tracción o tracción/compresión. Estas pruebas están aceptados por estándares internacionales como ASTM (D3479, 2002) para poder obtener las curvas S-N de los materiales ensayados.

A pesar de la preferencia por este tipo de ensayos uniaxiales de fatiga en polímeros, las pruebas de fatiga por flexión se usan ampliamente con fines investigativos. Realizar ensayos de fatiga a flexión tiene sus ventajas frente a los ensayos de fatiga uniaxiales. Las cargas de flexión ocurren en condiciones de carga de servicio con una mayor frecuencia que las cargas axiales. No hay problemas de pandeo que afecten las pruebas de fatiga por tracción/compresión.

Las fuerzas aplicadas son mucho menores y el diferente comportamiento y daño del espécimen tanto en el lado de tracción como el de compresión pueden ser monitoreados para cualquier relación tracción/compresión (De Baere et al., 2009, p.12).

Actualmente la tendencia a nivel mundial sobre la utilización de polímeros tanto como elementos de máquinas como partes constitutivas de estructuras y cubiertas, con el fin de disminuir costos, peso o mejorar los diseños ha hecho que el estudio de sus propiedades mecánicas sea cada vez más necesario. El análisis a fatiga es una de las principales causas de fallo de estos materiales y debido a que los polímeros son viscoelásticos y son malos conductores del calor, son mucho más sensibles a la frecuencia de carga alterna que los metales. Como resultado, bajo una carga cíclica, la rotura o la fusión pueden provocar fallas térmicas. Nuestro interés aquí es más bien la fractura por fatiga inducida por el inicio de grietas y la propagación de grietas como resultado directo de la carga cíclica. Sin embargo, se presta cierta atención al problema de la fatiga térmica, tanto para delinear las condiciones de prueba necesarias, que dependerán de las propiedades y la estructura del polímero que se está probando, como para limitar su aparición y describir algunos de los posibles efectos sobre comportamiento de fatiga de aumentos en la muestra o temperatura de la punta de la grieta como resultado de pérdidas por histéresis en cada ciclo (Sauer et al., 1980, pp.499-532).

A nivel local es una problemática diseñar elementos de máquinas utilizando diferentes polímeros sobre todo aquellos que están en auge en todo el mundo como lo son los elementos obtenidos a través de la impresión 3D. Debido a la poca información que existe en cuanto a la resistencia a la fatiga de materiales poliméricos se ha creído conveniente construir una máquina que permita analizar el comportamiento a fatiga de este tipo de materiales.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente este trabajo propone un prototipo de máquina para ensayos a fatiga axial en polímeros por medio de un actuador neumático, sensores de distancia y temperatura. El conteo de los ciclos se realizará de manera automática mediante el software LabVIEW mientras el cilindro neumático repite los ciclos de funcionamiento. La Variación de carga aplicada a las probetas se hará de forma Manual por medio de la unidad de mantenimiento neumático. La extracción de los resultados obtenidos se hará por medio de la interfaz de un software de computadora. Aplicando teorías de diseño se fabricará un mecanismo de mordazas que se desplazarán a lo largo de dos ejes, se usarán distintos componentes necesarios que automatizar este proceso. El proyecto se realiza por la necesidad de poseer este equipo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con el fin de impulsar estudios en polímeros. En el presente trabajo se conseguirá diseñar, construirá y automatizará un prototipo de mecanismo capaz de realizar ensayos a fatiga axial en polímeros.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y construir una máquina de ensayos de fatiga axial para polímeros de acuerdo con los requerimientos establecidos en la norma ASTM D3479.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar todos los elementos mecánicos y estructurales, así como también seleccionar los elementos eléctricos y programación de sistemas electrónicos.
- Montar e instalar todos los elementos constitutivos de la máquina previa comprobación de su diseño mediante software especializado.
- Realizar el protocolo de pruebas para validar el correcto funcionamiento de la máquina.
- Elaborar manuales de operación, seguridad y mantenimiento, así como también la guía para realizar el ensayo de fatiga axial.

CAPÍTULO II

2. REVISION DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 Marco teórico

2.1.1. Características de los Polímeros

Los polímeros son definidos como el conjunto de macromoléculas normalmente orgánicas, que se obtiene al unir moléculas más simples denominadas monómeros con la ayuda de enlaces químicos covalentes. Con esto se logra como resultado estructuras moleculares largas que se conectan entre sí por fuerzas variables. Los polímeros son de origen natural o sintético, y se consiguen al realizar el proceso llamado polimerización, que al presentarse variables como la temperatura, el tiempo y otras características de los monómeros se establecerá el largo de la cadena adquirida. (Uriarte, 2019, p.4)

2.1.1.1. Los polímeros

Los Polímeros se clasifican tomando en cuenta algunas características, en la tabla 1-2 se muestra de mejor manera.

Tabla 1-2. Clasificación de polímeros

Polímeros	
Según su origen	Naturales: Celulosa
	Semisintéticas: Neumáticos
	Sintéticos: Nailon
Según su composición	Homopolímeros: formados a partir de un solo monómero
	Heteropolímeros: Formado por dos o más monómeros distintos
Según su estructura	Lineales: formados por monómeros di funcionales
	Ramificados: Formado por monómeros trifuncionales
	Entrecruzados: Cadenas lineales adyacentes unidos por enlaces covalentes
	Reticulados: Cadenas ramificadas en tres direcciones.
Según su comportamiento frente al Calor	Termoplásticos: Nailon
	Termoestables: Baquelita
	Elastómeros: Caucho
Según la reacción de polimerización	Por reacción en Cadena
	Por crecimiento en pasos

Fuente: WordPress 2012, 2018

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

2.1.2. *Propiedades de los Polímeros*

2.1.2.1. *Propiedades físicas de los Polímeros*

Dureza. - Es la forma de medir la resistencia de un material a ser comprimido y dentado, esta es una propiedad compuesta que combina términos como penetración, rayado y maltrato, En los polímeros es complejo establecer y comparar la dureza por la existencia de una enorme variedad de valores. Debido al efecto de recuperación elástica, es muy difícil medir la dureza por medio de los indentadores. Los métodos más importantes para cuantificar esta propiedad son la dureza por bola, la dureza Shore y la dureza Rockwell

Tenacidad. - Es cuantificar la energía que puede ser absorbida por una antes de que se rompa. Estas mediciones son experimentales, esto significa que los valores obtenidos se pueden comparar únicamente de una forma aproximada.

Densidad. - En los polímeros esta propiedad es relativamente baja ya que va de entre 0.9 y 2.3 g/cm³. Los polímeros que más utilizados son el PE y el PP, los dos poseen una densidad menor a la del agua.

Permeabilidad. – Esta propiedad es una de las más aprovechadas, por ejemplo, los films de plástico son usados como barreras de vapor, ya que los polímeros son aquellos que no dejan pasar gases o vapores a través suyo como capas.

Transparencia. - Esta particularidad que es dada por el modo en que está estructurado a nivel molecular, este material generalmente se clasifica en amorfos y cristalinos. Los amorfos cuya transparencia va del par con las cualidades del polímero y lo cristalinos refringen la luz de forma individual (Rosato et al., 1993).

2.1.2.2. *Propiedades Mecánicas de los Polímeros*

Estas dependen de forma directa de su composición, de la estructura tanto a nivel molecular como supramolecular. En el presente actual las propiedades mecánicas de mayor interés son las de los polímeros ya que pueden ser mejoradas mediante la modificación de su morfología, un ejemplo es, variar la temperatura a la que se puede lograr que los polímeros se ablanden. Generalmente lo que más llama la atención para estudiar las propiedades mecánicas es la necesidad de predecir en aplicaciones prácticas el desempeño de estos polímeros. Los ensayos durante mucho tiempo se han realizado con el fin de entender el comportamiento mecánico de los plásticos por medio de la alteración de la red de polímeros reticulados. Estos esfuerzos ayudaron a poder describir la variación de forma a escala molecular de polímeros sólidos. Por lo tanto, se considerarán como propiedades mecánicas de los polímeros sólidos a diferentes niveles de tensión aplicados; elasticidad, viscoelasticidad, flujo plástico y fractura.

2.1.3. Fatiga de Polímeros

Cuando está expuesto a ciclos repetitivos de esfuerzo constante los polímeros pueden experimentar fallos por fatiga de igual forma que los metales. La fatiga se presenta con esfuerzos relativamente bajos en comparación al límite elástico. Cuando se desea representar gráficamente los resultados obtenidos tienen una forma similar los que se logra llegar con materiales metálicos, cuando un polímero presenta un esfuerzo que menor al necesario para que se produzca el fallo se le conoce como límite de fatiga, pero este no se presenta en todos los polímeros (Arboleda, 2007, pp. 46-52).

2.1.3.1. Ensayo de fatiga de polímeros

Permite establecer cuál será el comportamiento de materiales poliméricos que están sujetos a esfuerzos cíclicos de tracción, compresión, flexión, etc. La rotura de la probeta aparecerá después de estar bajo efectos de un esfuerzo dado durante un número de ciclos a una misma frecuencia cada ensayo. Hay que tener en cuenta que siempre los esfuerzos en ensayos de corta duración son mayores a los que provocan la rotura a fatiga

Los esfuerzos a los que ocurre la fatiga son mucho más pequeños al límite elástico, la gráfica que se obtiene al momento de terminar el ensayo es muy similar a las que ya se tiene de materiales diferentes parecidos a los metales (Andrzej et al., 2005, pp.54-56).

2.1.3.2. Curvas S-N

Estas curvas se logran crear luego de haber realizado una serie de ensayos donde probetas iguales son sometidas a distintas a tensiones cíclicas las cuales tienen una amplitud máxima mayor a la resistencia estática de tracción del material. De cada probeta se deberá contar los ciclos hasta la rotura. Mediante un diagrama de tensión, S, se presentan los resultados, con respecto al logaritmo del número de ciclos hasta la rotura N de cada una de las probetas.

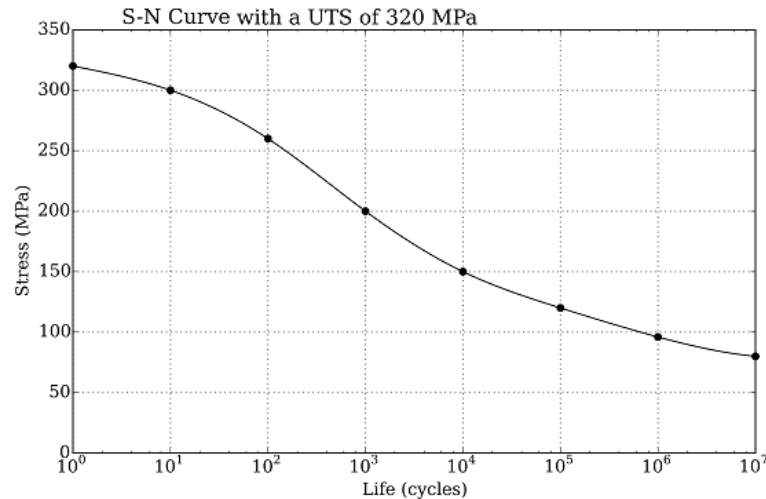


Gráfico 1-2. Curva S-N

Fuente: Wikipedia, 2016

Ha medida que disminuimos la tensión a la que está siendo ejercida la probeta el número de ciclos que durara aumentara. N será la cantidad de ciclos de tensión utilizados para producir la fractura total de la probeta. La propagación de la grieta dependerá únicamente de las dimensiones de la probeta, de igual manera que en la cantidad de ciclos N también se puede representar en una escala logarítmica al Esfuerzo y se pretende que los resultados obtenidos puedan estar representados por una línea recta cuando ambas escalas estén representadas en logaritmos. Aunque en la práctica no se haga esto, por el gran número de ciclos necesarios. Una característica de la fatiga es la dispersión en los resultados encontrados. Algunas de estas dispersiones son debido a errores experimentales, por ejemplo, no están bien alineadas las probetas, un error en el cálculo al determinar el valor del esfuerzo; por estas razones la dispersión es un detalle inherente de los ensayos a fatiga. Pero a pesar de todo esto necesariamente se necesitará un gran número de ensayos para realizar una buena curva S-N. Se necesitan como mínimo seis ensayos, lo óptimo sería realizar algunos más, si esto fuera posible. Y aquí podemos comprobar la diferencia entre la teoría y la práctica real. La creación de las probetas y preparar las superficies metálicas donde se colocarán, alinearan en la máquina de ensayos, dependerá la cantidad de dispersión de la tensión media y frecuencia de carga del ensayo.

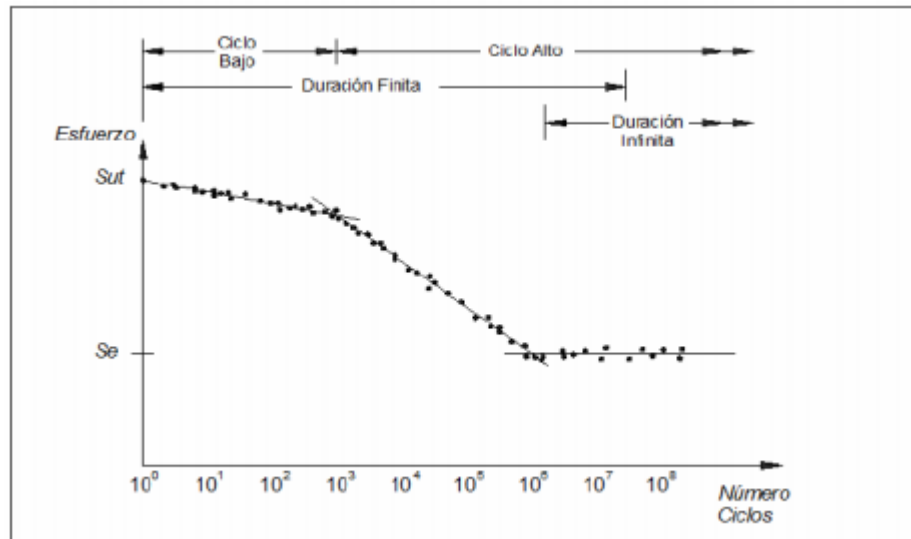


Gráfico 2-2. Curva S-N características

Fuente: (UCV, 2018)

2.1.3.3. Normas que seguir para realizar ensayos a fatiga

La normativa que en el País y a lo largo de todo el continente es dictada por la American Society for Testing and Materials (ASTM), que da la guía estándar para realizar ensayos de una variedad de materiales, este ente establece las condiciones y pasos a seguir para la obtención de buenos resultados. Esta normativa nos da una variedad de puntos a tomar en cuenta tales como el procedimiento a seguir para realizar un buen ensayo, que dimensiones tendrán las probetas para ser admisibles en el ensayo y que instrumentación de medida deberá ser utilizada, así como deberá tratarse a los datos obtenidos (Askeland, 1998, p.54).

2.1.3.4. Norma para la geometría de las probetas

En este trabajo utilizamos la norma ASTM D3039 para crear la geometría de las probetas ya que es un estándar muy utilizado para determinar las propiedades de los materiales compuestos, como en este caso polímeros. Por sus propiedades son muy solicitados cada vez más en industrias como la aeroespacial y automotriz, y cada vez más son usados como reemplazos de metales en muchas aplicaciones. ASTM D3039 es aplicada en polímeros que consisten en una matriz reforzada. A continuación, se adjunta parte de lo que rige la norma para crear la geometría de la probeta.

Tabla 2-2. Clasificación de polímeros

Parameter	Requirement
Coupon Requirements	
Shape	Constant rectangular cross-section
Mínimum length	Gripping +2 times width + gage length
Specimen width	As needed
Specimen width tolerance	±1 % of width
Specimen thickness	As needed
Specimen thickness tolerance	± 4 % of thickness
Specimen flatness	Fiat with light finger pressure
Tab Requirements (if used)	
Tab material	As needed
Fiber orientation	As needed
Tab thickness	As needed
Tab thickness variation between tabs	± 1 %-tab thickness
Tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
Tab step at bevel to specimen	Feathered without amaging specimen

Fuente:(ASTM, 1995, p.103)

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

2.2. Estructura de la Máquina

El diseño de la estructura dependerá del mecanismo con el que la maquina funcionara, hay varios como el mecanismo biela-manivela, mecanismos de funcionamiento hidráulico, mecanismo de prensa de funcionamiento neumático, que opción escoger es decisión del usuario ya que hay que tomar en cuenta algunos factores, los más comunes son el tipo de material al ensayar, la fuerza máxima necesaria, costos de fabricación, etc. (Ribas, 2008, pp.5-13).

2.2.1. Mecanismo biela-manivela

Este mecanismo se caracteriza por convertir el movimiento circular en movimiento rectilíneo, También lo puedes hacer en sentido contrario, es decir podemos partir de un movimiento lineal y llegar a un movimiento de giro, El lugar más común donde encontramos este mecanismo es en las partes de un motor de combustión interna, donde un pistón que se encuentra dentro de un cilindro. A pesar de ser un mecanismo muy simple que solo cuenta de dos partes tal y como lo dice su nombre es uno de los más utilizados (Bota et al., 2011, p.3). En el caso del tema de este trabajo no se lo tomo en cuenta por motivos de excentricidades muy bajas y altos niveles de vibración .

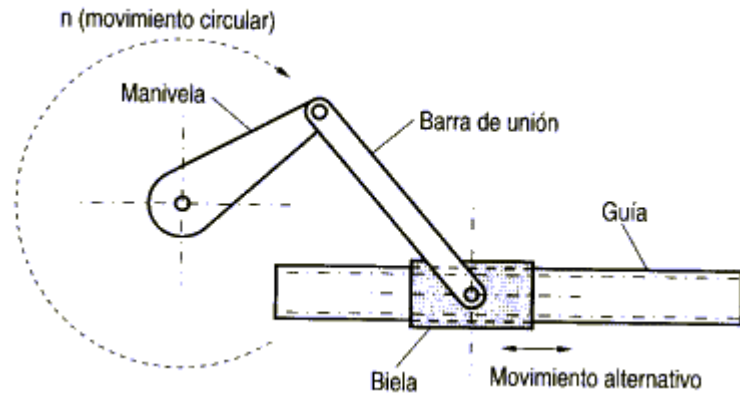


Figura 1-2. Mecanismo biela-manivela

Fuente: Mecanismos, 2012

2.2.2. Mecanismo Prensa Neumática

Este tipo de máquina herramienta es conocida por su ventaja de entregar gran cantidad de energía de una manera controlada, su funcionamiento se logra con la ayuda de aire a presión. En la estructura se soportan las mordazas que sujetaran la probeta, la mordaza inferior será fija, mientras la superior tendrá un desplazamiento, con esto se logra obtener tracción la cual es fundamental para un ensayo a fatiga (Ayala J, 2010, pp.32-39).

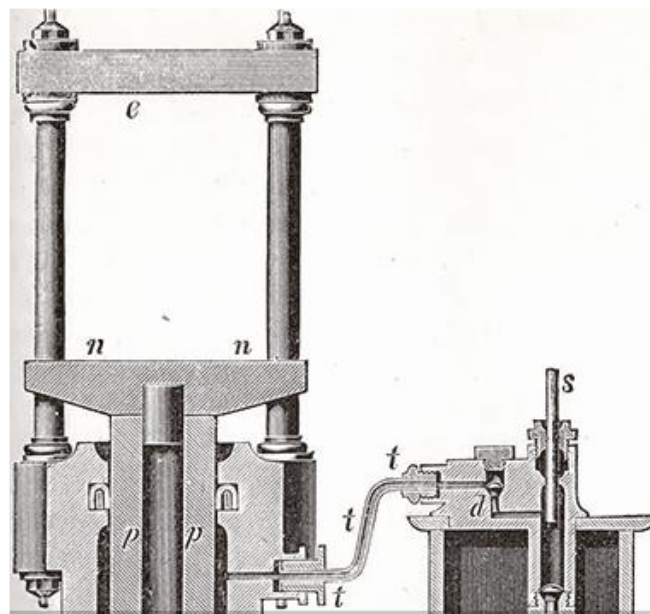


Figura 2-2. Prensa neumática

Fuente: (Wikipedia, 2007)

2.2.3. Métodos de diseño

Cuando se usa algún procedimiento, técnica y herramienta para diseñar un prototipo se lo conoce como métodos de diseño. Son la combinación de diferentes acciones que se usa en el proceso básico de diseño (Cross, 2002, p.43). El objetivo principal de esto es tomar una necesidad o una idea y convertirla en un hecho tangible real (Riba, 2002, p.70).

2.2.3.1. Ciclo básico de diseño

El ciclo básico de diseño es el conjunto de pasos a seguir para partiendo de un objetivo se pueda llegar a un hecho que es el. Pero entre estos extremos se tiene pasos sumamente importantes que si se los sigue en orden se podrá obtener un producto final de gran calidad (Riba, 2002, p.72).



Figura 3-2. Ciclo básico de diseño

Fuente: Researchgate, 2016

2.3. Unidad neumática

La neumática se encarga de estudiar el movimiento del aire y sacar provecho de esta energía, la primera vez que se logro es cuando se usó para navegar en barcos y se aprovechaba el viento para desplazar a las embarcaciones dándole una dirección. A partir de 1950, con la ayuda de sensores, se necesitó crear una estación de generación de aire comprimido, un lugar donde se deposite este aire como un compresor, se filtren sus impurezas y se pueda regular la presión de trabajo, un sistema de tuberías para llegar al lugar de trabajo se revoluciono la industria ya que se crearon equipos de accionamiento neumático que realizaban trabajos con buena eficiencia y de una manera fácil, ahora el campo de trabajo de este tipo de equipos es muy variado ya que se los emplean en máquinas herramientas, válvulas de control, sistemas de empaquetado, elevadores, herramientas de impacto, prensas neumáticas, robots industriales, frenos neumáticos, etc. (Creus, 2007, p.24).

2.3.1. Cilindros neumáticos

Estos actuadores neumáticos logran transformar la energía que otorga el aire comprimido en trabajo mecánico produciendo un movimiento lineal, conforme a su principio de operación los cilindros neumáticos se clasifican en de simple efecto y de doble efecto (Creus, 2007, pp.15-16).

2.3.1.1. Cilindro de simple acción

Estos actuadores poseen una única conexión de aire comprimido, por tal motivo solo pueden producir trabajo en un sentido. Necesitando el aire para provocar el movimiento de translación del vástago el cual retorna por el funcionamiento de un muelle incorporado (Majumdar, 1998, p.89).

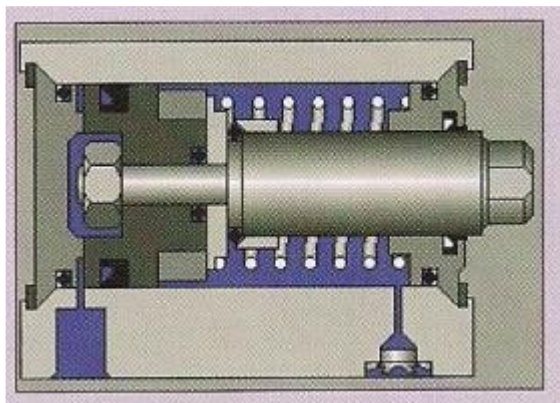


Figura 4-2. Cilindro de simple efecto

Fuente: Neumática básica, 2012

2.3.1.2. Cilindro de doble acción

Estos cilindros producen trabajo útil en ambos sentidos, ya que poseen una fuerza operante tanto en avance como en retroceso. Su construcción por lo general tiene forma de cilindros de embolo con dos tomas para aire comprimido, estas están siempre en cada etapa del cilindro. Se los utiliza cuando es necesario que el embolo realice una función al momento de su retorno a la posición de inicio. Estos cilindros poseen una carrera más larga en comparación a los de simple efecto, se debe tomar en cuenta el pandeo que puede tener el vástago en su posición final (posición extrema) (Majumdar, 1998, p.93).

