



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
INSTRUMENTACIÓN ELECTROMECAÁNICO PARA MEDICIÓN DE
FUERZAS DE TRACCIÓN HORIZONTAL EN FIBRAS
VEGETALES”**

Trabajo de titulación

Tipo: DISPOSITIVO TECNOLÓGICO

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES**

AUTOR: ALEXANDER CORNELIO SACAQUIRIN RIVADENEIRA

DIRECTOR: Ing. JORGE LUIS HERNÁNDEZ AMBATO PhD.

Riobamba – Ecuador

2019

© 2019, Alexander Cornelio Sacaquirin Rivadeneira

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

Yo, Alexander Cornelio Sacaquirin Rivadeneira, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo 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, 12 de noviembre de 2019

ALEXANDER CORNELIO SACAQUIRIN RIVADENEIRA

1400462055

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

El Tribunal de Trabajos de Titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Dispositivo Tecnológico, “IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTROMECAÁNICO PARA MEDICIÓN DE FUERZA DE TRACCIÓN HORIZONTAL EN FIBRAS VEGETALES”, realizado por el señor ALEXANDER CORNELIO SACAQUIRIN RIVADENEIRA, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación..

FIRMA

FECHA

Ing. José Luis Morales

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

.....

.....

PhD. Jorge Hernández Ambato

**DIRECTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

.....

.....

Ing. Andrés Morocho

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

.....

.....

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación refleja todas las horas de esfuerzo y dedicación, el cual se lo dedico, en primer lugar, a mis padres, Laura y Cornelio, quienes con su amor incondicional y su arduo esfuerzo me han alentado a culminar esta etapa de mi vida. A mi hermano Javier, y hermanas Cristina y Adriana que con su carisma, amistad y amor me han motivado durante todo este proceso. Finalmente, a mi primo, Randy, que fue la persona que me animó y convenció para prepararme en este campo de estudio.

ALEXANDER

AGRADECIMIENTO

Mi imperecedero agradecimiento, en primer lugar, a mis padres y hermanos por el apoyo incondicional que me han sabido brindar. A mi abuelo, Adriano, por la contribución realizada en la recolección de los especímenes vegetales. Finalmente, a mi tutor, el Ing. Jorge Hernández PhD., quien me ha brindado la confianza y el apoyo que me ha permitido culminar de la mejor manera este trabajo de titulación.

ALEXANDER

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 Ensayos de tracción en fibras vegetales.....	3
1.2 Influencia del tamaño del espécimen en los ensayos mecánicos.....	4
1.3 Esfuerzo y deformación	4
1.4 Magnitudes físicas en ensayos mecánicos.....	6
1.5 Máquinas comerciales para pruebas de ensayos mecánicos.....	8
1.6 Estructura de una máquina para ensayos mecánicos	9
1.7 Sensores para medición de deformaciones.....	10
1.7.1 <i>Galgas extensiométricas</i>	10
1.7.2 <i>Celdas de carga</i>	11
1.8 Actuadores	12
1.8.1 <i>Motores paso a paso</i>	12
1.9 Microcontroladores.....	13
1.9.1 <i>AVR</i>	13
1.9.2 <i>STM32 SERIES F4</i>	14
1.10 Sistemas Embebidos.....	15
1.11 Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)	16
1.12 Acumuladores electroquímicos	17

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO.....	19
2.1 Requerimientos del prototipo.....	19
2.1.1 <i>Concepción general del diseño de la arquitectura del prototipo</i>	20
2.2 Diseño del prototipo electromecánico.....	21