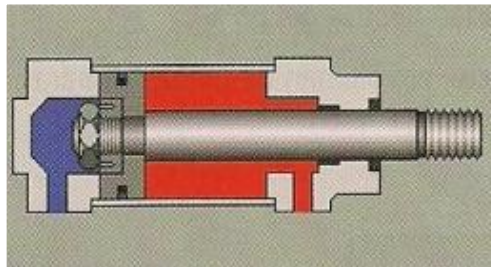


Figura 5-2. Cilindro de doble acción
Fuente: (Majumdar, 1998).

2.3.2. Tratamiento del aire

El aire comprimido posee impurezas que pueden ser sólidas, gaseosas o líquidas por este motivo debemos tratar a este fluido para evitar cualquier contratiempo. Para lidiar con este problema se instalan las unidades de mantenimiento de filtrado de aire, tratan el aire decantándolo, regulando su presión y lubricándolo con el uso de aceite finamente distribuido en el (Serrano, 2009, pp.86-87).

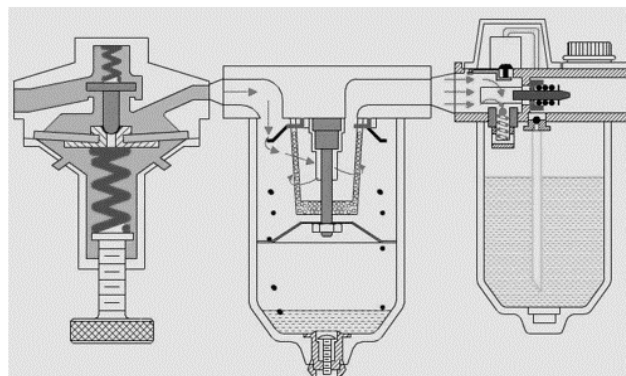


Figura 6-2. Unidad de mantenimiento
Fuente: (Electromatic, 2012)

2.3.3. Válvulas distribuidoras

Su función principal es la de dirigir hacia las distintas vías al aire comprimido, esto lo realiza al arranque, la parada cuando ocurre lo del cambio de sentido del pistón. En la neumática los esquemas son representados por símbolos, estos indican cuantas posiciones y vías posee el accesorio. La cantidad de cuadrados adyacentes del símbolo serán el número de posiciones que tiene la válvula, y dentro de ellos se dibujara su esquema de funcionamiento. La cantidad de tuberías serán representadas por líneas (Creus, 2007, pp.52-53). A continuación, se muestra una válvula de 5 vías y 2 posiciones en la figura 9-2.

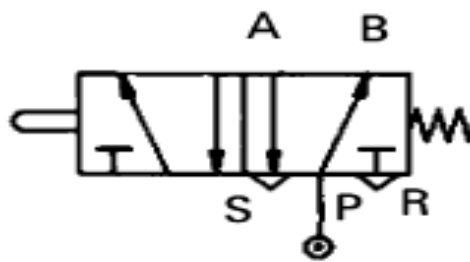


Figura 7-2. Válvula de 5 vías y 2 posiciones
Fuente: Creus, 2007

2.3.3.1. Electroválvula

Una electroválvula es un dispositivo que replica a pulsos eléctricos. La corriente circulatoria del solenoide permite abrir o cerra la válvula de esta manera se puede regular el flujo del fluido. Esta corriente que circula crea un campo magnético que sirve para atraer el núcleo móvil y cuando el campo magnético deja de funcionar el núcleo deberá volver a su posición, por la función de un resorte (Creus, 2007, p.59).



Figura 8-2. Válvula distribuidora 5/2 de bobina simple.
Fuente: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

2.3.4. Tubos y racores

Son elementos que forman parte de un circuito neumático, su función principal es unir otros componentes. Por los tubos y racores viajara aire a presión, la ventaja de estos elementos es que la perdida de presión es muy bajas y los costos son económicos, para disminuir esta variación de presión se deberá tener cuidado en el diseño para necesitar la mínima longitud, seleccionar accesorios y tuberías de superficies internas lisas y diámetros de paso adecuados (Serrano, 2009, p.233).

2.3.4.1. Tubos según el material

La gama de tubos es muy variada en el campo neumático, hay de aceros, latón y cobre que son rígidas, o flexibles como el caucho que posee fibras reforzadas. Las más utilizadas son de poliamida, teflón y nilón (Serrano, 2009, p.233).



Figura 9-2. Tipos de tubos

Fuente: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

2.3.4.2. Racores

Hay una gran variedad de racores, por su forma, tamaño, tipo de conexión y por los materiales a usar y fabricar. Entre los más frecuentes tenemos al acero, acero inoxidable, latón y plásticos. Existen en el tamaño y forma necesario para dar solución a cualquier problema de unión de elementos neumáticos como tuberías (Serrano, 2009, p. 241).

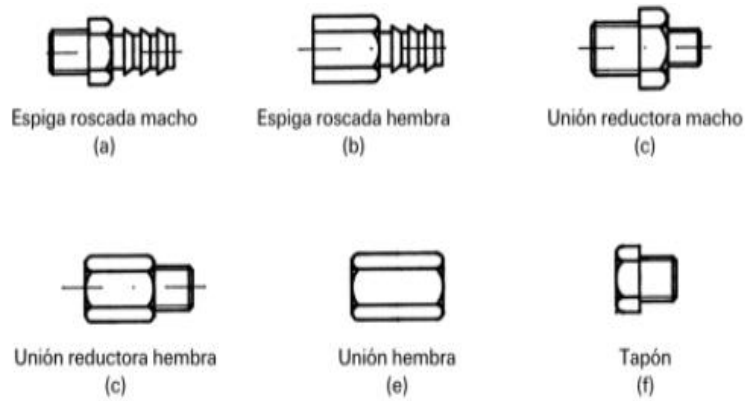


Figura 10-2. Tipos de racores

Fuente: Serrano, 2009

2.4. Automatización y Control

2.4.1. Automatización

Es un conjunto de procesos informáticos, mecánicos, electrónicos diseñados para usar a las máquinas y sus capacidades para realizar funciones independientes en las que se necesitaba la presencia del ser humano, y este solo sirva de programador del sistema. La automatización suele ser dependiente y semiindependiente del control humano (Almazán et al., 2008: p.2).

2.4.1.1. Microcontrolador

Es un circuito integrado que en su interior posee una CPU con unidades de memoria RAM y ROM. Por esto se dice que son minicomputadores completos solo que están adaptadas a un circuito integrado, pero con la misma capacidad de una de tamaño normal (Marques, 2011, p.5).

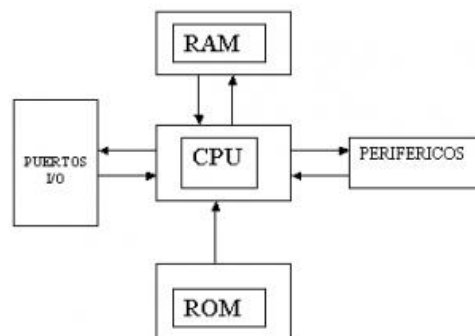


Figura 11-2. Microcontroladores

Fuente: (Electrónica y estudio, 2019)

2.4.1.1.2 *Arduino Nano*

Es usada para fabricar elementos autónomos, comunicándose con dispositivos software. Con Arduino nano se puede automatizar cualquier sistema y hacerlo independiente o semindependiente, el lenguaje de programación es muy fácil de aprender o a su vez se lleva muy bien con otros lenguajes, en este caso solo serviría de enlace entre el equipo a automatizar y el software (Kumar et al., 2019, p.21).

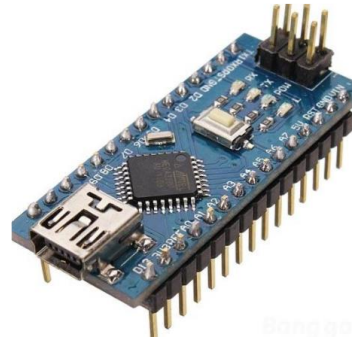


Figura 12-2. Arduino nano

Fuente: (Electrónilab, 2016)

2.4.1.2 *Programación en LabVIEW*

Es un lenguaje y una programación grafica al mismo tiempo, sirve para crear de manera rápida y sencilla programaciones. Originalmente fue creado para controlar equipos electrónicos usando instrumentación virtual. Consta de un panel frontal donde interactuará el usuario y un diagrama de bloques donde se realizará la programación. Trabaja muy bien de la mano de hardware como Arduino (Lajara, et al., 2010, pp.21-23).

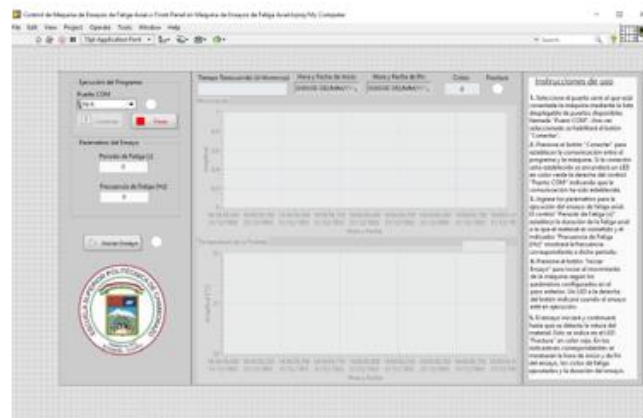


Figura 13-2. Interfaz de LabVIEW

Fuente: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

2.4.2 Sistema embebido

Este sistema diseñado para realizar una o varias funciones dedicadas a cumplir un trabajo en tiempo real y cubren una variedad alta de necesidades del usuario. Sus elementos se encuentran en la placa base. La mayoría son creados e instalados cerca de otros microcontroladores o sistemas de señales digitales que están enlazados con otros mediante la red (Forrai, 2013, pp.1-2).



Figura 14-2. Placa base

Fuente: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

2.4.2.1 Comunicación entre Arduino y LabVIEW

La interfaz de programación de LabVIEW para Arduino es denominada como LIFA Toolkit la cual es una herramienta que se consigue descargando desde la página de National Instruments y que ayuda a los usuarios a acceder a los datos del microcontrolador Arduino y encausarlos en el lenguaje de programación gráfica de LabVIEW. Para utilizar la aplicación LIFA solo es necesario tener el software LabVIEW y lo podrás encontrar en sus librerías (Ruiz, 2015, p.5)

2.4.2.2 Sensores

Un sensor es un dispositivo que mide una magnitud física del exterior que nos rodea y la convierte en una señal eléctrica entendible para el usuario (Pallás, 2003, p.3). El sensor es un dispositivo de entrada que genera una salida que se puede manipular, existen una gran variedad de sensores que pueden medir la misma magnitud física, pero en condiciones diferentes, o en algunas ocasiones es el mismo sensor, pero la eficiencia varía de la empresa que lo fabrica (Corona et al., 2014, p.17).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Diseño conceptual

El primer prototipo de la máquina para ensayo de fatiga en especímenes poliméricos sometidos a fatiga axial deberá ser capaz de someter a una probeta de ensayo con geometría y dimensiones definidas a cargas uniaxiales de tracción cíclica y amplitud constante, esto se logrará fijando el espécimen de prueba por medio de dos mordazas de sujeción alineadas verticalmente de las cuales una permanecerá estática y la otra será móvil. La mordaza móvil será accionada por medio de un actuador neumático (cilindro neumático) capaz de alcanzar fuerzas aproximadas a los 5 KN, el prototipo además contará con un control automatizado con el cual se permita establecer y modificar la frecuencia con la que se aplican los ciclos de carga, la fuerza por otro lado se controlará manualmente a través de la válvula reguladora de presión. Así de este modo se desarrollará la metodología para realizar el proceso que de diseño y dimensionamiento de las partes mecánica, eléctrica y electrónica partiendo del estado del arte y metodología del diseño conceptual.

3.1.1. *Determinación de las especificaciones y requerimientos de la máquina*

El funcionamiento, requerimientos y especificaciones de la máquina de fatiga de fatiga axial estarán basados en los lineamientos establecidos por las normas ASTM D 3479 y ASTM D 3039, en dónde se establece que la máquina debe ser capaz de impartir a la mordaza móvil una velocidad controlada con respecto a la cabeza estacionaria, también se debe contar con un indicador de carga que en nuestro caso será la presión la cual se relacionará con el diámetro del cilindro neumático para obtener la fuerza axial total aplicada a la probeta ensayada. Las mordazas deben tener suficiente resistencia a la fatiga y sus superficies laterales de agarre deben estar ligeramente aserradas.

3.1.2. *Desarrollo de la función de calidad (QFD)*

El diseño adecuado para la máquina de ensayos a fatiga axial para polímeros se establecerá a partir del despliegue de la casa de la calidad. En el cual se deben determinar los requerimientos establecidos por la voz del usuario (cliente), y la voz del ingeniero (análisis técnico). El despliegue

de la casa de la calidad nos dará como resultado las especificaciones técnicas de la máquina en función de los requerimientos del usuario final logrando así que la máquina cumpla con las expectativas del cliente y además exista balance entre el costo, utilidad y eficiencia.

3.1.2.1. Voz del Usuario

La necesidad de diseñar y construir una máquina que permita realizar ensayos de fatiga axial en polímeros surge de la idea de aprovechar estos materiales en nuevos campos de aplicación debido a que gracias al avance de la tecnología en la producción de polímeros estos han mejorado considerablemente sus propiedades mecánicas una de las cuales es su comportamiento a fatiga. A continuación, se listan requerimientos y características deseables para el prototipo de la máquina.

- Capacidad de analizar varios materiales.
- Que pueda ensayar probetas de diferentes dimensiones
- Fácil de operar.
- Fácil mantenimiento.
- Fácil colocación de las probetas.
- Durabilidad de los materiales.
- Bajo costo.
- Silenciosa.
- Compacta.

3.1.2.2. Voz del ingeniero

En esta sección se traduce las necesidades, características y requerimientos del usuario a especificaciones técnicas.

- Fuerza máxima de la máquina
- Dimensiones de la mordaza.
- Confort y Ergonomía.
- Mantenimiento.
- Mecanismo de Sujeción de las mordazas
- Resistencia a fatiga de los materiales.
- Costo.
- Nivel de ruido.
- Estructura Ligera.

3.1.3. Análisis funcional

3.1.3.1. Nivel 0

En este nivel se describe la función principal de la máquina para ensayos a fatiga axial de polímeros representado en el bloque mostrado a continuación:



Figura 2-3. Función principal de la máquina de ensayos a fatiga axial.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.1.3.2. Nivel 1

En el presente nivel se describen las subfunciones necesarias para cumplir la función principal de la máquina para ensayos de fatiga axial en polímeros.

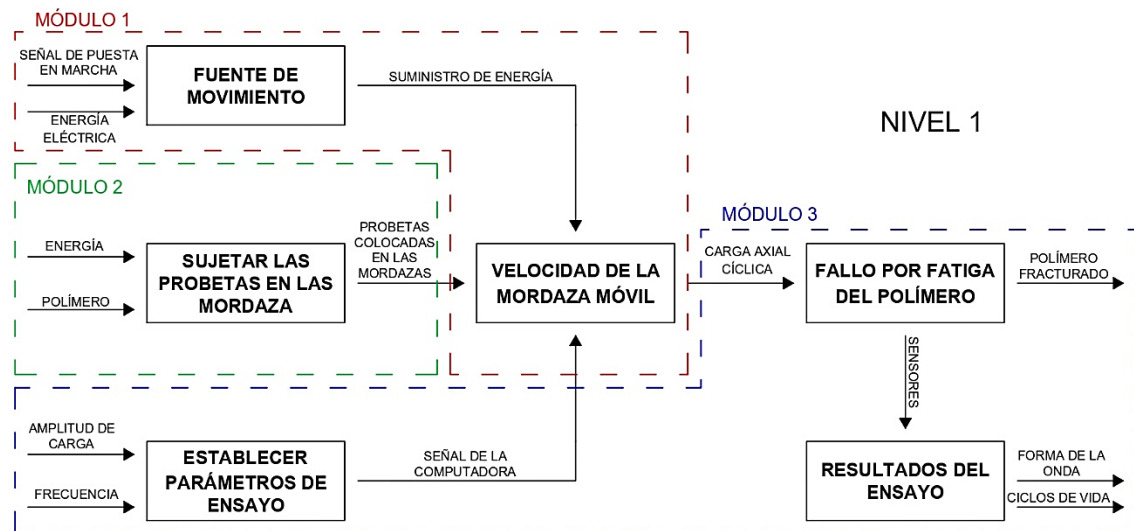


Figura 3-3. Módulos de funcionamiento de la máquina.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Los módulos que se definieron para la máquina de ensayos a fatiga axial son:

- Módulo I: Fuente de movimiento y mecanismo que producirá la carga.
- Módulo II: Mecanismo de sujeción de especímenes poliméricos (Mordazas).
- Módulo III: Sistema de control y monitoreo Electrónico

3.1.4. Desarrollo de las alternativas de solución para el prototipo de máquina

3.1.4.1. Fuente de movimiento y mecanismo que producirá la carga

Para que la máquina pueda impartir cargas cíclicas de tracción se debe considerar mecanismos capaces de producir movimiento lineal en un plano uniaxial, debido a que solo debemos impartirle movimiento lineal a una mordaza con respecto a la otra se han considerado las opciones que se listan a continuación:

- Mecanismo Biela Manivela
- Sistema de cilindro Hidráulico
- Sistema de cilindro Neumático

- *Mecanismo Biela Manivela:* Este mecanismo es capaz de transformar movimiento circular en movimiento lineal alternativo, el desplazamiento de este movimiento lineal se controla a través de la excentricidad que le asignemos a la manivela.

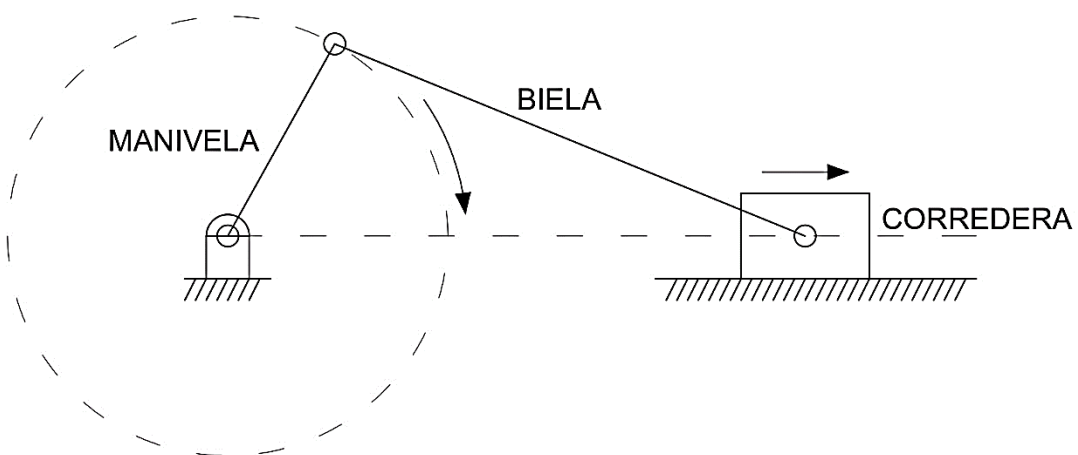


Figura 4-3. Mecanismo biela-manivela-corredera.

Fuente: (Myszka, 2012)

Tabla 1-3. Ventajas y desventajas del mecanismo biela, manivela, corredera.

Mecanismo Biela Manivela	
Ventajas	Desventajas
Con este mecanismo y un motor eléctrico como fuente de energía se pueden alcanzar frecuencias iguales o superiores a los 30 Hz. Lo cual acortaría el tiempo de ensayo.	El mecanismo en conjunto con la fuente de energía es propenso a los efectos negativos de las vibraciones.
La distancia lineal recorrida por la corredera es la misma en cada ciclo.	Es muy difícil modificar la excentricidad de la manivela para desplazamientos de la corredera muy pequeños como los requeridos para los ensayos de nuestra máquina que se encuentran en dimensiones inferiores a 1mm dependiendo del porcentaje de alargamiento del polímero. Lo cual hace muy complejo obtener buena precisión con esas dimensiones.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

- *Sistema de Cilindro Hidráulico:* El sistema consiste en un circuito el cual estará constituido por un depósito, acumulador hidráulico, motobomba y una red de conexiones (tuberías) que alimenten y conecten los dispositivos hidráulicos como el cilindro. El cilindro hidráulico del sistema será controlado a través de válvulas solenoides 4 vías / 2 posiciones, y la carga axial se fijará en función de la presión establecida por una válvula reguladora de presión.

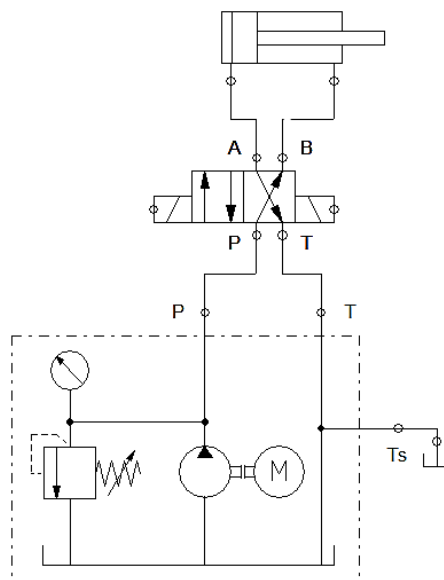


Figura 5-3. Sistema Hidráulico con cilindro de doble efecto.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 2-3. Ventajas y desventajas del sistema de cilindro hidráulico.

Sistema de cilindro Hidráulico	
Ventajas	Desventajas
El cilindro puede producir fuerzas elevadas.	Debido a las altas fuerzas y presiones que puede generar el sistema, la máquina debe dimensionarse para soportar mayores esfuerzos lo cual haría que la máquina deje de ser compacta y generar mayores gastos.
Velocidad de respuesta más alta para el arranque, inversiones de velocidad y paro del movimiento.	Costo de total del sistema muy elevado.
Fácil control de posición, velocidad y fuerza a través del uso de servo válvulas distribuidoras.	

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

- *Sistema de Cilindro Neumático:* Este sistema está constituido principalmente de una fuente de aire comprimido (compresor), la unidad de mantenimiento que consta de filtro de aire, regulador de presión y lubricador. Todo esto conectado a través de mangueras para suministrar el aire comprimido hacia el cilindro neumático del sistema será controlado a través de válvulas solenoides 4 vías / 2 posiciones, y la carga axial se fijará en función de la presión establecida por una válvula reguladora de presión.

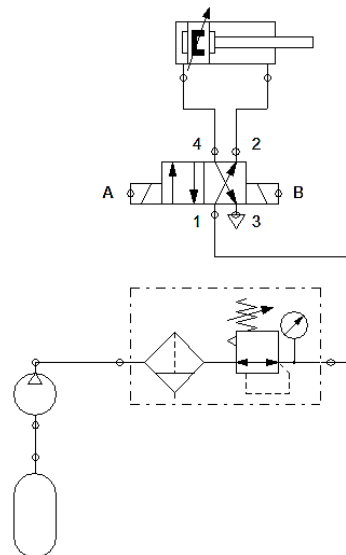


Figura 6-3. Sistema Neumático con cilindro de doble efecto.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 3-3. Ventajas y desventajas del sistema de cilindro neumático.

Sistema de cilindro Neumático	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Los cilindros neumáticos producen mucha menor fuerza que los cilindros hidráulicos, pero para nuestro caso la fuerza es suficiente para alcanzar esfuerzos de tracción en materiales poliméricos.	<ul style="list-style-type: none">• Gran cantidad de generación de aire comprimido que se requiere para el ensayo eleva los costos del consumo eléctrico.
<ul style="list-style-type: none">• Velocidad de respuesta más alta para el arranque, inversiones de velocidad y paro del movimiento.	<ul style="list-style-type: none">• La frecuencia del ensayo se ve reducida sustancialmente haciendo que cada ensayo tome más tiempo en completarse.• El sistema de generación de aire comprimido (compresor) es muy ruidoso.
<ul style="list-style-type: none">• Fácil control de posición, velocidad y fuerza a través del uso de servo válvulas distribuidoras.	

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.1.4.2. Sistema de Mordazas

El sistema o mecanismo de sujeción de las probetas debe tener la suficiente fuerza para evitar que la probeta resbale mientras se está realizando el ensayo. A continuación, se describen algunas de las opciones:

- Mordazas de acción lateral de tornillo
 - Mordazas Neumáticas de acción lateral
 - Mordaza de acción de cuña
- Mordazas de acción lateral de tornillo: Este tipo de mordazas ofrecen una solución muy sencilla y des complicada de sujetar los especímenes poliméricos, pero a su vez muy eficiente, las cuales se pueden manipular manualmente por el usuario.

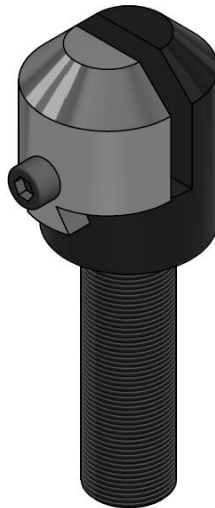


Figura 7-3. Mordaza de acción lateral de tornillo.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 4-3. Ventajas y desventajas de las mordazas de acción lateral de tornillo

Ventajas	Desventajas
Simples y eficientes	Capacidad de fuerza de sujeción baja.
Fácil montaje.	Requiere que el usuario ajuste las mordazas manualmente lo cual toma algo de tiempo y esfuerzo físico.
Fáciles de maquinar	

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

- Mordazas Neumáticas de acción lateral: Este tipo de mordazas requieren una fuente de aire comprimido, pero a su vez son muy fáciles de usar.



Figura 8-3. Mordaza Neumática de acción lateral

Fuente: (INSTRON. 2020)

Tabla 5-3. Ventajas y desventajas de la mordaza neumática de acción lateral

Ventajas	Desventajas
Fáciles de usar	Requiere fuente de aire comprimido
Sujeción rápida	Difícil de maquinar
No requiere esfuerzo físico	Costosa

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

- Mordazas de acción de cuña: Este tipo de mordazas tienen gran capacidad de fuerza y son virtualmente inmunes al deslizamiento.



Figura 9-3. Mordaza de acción de cuña

Fuente: (INSTRON. 2020)

Tabla 6-3. Ventajas y desventajas de la mordaza de acción de cuña

Ventajas	Desventajas
Gran capacidad de fuerza	Ajuste y alineamiento manual
Virtualmente no existe deslizamiento	Difícil de maquinar
Fácil alineación y posición de las probetas.	Costosa

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.1.4.3. Sistema de control y monitoreo electrónico

Para controlar y monitorear el sistema podemos optar por las opciones listadas a continuación:

- Control por Arduino
- Control por Raspberry Pi
- PLC más HMI

- *Arduino*: La forma más económica y simple por medio de la cual podríamos controlar el sistema y tener una interfaz gráfica de monitoreo y establecimiento de parámetros si lo conectamos con un software como LabVIEW.

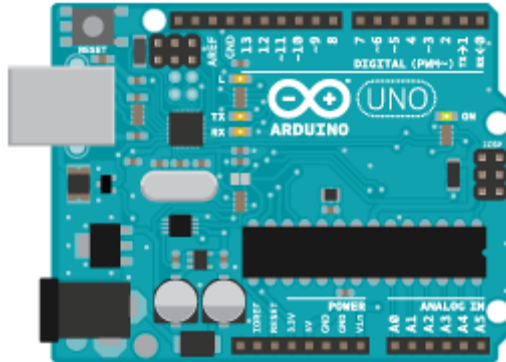


Figura 10-3. Arduino UNO.

Fuente: (Arduino., 2020)

Tabla 7-3. Ventajas y desventajas del Arduino UNO

Arduino UNO	
Ventajas	Desventajas
Bajo costo.	Sensores no muy precisos.
Fácil programación.	Requiere conectarlo a una computadora para tener una interfaz gráfica en un software como LabVIEW.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

- *Raspberry Pi*: Es un ordenador muy pequeño con puertos GPIO al cual se podría agregar una pantalla y desde ahí programar nuestra máquina para establecer los parámetros y monitorear en tiempo real el proceso del ensayo sin la necesidad de tener una computadora.

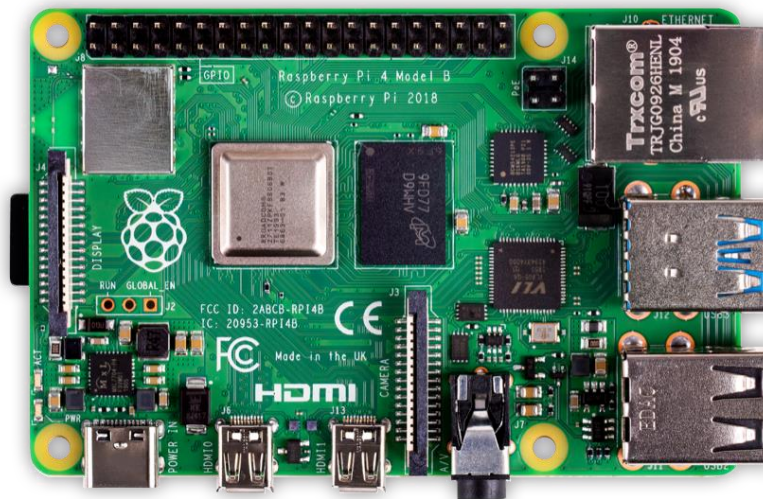


Figura 11-3. Raspberry Pi 4.

Fuente: Raspberry Pi., 2020

Tabla 8-3. Ventajas y desventajas de la Raspberry Pi

Raspberry Pi	
Ventajas	Desventajas
No es muy costoso.	Requiere una carcasa con ventilación.
Varios lenguajes de programación.	Utiliza los sensores no tan precisos que el Arduino.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

- *PLC*: Este tipo de equipos son altamente utilizados en la industria para controlar componentes de maquinarias programados para ejecutar tareas automáticamente.



Figura 12-3. PLC Siemens S7 1200.

Fuente: (Siemens., 2020)

Tabla 9-3. Ventajas y desventajas del PLC

PLC	
Ventajas	Desventajas
Alta capacidad de procesamiento.	Costoso
Alta precisión en la automatización de tareas simples.	

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.1.5. Alternativas de solución

Las alternativas de solución se obtienen a partir de combinar las alternativas individuales de cada uno de los módulos presentados anteriormente. La solución óptima será aquella cuyos componentes cumplan con las prioridades de diseño y dimensionamiento obtenidas del análisis del despliegue de la casa de la calidad, asegurando así un diseño eficiente y óptimo en función de los requerimientos de la máquina establecidos en las normas ASTM D 3479 y ASTM D 3039.

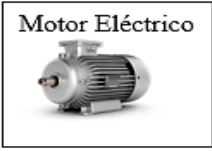


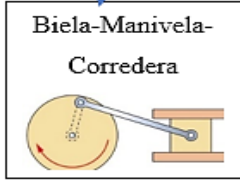





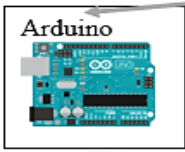


Función	Alternativas		
Fuente de Energía			
Mecanismo de funcionamiento			
Mecanismo de Sujeción de probetas			
Sistema de control y monitoreo electrónico			
Soluciones	Solución 1	Solución 2	Solución 3

Figura 13-3. Matriz morfológica

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.1.5.1. Alternativas de solución para cada módulo

Partiendo de nuestra matriz morfológica hemos considerado tres alternativas que satisfacen el diseño conceptual de nuestra máquina las cuales serán analizadas por el método ordinal de criterios ponderados, el cual nos permitirá seleccionar la alternativa más viable de diseño final. A continuación, se encuentran descritas las tres alternativas a tomar en cuenta:

Tabla 10-3. Componentes de las diferentes alternativas de solución

MÓDULO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO	Mecanismo Biela-Manivela-Corredera	Sistema de cilindro Hidráulico	Sistema de Cilindro Neumático
MORDAZAS	Mordazas de Cuña	Mordazas de Cuña	Mordazas de acción lateral de tornillo
SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO ELECTRÓNICO	PLC	PLC	Arduino

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.1.6. Criterios de evaluación del módulo

Los criterios de valoración que se consideraron más determinantes son:

- Capacidad de impartir carga
- Costo
- Mantenimiento
- Eficiencia de sujeción de probetas

Capacidad > Costo > Mantenimiento = Eficiencia

A continuación, se muestra en la tabla 11-3 la evaluación de los principios de solución en función de los criterios de valoración determinantes:

Tabla 11-3. Evaluación de las alternativas de solución

Solución	Capacidad	Costo	Mantenimiento	Eficiencia
Alternativa 1	2	1	2	2
Alternativa 2	3	2	2	1
Alternativa 3	1	1	1	1

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

A continuación, se muestra en la tabla 12-3 la evaluación del peso específico de cada criterio

Tabla 12-3. Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Capacidad	Costo	Mantenimiento	Eficiencia	$\Sigma+1$	Ponderación
Capacidad		1	1	1	4	0.4
Costo	0		1	1	3	0.3
Mantenimiento	0	0		0.5	1.5	0.15
Eficiencia	0	0	0.5		1.5	0.15
					10	1

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

A continuación, en la tabla 13-3 se realiza la evaluación del peso específico del criterio Capacidad.

Tabla 13-3. Evaluación de soluciones respecto del criterio Capacidad

Eficiencia	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	2	0.33
Alternativa 2	0		0	1	0.17
Alternativa 3	1	1		3	0.5
				6	1

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

A continuación, en la tabla 14-3 se realiza la evaluación del peso específico del criterio Costo.

Tabla 14-3. Evaluación de soluciones respecto del criterio Costo

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0.166
Alternativa 2	1		0.5	2.5	0.417
Alternativa 3	1	0.5		2.5	0.417
				6	1

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

A continuación, en la tabla 15-3 se realiza la evaluación del peso específico del criterio Mantenimiento.

Tabla 15-3. Evaluación de soluciones respecto del criterio Mantenimiento

Mantenimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	0	1.5	0.25
Alternativa 2	0.5		0	1.5	0.25
Alternativa 3	1	1		3	0.5
				6	1

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

A continuación, se realiza la evaluación del peso específico del criterio Eficiencia como se muestra en la tabla 16-3.

Tabla 16-3. Evaluación de soluciones respecto del criterio Eficiencia

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0.166
Alternativa 2	1		0.5	2.5	0.417
Alternativa 3	1	0.5		2.5	0.417
				6	1

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

En la tabla 17-3, se presenta los resultados obtenidos luego de realizar la evaluación de cada criterio y posterior la sumatoria de cada una de las soluciones que se plantearon. Se muestra también la solución más favorable que cumple con los requerimientos técnicos y del usuario.

Tabla 17-3. Soluciones de las alternativas

Alternativa	Capacidad	Costo	Mantenimiento	Eficiencia	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.4*0.33	0.3*0.166	0.15*0.25	0.15*0.166	0.2442	3
Alternativa 2	0.4*0.17	0.3*0.417	0.15*0.25	0.15*0.417	0.2932	2
Alternativa 3	0.4*0.5	0.3*0.417	0.15*0.5	0.15*0.417	0.4627	1

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

De acuerdo con la tabla de soluciones nuestra solución se encuentra en la alternativa tres, la cual consiste en un sistema de cilindro neumático, mordazas de acción lateral con tornillo y un sistema de control y monitoreo electrónico.

3.1.7. Diseño de detalle

El diseño mostrado a continuación ha sido realizado en el software “Inventor 2021”, en la figura se puede apreciar las partes que conforman el prototipo de la máquina para ensayos de fatiga axial en polímeros.

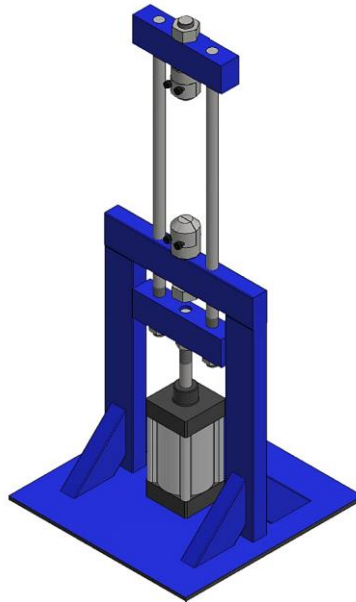


Figura 14-3. Diseño de detalle del prototipo

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.2. Dimensionamiento del sistema neumático

La fuerza estimada que debe producir el cilindro neumático está en función del esfuerzo máximo de tracción que puede soportar un material polimérico. Para el diseño de la máquina tomamos como referencia la resistencia a la tracción del ácido poli láctico (PLA) la cual bordea los 50 MPa esto debido a que es un material muy usado en la actualidad en aplicaciones como la impresión 3D y su resistencia es intermedia con respecto a otros polímeros de uso frecuente como el PET y el Nylon 6, además el área transversal de nuestra probeta será tomada de la tabla 18-3 de recomendaciones de geometría para especímenes de tracción mostrada a continuación:

Tabla 18-3. Recomendaciones de geometría de probetas de tracción

Orientación de las Fibras	Ancho (mm)	Longitud total (mm)	Espesor (mm)	Longitud de pestañas	Espesor de pestañas	Ángulo de bisel de pestaña
0° Unidireccional	15	250	1.0	56	1.5	7° - 90°
90° Unidireccional	25	175	2.0	25	1.5	90°
Balanceadas y simétricas	25	250	2.5	-	-	-
Discontinuas-Aleatorias	25	250	2.5	-	-	-

Fuente: ASTM D 3039/D 3039M. 2020

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Como referencia tomamos el área transversal máxima de probeta que encontramos en la tabla de recomendaciones la cual es de 25x2.5 mm², ahora con el valor del esfuerzo axial y el área transversal calculamos la fuerza requerida por el cilindro para llevar a la probeta con las dimensiones de área antes mencionadas. La fuerza se despeja de la fórmula del esfuerzo axial mostrada a continuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$F = \sigma * A \quad (2)$$

Donde:

σ : Esfuerzo de tracción [Mpa]

F: Fuerza de tracción impartida a la probeta [N]

A: Área transversal [mm²]

$$F = 50(2.5 * 25)$$

$$F = 3125 \text{ N}$$

Debido a que el cilindro también debe empujar el peso del marco donde están sujetadas las probetas nos hemos impuesto un factor adicional de carga de 1.5, es decir la fuerza calculada anteriormente debemos agregarle un estimado en nuestro caso de 50% más debido a que también debe vencer el peso del marco donde va colocada la mordaza móvil, en lo posterior con las dimensiones finales de la máquina y el peso real se podrá establecer el verdadero valor de carga axial aplicada a la probeta. Por lo tanto, la fuerza requerida sería:

$$F_{\text{req}} = F * 1.5 \quad (3)$$

Donde:

F_{req} : Fuerza requerida para compensar pérdidas por peso de componentes [N]

F: Fuerza de tracción impartida a la probeta [N]

$$F = 3125(1.5)$$

$$F = 4687.5 \text{ N}$$

3.2.1. Dimensionamiento del cilindro

La fuerza que se desarrolla en un cilindro neumático de doble efecto es determinada por varios parámetros como la presión del aire, el diámetro del émbolo, el diámetro del vástago en el retroceso y el rendimiento del cilindro debido a las pérdidas que surgen a causa del rozamiento. En cuanto al rendimiento de los cilindros neumáticos, debido a que no disponemos datos precisos del fabricante nos guiaremos a modo de orientación de lo descrito por (Serrano, 2009: p. 95), el cual nos pone en consideración que para cilindros de diámetros superiores a 40mm el rendimiento es igual a 0.95. La fuerza de avance de un cilindro neumático será:

$$F_a = \frac{\pi}{40} D^2 * p * R \quad (4)$$

Donde:

F_a : Fuerza de avance [N]

D: Diámetro [mm]

p: Presión [bar]

R: Rendimiento del Cilindro

A continuación, se muestra en la tabla 19-3 las fuerzas teóricas de los cilindros de doble efecto para rangos de presión entre dos y ocho bares, Para nuestro cilindro la fuerza requerida será escogida para una presión de seis bares ya que este valor se encuentra en el promedio de presión alcanzado por los compresores de uso común.

Tabla 19-3. Fuerzas teóricas en cilindros de doble efecto

D (mm)	Fuerza en Newton para presión en Bar			
	2	4	6	8
10	16	32	48	64
12	22	44	66	88
16	40	80	120	160
20	62	124	186	248
25	98	196	294	392
32	160	320	480	640
40	252	504	756	1008
50	392	784	1176	1568
63	624	1248	1872	2496
80	1006	2012	3018	4024
100	1570	3140	4710	6280
125	2460	4920	7380	9840
160	4020	8040	12060	16080
200	6280	12560	18840	25120
250	9820	19640	29460	39280

Fuente: Serrano, N. 2020

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Como podemos evidenciar el cilindro neumático que más se acerca a nuestro requerimiento es el de diámetro de 100 mm ya que a una presión de seis bares podemos alcanzar 4710 N de fuerza, esta fuerza es muy cercana a la fuerza requerida de 4687.5 N. El cilindro adquirido tiene un vástago de 25mm el cual analizaremos posteriormente para comprobar su resistencia.

3.2.2. Cálculo del Vástago

El vástago de un cilindro ya sea neumático o hidráulico siempre trabajan a esfuerzos de tracción, compresión y pandeo. Debido a su forma no es conveniente que los vástagos estén sometidos a esfuerzos radiales los cuales pudieren causar flexión.

En nuestro caso el vástago del cilindro estará sometido a esfuerzos de compresión por lo tanto el análisis del vástago estará enfocado al fallo por pandeo, siendo necesario aplicar la expresión de Euler en donde la longitud de pandeo L es igual a la carrera C del vástago como se muestra en la figura 15-3:

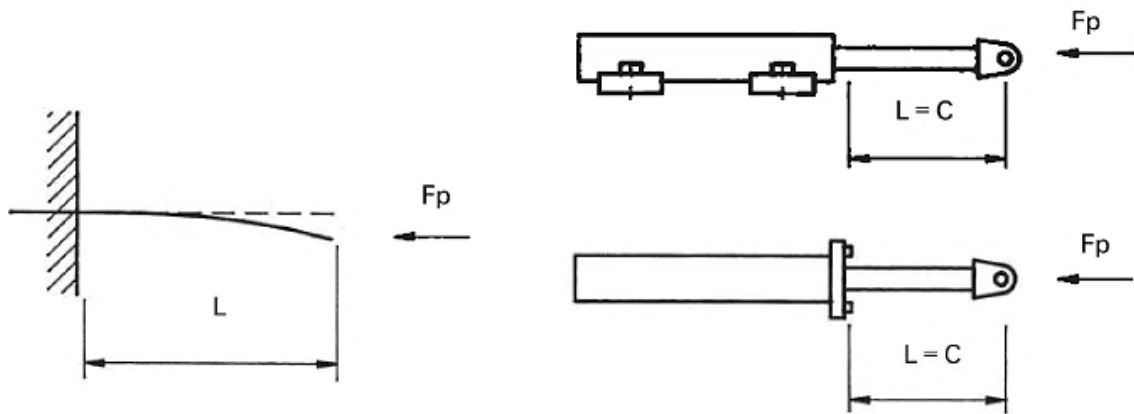


Figura 15-3. Extremo empotrado y el otro libre

Fuente: Serrano, N. 2009

La expresión de Euler sería la siguiente:

$$F_p = \frac{\pi^2 * E * I}{4 * L^2} = \frac{\pi^2 * E * I}{4 * C^2} \quad (5)$$

$$F_p = \frac{\pi^2 * E * I}{4 * C^2 * Cs} \quad (6)$$

$$I = \frac{\pi * d^4}{64} \quad (7)$$

Donde:

Fp: Carga axial permitida sobre el vástago [N]

E: Módulo de Elasticidad del material del vástago [N/mm²], en el acero 205000 [N/mm²]

I: Momento de Inercia en la sección del vástago [mm⁴]

d: Diámetro del vástago en [mm]

C: Carrera del vástago del cilindro [mm]

Cs: Coeficiente de Seguridad. Suele tomarse entre 2 y 4

$$I = \frac{\pi * (25)^4}{64}$$

$$I = 19174.75985 \text{ mm}^4$$

$$F_p = \frac{\pi^2 * 205000 * 19174.7599}{4 * 100^2 * 4}$$

$$F_p = 242473.1 \text{ N}$$

La fuerza generada por el cilindro incluso a 8 bares es de 6280 N la cual está muy por debajo de la fuerza axial permitida por el vástago F_p aun cuando nos hemos impuesto un coeficiente de seguridad de 4. Lo cual nos indica que el vástago de 25mm de diámetro es capaz de cumplir su función sin riesgo a sufrir fallo por pandeo.

$$6280 \text{ N} < F_p$$

3.2.3. Elementos complementarios del sistema neumático

Para poder completar el sistema neumático se necesitan más elementos para que el circuito se complete y el cilindro pueda ponerse en marcha y así controlarlo de la manera deseada, en la figura 16-3 podemos observar todos los componentes neumáticos necesarios para completar el circuito.

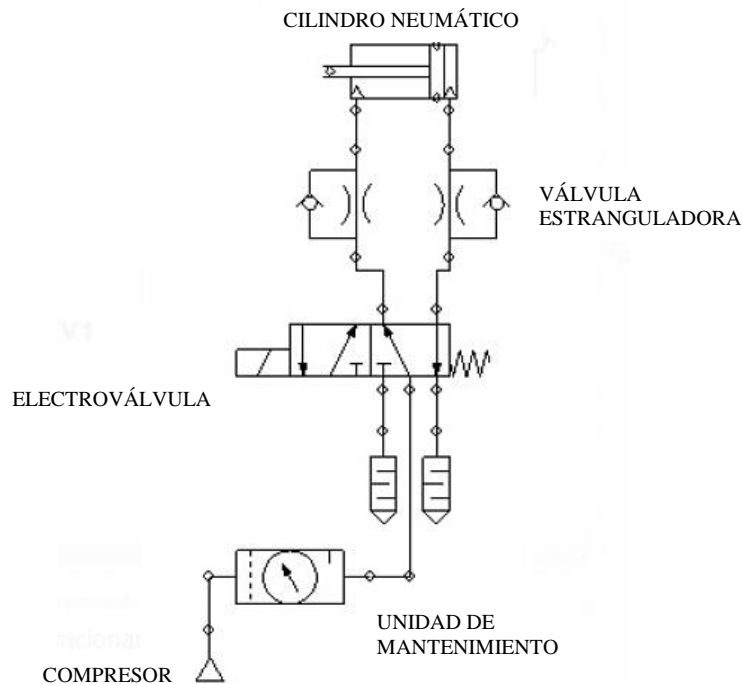


Figura 16-3. Diagrama del circuito neumático

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

El tiempo que el cilindro tarda en hacer la carrera o en retornar desde la carrera depende de apertura de las válvulas estranguladoras. Si están abiertas al 100% caudal de aire que circula es el que suministra el compresor, por lo que se demoran menos. Si la apertura de las válvulas estranguladoras se reducen, el vástago del cilindro demora en retroceder o en avanzar dependiendo de cuál de las dos (pueden ser ambas) esté con la apertura reducida.

3.2.3.1. Electroválvula

Para controlar la puesta en marcha del cilindro, el sentido de desplazamiento es necesario dirigir el aire comprimido proveniente del compresor, esto lo lograremos en nuestro caso con una electroválvula de cinco vías y dos posiciones. Hemos encontrado en el mercado electroválvulas de la marca VPC NEUMATIC, de la cual hemos seleccionado y adquirido el modelo que se muestra junto con sus especificaciones técnicas en la tabla 20-3.