2.2.1	<i>Diseño de la estructura mecánica</i>	21
2.2.1.1	<i>Análisis de la fuerza de tracción y selección del motor paso a paso</i>	22
2.2.2	<i>Diseño de la estructura electrónica y eléctrica</i>	25
2.3	Implementación de los módulos electrónicos y eléctricos	26
2.3.1	<i>Tarjetas de desarrollo</i>	26
2.3.1.1	<i>Tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re</i>	26
2.3.2	<i>Sensor de Fuerza: Celda de carga 1 kg</i>	28
2.3.2.1	<i>Acondicionamiento de la señal analógica</i>	29
2.3.2.2	<i>Filtrado de la señal</i>	32
2.3.3	<i>Módulo de control del actuador</i>	33
2.3.4	<i>Visualización del proceso de ejecución del prototipo electromecánico</i>	35
2.3.5	<i>Fuente de alimentación del prototipo</i>	36
2.3.6	<i>Esquemas de conexión del prototipo</i>	37
2.3.6.1	<i>Esquema de conexión del módulo de adquisición de datos del sensor</i>	37
2.3.6.2	<i>Esquema de conexión del módulo para el motor paso a paso Nema 17</i>	38
2.3.6.3	<i>Esquema de conexión del módulo de Visualización</i>	39
2.3.7	<i>Diseño del algoritmo de control para el prototipo</i>	40
2.3.7.1	<i>Requerimientos de software</i>	42
2.3.7.2	<i>Diagrama de flujo para el software de la tarjeta de desarrollo</i>	42
2.3.7.3	<i>Diagrama de flujo para el software de la interfaz gráfica</i>	45
2.4	Pruebas preliminares, ajuste y calibración	47
2.5	Evaluación final del prototipo electromecánico	47

CAPÍTULO III

3.	VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO	48
3.1	Caracterización de la celda de carga de 1 kg	48
3.2	Funcionamiento del prototipo: ensayos mecánicos de tracción	49
3.2.1	<i>Pita</i>	50
3.2.1.1	<i>Ensayos de tracción en fibras frescas de pita</i>	50
3.2.1.2	<i>Ensayos de tracción en fibras secas de pita</i>	53
3.2.2	<i>Paja toquilla</i>	56
3.2.2.1	<i>Ensayos de tracción en fibras frescas de paja toquilla</i>	57
3.2.2.2	<i>Ensayos de tracción en fibras secas de paja toquilla</i>	59
3.2.3	<i>Cabuya</i>	62
3.2.3.1	<i>Ensayos de tracción en fibras frescas de cabuya</i>	63
3.2.3.2	<i>Ensayos de tracción en fibras secas de cabuya</i>	65

3.2.4	<i>Canela</i>	68
3.2.4.1	<i>Ensayos de tracción en hojas de canela</i>	68
3.2.5	<i>Limón</i>	70
3.2.5.1	<i>Ensayos de tracción en hojas limón</i>	71
3.3	Determinación del consumo de energía del prototipo electromecánico	73
3.4	Análisis de costos	73
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES	76
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Características de Máquinas Comerciales.	8
Tabla 2-1.	Características de los microcontroladores ATmega8 y ATmega16.	13
Tabla 3-1.	Características de acumuladores electroquímicos recargables más comunes.	18
Tabla 1-2.	Descripción de los requerimientos técnicos del prototipo.	20
Tabla 2-2.	Parámetros para la selección del actuador electromecánico.	24
Tabla 3-2.	Características técnicas de la tarjeta de desarrollo STM32.	27
Tabla 1-3.	Mediciones realizadas para la caracterización de fuerza.	49
Tabla 2-3.	Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras frescas de pita.	53
Tabla 3-3.	Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras secas de pita.	56
Tabla 4-3.	Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras frescas de paja toquilla.	59
Tabla 5-3.	Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras secas de paja toquilla.	62
Tabla 6-3.	Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras frescas de cabuya.	65
Tabla 7-3.	Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras secas de cabuya.	68
Tabla 8-3.	Parámetros mecánicos y dimensionales de hojas de canela.	70
Tabla 9-3.	Parámetros mecánicos y dimensionales de hojas de canela.	73
Tabla 10-3.	Consumo de corriente de cada módulo electrónico.	73
Tabla 11-3.	Análisis de costos.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Deformación atribuida a σ_x .	5
Figura 2-1.	Ejemplos de respuesta esfuerzo-deformación de algunos materiales.	7
Figura 3-1.	Estructura de una máquina para ensayos mecánicos.	9
Figura 4-1.	Galga extensiométrica.	11
Figura 5-1.	Esquema de conexión de una celda de carga.	11
Figura 6-1.	Motor paso a paso.	12
Figura 7-1.	Arquitectura del microcontrolador.	14
Figura 8-1.	Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560.	15
Figura 9-1.	Distribución preliminar de una interfaz de usuario	16
Figura 10-1.	Estructura de un acumulador electroquímico.	17
Figura 1-2.	Esquema estructural del diseño e implementación del prototipo.	19
Figura 2-2.	Diagrama de la concepción general del prototipo.	21
Figura 3-2.	Diseño del sistema mecánico estructural para el prototipo electromecánico.	22
Figura 4-2.	Diagrama de fuerzas que interactúan en el desplazamiento de la cruceta.	23
Figura 5-2.	Motor paso a paso Nema 17.	25
Figura 6-2.	Diagrama de bloques del prototipo.	26
Figura 7-2.	Tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446RE.	28
Figura 8-2.	Dimensiones de la celda de carga de 1 kg.	29
Figura 9-2.	Diagrama para digitalizar una señal analógica.	29
Figura 10-2.	Circuito puente de wheastone.	30
Figura 11-2.	Esquema interno de AD620.	31
Figura 12-2.	Driver a4988.	34
Figura 13-2.	Interfaz gráfica diseñada en el software Qt Creator.	36
Figura 14-2.	Batería Lipo marca Turnigy recargables de 11.1 V a 2200 mAh.	37
Figura 15-2.	Esquemático de la etapa de adquisición de datos del sensor.	38
Figura 16-2.	Esquemático de conexiones para el motor Nema 17.	39
Figura 17-2.	Comunicación serial entre la tarjeta de desarrollo y la computadora.	40
Figura 18-2.	IDE de Mbed.	41
Figura 19-2.	Entorno de desarrollo de Qt Creator.	41
Figura 20-2.	Diagrama de flujo para el control de tarjeta de desarrollo.	44
Figura 21-2.	Diagrama de flujo para el control de la interfaz gráfica.	46

Figura 22-2.	Desplazamiento horizontal de la cruceta.	47
Figura 1-3.	Ensayos experimentales de tracción en fibras frescas de pita.	51
Figura 2-3.	Ensayos experimentales de tracción en fibras secas de pita.	54
Figura 3-3.	Ensayos experimentales de tracción en fibras frescas de paja toquilla.	57
Figura 4-3.	Ensayos experimentales de tracción en fibras secas de paja toquilla.	60
Figura 5-3.	Ensayos experimentales de tracción en fibras frescas de cabuya.	63
Figura 6-3.	Ensayos experimentales de tracción en fibras secas de cabuya.	66
Figura 7-3.	Ensayos experimentales de tracción en hojas de canela.	69
Figura 8-3.	Ensayos experimentales de tracción en hojas de limón.	71

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1.	Curva de tensión típica frente a deformación de fibras vegetales.	4
Gráfico 1-1.	Curva Esfuerzo-Deformación.	7
Gráfico 1-2.	Señal en el dominio del tiempo.	32
Gráfico 2-2.	Señal en el dominio de la frecuencia.	33
Gráfico 1-3.	Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes frescos de pita.	52
Gráfico 2-3.	Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes secos de pita.	55
Gráfico 3-3.	Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes frescos de paja toquilla.	58
Gráfico 4-3.	Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes secos de paja toquilla.	61
Gráfico 5-3.	Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes frescos de cabuya.	64
Gráfico 6-3.	Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes secos de cabuya.	67
Gráfico 7-3.	Curvas Fuerza-Tiempo de diferentes especímenes de hojas de canela.	70
Gráfico 8-3.	Curvas Fuerza-Tiempo de diferentes especímenes de hojas de limón.	72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Manual de Usuario