Tabla 20-3. Especificaciones técnicas de la electroválvula 5/2 monoestable

	<p>Marca : VPC PNEUMATIC Modelo : 4V 110 – 06 AC 110V</p>
Especificaciones	
Tipo de actuación	Guía interna
Medio de trabajo	Aire limpio (filtrado 40 µm)
Tamaño de acople	Avance = 1/8 Retroceso = 1/8 Extenuación = 1/8
Zona seccional	12 mm ² (CV=0.67)
Presión de trabajo	0.15 ~ 0.9 MPa
Presión máxima	1.2 MPa
Temperatura de trabajo	-5 ~ 60 °C
Rango de voltaje	-15% ~ -10%
Grado de resistencia al calor	B
Grado de protección	IP65(DIN40050)
Tipo de bobina	Tipo DIN, Cables flotantes
Frecuencia máxima de trabajo	5 ciclos/S


Fuente: VPC PNEUMATIC, 2017

Realizado por: Quezada, J.; Bonifaz, J. 2020

3.2.3.2. Tubería neumática

Las tuberías deben seleccionarse para soportar una presión de al menos diez bares ya que es la presión máxima que puede alcanzar un compresor industrial, para ello seleccionamos una tubería flexible cuyas especificaciones técnicas se describen en la tabla 21-3

Tabla 21-3. Especificaciones técnicas de la tubería neumática





	<p>Marca : VPC PNEUMATIC Modelo : PU- 0604- C</p>
Especificaciones	
Presión mínima de trabajo a 20°C	10 (Bar)
Presión de ráfaga mínima a 20°C	30 (Bar)
Radio de curvatura mínimo a 20°C	15 mm
Peso neto (Kg/ rollo)	3.9
Material	Polyester Polyuretano
Tube color	C (Claro)
Dureza	95 A ~ 98 A
Fluido	Aire, agua
Temperatura del fluido y el ambiente	-20 °C ~ 80 °C

Fuente: VPC PNEUMATIC, 2017

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.2.3.3. Racores y acoples

Tabla 22-3. Especificaciones técnicas de los elementos de unión neumáticos

	<p>Modelo : VPC 06-04 Marca : VPC PNEUMATIC</p>
	<p>Modelo : VPY 06 Marca : VPC PNEUMATIC</p>
	<p>Modelo : VSC 06-04 Marca : VPC PNEUMATIC</p>
	<p>Modelo : SU-6 1/8" 16 Marca : VPC PNEUMATIC</p>

Fuente: VPC PNEUMATIC, 2017

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.2.3.4. Unidad de mantenimiento neumático

Este elemento es indispensable en nuestro sistema ya que permitirá el ingreso de aire limpio y lubricado, además de permitirnos controlar la presión en el sistema y por ende la fuerza del cilindro. En la tabla 23-3 podemos ver las especificaciones técnicas de la unidad de mantenimiento de nuestro sistema neumático.



Figura 17-3. Unidad de mantenimiento neumática

Fuente: SDPC, 2020

Tabla 23-3. Especificaciones técnicas de la unidad de mantenimiento neumática

Modelo	DC201
Marca	SDPC
Fluido	Aire comprimido
Presión Máxima	16 bar
Rango de Regulación	0 – 12 bar
Indicador de Presión	Manómetro 0-16 bar
Grado de filtrado	40um
Purga de condensado	Manual
Conexión Neumática	Rosca NPT ¼

Fuente: SDPC, 2017

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.3. Análisis de fuerzas y diseño mecánico de componentes

Una vez obtenida la fuerza producida por el cilindro neumático procedemos a diseñar los demás componentes de la máquina, dimensionando estos componentes en función de las probetas de ensayo cuyas máximas dimensiones serán tomadas de la tabla 18-3 y como se muestran a continuación en la figura 18-3.

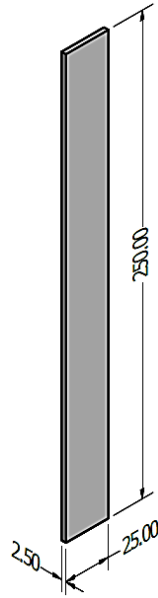


Figura 18-3. Dimensiones de las probetas de ensayo en mm

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.3.1. Diseño de los ejes.



Figura 19-3. Eje de marco de mordaza móvil

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Este eje se fabricará en acero de transmisión AISI 1020 el cual está sometido a carga axial cíclica de compresión, este eje se diseñará a fatiga y experimentará una carga axial que va de 0 N a 6280 N/2 ya que la fuerza total se reparte entre los dos ejes en igual medida, no existen concentradores de esfuerzo y por ende la sensibilidad de la muesca es igual a 1, el límite elástico de la barra es de $S_y=207$ Mpa y la resistencia última a la tracción $SUT= 379$ Mpa como se muestra en el anexo A

Para este análisis el límite de fatiga se calcula con la siguiente fórmula:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e' \quad (8)$$

Donde:

S_e : Límite de fatiga [MPa]

K_a : Factor de Superficie [adimensional]

K_b : Factor de Tamaño [adimensional]

K_c : Factor de modificación de carga [adimensional]

K_d : Factor de Temperatura [adimensional]

K_e : Factor de Confiabilidad [adimensional]

K_f : Factor de efectos Varios [adimensional]

S_e' : Limite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria [MPa]

Factor de Superficie $k_a = 0,935$ Maquinado o laminado en frio ver Anexo B

Factor de Tamaño $k_b = 1$ (Carga axial no hay efecto de tamaño) ver Anexo C

Factor de modificación de carga $k_c = 0.85$ debido que está sometido a carga axial.

Factor de Temperatura $k_d = 1$ a condiciones normales ver Anexo D

Factor de Confiabilidad $k_e = 0,814$ para 99% de confiabilidad ver Anexo E

El factor de efectos Varios k_f se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$k_f = q(k_t - 1) + 1 \quad (9)$$

Donde:

K_f : Factor de efectos varios

q : Sensibilidad a la muestra

K_t : Factor de concentración de esfuerzos

Debido a que no existen concentradores de esfuerzos el valor de $K_f=1$

$$k_f = 1(1 - 1) + 1$$

$$k_f = 1$$

Para S_e' a carga axial se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S_e' = 0,45 * S_{ut} \quad (10)$$

Donde:

S_e' : Limite de resistencia a la fatiga en barra circular [MPa]

S_{ut} : Resistencia última a la tensión [MPa]

Reemplazando los valores tenemos que es igual a:

$$S_e' = 0,45 * 379 = 170.55 \text{ MPa}$$

Con los resultados anteriores calculados reemplazamos en la fórmula (8) y tenemos:

$$S_e = 0,935 * 1 * 0,85 * 1 * 0,814 * 1 * 170,55$$

$$S_e = 110,33 \text{ MPa}$$

El eje está sometido a esfuerzos axiales repetidos como se muestra en la figura 20-3:

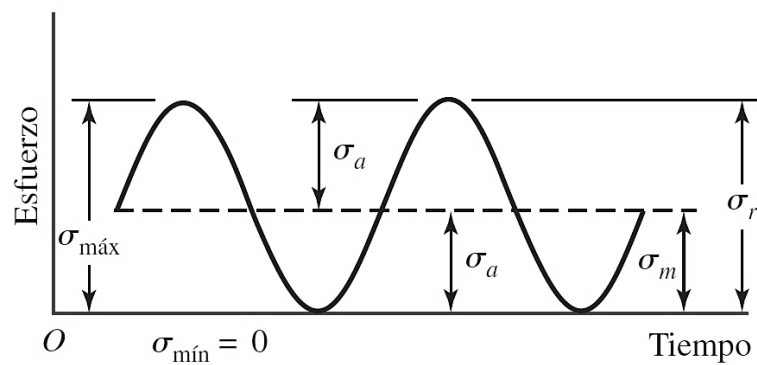


Figura 20-3. Esfuerzos repetidos

Fuente: Budynas, R.; Nisbett, J. 2008

El esfuerzo máximo se calcula a partir de la ecuación:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A} \quad (11)$$

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (12)$$

El esfuerzo medio y el esfuerzo máximo se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (13)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (14)$$

Donde:

F: Fuerza axial máxima [N]

A: Área circular del eje [mm²]

d: diámetro del eje [mm]

σ_a : Esfuerzo amplitud [MPa]

σ_m : Esfuerzo medio [MPa]

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo [MPa]

$\sigma_{m\acute{i}n}$: Esfuerzo mínimo [MPa]

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3140}{\frac{\pi * d^2}{4}}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3997.97}{d^2}$$

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\frac{3997.97}{d^2} - 0}{2}$$

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{3997.97}{2 * d^2}$$

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{1998.98}{d^2}$$

Para calcular el diámetro mínimo requerido con un coeficiente de seguridad de 4, utilizamos el criterio de Soderberg el cual tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (15)$$

Donde:

S_e : Límite de resistencia a la fatiga [Mpa]

S_y : Límite elástico [Mpa]

n : Coeficiente de seguridad [adimensional]

σ_a : Esfuerzo amplitud [Mpa]

σ_m : Esfuerzo medio [Mpa]

$$\frac{1998.98}{d^2} + \frac{1998.98}{207} = \frac{1}{4}$$

$$d = 10.54 \text{ mm}$$

Con este resultado tenemos que cualquier diámetro mayor asegurar suficiente resistencia del eje y vida infinita con un coeficiente de seguridad superior a 4. Para nuestra máquina seleccionamos un eje de 25mm

3.3.2. Diseño del sujetador de ejes

Este elemento se analizará como una viga, ya que por su geometría estará sometido a esfuerzos cíclicos de flexión iguales a los de la figura 22-3. El elemento es el que se muestra a continuación en la figura 21-3.

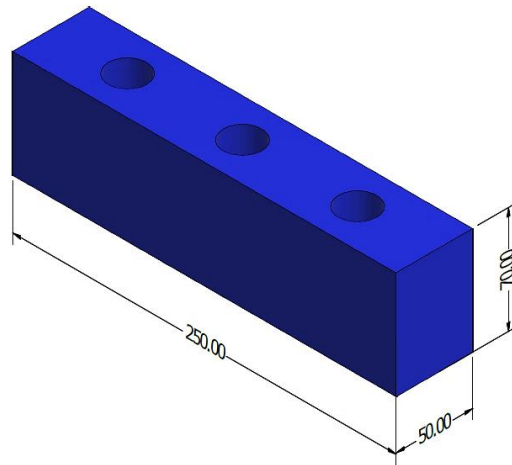


Figura 21-3. Sujetador de ejes

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

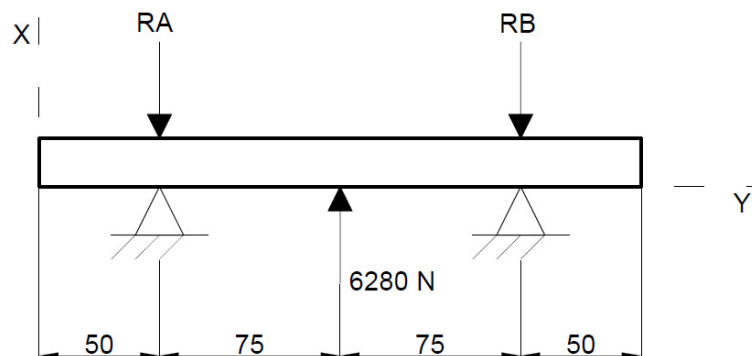


Figura 22-3. Fuerzas en el sujetador de ejes

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Para este elemento se analizará el momento máximo provocado por la fuerza impartida por el cilindro, el acero A36 tiene un límite elástico de 250Mpa y una resistencia última a la tracción de Mpa. El elemento está hecho de tubo rectangular 80x40x2 y sus características geométricas entre ellas la inercia igual a 373200 mm⁴ se encuentra descritas en el anexo F, por lo cual el análisis a fatiga nos dará como resultado el coeficiente de seguridad.

Primero calculamos el momento flector máximo que actúa sobre el elemento el cual se encuentra en el punto de carga como se muestra en el anexo G con la siguiente expresión:

$$M_{\text{máx}} = \frac{F * x}{2} \quad (16)$$

Donde:

F: Fuerza [N]

x: Posición de la carga [mm]

$M_{m\acute{a}x}$: Momento flector máximo producido en el elemento [N.mm]

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{6280 * 75}{2}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 235500 \text{ N. mm}$$

El esfuerzo de flexión máximo lo calculamos con la expresión:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x} * c}{I} \quad (17)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo de flexión máximo [N/mm²]

c: Posición del eje neutro (altura/2) [mm]

I: Inercia del elemento [mm⁴]

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{235500 * 40}{373200}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 25.24 \text{ MPa}$$

Para este análisis el límite de fatiga se calcula con la fórmula 10:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

Donde:

S_e : Límite de fatiga [MPa]

K_a : Factor de Superficie

K_b : Factor de Tamaño

K_c : Factor de modificación de carga

K_d : Factor de Temperatura

K_e : Factor de Confiabilidad

K_f : Factor de efectos Varios

S_e' : Limite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

Factor de Superficie $k_a = 0,935$ Maquinado o laminado en frio ver Anexo B

Factor de Tamaño $k_b = 0.825$ (Piezas rectangulares) ver Anexo C

Factor de modificación de carga $k_c = 1$ debido que está sometido a flexión.

Factor de Temperatura $k_d = 1$ a condiciones normales ver Anexo D

Factor de Confiabilidad $k_e = 0,814$ para 99% de confiabilidad ver Anexo E

El factor de efectos Varios k_f se obtiene mediante la fórmula 9:

$$k_f = q(k_t - 1) + 1$$

Donde:

K_f : Factor de efectos varios

q : Sensibilidad a la muestra

K_t : Factor de concentración de esfuerzos

Debido a que no existen concentradores de esfuerzos el valor de $K_f=1$

$$k_f = 1(1 - 1) + 1$$

$$k_f = 1$$

Para S_e' a flexión se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S_e' = 0,5 * S_{ut} \quad (18)$$

Donde:

S_e' : Limite de resistencia a la fatiga en barra circular [MPa]

S_{ut} : Resistencia última a la tensión [MPa]

Reemplazando los valores tenemos que es igual a:

$$S_e' = 0,5 * 400 = 200 \text{ MPa}$$

Con los resultados anteriores calculados reemplazamos en la fórmula (8) y tenemos:

$$S_e = 0,935 * 0,825 * 1 * 1 * 0,814 * 1 * 200$$

$$S_e = 125,58 \text{ MPa}$$

El esfuerzo medio y el esfuerzo máximo se calculan a partir de las siguientes ecuaciones 13 y 14:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2}$$

Donde:

F : Fuerza axial máxima [N]

A: Área circular del eje [mm²]

d: diámetro del eje [mm]

σ_a : Esfuerzo amplitud [MPa]

σ_m : Esfuerzo medio [MPa]

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo [MPa]

$\sigma_{m\acute{i}n}$: Esfuerzo mínimo [MPa]

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{25.24 - 0}{2}$$

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{25.24}{2}$$

$$\sigma_m = \sigma_a = 12.62 \text{ MPa}$$

Para calcular el coeficiente de seguridad, utilizamos el criterio de Soderberg con la ecuación 15:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

Donde:

S_e : Límite de resistencia a la fatiga [Mpa]

S_y : Límite elástico [Mpa]

n: Coeficiente de seguridad [adimensional]

σ_a : Esfuerzo amplitud [Mpa]

σ_m : Esfuerzo medio [Mpa]

$$\frac{12.62}{125.58} + \frac{12.62}{250} = \frac{1}{n}$$

$$n = 6.62$$

Nuestro factor de seguridad es mucho mayor que 1 por lo tanto está apto para soportar infinitos ciclos de carga de la máquina.

3.3.3. Dimensionamiento del eje de sujeción de las mordazas

La mordaza tiene la forma que se muestra en la figura 23-3 en donde podemos apreciar el eje de sujeción de las mordazas el cual debemos dimensionar ya que está sometido a esfuerzos cíclicos de tracción.

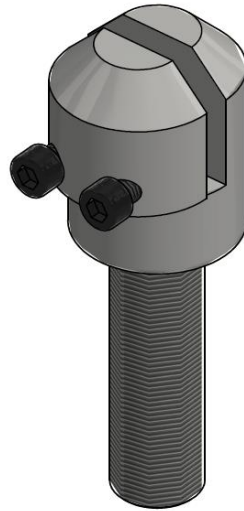


Figura 23-3. Mordaza

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Este elemento se fabricará en acero de transmisión AISI 1020 el cual está sometido a carga axial cíclica de tracción, este eje se diseñará a fatiga y experimentará una carga axial que va de 0 N a 6280 N, el límite elástico de la barra es de $S_y=207$ Mpa y la resistencia última a la tracción $S_{UT}=379$ Mpa como se muestra en el anexo A

Para este análisis el límite de fatiga se calcula con la siguiente fórmula 8:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e'$$

Factor de Superficie $k_a = 0,935$ Maquinado o laminado en frio ver Anexo B

Factor de Tamaño $k_b = 1$ (Carga axial no hay efecto de tamaño) ver Anexo C

Factor de modificación de carga $k_c = 0.85$ debido que está sometido a carga axial.

Factor de Temperatura $k_d = 1$ a condiciones normales ver Anexo D

Factor de Confiabilidad $k_e = 0,814$ para 99% de confiabilidad ver Anexo E

Factor de concentración de esfuerzos $k_t = 2,6$ ver anexo H.

Sensibilidad $q = 0,8$ ver anexo I

El factor de efectos Varios k_f se obtiene mediante la fórmula 9:

$$k_f = 0.8(2.6 - 1) + 1$$

$$K_f = 2.28$$

Para S_e' a carga axial se calcula mediante la fórmula 10:

$$S_e' = 0,45 * S_{ut}$$

$$S_e' = 0,45 * 379 = 170.55 \text{ MPa}$$

Con los resultados anteriores calculados reemplazamos en la fórmula (8) y tenemos:

$$S_e = 0,935 * 1 * 0,85 * 1 * 0,814 * 170,55$$

$$S_e = 110.33 \text{ MPa}$$

El eje está sometido a esfuerzos axiales repetidos como se muestra en la figura 20-3:

El esfuerzo máximo se calcula a partir reemplazando la ecuación 12 en 11:

El esfuerzo medio y el esfuerzo máximo se calculan a partir de las siguientes ecuaciones 13 y 14:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{6280}{\frac{\pi * d^2}{4}}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{7995.94}{d^2}$$

$$\sigma_a = \frac{\frac{7995.94}{d^2} - 0}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{7995.94}{2 * d^2}$$

$$\sigma_m = \frac{3997.97}{d^2}$$

$$\sigma_a = \frac{3997.97}{d^2} * K_f$$

$$\sigma_a = \frac{3997.97}{d^2} * 2.28$$

$$\sigma_a = \frac{9115.3716}{d^2}$$

Para calcular el diámetro mínimo requerido con un coeficiente de seguridad de 4, utilizamos el criterio de Soderberg con la ecuación 15:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{\frac{9115.3716}{d^2}}{110.33} + \frac{\frac{3997.97}{d^2}}{207} = \frac{1}{4}$$

$$d = 20.2 \text{ mm}$$

El eje de la mordaza requiere un diámetro mínimo de 20,2 mm, pero al tener la cabeza de la mordaza un diámetro de 60 mm para poder sujetar las probetas el concentrador de esfuerzos sería muy alto por lo tanto hemos seleccionado un diámetro estándar más alto de 32 mm.

3.3.4. Análisis de resistencia de los pernos prisioneros de las mordazas

Los pernos soportarán una carga de 6280N, y debido a la forma que están colocados serán analizados a corte para determinar su coeficiente de seguridad, el espacio entre los pernos es de 30mm, se utilizaron pernos prisioneros M10x1,5 grado 4.6 con límite de fluencia $S_y=240\text{Mpa}$, $S_{ut}=400$ y resistencia de prueba $S_p=225\text{Mpa}$ como consta en el Anexo J. En la figura 24-3 podemos apreciar el diagrama de fuerzas que actúan sobre los pernos de sujeción:

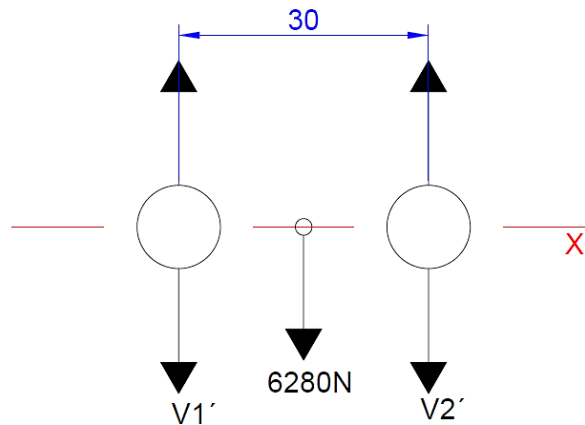


Figura 24-3. Diagrama de fuerzas actuantes sobre los pernos

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

La fuerza V_1' es igual a la fuerza V_2' y V_i' se calcula con la siguiente expresión

$$V_i' = \frac{P}{N} \quad (19)$$

Dónde:

V_i' : Fuerza de corte primario que actúa sobre cada perno [N]

P: Fuerza que actúa sobre la junta [N]

N: Número de pernos [adimensional]

$$V_i' = \frac{P}{N}$$

$$V_i' = \frac{6280}{2}$$

$$V_i' = 3140\text{ N}$$

El esfuerzo de corte varía de la misma forma que en lo mostrado en la figura 20-3 para el esfuerzo axial, el valor máximo de corte corresponde al valor de V_i' y el valor de corte mínimo será de 0

por lo tanto, nuestro esfuerzo amplitud de corte será del mismo valor que el esfuerzo medio. El esfuerzo medio y de amplitud se calcula con la siguiente expresión:

$$\tau_m = \tau_a = 115 * n * \frac{V_{m\acute{a}x} + V_{m\acute{i}n}}{2 A_t} \quad (20)$$

Dónde:

τ_m : Esfuerzo medio de corte [MPa]

τ_a : Esfuerzo amplitud de corte [MPa]

n: Coeficiente de seguridad [adimensional]

$V_{m\acute{a}x}$: Fuerza de corte máxima [N]

$V_{m\acute{i}n}$: Fuerza de corte mínima [N]

A_t : Área de tracción del perno, ver Anexo K [mm²]

$$\tau_m = \tau_a = 1.15 * n * \frac{3140 + 0}{2 \cdot 58}$$

$$\tau_m = \tau_a = 31.13 * n$$

Para el límite de resistencia a fatiga asumimos un K global de 0,6 y lo calculamos con las siguientes expresiones:

$$Se' = 0.29 * Sut \quad (21)$$

$$Se = K * Se' \quad (22)$$

Dónde:

Se' : Límite de resistencia a la fatiga [Mpa]

Se : Límite de resistencia a la fatiga corregido [Mpa]

K: Factor de corrección [adimensional]

Sut: Límite de resistencia a la tracción del material [Mpa]

$$Se' = 0.29 * 400$$

$$Se' = 116 \text{ MPa}$$

$$Se = 0.6 * 116$$

$$Se = 69.6 \text{ Mpa}$$

Para el criterio de fallo por fatiga tenemos las siguientes expresiones:

$$S_{sy} = \frac{S_y}{2} \quad (23)$$

$$\tau_a = \frac{S_e'}{n} \quad (24)$$

$$\tau_a + \tau_m = \frac{S_{sy}}{n} \quad (25)$$

Dónde:

τ_m : Esfuerzo medio de corte [MPa]

τ_a : Esfuerzo amplitud de corte [MPa]

n: coeficiente de seguridad [adimensional]

S_{sy} : Esfuerzo admisible de corte [MPa]

S_y : Límite elástico [Mpa]

S_e' : Límite de resistencia a la fatiga [Mpa]

$$S_{sy} = \frac{240}{2}$$

$$S_{sy} = 120 \text{ Mpa}$$

$$31.13 * n = \frac{116}{n}$$

$$n = 1.93$$

$$\tau_a + \tau_m = \frac{S_{sy}}{n}$$

$$31.13 * n + 31.13 * n = \frac{120}{n}$$

$$n = 1.38$$

Por lo tanto, nuestro factor de seguridad es el valor menor de n es cual es de 1,38

3.3.5. *Análisis de la estructura principal*

Nuestra estructura principal o base de la máquina ha sido diseñada con tubos rectangulares 80x40x2, esto debido a que en este tubo es posible realizar los agujeros guía tanto para las mordazas que tienen un diámetro de eje igual a 32mm como para los ejes de la estructura móvil. A continuación, en la figura 25-3 podemos observar la geometría de la estructura principal.