RESUMEN

En este trabajo se implementó un prototipo electromecánico que permite el estudio de ensayos de tracción horizontal en fibras vegetales. Cada una de las etapas seguidas para la implementación del prototipo son descritas. En primer lugar, se estableció los aspectos teóricos referentes a los ensayos mecánicos y como se encuentran constituidos los equipos de pruebas mecánicas. El principal parámetro físico considerado fue el nivel de tracción, mismo que determina la capacidad máxima que soporta el espécimen al aplicar la fuerza axial sobre un extremo del material, produciendo una deformación y posterior ruptura del material bajo estudio. Por lo tanto, la medición de este parámetro contribuye a determinar el comportamiento y estado del espécimen. Se desarrolló el diseño estructural, electrónico y de algoritmos de control (firmware). Luego, se realizó la selección de los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos en base a los criterios de diseño. Para el módulo de amplificación de la señal analógica emitida por la celda de carga de 1 kg, se utilizó un amplificador operacional AD620. La señal analógica es receptada por una tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446RE, teniendo en su estructura interna un convertidor analógico-digital de 12 bits que permite mejorar la precisión de lectura de datos. El desplazamiento lineal de la cruceta se realizó por la acción de un motor paso a paso Nema 17. La interfaz gráfica presenta un ambiente amigable e interactivo que permite visualizar los parámetros medibles de fuerza, esfuerzo y deformación, la curva Esfuerzo-Tiempo, almacenar información y emitir mensajes de alerta. La caracterización del sensor permite conocer la fuerza aplicada en el estudio de tracción. Se desarrollaron pruebas de tracción en fibras vegetales de pita, cabuya, paja toquilla y hojas de canela y limón permitiendo verificar que el funcionamiento del prototipo electromecánico cumple con las condiciones de diseño.

Palabras clave: <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA>, <INSTRUMENTACIÓN>, <TRACCIÓN>, <MÁQUINA>, <ESFUERZO>, <DEFORMACIÓN>, <ESPÉCIMEN>, <FIBRAS VEGETALES>.

ABSTRACT

In this work an electro-mechanic prototype was implemented that allowed us to study the horizontal traction tests in vegetables fibers. Each one of the followed stages for the implementation of the prototype is described. In the first place, it was established the theoretical aspects referring to the mechanical tests, and how the equipment's of mechanicals tests are constituted. The main physical parameter taken into account was the level of traction, the same that determines the maximum capacity that handles the specimen when applying the axial force over a side of the material, producing a deformation and eventually a rupture of the material under study. So then, the measurement of this parameter contributes to determine the behavior and shape of the specimen. It was developed the structural design, electronic, and of the algorism of control (firmware). Then, it was done the selection of the mechanical elements, electrical, and electronics based on the design criteria. For the module of amplification of the analog signal emitted for the cell of charge of 1 kg, it was used an operational amplifierAD620. The analog signal is received for a development card STM32 Nucleus F446RE, having in its internal structure an analog-digital converter of 12 bits that allows to improve the precision of data reading. The linear displacement of the crosshead was made by the action of a Nema 17 stepper motor. The graphical interface presents a friendly and interactive environment that allows visualizing the measurable parameters of force, effort and deformation, the Stress-Time curve, store information and issue alert messages. The characterization of the sensor allows knowing the force applied in the traction study. Traction tests were carried out on vegetable fibers of pita, cabuya, toquilla straw, cinnamon, and lemon leaves allowing us to verify that the operation of the electromechanical prototype complies with the design conditions.