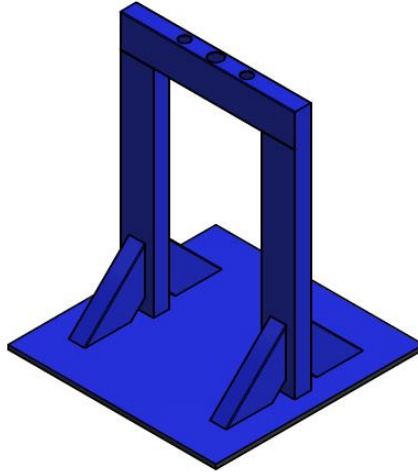


Figura 25-3. Estructura principal de la máquina

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Para el análisis de la estructura utilizaremos el software “SAP 2000”, para lo cual es necesario establecer los parámetros necesarios para el estudio, en la tabla 24-3 podemos encontrar los parámetros a considerar:

Tabla 24-3. Parámetros para el análisis de la estructura

Descripción	Detalle
Material	ASTM A-36
Perfil estructural rectangular	80x40x2
Patrones de carga	Muerta (D): Peso de la estructura Viva (L): Carga de 6280N
Combinaciones de carga	Combo 1: 1,4D Combo 2: 1,2D+1,6L
Código de diseño	AISC 360-10
	NEC-SE-CG
Método	LRFD
Tipo de estructura	OMF
Tipo de apoyos	Fijos
Puntos de apoyos	A, B, C, D, E, F

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

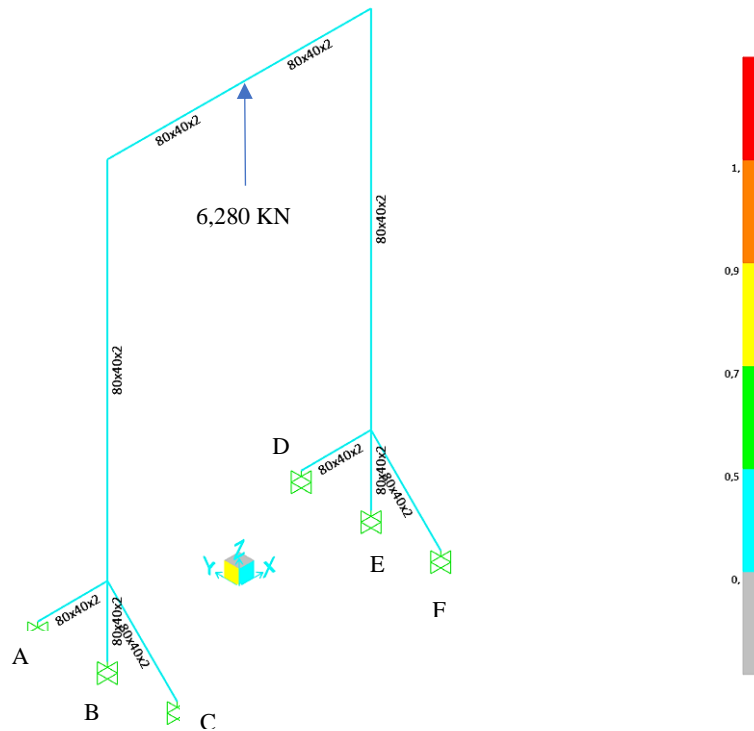


Figura 26-3. Resultados del análisis en SAP 2000
 Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

En la figura 26-3 podemos observar la relación demanda capacidad y cómo podemos apreciar los valores no sobrepasan la unidad por lo cual, la estructura cumple su función tanto a nivel de materiales y elementos estructurales. Para el análisis se asignó una carga vertical hacia arriba de 6280 N la cual sería la que impartiría el cilindro a la estructura a través de la mordaza inferior.

3.3.5.1. Análisis de la estructura principal a fatiga

Nuestra estructura principal o base de la máquina ha sido analizada mediante el software SolidWorks, se realizó un estudio a fatiga con las propiedades que se detallan en la tabla 25-3.

Tabla 25-3. Propiedad del estudio a fatiga.

Nombre de estudio	Fatiga 1
Tipo de análisis	Fatiga (Amplitud constante)
Interacción entre sucesos	Aleatoria
Calcular tensiones alternas usando	Intensidad de tensión (P1-P3)
Cara de elemento SHELL	Cara superior
Corrección de la tensión media	Ninguno
Factor de reducción de resistencia a la fatiga	1
Vida infinita	Activar

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Los resultados del estudio se pueden observar en la figura 28-3 y la tabla 27-3, en donde podemos apreciar que la frecuencia más baja a la cual el elemento podría sufrir de vibraciones a causa de resonancia sería 306Hz, por lo cual se descartan vibraciones que afecten la máquina ya que el valor máximo al cual trabaja la máquina es de 1Hz.

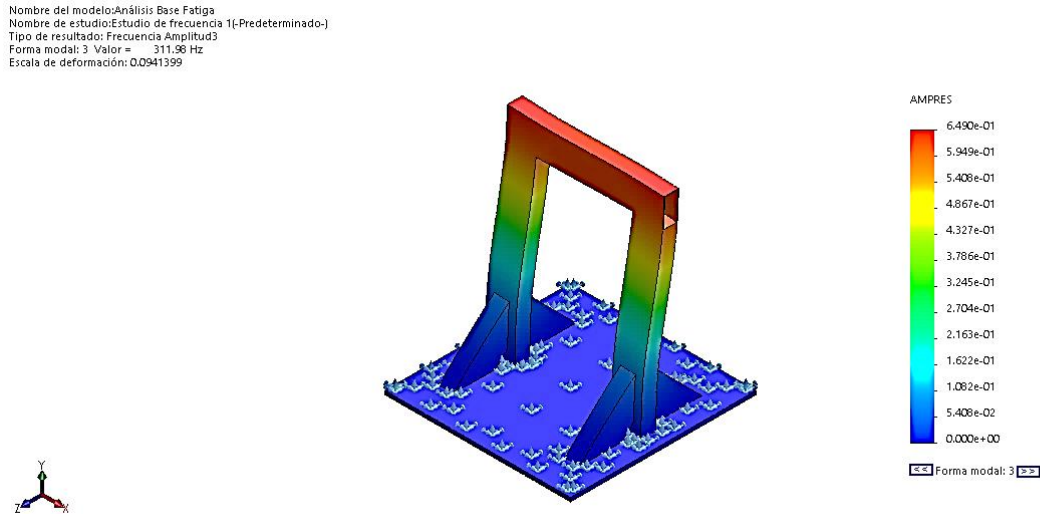


Figura 28-3. Estudio de frecuencias

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 27-3. Resultados del estudio de frecuencias.

Nombre	Tipo	Valor (Hz)
Amplitud 1	Amplitud resultante Modal 1	1068.68
Amplitud 2	Amplitud resultante Modal 2	306.563
Amplitud 3	Amplitud resultante Modal 3	311.983
Amplitud 4	Amplitud resultante Modal 4	493.387
Amplitud 5	Amplitud resultante Modal 5	1068.58

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020


3.4. Selección de elementos eléctricos y electrónicos

3.4.1. Elementos eléctricos

3.4.1.1. Fusible cilíndrico

Implementaremos este elemento para proteger el circuito eléctrico, con las especificaciones indicadas en la tabla 28-3

Tabla 28-3. Especificaciones del fusible y base.

	Modelo : Gg 10x38x32 Marca : DF Electric
Especificaciones	
Voltaje nominal	400V
Corriente nominal	32A
Tipo de fusible	RT 14-20

Fuente: DF Electric, 2020

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.4.1.2. Relé

Este módulo nos permite accionar la electroválvula, este módulo es de 5V ya que es el voltaje al cual el Arduino emite la señal y su conexión con el mismo es directa.




Figura 29-3. Relé de 5V

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.4.1.3. Paro de emergencia

Este elemento se implementa como medida de seguridad, ante cualquier accidente o mal funcionamiento de la máquina que pudiese comprometer la integridad de esta en la tabla 29-3 se encuentran descritas las especificaciones técnicas del pulsador.

Tabla 29-3. Especificaciones del pulsador

	<p>Modelo : ES-XN4E-BLA412MFRH Marca : ES-XN</p>
Especificaciones	
Grado de protección	IP20
Diámetro	44 mm
Tipo de conexión	Roscada
Número de contactos de apertura positiva	2
Tipo de montaje	IE 947-5-1 D30
Corriente térmica de referencia I _{th}	1 ^a
Corriente de activación	mín a 24V – 10 mA
Tensión de aislamiento de referencia	250V


Fuente: ES-XN, 2020

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.4.1.4. Luz piloto

Esta luz nos permite comprobar la alimentación eléctrica de la máquina, con esta luz podremos verificar el encendido.

Tabla 30-3. Especificaciones técnicas de la luz piloto verde

	<p>Modelo : 763-7921 Marca : RS PRO</p>
Especificaciones	
Diámetro Exterior	22 mm
Rango de temperatura	-25C° - +55 C°
Grado IP	IP65
Frecuencia AC	50-60 Hz
Forma del led	Circular
Rango de Voltaje	+- 20% Voltaje nominal

Fuente: RS PRO, 2020

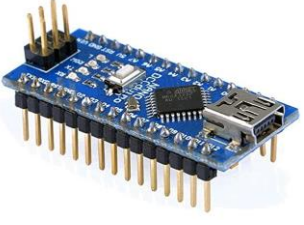
Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.4.2. Elementos electrónicos

3.4.2.1. Arduino Nano

Este elemento se encargará del control de la máquina a través de su conexión con el software LabVIEW, el cual mediante programación gráfica visual será capaz de controlar el movimiento del cilindro, la frecuencia del movimiento, monitorear la posición del cilindro por medio de sensores infrarrojos para saber cuándo detener el ensayo y por último monitorear a través del sensor LM35 la temperatura de la probeta.

Tabla 31-3. Especificaciones de Arduino

	Modelo : Arduino Nano
Especificaciones	
Microcontrolador	ATmega328
Arquitectura	AVR
Voltaje de Operación	5V
Memoria Flash	32 KB de los cuales 2 KB utilizados por el gestor de arranque
SRAM	2 KB
Velocidad del reloj	16 MHz
Pines analógicos	8
EEPROM	1KB
Corriente directa por Pines I/O	40 mA
Voltaje de alimentación	7-12V
Pines Digitales I/O	22 (6 de los cuales son PWM)
Salida PWM	6
Consumo de poder	19 mA
Tamaño PCB	18x45 mm
Peso	7g
Código del producto	A000005


Fuente: Arduino, 2020

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.4.2.2. Sensores Infrarrojos de presencia

Estos sensores los ocuparemos para medir el desplazamiento del cilindro el cual nos permitirá determinar la finalización del ensayo, ya que cuando la máquina se encuentre en funcionamiento ensayando cualquier material la resistencia de este impedirá que el cilindro se desplace la misma distancia que cuando se encuentra en vacío.

Tabla 32-3. Especificaciones del sensor infrarrojo


 <p>Vcc — 5V GND — GND OUT — D9</p>	Modelo : IR-FC-51
Especificaciones	
Ángulo de cobertura	35°
Voltaje de funcionamiento	3V – 6V
Rango de detección	2cm – 30cm
PCB tamaño	3.1cm x 1.4cm
Dimensión total	4.5cm x 1.4cm x 0.7cm
Consumo actual	en 5V: 43mA aproximadamente

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.4.2.3. Sensor LM35

Este elemento nos permitirá monitorear la temperatura de la probeta ya que debemos procurar que la temperatura de la probeta no exceda los 10°C durante el ensayo.

Tabla 33-3. Especificaciones del sensor LM35

	Modelo : LM35 Marca : OEM
Especificaciones	
Exactitud	+/- 0,5 °C
Bajo autocalentamiento	0,08 °C
Salida Lineal	10 mV/°C
Voltaje de operación	4V – 30V
Consumo de corriente	60uA típico
Baja impedancia de salida	0,1 ohm
Temperatura de operación	0 °C – 100 °C
Encapsulado	TO-92

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.5. Funcionamiento del Circuito eléctrico

El circuito eléctrico funciona de la siguiente manera: Se tiene un paro de emergencia que está normalmente cerrado, es decir, normalmente conduce la corriente y cuando se presiona deja de conducir. La corriente circula a través del paro de emergencia y tiene dos caminos. Un camino es por la rama que tiene a la luz piloto, que al pasar por ahí la enciende. El otro camino es el del contacto del relé y la bobina de electroválvula. Cuando el contacto K1 se cierra (lo que es controlado por la señal CONTROL, que proviene del Arduino), la bobina de la electroválvula se energiza, lo que hace que el cilindro neumático haga la carrera. Esto sucede cuando la señal de control es igual a 0V. Cuando la señal de control es igual a 5V, el contacto K1 se abre, lo que quita la energía a la bobina de la electroválvula, haciendo que el cilindro regrese. La luz piloto solo está para indicar que no hay falla de alimentación de 110V.

Por otro lado, al accionar el paro de emergencia, la corriente deja de circular por las dos ramas que están abajo, lo que hace que no haya paso de corriente y el circuito esté sin energía, lo que hace que la luz piloto esté apagada. El bloque que dice "Módulo de optoacoplador" representa una parte del módulo de relé que está en el tablero y la bobina de relé K1 representa la bobina del relé que se usa ahí, y que está asociado al contacto K1

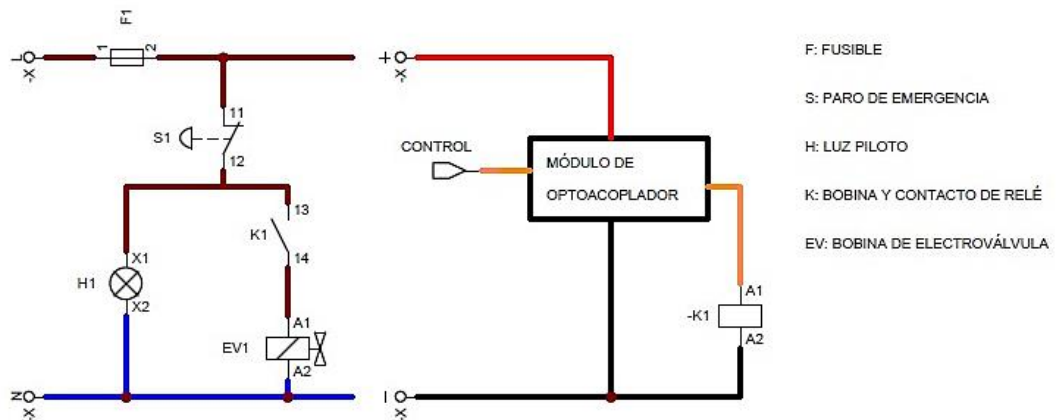


Figura 30-3. Circuito eléctrico.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.5.1. Etapa de control

Para el control del prototipo se utilizará LabVIEW mediante el cual programaremos la lógica de control del Arduino mediante el Toolkit LINX.

3.5.1.1. Adquisición de señal de los sensores

Cómo podemos observar en la figura se usan 3 pines digitales del Arduino y 1 pin analógico. Los pines digitales D12 y D11 corresponden a los sensores infrarrojos de presencia. D11 corresponde al sensor que detecta cuando el vástago del cilindro está en posición de reposo y D12 corresponde al sensor que detecta cuando el vástago del cilindro ha hecho la carrera (es decir, cuando se ha producido la fractura del material), El pin analógico que se ocupa es el A0 y se encarga de la lectura del sensor de temperatura LM35

El tercer pin digital que se usó es D10 y se usó como salida. Este pin se encarga del accionamiento del relé que controla a la electroválvula, es decir, este pin se encarga de ejecutar el avance y retroceso del vástago del cilindro mediante la interacción con el circuito eléctrico.

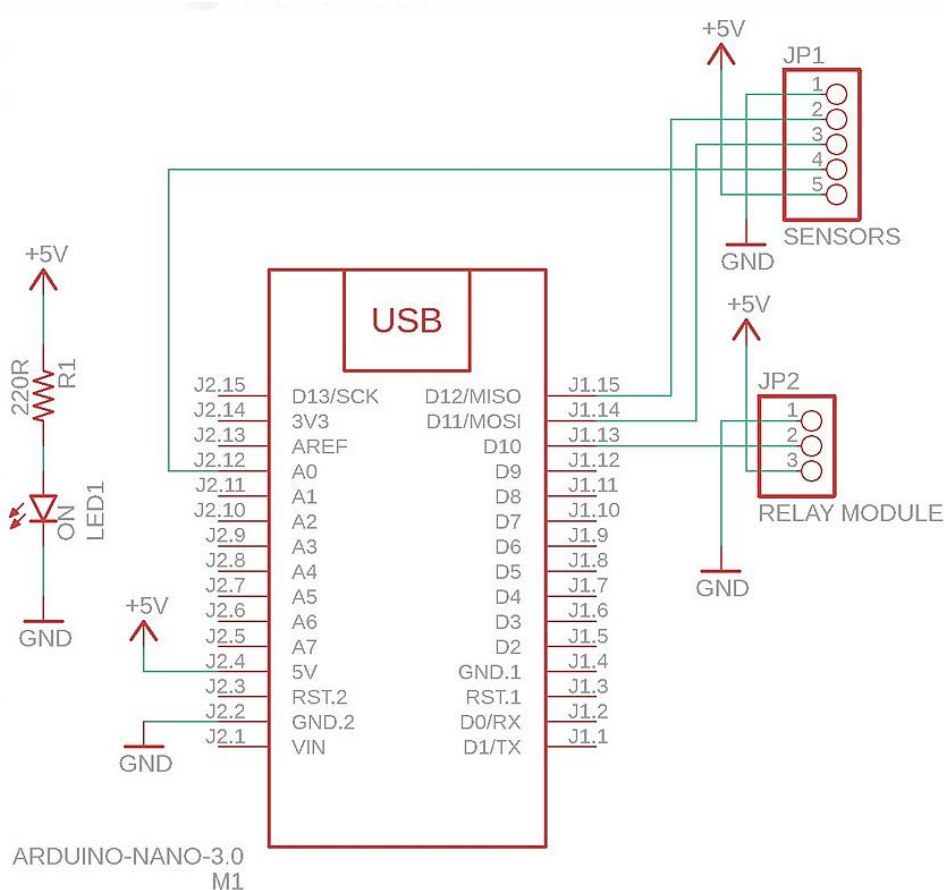


Figura 31-3. Esquema para la adquisición de señal de los sensores

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.5.2. Diseño de la placa PCB

En el diseño de la PCB se observa que es de una sola capa (es decir, la baquelita tiene las pistas de cobre solo en una de sus dos caras) y que tiene 4 orificios para acoplar el módulo de relés. También está un LED solo para indicar el encendido del Arduino con su respectiva resistencia limitadora de corriente de 220 Ohm, para que no se quemé el LED.

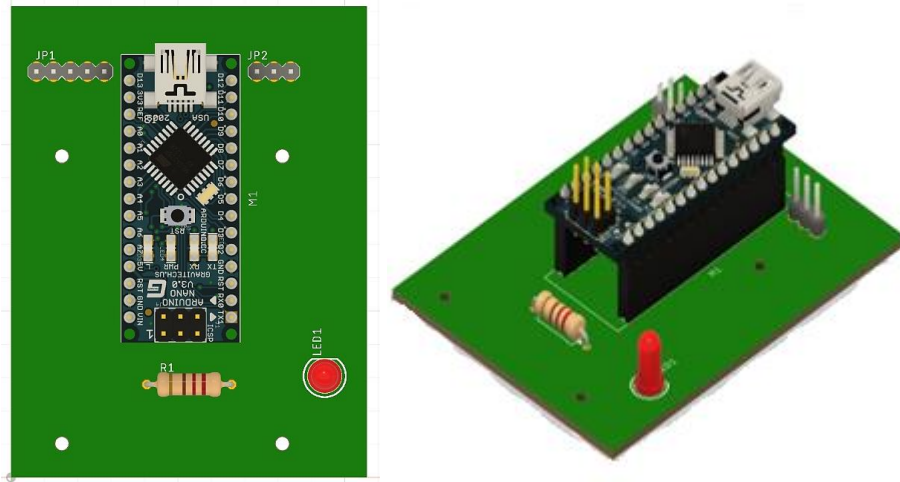


Figura 32-3. Diseño de la placa PCB

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

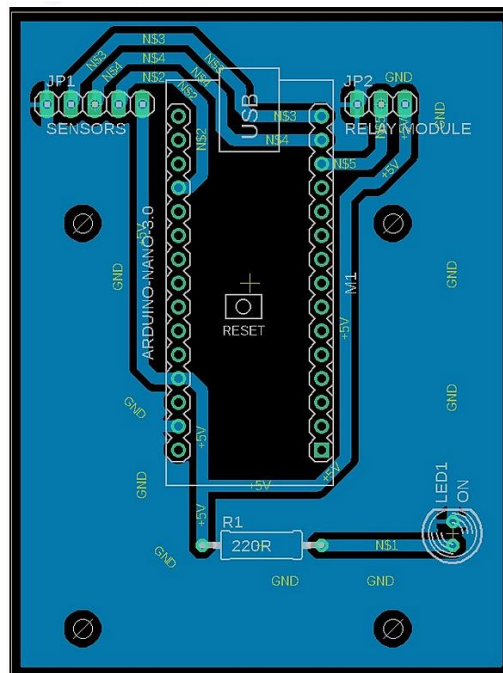


Figura 33-3. Placa PCB.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.5.3. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario

Para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario utilizamos indicadores de tiempo, fecha, gráfica de amplitud vs tiempo y monitoreo de la temperatura, por otro lado el parámetro controlable del ensayo desde la interfaz gráfica de LabVIEW es la frecuencia de cada ciclo de carga, en el programa del software ingresaremos el periodo de cada ciclo es decir, si establecemos un periodo de cuatro segundos, el cilindro impartirá la fuerza durante dos segundos y regresará a su posición inicial durante los dos segundos restantes, esto a su vez se muestra en un indicador convertido este valor del período a Hertz. Entonces sabemos cómo referencia que un periodo de un segundo equivale a 1Hz, y a medida que el periodo aumenta la frecuencia disminuye. En la figura podemos observar cómo está diseñada la interfaz gráfica en donde además en el lado derecho de la pantalla existe un texto instructivo del uso del programa que controla la máquina.

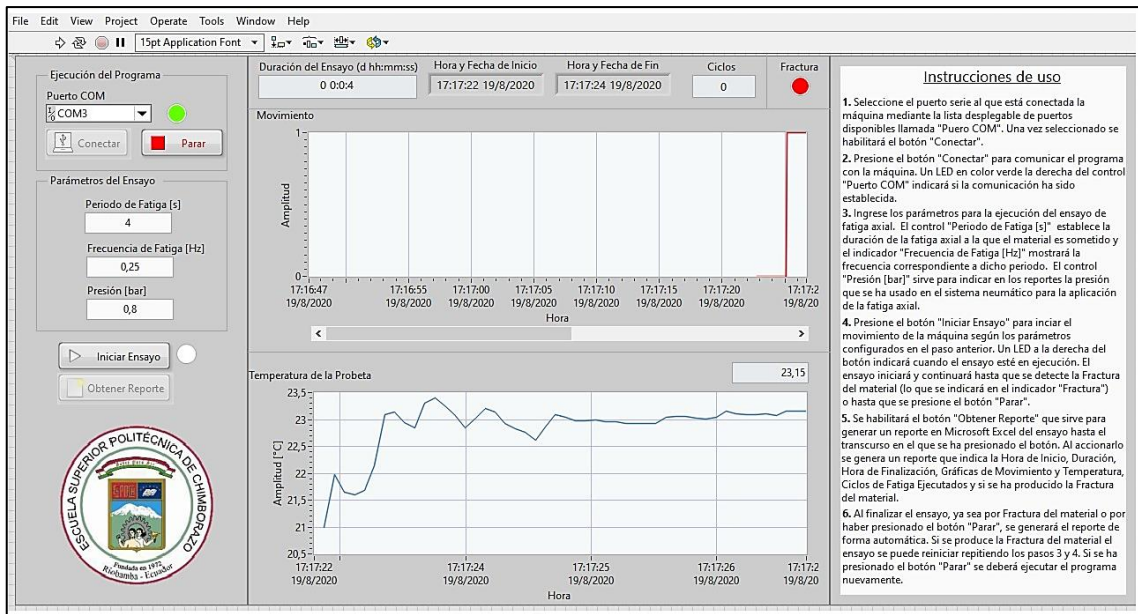


Figura 34-3. Ventana principal de la interfaz gráfica de usuario.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Desde la interfaz gráfica podemos además detener el ensayo en cualquier momento si así lo deseamos por algún inconveniente que se presente con la máquina. La fuerza de la máquina se controla manualmente a través del regulador de presión de la unidad de mantenimiento pero para iniciar el ensayo debemos introducir este valor también en el programa ya que al finalizar el ensayo el programa nos entregará una hoja Excel en donde encontraremos todos los datos concernientes al ensayo como la fuerza aplica, frecuencia del ensayo, número de ciclos antes de la fractura, monitoreo de la onda de la gráfica esfuerzo-vida y la gráfica de monitoreo de temperatura.

3.5.3.1. Control del prototipo programación gráfica

La estructura de la programación se realizó con cuatro estados que funcionan en paralelo para así reducir probabilidades de falla en el programa por saturación de funciones, el esquema que se muestra en la figura 35-3.

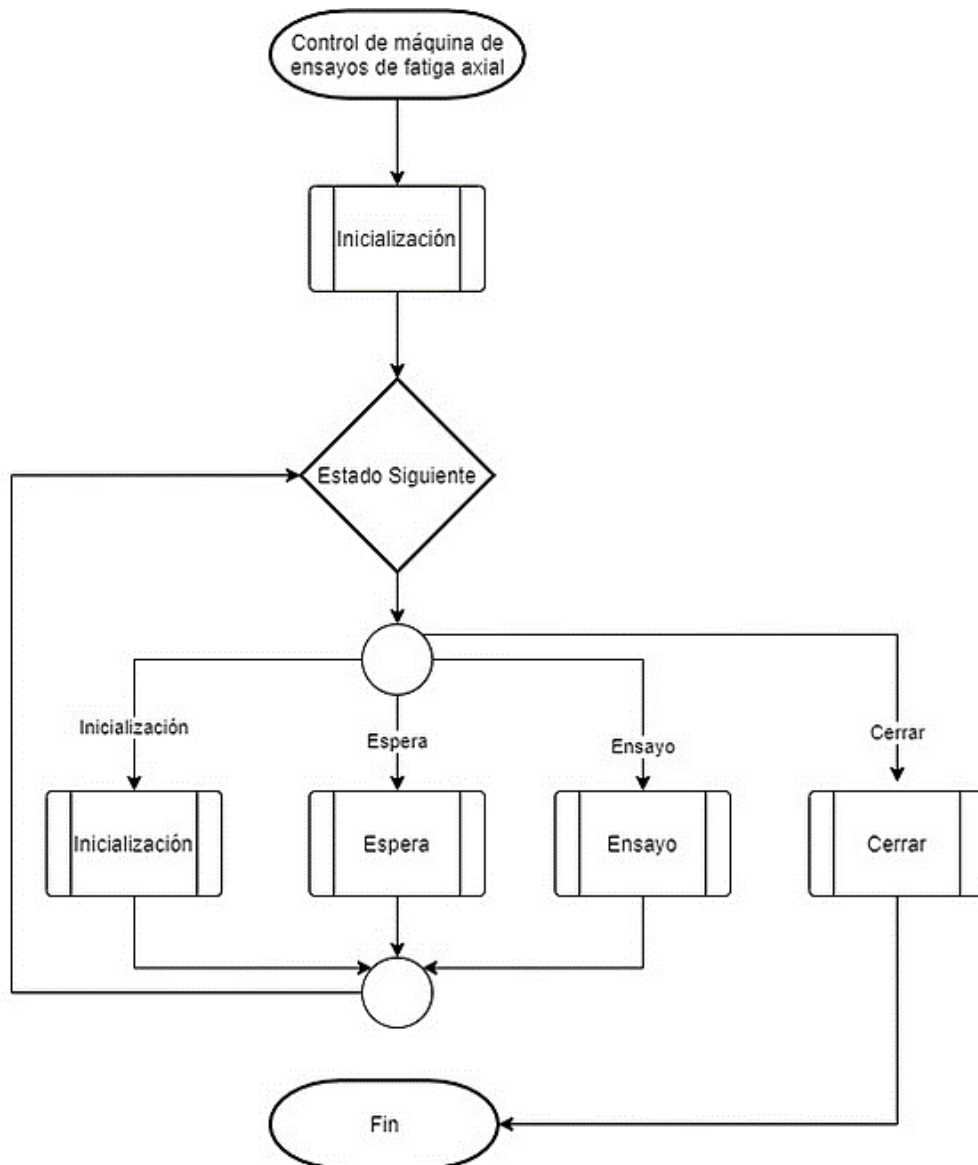


Gráfico 1-3. Estructura de la programación en LabVIEW 1

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Y cada estado también sigue un algoritmo para su correcto funcionamiento, a continuación, se muestra cada uno de ellos.

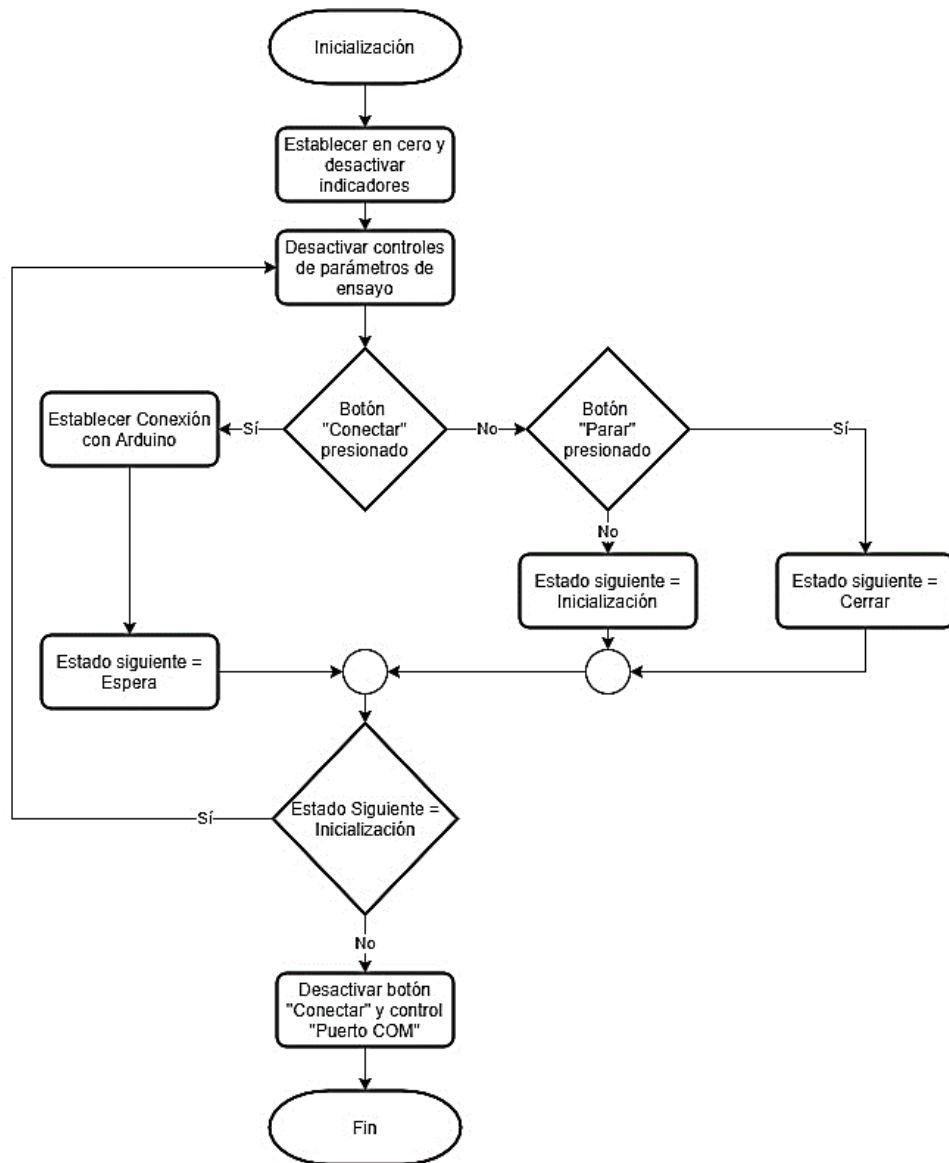


Gráfico 2-3. Esquema de programación del estado de inicialización

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

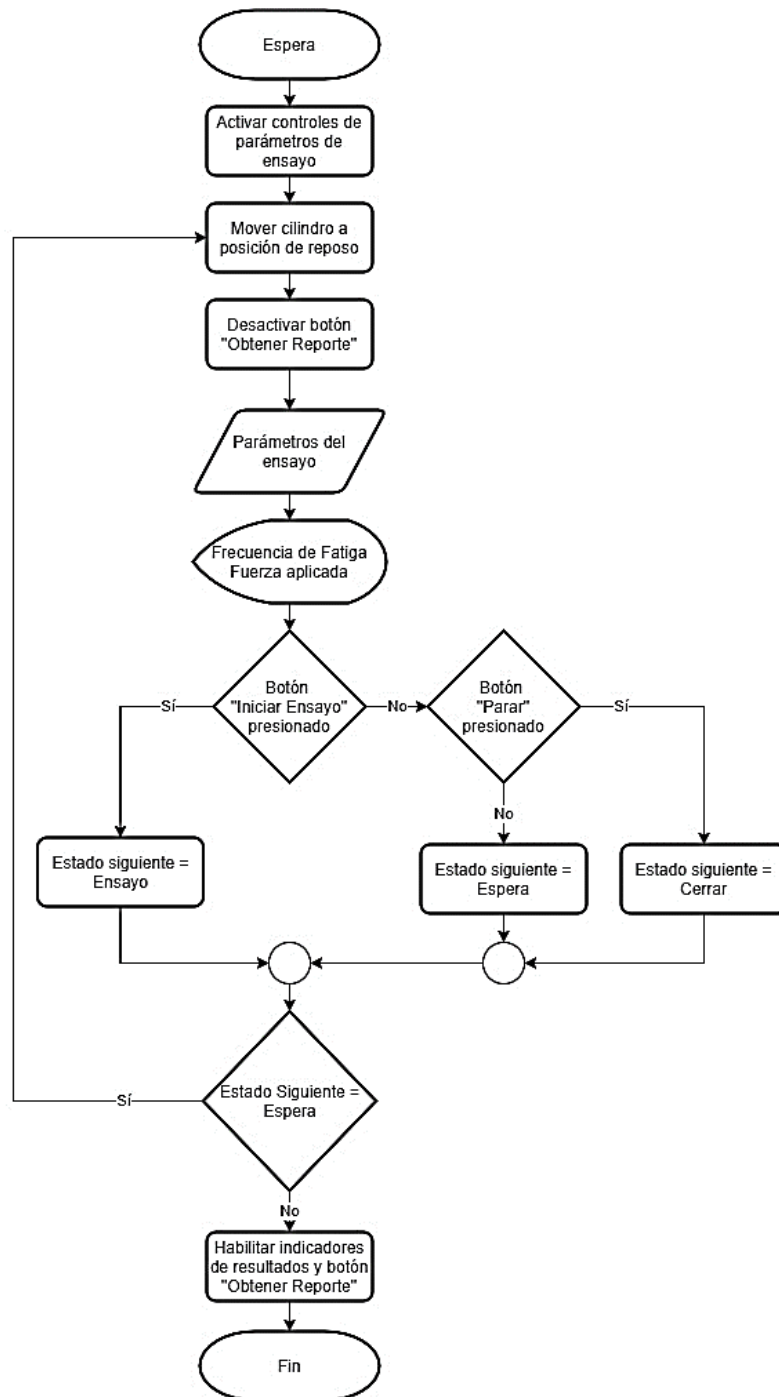


Gráfico 3-3. Esquema de programación del estado de espera

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

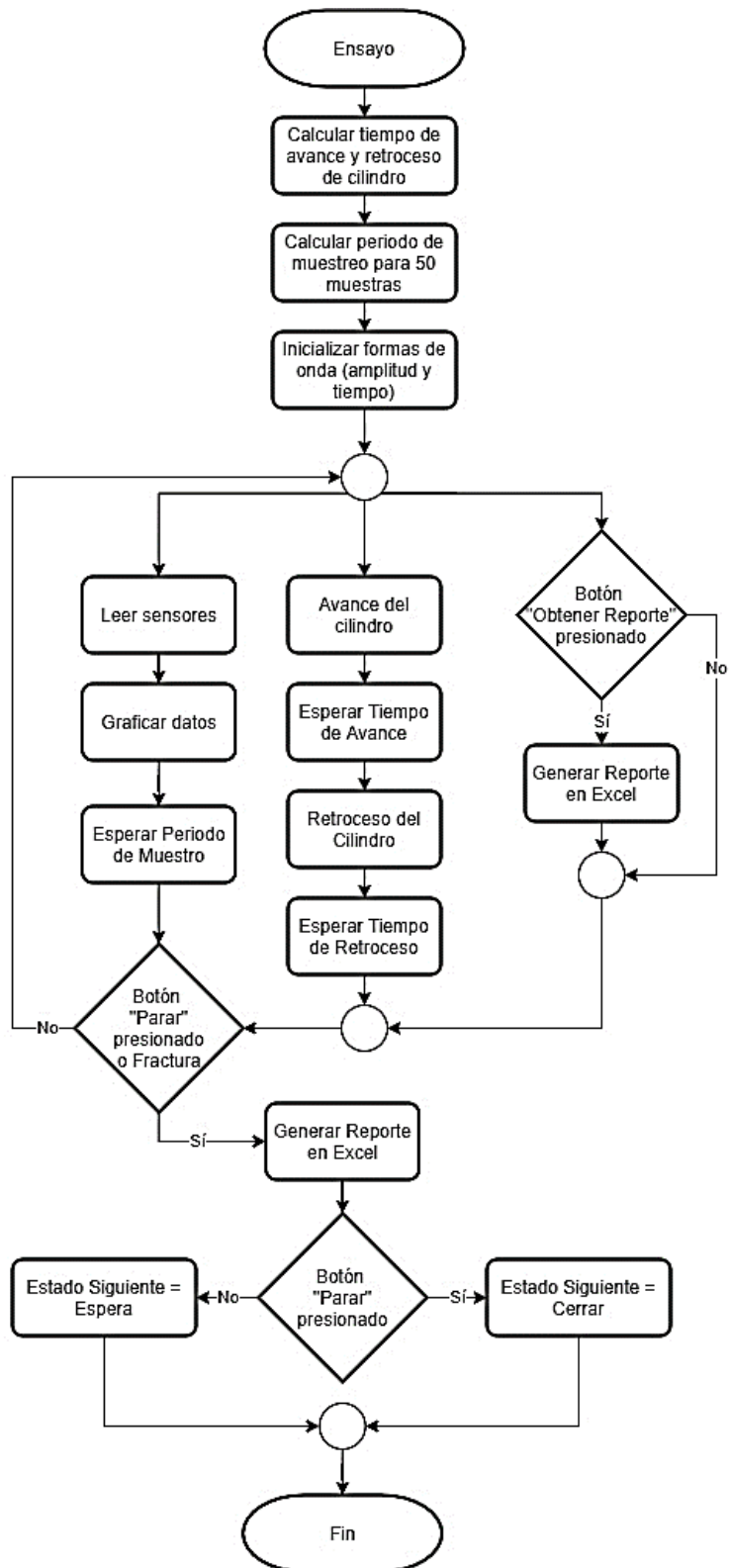


Gráfico 4-3. Esquema de programación del estado de ensayo

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

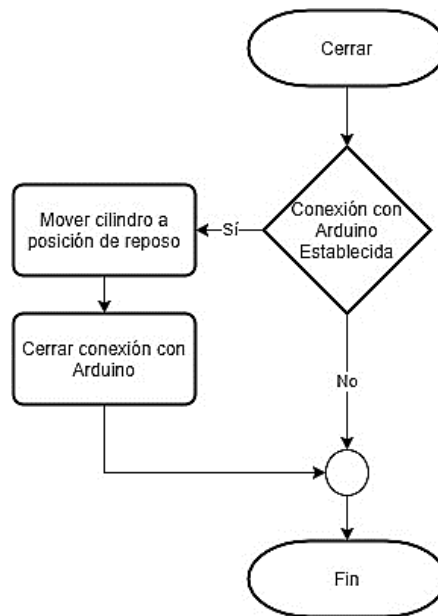


Gráfico 5-3. Esquema de programación del estado de cerrar

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.6. Construcción y Montaje

3.6.1. Método de construcción

Las siguientes máquinas descritas en la tabla 34-3 fueron utilizadas en la construcción de la máquina de ensayos a fatiga axial de polímeros.

Tabla 34-3. Máquinas utilizadas

Máquinas
Torno
Soldadora de arco eléctrico
Compresor
Sierra cortadora de metal
Taladro de banco
Prensa de Banco

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

En la tabla 35-3 se listan las herramientas en general utilizadas para la construcción de la máquina.

Tabla 35-3. Herramientas

Herramientas
Flexómetro
Prensa
Escuadra
Cuchillas de torno
Brocas
Calibrador
Nivel
Discos de corte
Amoladora
Discos de desbaste

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.6.1.1. Elementos de construcción.

A continuación, en la tabla 36-3 se listan los materiales utilizados para construir los elementos mecánicos de cada sistema de la máquina.

Tabla 36-3. Elementos de construcción


Sistema	Elemento	Cantidad	Material
Estructural	Estructura base de la máquina	1	Tubo estructural rectangular A36 80x40x2 mm
	Ejes de marco móvil	1	Acero de transmisión AISI 1020
	Sujetadores de mordazas y ejes	1	Tubo estructural rectangular 80x40x2
Sujeción de especímenes	Mordazas	1	A cero de transmisión AISI 1020

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.6.1.2. Operaciones y tiempos de construcción para el sistema estructural

Las operaciones realizadas para la máquina de ensayos a fatiga axial de polímeros y los tiempos de manufactura se detallan a continuación en la tabla 37-3.

Tabla 37-3. Operaciones y tiempos de construcción del sistema estructural


Sistema estructural			
Elemento	N.º	Operación	Tiempo (min)
Estructura base de la máquina	1	Toma de medidas de los perfiles rectangulares y placa base	60
	2	Corte del material	30
	3	Pre soldado (puntos de suelda)	60
	4	Escuadrado	30
	5	Soldado	60
	6	Taladrado de agujeros	60
	7	Pulido	120
	8	Pintado	30
Ejes de marco móvil	9	Toma de medidas	15
	10	Corte	15
	11	Fijación de la pieza en el torno	20
	12	Refrentado	20
	13	Cilindrado	20
	14	Roscado	20
	15	Comprobación de dimensiones	15
	16	Pulido	120
Sujetadores de mordaza y ejes	17	Toma de medidas de los perfiles rectangulares y placa base	60
	18	Corte del material	30
	19	Pre soldado (puntos de suelda)	40
	20	Escuadrado	30
	21	Soldado	60
	22	Taladrado de agujeros	60
	23	Pulido	120
	24	Pintado	30

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.6.1.3. Operaciones y tiempos de construcción para el sistema de sujeción.

El sistema de sujeción está constituido de las dos mordazas de sujeción de las probetas las cuales son idénticas tanto en forma como geometría, sus tiempos de construcción y operaciones de manufactura se detallan en la tabla 38-3.

Tabla 38-3. Operaciones y tiempos de construcción del sistema de sujeción


Sujeción			
Elemento	N.º	Operación	Tiempo (min)
Mordazas	25	Toma de medidas	15
	26	Corte	15
	27	Fijación de la pieza en el torno	20
	28	Refrentado	20
	29	Cilindrado	20
	30	Roscado	20
	31	Comprobación de dimensiones	15
	32	Taladrado de agujeros para pernos	30
	33	Roscado de agujero para pernos	60
	34	Pulido	120

Realizado por: Quezada, J.; Bonifaz, J. 2020

3.6.1.4. Operaciones y tiempos de montaje para el sistema neumático y de control.

El control y montaje del sistema neumático tomo el tiempo que se detalla en la tabla 39-3.

Tabla 39-3. Operaciones y tiempos de construcción del sistema neumático y de control

Sistema neumático de aplicación de carga y sistema de control			
Elemento	N.º	Operación	Tiempo (min)
Cilindro neumático	35	Armado	30
Tubería de aire	36	Armado	30
Acoples	37	Armado	40
Circuitos eléctricos y electrónicos	38	Armado y Programación	4800

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.6.2. Montaje de la máquina de ensayos a fatiga axial de polímeros

El montaje de cada uno de los elementos de detalla en la tabla 40-3, a través de esta podremos realizar el ensamblaje final de la máquina para así poder comprobar y validar su funcionamiento.

Tabla 40-3. Montaje de la máquina

Sistema	Operación	Símbolo	Tiempo (min)
Estructural	Montaje de la base	M1	30
	Montaje de los ejes de marco móvil	M2	30
	Montaje de sujetadores de mordaza y ejes.	M3	60
	Soldadura de ejes con sujetador superior	M4	60
	Ajuste de pernos	M5	15
Sujeción	Montaje de base de mordazas	M6	30
	Montaje de la prensa de mordaza	M7	15
Neumático	Montaje del cilindro neumático	M8	30
	Montaje de tuberías y acoples	M9	30
Control	Montaje del tablero de control	M10	30
	Montaje de dispositivos de control electrónicos.	M11	60
	Implementación de la programación	M12	400

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.6.2.1. Diagrama de flujo del montaje

El montaje de la máquina se observa detallado en el diagrama de flujo mostrado en la figura 40-3.

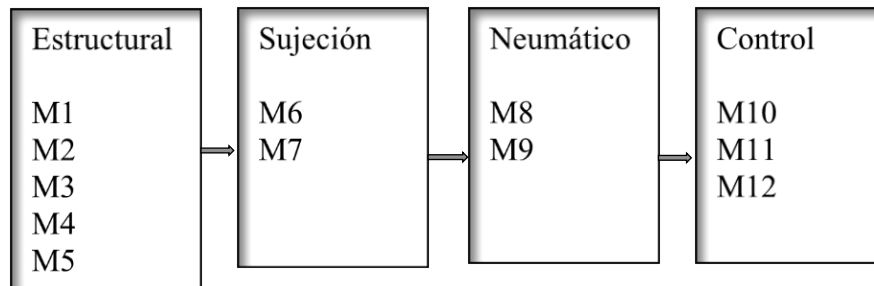


Figura 35-3. Diagrama de flujo del montaje de la máquina.

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.6.3. Tiempo total de construcción y montaje

El tiempo de construcción y montaje de la máquina de ensayos a fatiga axial para polímeros se describen en la tabla 41-3.

Tabla 41-3. Tiempo de construcción y montaje

Proceso	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Tiempo (días)
Etapa de construcción	6360	106	13.25
Etapa de montaje	790	13.17	1.65
Total	7150	119.17	15

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020


El tiempo en días está considerado como ocho horas laborables, por lo tanto, hemos terminado la construcción y montaje de la máquina en tres semanas trabajando ocho horas diarias y cinco días a la semana.

3.7. Manual de operación y

3.7.1. Manual de operación de la máquina

El manual de operaciones es un instrumento muy importante en el manejo de la máquina, ya que permitirá comunicar de una forma eficaz los procedimientos recomendados para una puesta en marcha de la máquina segura y correcta.