Key words: <ENGINEERING AND ELECTRONIC TECHNOLOGY>, <INSTRUMENTATION>, < TRACTION>, < MACHINE>, < EFFORT>, < DEFORMATION>, < SPECIMEN>, < VEGETAL FIBERS>.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las características mecánicas en materiales sólidos lleva muchos años en pleno auge de estudio, partiendo desde leyes establecidas por físicos hasta estándares definidos, lo que permite el desarrollo de ensayos mecánicos que deforman o dañan al material modificando su estructura interna o produciendo una fractura. Estos ensayos mecánicos se conocen como ensayos destructivos al intervenir variables físicas que alteran o modifican la estructura de un material.

El denominado Young's Modulus es un parámetro por el cual se caracteriza el comportamiento mecánico de un material sólido. Este parámetro define la relación entre la fuerza ejercida por unidad de área (stress) y la deformación (strain) como resultado de haber aplicado una fuerza controlada al material de estudio. La importancia de este parámetro proporciona aportes físico-técnicos a los científicos e investigadores el conocer cuan elástico es un material y en qué punto sufre la ruptura.

Por otro lado, el placer de selección de nuestros alimentos se basa entre otros por su color, olor, sabor, firmeza y tamaño a través de nuestros sentidos. Sin embargo, la producción, calidad y el valor nutricional pueden verse afectados en el campo, cosecha, postcosecha y comercialización. Particularmente, agentes externos afectan sin lugar a duda en diferentes etapas de la cadena productiva y de la comercialización, causando grandes pérdidas económicas.

En Ecuador, el sistema de producción se mantiene con grandes extensiones de cultivos en la costa, en contraste los cultivos se producen en lotes pequeños de 0,5 - 10 hectáreas en la sierra. Períodos marcados de alta pluviosidad incentivan la prevalencia de agentes patógenos, favoreciendo el desarrollo de enfermedades epidémicas. Sin embargo, existen controles constantes por parte de institutos botánicos para medir el impacto de estos agentes mediante el estudio de las características físicas de cada una de las especies de la población vegetal.

En el campo de la botánica, las plantas son objeto de estudio desde varios puntos de vista. Así pueden diferenciarse distintas líneas de investigación de acuerdo con los problemas de interés

requeridos para el estudio: desde las moléculas y las células pasando por las fibras, tejidos y órganos hasta los individuos, las poblaciones y las comunidades vegetales. Por estos motivos, la medición de las características mecánicas de los materiales define un aspecto importante en la evaluación objetiva de la calidad de las hojas en plantas, adicionando a muchos biólogos el enfoque de su estudio específicamente a las fibras y tejidos vegetales.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo tiene por objetivo describir aspectos conceptuales a considerar para el desarrollo del prototipo electromecánico que permite la práctica de ensayos de tracción horizontal aplicado en fibras vegetales mediante técnicas, metodologías y el uso de tecnología. El estudio de las propiedades físico-mecánicas de las fibras vegetales, es de gran importancia en el ámbito de la salud y vitalidad de la población vegetal. Por otro lado, para determinar las características mecánicas de los materiales se emplean experimentos de laboratorio que involucran ensayos químicos, físicos, mecánicos, entre otros. Cada uno de estos ensayos proporcionan parámetros de acuerdo al comportamiento del material de frente a las variables de estudio.

1.1 Ensayos de tracción en fibras vegetales

Son pruebas en las cuales una fibra vegetal extraída cuidadosamente es sometida a una carga axial, gradualmente creciente, hasta el punto en donde se produce la falla o ruptura de la fibra. En ensayos de tracción, la operación se realiza sujetando los extremos opuestos del material y separándolos, produciendo un alargamiento, cuyos resultados constituyen criterios de calidad. Los resultados de estos ensayos mecánicos aplicados en fibras vegetales permiten conocer las propiedades físico-mecánicas de estos elementos y contribuir a la obtención de resultados satisfactorios, según sea el caso de estudio. En el gráfico 1-1, se observa el comportamiento a la tracción de algunas fibras vegetales, las cuales se pueden clasificar en dos grupos diferentes de alto rendimiento: curauá, sisal y yute (gráfico 1-1(a)) debido a que presentan mayor resistencia a la tracción, y de bajo rendimiento: piasava y coco (gráfico 1-1(b)). (Tomczak, Sydenstricker and Satyanarayana, 2007, pp. 1710-1721; Alves Fidelis *et al.*, 2013, pp. 149-157).