Tabla 42-3. Manual de operaciones

Máquina de ensayos a fatiga axial			
Características generales			
Alto	1,176 m	Fuerza Máx.	6280 N a 8 bar
Ancho	0,5 m	Voltaje	110
Largo	0,5 m	Presión máxima	10 bar
Peso	57,513 kg	Compresor	8 bar
Estructura	Tubo estructural rectangular A36	Clasificación	Semi Automática
Sistema de control	Interfaz gráfica de LabVIEW	Dimensiones máximas de probetas	Rectangular 250mmx25mmx10mm

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.7.2. Instrucciones de funcionamiento






Es importante conocer ciertos lineamientos antes de la puesta en marcha de la máquina como los que se indican a continuación:



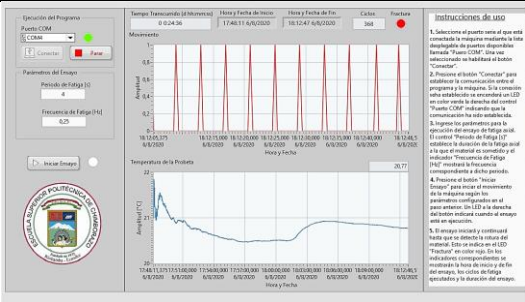


- Verificar que ninguno de los sensores infrarrojos este obstruido por algún objeto
- Verificar que el depósito de aire comprimido este completamente lleno.
- Comprobar que la superficie donde se encuentra apoyada la máquina esté completamente nivelada.

- Comprobar que al conectar la máquina a una fuente de energía la luz piloto verde se encienda.
- Verificar que todas las conexiones neumáticas estén colocadas correctamente.

Una vez finalizada la revisión se debe seguir los siguientes pasos que se detallan en la tabla 43-3 para dar inicio al funcionamiento.

Tabla 43-3. Instrucciones de funcionamiento

Funcionamiento	Ilustración
Conectar la máquina a la toma de 110 V	
Comprobar la luz piloto verde	
Desactivar el paro de emergencia	
Conectar el compresor a la toma de 110 V	
Colocar las probetas en las mordazas con la ayuda de una llave N° 8 Allen (Hexagonal)	
Establecer la presión en la válvula de regulación de la unidad de mantenimiento en función de la fuerza requerida. (Ir a la tabla -3 para conocer la fuerza en función de la presión)	

	
<p>Inicializar la interfaz de usuario en LabVIEW</p>	
<p>Seguir las instrucciones del costado derecho de la interfaz para conectar LabVIEW con el Arduino, ingresar los parámetros de ensayo e iniciar el mismo.</p>	
<p>Una vez terminado el ensayo aparecerá una hoja Excel con todos los parámetros y resultados del ensayo, la cual debemos guardarla inmediatamente para no perder la información del ensayo.</p>	
<p>Una vez terminado el ensayo activamos el paro de emergencia para después desconectar la máquina.</p>	

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 44-3. Fuerza del cilindro neumático en función de la presión y el material a ensayar

Material	Resistencia Última a la tracción	Dimensiones recomendadas de las probetas			Presión (bar) a establecer en función de la fuerza (N) requerida para cada porcentaje del UTS																											
					90		85		80		75		70		65		60		55		50		45		40		35		Área			
		Largo	Ancho	Espesor	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión	Fuerza	Presión				
PLA	50	250	25	4	4500	6,2	4250	5,9	4000	5,5	3750	5,2	3500	4,9	3250	4,5	3000	4,2	2750	3,9	2500	3,5	2250	3,2	2000	2,8	1750	2,5	100			
Polietileno (baja densidad)	31,7	250	25	6	4280	5,9	4042	5,6	3804	5,3	3566,3	4,9	3329	4,6	3091	4,3	2853	4,0	2615	3,7	2378	3,4	2140	3,0	1902	2,7	1664	2,4	150			
Polietileno (alta densidad)	31	250	25	6	4185	5,8	3953	5,5	3720	5,2	3487,5	4,8	3255	4,5	3023	4,2	2790	3,9	2558	3,6	2325	3,3	2093	3,0	1860	2,7	1628	2,3	150			
Cloruro de polivinilo	52	250	25	4	4680	6,4	4420	6,1	4160	5,7	3900	5,4	3640	5,0	3380	4,7	3120	4,3	2860	4,0	2600	3,6	2340	3,3	2080	3,0	1820	2,6	100			
Politetrafluoretano	34	250	25	6	4590	6,3	4335	6,0	4080	5,6	3825	5,3	3570	4,9	3315	4,6	3060	4,3	2805	3,9	2550	3,6	2295	3,2	2040	2,9	1785	2,6	150			
Polipropileno	41	250	25	5	4613	6,3	4356	6,0	4100	5,7	3843,8	5,3	3588	5,0	3331	4,6	3075	4,3	2819	3,9	2563	3,6	2306	3,3	2050	2,9	1794	2,6	125			
Poliestireno	52	250	25	4	4680	6,4	4420	6,1	4160	5,7	3900	5,4	3640	5,0	3380	4,7	3120	4,3	2860	4,0	2600	3,6	2340	3,3	2080	3,0	1820	2,6	100			
Poli(metacrilato de metilo)	76	250	25	2,5	4275	5,9	4038	5,6	3800	5,3	3562,5	4,9	3325	4,6	3088	4,3	2850	4,0	2613	3,7	2375	3,3	2138	3,0	1900	2,7	1663	2,4	62,5			
Fenol-formaldehido	62	250	25	3	4185	5,8	3953	5,5	3720	5,2	3487,5	4,8	3255	4,5	3023	4,2	2790	3,9	2558	3,6	2325	3,3	2093	3,0	1860	2,7	1628	2,3	75			
Nylón 66	94	250	25	2	4230	5,8	3995	5,5	3760	5,2	3525	4,9	3290	4,6	3055	4,3	2820	3,9	2585	3,6	2350	3,3	2115	3,0	1880	2,7	1645	2,4	50			
Poliéster	72	250	25	3	4860	6,7	4590	6,3	4320	6,0	4050	5,6	3780	5,2	3510	4,9	3240	4,5	2970	4,1	2700	3,8	2430	3,4	2160	3,1	1890	2,7	75			
Polycarbonato	60	250	25	3,5	4725	6,5	4463	6,1	4200	5,8	3937,5	5,4	3675	5,1	3413	4,7	3150	4,4	2888	4,0	2625	3,7	2363	3,3	2100	3,0	1838	2,6	87,5			

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.7.3. Manual de mantenimiento de la máquina

El plan de mantenimiento de detalla a continuación en la tabla 45-3.

Tabla 45-3. Mantenimiento preventivo de la máquina

Plan de mantenimiento preventivo de la máquina para ensayo de fatiga axial en polímeros					
Elemento	Actividad	Realizó	Período	Frecuencia	Observaciones
Estructura Base	Limpieza	Operario	10 min	Semanal	Limpiar la estructura para eliminar el polvo
Ejes de marco móvil	Limpieza y lubricación	Operario	10 min	Mensual	Lubricar los ejes para evitar fricción con los sujetadores de ejes
Mordazas	Cambio de pernos	Operario	10 min	Semestral	Cambiar los pernos de las mordazas de tamaño M10x1.5
Compresor	Mantenimiento preventivo	Operario	60 min	Según instructivo del fabricante	Revisar el filtro y purgar condensados del depósito
Cilindro neumático	Limpieza	Operario	5 min	Mensual	Limpieza del vástago
Tubería neumática	Revisión	Operario	5 min	Semanal	Revisar que no exista fugas en la tubería, cambiar empaques
Electrónica	Revisión	Operario	5 min	Quincenal	Revisar sensores
Circuito eléctrico	Revisión	Eléctrico	10 min	Quimestral	Revisar terminales de entrada y salida

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.8. Análisis de costos

Se detallarán los valores necesarios para la construcción de la máquina incluyendo los costos de la mano de obra que se requirió para la máquina de ensayos a fatiga axial de polímeros.

3.8.1. Costo directo

En el costo directo detallamos todos los gastos asociados a la materia prima para la construcción de la máquina

Tabla 46-3. Costos materiales metal mecánicos

Ítem	Materiales	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Tubo estructural rectangular A36 80x40x2 mm	2	30	60
2	Acero de transmisión AISI 1020	3	30	90
3	Plancha de acero e=10 mm	1	50	50
4	Pernos M10	8	0,5	4
5	Tuercas M25, M32	8	0,75	6
SUBTOTAL 1				210

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 47-3. Costos materiales eléctricos y electrónicos

Ítem	Materiales	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Resistencias	1	0,05	0,50
2	Placa PCB	1	15	35
3	Leds rojos	1	0,10	0,10
4	Alambre de estaño	1	8	13
5	Módulo de relé	1	8	13
6	Arduino Nano	1	8	13
7	Sensor LM35	1	2	7
8	Luz piloto verde 120-220 V	1	1,35	6,35
9	Pulsador tipo hongo	1	2,05	7,05
10	Fusible	1	5	5
11	Cable flexible 12 AWG	3	1,25	3,75
12	Cable de timbre negro	8	0,25	2
13	Cable de timbre amarillo	8	0,25	2
14	Enchufe	1	3,50	3,50
15	Enchufe 110 V	2	2	10
16	Sensores Infrarrojos	2	3	40
17	Caja metálica para circuito electrónico	1	10	20
SUBTOTAL 2				181,25

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 48-3. Costos materiales neumáticos

Ítem	Materiales	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Cilindro neumático doble efecto 100x100x25	1	450	450
2	Electroválvula 5/2, 10 Bar	1	100	100
3	Silenciador de bronce G1/8	2	3	6
4	Regulador de caudal 6 mm, G1/8	2	40	80
5	Manguera neumática 6x4 mm PU	5	2,50	12,50
6	Cable concéntrico para electroválvula	2	2,25	4,50
7	Bobina magnética para Electroválvula 24VDC	1	15	15
8	Acople de bronce ¼ a 1/8	4	3,50	14
9	Unidad de filtro y regulador	1	98	98
10	Compresor 50L – 2,5 HP	1	100	100
SUBTOTAL 3				880

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 49-3. Costos mano de obra

Ítem	Descripción	Días	USD/día	Valor total
1	Mecánico	15	25	375
2	Programador			450
SUBTOTAL 4				825

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 50-3. Costos de probetas de PLA (Impresión 3D) para pruebas

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
1	Probetas PLA	12	10	120
SUBTOTAL 5				120

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 51-3. Costo de equipos y herramientas

Ítem	Descripción	Hora	USD/hora	Valor total
1	Torno	8	5	40
3	Soldadora de arco eléctrico	8	8	64
6	Taladro de banco	2	1,50	3
8	Amoladora	4	1	4
9	Disco de corte	4	1	4
SUBTOTAL 6				115

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

La suma de todos los costos directos se muestra en la tabla 52-3 en donde tenemos el total de gastos directos.

Tabla 52-3. Total de costos directos

Descripción	Costo
Subtotal 1	210
Subtotal 2	181,25
Subtotal 3	880
Subtotal 4	825
Subtotal 5	120
Subtotal 6	115
TOTAL	2331,25

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

3.8.2. Costos indirectos

Estos costes son aquellos que afectaron al proceso de fabricación, pero no estaban directamente relacionados con el mismo, por ejemplo, los imprevistos y contratiempos de diferentes tipos, en la tabla 53-3 se encuentran los valores de costos indirectos que se generaron durante la fabricación de la máquina.

Tabla 53-3. Costos indirectos

Ítem	Descripción	Valor unitario	Valor Total
1	Ingenieriles	223,12	223,12
2	Utilidad	0	0
TOTAL			223,12

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Como es una máquina con fines investigativos la utilidad es igual a cero.

3.8.3. Costo total

En la tabla 54-3 se encuentra especificado el valor total de la máquina con la suma de todos los costos que han incurrido en el proceso de fabricación de la máquina de ensayos a fatiga axial para polímeros.

Tabla 54-3. Costo total

Detalle	Valor (USD)
Costos directos	2231,25
Costos indirectos	223,12
TOTAL	2464,37

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

El costo total del prototipo de máquina de ensayos a fatiga axial de polímeros es de 2454,37 dólares americanos.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Pruebas de funcionamiento

Después de realizar el montaje e instalación procedimos a efectuar pruebas de funcionamiento y así poder lograr una evaluación objetiva del prototipo, observando si se muestra alguna falla cuando realiza los ensayos, y si esto ocurriera se deberá realizar las respectivas correcciones necesarias. Para evaluar la máquina comprobamos si todo funcionaba de acuerdo con la programación de sensores y microcontroladores en el encendido y apagado, movimiento del cilindro, sujeción de mordazas, visualización de la interfaz gráfica de usuario, existencia de fugas de aire en el sistema neumático, el botón de paro de emergencia y la adquisición de datos controlada desde el software LabVIEW.

4.1.1. Pruebas de funcionamiento al vacío

Para un correcto funcionamiento de las partes mecánicas, neumáticas, electrónicas y eléctricas, se planteó los siguientes objetivos

- Comprobar el correcto funcionamiento del prototipo sin ninguna probeta.
- Verificar que el botón paro de emergencia funcione de una manera adecuada.
- Asegurarse que los sensores funcionen como deben.

Tabla 1-4. Pruebas de funcionamiento al vacío

Ítem	Actividades para verificar	Criterio de aceptación
01	Funcionamiento circuito eléctrico	Los componentes eléctricos arrojan las señales requeridas para su óptimo funcionamiento
02	Funcionamiento circuito electrónico	La comunicación entre los sensores y la placa base es correcta.
03	Funcionamiento sistema neumático	El movimiento del prototipo es el esperado, la variable presión se puede ajustar como se requiere

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Parámetros configurados para pruebas al vacío

Tabla 2-4. Parámetros de entrada para prueba

Parámetro de entrada	Valor	Unidades
Presión	2	Bar
Frecuencia	0.25	Hz

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

Tabla 3-4. Señales de entrada y salida

Entrada	Salida
Energía eléctrica	Presión del cilindro neumático
Parámetros de inicio	Velocidad del ensayo

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

En esta prueba se observa un correcto funcionamiento de todos los sistemas que forman el prototipo de ensayos para fatiga en polímeros, no existen fugas de aire a presión, todos los sensores realizan tomas de datos, el sistema neumático se mueve de forma adecuada.

4.1.2. Pruebas de funcionamiento en carga

Se debe cumplir con lo siguiente:

- Comprobar el correcto funcionamiento de los componentes del prototipo con la probeta de polímero expuesta a una carga constante.
- Chequear las señales emitidas por los sensores
- Realizar ensayos de probetas de polímeros de igual geometría a diferente carga.
- Realizar la gráfica esfuerzo vs número de ciclos con los datos obtenidos en el software

Tabla 4-4. Pruebas de funcionamiento con carga

Ítem	Actividades para verificar	Criterio de aceptación
01	Correcto ajuste de las dos mordazas	No presentan ningún defecto
02	Regulación de presión en la unidad de mantenimiento	Buen funcionamiento de la unidad de mantenimiento
03	Ajuste de parámetros de inicio	Fácil y correcto modo de ingresar los parámetros iniciales
04	Inicio del ensayo	Correcto funcionamiento al presionar el botón inicio
05	Toma de datos durante el ensayo	Los sensores envían las señales de muestreo
06	Fin del ensayo	Una vez ocurrida la fractura el ensayo se termina automáticamente
07	Obtención de resultados	Los datos se importan y son generados en la computadora

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

4.1.3. *Probetas ensayadas*

Tabla 5-4. Probetas ensayadas

Probetas	Material	Observaciones
1-6	PLA	Todas las probetas deberán ser de geometría igual y esta será según lo establece la Norma

Realizado por: Bonifaz, J., Quezada, A., 2020

4.2. **Discusión de resultados**

Para comprobar su buen funcionamiento en la clasificación se realizaron ensayos con probetas de PLA. Gracias a estas pruebas se obtuvo el número de ciclos en las que una probeta de cualquier polímero que este expuesta a una carga constante relativamente baja sufre una rotura debido a la fatiga, también se logró evaluar el funcionamiento del mecanismo del prototipo. Se realizará una comparación del número de ciclos necesarios para que ocurra la rotura en probetas del mismo material y geometría, expuestas a diferentes cargas. En la tabla 6-4 se muestra los resultados obtenidos en el ensayo de 6 probetas.

Tabla 6-4. Muestras de 6 probetas a una frecuencia de 0.25 Hz

Nº de probeta	Área (mm ²)	Carga (N)	Esfuerzo (MPa)	Numero de ciclos	Horas de vida
1	100	4500	45	203	0.22
2	100	4000	40	368	0.41
3	100	3500	35	439	0.49
4	100	3000	30	2042	2.26
5	100	2500	25	15682	17.42
6	100	2000	20	56365	62.62

Realizado por: Bonifaz, J.; Quezada, A. 2020

4.2.1. Comparación de resultados obtenidos

Los datos que arroja nuestra máquina los comparamos con un trabajo de investigación similar realizada en la Universidad del País Vasco de España donde de igual manera realizaron el estudio de fatiga en el polímero PLA, la diferencia es la cantidad de carga y la geometría de las probetas ya que las fabricadas por nosotros son de dimensiones diferentes y de igual manera las cargas aplicadas en el material, pero se logra ver como las curvas obtenidas son similares ya que la fatiga en polímeros deberá comportarse de esa manera. La siguiente grafica representa lo obtenido por nuestro prototipo:

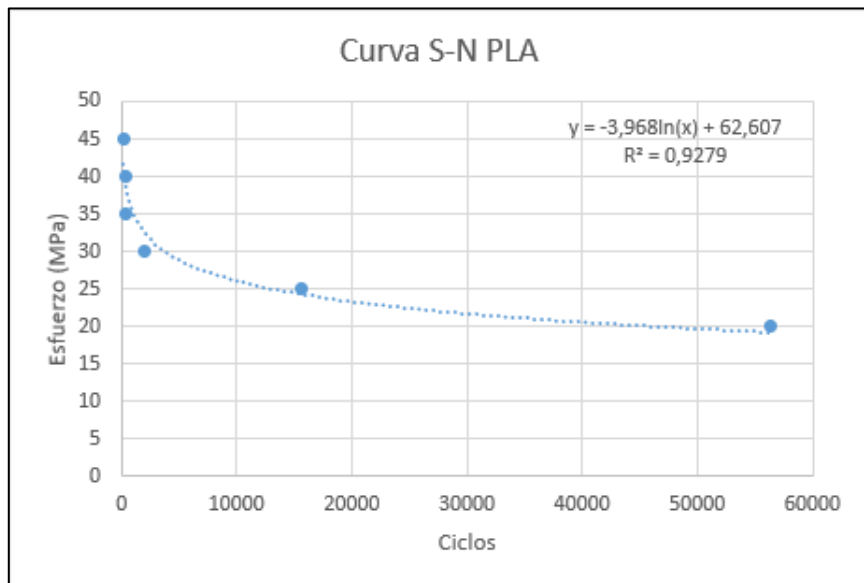


Gráfico 1-4. Curva S-N del PLA en prototipo neumático

Realizado por: Bonifaz, J.; Quezada, A. 2020

A continuación, mostramos los resultados de un Estudio del comportamiento a fatiga basados en PLA-BaSO4.

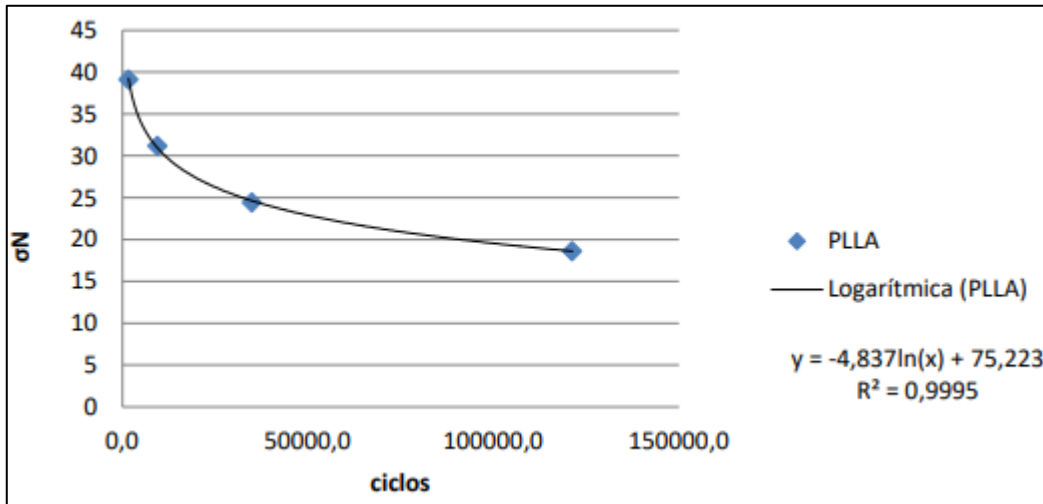


Gráfico 2-4. Curva S-N del PLA-BaSO4 en prototipo comparado

Realizado por: Gonzalo, I. 2017

4.2.2. Efectividad del funcionamiento

Los resultados anteriores son los esperados, también se hará un análisis de la rotura generada ya que esta deberá ser de tipo frágil y propagarse a través de la superficie a lo largo de su ancho y no presentará cizallamientos de grandes medidas en comparación a la geometría de la probeta para que se ratifique que se simuló un ensayo a fatiga.



Figura 1-4. Probeta de PLA antes de ser ensayada

Realizado por: Bonifaz, J.; Quezada, A. 2020



Figura 2-4. Probeta de PLA después de ser ensayada

Realizado por: Bonifaz, J.; Quezada, A. 2020

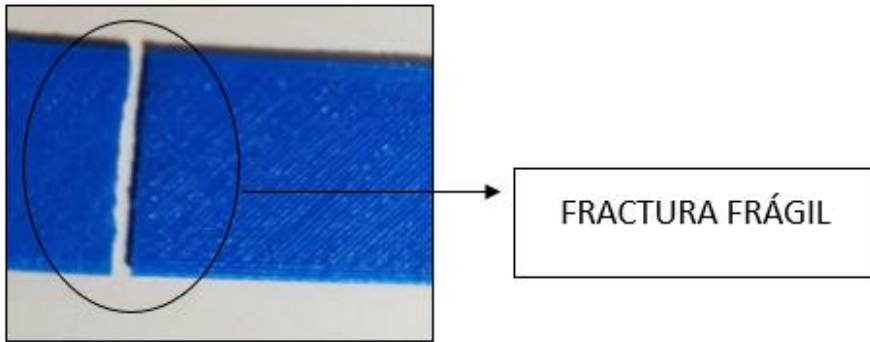


Figura 3-4. Falla frágil debido a fatiga

Realizado por: Bonifaz, J.; Quezada, A. 2020

Este resultado se obtuvo en las 6 probetas ensayadas, lo que varía es el tiempo de falla ya que este aumentara a medida que la carga sea menor, la rotura también es ligeramente diferente ya que a mayor carga se generaron cizallas con picos un poco más pronunciados.

De acuerdo con los resultados obtenidos y el análisis realizado podemos decir que nuestra maquina tiene una eficiencia del 95%, este resultado esta dado por el funcionamiento del cilindro neumático. El sistema de aire sufre una ligera pérdida de presión cuando el ciclo va por la mitad, está perdida es más grande cuando trabajamos con frecuencias más bajas de 0.25 Hz y presiones más altas de cinco bares.

4.3. Guía de ensayo



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
DIRECCIÓN DE DESARROLLO ACADÉMICO



FACULTAD: MECÁNICA

CARRERA: ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

GUÍA DE LABORATORIO

PRÁCTICA ENSAYO DE FATIGA AXIAL EN POLÍMEROS

1. DATOS GENERALES:

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

- ✓ Determinar las propiedades físicas y mecánicas del polímero a ser sometido a cargas dinámicas cíclicas (esfuerzos de fatiga), aplicando el método establecido por la Norma: ASTM D3479 “Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials”.

2.2 ESPECÍFICOS.

- ✓ Determinar la curva Esfuerzo Vs. Numero de ciclos (N_c)
- ✓ Determinar el esfuerzo de fatiga.
- ✓ Observar el comportamiento del material al ser sometido a cargas dinámicas.
- ✓ Cuantificar el número de ciclos que admite la probeta antes de la fractura.
- ✓ Analizar el tipo de falla que presenta el material al finalizar el ensayo.

3. INSTRUCCIONES

1. Colocarse los equipos de protección personal (EPP) requeridos para el ingreso al laboratorio casco, mandil y calzado adecuado.
2. Verificar que se encuentre en buenas condiciones para el ensayo.

3. Verificar que no se encuentre la máquina encendida.
4. Medir la probeta y verificar que cumpla con los parámetros que establece la norma para la validez del ensayo.
5. Colocar la probeta correctamente en las mordazas de sujeción y ajustarlas completamente.
6. Colocar el sensor de tipo LM35 en la mitad de la probeta, para medir la variación de temperatura.
7. Encender la máquina.
8. Regular la presión de trabajo, según el tipo de polímero a estudiar.
9. Abrir la Interfaz de LabVIEW que controla el ensayo
10. Asegurarse que esté conectado el software a la máquina.
11. Correr la programación
12. Colocar la presión a la que se va a realizar el ensayo
13. Dar Clic en Iniciar el Ensayo
14. Esperar el tiempo que se demora en fracturarse la probeta.
15. Repetir el ensayo variando la presión para obtener más datos que se representaran en la curva Esfuerzo Vs. Numero de ciclos.
16. Apagar el equipo y retirar la probeta.

4. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:

4.1. EQUIPOS



Fig 1. Máquina de fatiga de polímeros

Partes:

1.
2.

3.
4.
5.

4.2. ACCESORIOS



Fig 2. Compresor



Fig3. computador

4.3. HERRAMIENTAS



Fig 4. Calibrador



Fig 5. Flexómetro



Fig 6. Llave hexagonal No. 08

5. MARCO TEORICO

Máquina de Fatiga

Breve concepto referenciado.

Variables:

Unidades:

Capacidad Máxima:

NORMA

Hablará de la norma, procedimientos, consideraciones, principios empleados, propiedades mecánicas que se obtienen, etc. En este ensayo se va a utilizar la norma ASTM D3479 “Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials”

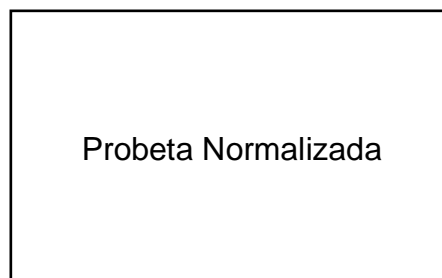


Fig. 7 Nombre de la probeta

PROBETA

Se describirá a la probeta, dimensiones, materiales, condiciones especiales, preparación de la probeta, etc., los mismos que se serán listados en una tabla.

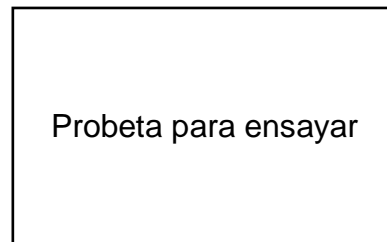


Fig. 8 Nombre de la probeta

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Obtención de datos

Tabla 1. PLA (Acido Poli láctico)

Longitud total (L) (mm)	
Ancho de la probeta(A)(mm)	
Espesor de la probeta (e) (mm)	
Peso (g)	

Tabla 2. valores de la carga aplicada

Datos	Área (mm ²)	Carga (N)
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Procesamiento de los resultados

✓ Área transversal de la probeta

$$A = a * e$$

a= ancho - ancho entre 10mm-20mm

e= espesor - espesor entre 1mm-8mm

✓ **Esfuerzo normal máximo**

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F}{A}$$

$$A_{req} = \frac{F}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

Donde:

F: fuerza ejercida en la probeta

A: Área de la probeta

A_{req} : Área requerida calculada

Tabla 3. Cálculos fuerza del cilindro

CÁLCULO DE LA FUERZA DEL CILINDRO			
		$Fa = \frac{\pi}{40} * D^2 * P * R$	
Fuerza de Avance (N)			
		$Fr = \frac{\pi}{40} * (D^2 - d^2) * P * R$	
Fuerza de Retroceso (N)			
D	100	Diámetro del cilindro (mm)	
D	25	Diámetro del vástago (mm)	
P	1 hasta 7	Presión (bar)	
R	0,95	Rendimiento	
Para cilindros de hasta D = 40 mm	R = 0,85		
Para cilindros superiores a D = 40 mm	R = 0,95		

✓ **Fuerza**

- **Esfuerzo axial aplicado a la probeta**

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

F: Fuerza

A: Área

Probeta durante el ensayo

Fig. 9 Nombre de la probeta

Presentación de resultados:

Con las fórmulas planteadas anteriormente procedemos a llenar los datos de la siguiente tabla:

Tabla 4. *Cálculos para el ensayo*

N° de probeta	Área (mm ²)	Carga (N)	Esfuerzo (MPa)	Numero de ciclos	Horas de vida
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Gráfico 1. *Diagrama esfuerzo vs Número de ciclos*

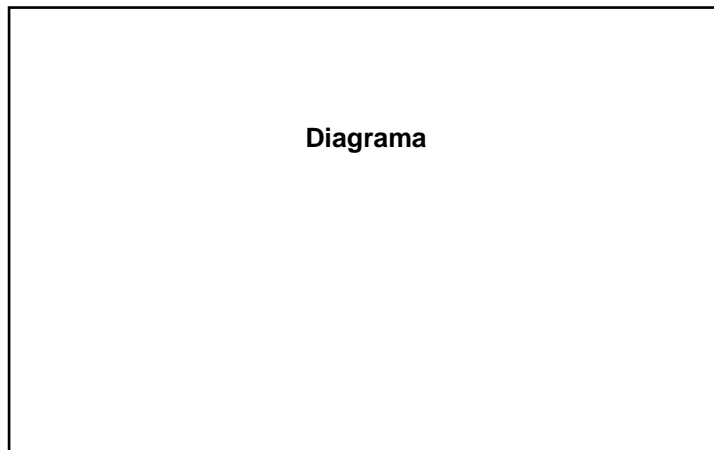


Tabla 5. *resultados obtenidos del ensayo.*

Muestra	1
Designación	
Característica	
Espesor (mm)	
Carga máxima (N)	
Esfuerzo máximo (MPa)	
Horas de vida	
Número de ciclos	

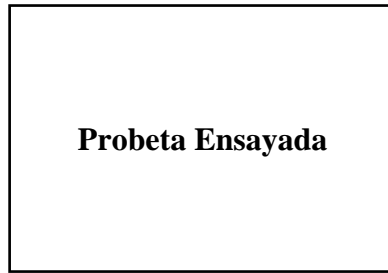


Fig. 10 Nombre de la probeta

7. DISCUSIÓN Y ANALISIS

Analizaremos las condiciones que establece la norma para la validación de este ensayo si se las cumplió o no, anotaremos lo sucedido con la probeta durante el ensayo, los cambios que tuvo. Se analizará el tipo de fractura para identificar el tipo de material y se hará una discusión de los datos obtenidos

8. CONCLUSIONES

Las conclusiones son netamente de la interpretación del estudiante y son las respuestas a los objetivos planteados y estas deberán obtenerse a partir de los datos anteriores, estas deberán ser igual al número de objetivos planteados.

9. RECOMENDACIONES

Se refiere a que cree usted que se debe hacer para mejorar la precisión y obtención de datos.

10. BIBLIOGRAFÍA

Citar bibliografía según la Norma

CONCLUSIONES

- El uso de software especializado de diseño nos permite saber si las dimensiones de nuestro equipo son las correctas para que este funcione eficientemente cuando este expuesto a cargas.
- Se debe considerar las características de funcionamiento de los elementos neumáticos para diseñar el sistema en el cual van a estar en operación, estas pueden ser presión y fuerza de trabajo, voltajes de trabajo, etc.
- Para generar un eficiente funcionamiento de la programación se realizó procesos en paralelo y así poder minimizar los tiempos por medio del uso de bibliotecas de LabVIEW.
- Se trabaja con frecuencias máximas de 1 Hz para que la temperatura de la probeta no varíe de forma que esta produzca deterioro en las propiedades del material y esto influya en los resultados de los ensayos, se recomienda trabajar con una frecuencia de 0.25 Hz
- El fallo de las probetas de PLA que se ensayaron a fatiga produjo en las mismas los resultados esperados (Rotura por fallo a fatiga) se concluye que el prototipo funciona de una manera correcta
- De acuerdo con las gráficas de temperatura, la variación que hubo en esta propiedad a lo largo del ensayo fue muy baja esto garantiza que el fallo en las probetas es debido a fallo mecánico y no a un fallo por degradación de propiedades físicas que produce una alta variación de temperatura.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar un sensor para medir la fuerza aplicada a la probeta y un control de presión, de modo que la fuerza aplicada pueda ajustarse de forma automática mediante un algoritmo de control.
- Se recomienda el uso de un sensor de visión artificial para detectar la rotura de la probeta. Esto haría posible que la máquina pueda probarse con más materiales.
- Cambiar el sensor de temperatura por un sensor infrarrojo a distancia o una cámara térmica para poder tener el registro de cómo varía la temperatura a lo largo de toda la probeta y no en un solo punto (como sucedería con el uso de un sensor infrarrojo)
- Se recomienda el uso de sensores industriales para poseer un mejor control de estos.
- Es recomendable leer las instrucciones de uso del equipo para garantizar un correcto funcionamiento.
- Realizar los mantenimientos preventivos tal y como se recomienda en el manual para que el equipo tenga una mayor vida útil
- Se recomienda que el compresor que da funcionamiento al equipo tenga un mayor recipiente reservorio para disminuir pérdidas de presión en el proceso.

GLOSARIO

Actuador neumático: Son mecanismos que convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico. (EADIC, 2017)

ASTM: Organización científica y técnica para el establecimiento y la difusión de normas relativas a las características y prestaciones de materiales, productos, sistemas y servicios. (MOTORGIGA, 2019)

Decantación: El concepto alude al acto y el resultado de decantar: lograr la separación de sustancias que presentan distinta densidad y se encuentran en un medio líquido. (Pérez et al., 2017)

Electroválvula: Es una válvula que abre o cierra el paso de un líquido en un circuito. La apertura y cierre de la válvula se efectúa a través de un campo magnético generado por una bobina en una base fija que atrae el émbolo. (ALTEC, 2016)

Fatiga: Pérdida de la resistencia mecánica de un material, al ser sometido largamente a esfuerzos repetidos. (RAE, 2019)

Frecuencia: Número de veces que se repite un proceso periódico por unidad de tiempo. (RAE, 2019)

Microcontrolador: Es un circuito integrado que en su interior posee una CPU con unidades de memoria RAM y ROM (Marques, 2011, p.5).

Mordazas: Pieza desplazable del freno de tambor que sirve de soporte a los elementos de fricción. (RAE, 2019)

Neumática: se encarga de estudiar el movimiento del aire y sacar provecho de esta energía (Creus, 2007, p.24).

Pistón: émbolo (pieza de una máquina) (RAE, 2019).

Polímeros: conjunto de macromoléculas normalmente orgánicas, que se obtiene al unir moléculas más simples denominadas monómeros con la ayuda de enlaces químicos covalentes (Uriarte, 2019, p.4).

Probeta: Tubo de cristal, cerrado por un extremo y destinado a contener líquidos o gases. (RAE, 2019).

Racores: Pieza metálica con dos roscas internas en sentido inverso, que sirve para unir tubos y otros perfiles cilíndricos (RAE, 2019).

Solenoides: Bomba cilíndrica de hilo conductor de manera que la corriente eléctrica produzca un intenso campo magnético (RAE, 2019).

Tensión: Estado de un cuerpo sometido a la acción de fuerzas opuestas que lo atraen (RAE, 2019).

Tracción: Esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a alargarlo (RAE, 2019).

Vástago: Barra que, ajusta al centro de una de las dos caras del embolo, sirve para darle movimiento o transmitir el suyo a algún mecanismo (RAE, 2019).

BIBLIOGRAFÍA

ALEGRE, E; et al. *Evaluación de la vida útil de los materiales poliméricos fabricados con aditivos mediante por medio de la prueba del anillo rodante con anillo dentado cargado cíclicamente* [en línea]. España: Grupo de Visión del Comité Español de Automática (CEA), 2016. [Consulta: 11 diciembre 2019]. Recuperado de:

<https://intranet.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/8/files/ConceptosyMetodosenVxC.pdf>

ALMAZÁN BLANCA. *Automatización y robótica para la producción* [en línea]. Mexico: Gestipolis, 2008. [Consulta: 11 diciembre 2019]. Recuperado de:

<https://www.gestipolis.com/automatizacion-robotica-produccion/>

ANDRZEJ, K, et al. *Comportamientos recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra natural.* Alemania, Universidad Kassel. 2005. Recuperado de:

<https://chirinossilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/ciencia-e-ingenieria-de-los-materiales-askeland-3-edicion.pdf>

ALTEC. Electroválvulas. [en línea]. 2016. [Consulta: 21 diciembre 2019]. Recuperado de:

<https://www.altecdust.com/soporte-tecnico/que-son-las-electrovalvulas>

ASKELAND, D. *Ciencia e Ingeniería de los materiales 3era edición* [en línea]. Missouri-Rola: International Thomson Editors, 1998. [Consulta: 17 diciembre 2019]. Recuperado de:

<https://chirinossilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/ciencia-e-ingenieria-de-los-materiales-askeland-3-edicion.pdf>

AYALA GUTIERREZ, Juan Pablo. *Diseño de una prensa neumática* [en línea].(Trabajo de titulación). (Pregrado), Escuela de Tecnología Mecánica, Mexico. 2017. pp.4-48. [Consulta: 2019-12-10]. Recuperado de:

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8307/62151A973.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

BALBO, P: et al. “Mechanism of Poly(A) Polymerase: Structure of the Enzyme-MgATP-RNA Ternary Complex and Kinetic Analysis”. *Department of Biochemistry, Tufts School of Medicine* [en línea], 2007, (United State of America) 15(9), pp. 1024-1026. [Consulta: 16 abril 2020]. Recuperado de:

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0969212607002833?token=AB91239B0B2069A68DB9C3ED10F1D667472EFAC44D6D8EE818734DD392F859376EA7F1785B17C2BA5B5C2FAB1DEC3B0B>

CAMSCO. *Base de fusible* [en línea]. Taiwán-China: Camsco, 2019. [Consulta: 04 marzo 2020]. Recuperado de:

<https://www.camsco.com.tw/spa/fuse-link-base/fuse-base.html>

CAMSCO. *Control Unit E Series* [en línea]. Taiwán-China: Camsco, 2019. [Consulta: 04 marzo 2020]. Recuperado de:

https://www.camsco.com.tw/upload_files/e-download/Camsco-E-Catalog.pdf

CAMSCO. *Fusible* [en línea]. Taiwán-China: Camsco, 2019. [Consulta: 04 marzo 2020]. Recuperado de:

https://www.camsco.com.tw/upload_files/e-download/Camsco-E-Catalog.pdf

CICOLANI, J. “Beginning Robotics with Raspberry Pi and Arduino: Using Python and OpenCV”. *Technology in action* [en línea], 2018, (United State of America), pp. 2-273. [Consulta: 14 abril 2020]. ISBN-13 (electronic): 978-1-4842-3462-4. Recuperado de:

<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3462-4>

CORONA, L; et al. *Sensores y Actuadores* [en línea]. México D.F-México: Grupo Editorial Patria, 2014. [Consulta: 14 abril 2020]. Recuperado de:

<https://books.google.es/books?id=wMm3BgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es>

CREUS, Antonio. *Neumática e Hidráulica* [en línea]. España: Marcombo, 2007. [Consulta: 13 abril 2020]. Recuperado de:

https://www.academia.edu/37145190/Neum%C3%A1tica_e_Hidr%C3%A1ulica_AntonioCreus_Sol%C3%A9_LIBROSVIRTUAL

CROSS, Nigel. *Métodos de Diseño: Estrategias para el Diseño de Productos*. 2ª ed. México-México: LYMUSA WILEY, 2002, p.43.

EADIC. Actuadores neumáticos [en línea]. 2017. [Consulta: 04 septiembre 2020]. Recuperado de:

<https://www.eadic.com/que-funcion-cumplen-los-actuadores-neumaticos/#:~:text=Los%20cilindros%20neum%C3%A1ticos%2C%20independientemente%20de,efecto%20y%20de%20doble%20efecto.>

EBASEE. *AC Contactor* [en línea]. Gutang Road-Shanghai: Ebasee, 2012. [Consulta: 04 marzo 2020]. Recuperado de:
<http://www.ebasee.com/upLoad/product/181204/201812040957463305.pdf>

FORRAI, A. *Embedded Control System Design: A Model Based Approach* [en línea]. Veenendaal-The Netherlands: Springer Science & Business Media, 2013. [Consulta: 14 abril 2020]. Recuperado de:
<https://books.google.es/books?id=POFgpLpUXBIC&printsec=frontcover&hl=es>

GRELLMANN, W; et al. “Evaluación de la vida útil de los materiales poliméricos fabricados con aditivos mediante por medio de la prueba del anillo rodante con anillo dentado cargado cíclicamente”. *Procedia Structural Integrity* [en línea], 2019, Alemania: Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Merseburg 13. pp. 34.38. [Consulta: 14 abril 2020]. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618302385>

GUAMANQUISPE, Jorge. *Estudio del Comportamiento a Fatiga Mecánica de Polímeros Compuestos con Fibra Natural y su Incidencia en la Aplicación para la Fabricación de Accesorios de la Industria Carrocera* [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría) Universidad Tecnica de Ambato, Ecuador. 2013. pp. 50-180. [Consulta: 14 abril 2020]. Recuperado de:
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/6107/1/Tesis%20I.%20M.%20183%20-%20Moroch%20Toaza%20Verónica%20Elizabeth.pdf>

HYTROL CONVEYOR COMPANY, INC. *Manual básico de entrenamiento Número 1* [en línea]. Toluca-México: Hytrol Conveyor de México S. De R.L. De C.V, 2020. [Consulta: 12 abril 2020]. Recuperado de:
https://docplayer.es/5832929-Boletin-numero-609-manual-basico-de-entrenamiento.html?fbclid=IwAR3OCtYJIDrZQX9Q-YlfiB_Ev4muSxSjN3g5OsA9P3Ax-tVkJATfpu_MZHI.

KUMAR, D; et al, An Effective Moisture Control based Modern Irrigation System (MIS) with Arduino Nano [en línea]. India: 2019. pp. 70-72, [Consulta: 18 abril 2020]. 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS), Recuperado de: 10.1109/ICACCS.2019.8728446.

LAJARA, J. *LabVIEW: Entorno gráfico de programación* [en línea]. Cataluña- España: Marcombo, S.A, 2011, p. 21-23. [Consulta: 18 abril 2020]. Recuperado de:

https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=ZFQua3-eeQEC&oi=fnd&pg=PA21&dq=programacion+Labview&ots=qI3xU5NF1v&sig=kCbSzxwzqfr3I-2Kbe-94BqwJIQ&redir_esc=y#v=onepage&q=programacion%20Labview&f=false

LARBURU, N. *Máquinas Prontuario: Técnicas máquinas herramientas*. 2ª ed. Madrid-España: Paraninfo, 1990, p.518

MAJUMDAR, S.R. *Sistemas Neumáticos: Principios y Mantenimiento*. McGraw Hill, 1998, pp. 89-93.

MARMOLEJO, Ruben. *LM35 – El sensor de temperatura más popular* [en línea]. Mexico, 2017. Recuperado de:
<https://hetpro-store.com/TUTORIALES/lm35/>

MONTESANO, J: et al. *Considerations for Progressive Damage in Fiber Reinforced Composite Materials Subject to Fatigue* [en línea]. Canada: Department of Aerospace Engineering, Ryerson University, 2009. [Consulta: 14 abril 2020]. Recuperado de:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12659-8_12

MOTORGIGA. ASTM [en línea]. 2018. [Consulta: 23 julio 2020]. Recuperado de:
<https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/a-s-t-m-definicion-significado/gmx-niv15-con321.htm>

NYLAMP MECHATRONICS. *Tutorial Sensor de Distancia SHARP* [en línea]. Trujillo-Perú. 2016. Recuperado de:
https://naylorlampmechatronics.com/blog/55_tutorial-sensor-de-distancia-sharp.html

PALLÁS, R. *Sensores y Acondicionadores de Señal* [en línea]. 4ª ed. Barcelona-España: Marcombo, 2003. [Consulta: 14 abril 2020]. Recuperado de:
https://books.google.es/books?id=Eevyk28_fVkC&printsec=frontcover&hl=es

PARKER HANNIFIN CORPORATION. *Pneumatic Cylinders: Catalog AU03-0900P-3* [en línea]. Ohio-USA: Parker Hannifin Corporation, 2006. [Consulta: 03 marzo 2020]. Recuperado de:
<https://www.parker.com/literature/Industrial%20Cylinder/cylinder/cat/english/AU03-0900P-3-NA.pdf>

PÉREZ, J. & MERINO, M. Decantación. [en línea]. 2017. [Consulta: 14 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://definicion.de/decantacion/>

RAE. Fatiga. [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/fatiga>

RAE. Frecuencia [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/frecuencia>

RAE. Mordaza [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/mordaza>

RAE. Pistón [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/piston>

RAE. Probeta [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/probeta>

RAE. Racor [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/racor>

RAE. Solenoide [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/solenoide>

RAE. Tensión [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/tension>

RAE. Tracción [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/traccion>

RAE. Vástago [en línea]. 2019. [Consulta: 24 agosto 2020]. Recuperado de:

<https://dle.rae.es/vastago>

RIBA, Carles. *Diseño Concurrente* [en línea]. Barcelona-España: Ediciones UPC, 2002. [Consulta: 13 abril 2020]. Recuperado de:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36754/9788498800746.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ROSATO, D. Rosato's Plastics Encyclopedia and Dictionary, [en línea]. Munich-Alemania, 1993. [Consulta: 02 abril 2020]. Recuperado de:

<https://todoenpolimeros.com/2019/07/08/la-dureza-en-los-plasticos/#:~:text=La%20dureza%20es%20la%20medida,%2C%20rayado%2C%20maltrato%2C%20etc.>

RUIZ, José, *Utilización de LabVIEW para la Visualización y Control de la Plataforma Open Hardware Arduino* [en línea]. España: 2012. [Consulta: 14 mayo 2020]. Recuperado de:

<http://proyecto987.es/blog/wp-content/uploads/2016/04/Arduino-LabVIEW.pdf>

SAUER, J: et al. *Fatigue of polymers* [en línea]. Estados Unidos: International Journal of Fracture, Vol. 16, No. 6, 1980. [Consulta: 15 abril 2020]. Recuperado de:

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02265215z>

SERRANO NICOLÁS, A. *Neumáticos Práctica* [en línea]. Madrid-España: Paraninfo, 2009. [Consulta: 13 abril 2020]. Recuperado de:

<https://books.google.es/books?id=-IUVsZSC6GsC&printsec=frontcover&hl=es>

SELMY, A: et al. "Flexural Fatigue Performance of Glass Fiber/Epoxy Step-Wise Functionally and Non-Functionally Graded Composites of Different Structures". *Artículo científico* [en línea], 2017, (United State of America). 32(3). [Consulta: 14 abril 2020]. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/317936738_Flexural_Fatigue_Performance_of_Glass_FiberEpoxy_StepWise_Functionally_and_NonFunctionally_Graded_Composites_ofDifferent_Structures

URIARTE, J. *Polímeros* [en línea]. 2019. [Consulta: 03 abril 2020]. Recuperado de:

<https://www.caracteristicas.co/polimeros/#ixzz6VxHYIEXG>