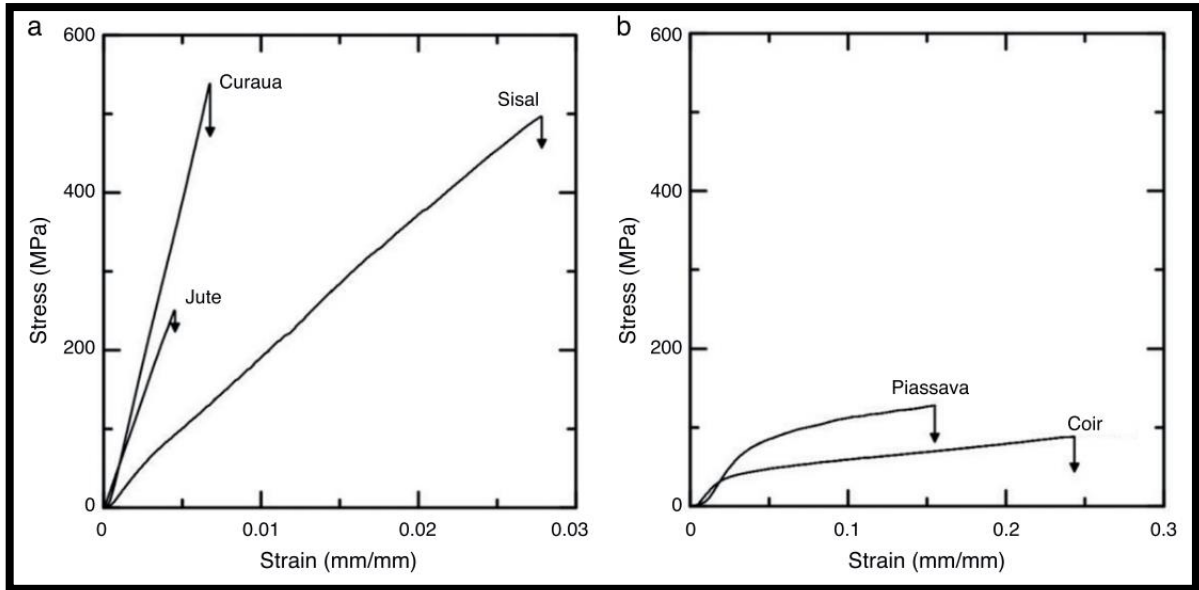


Gráfico 1-1: Curva de tensión típica frente a deformación de fibras vegetales.

Fuente: Alves Fidelis et al., 2013, p. 153.

1.2 Influencia del tamaño del espécimen en los ensayos mecánicos

En ensayos mecánicos, la relación en el aumento del área de la muestra influye en los resultados del estudio, siendo así, al incrementar o disminuir el área de la muestra, las características mecánicas disminuirán o aumentarán según sea el caso. Es decir, las características del tipo de fibra vegetal empleada en el estudio deben ser consideradas debido a que las propiedades de una fibra vegetal difieren del resto de la población (Tomczak, Sydenstricker y Satyanarayana, 2007, pp. 1710-1721 ; Kulkarni *et al.*, 1981, pp. 905-906).

1.3 Esfuerzo y deformación

El esfuerzo conocido como Stress, es una fuerza aplicada y distribuida sobre una superficie interna o externa de un cuerpo. La deformación es el efecto sufrido por un cuerpo al aplicar una carga axial controlada sobre la superficie interna o externa del mismo. En la figura 1-1, se considera una fuerza F aplicada al elemento rectangular. Se observa como el elemento aumenta en longitud en la dirección x y disminuye en relación con y y z . Por lo tanto, la nueva longitud en cualquier dirección

es igual a su longitud original más la deformación sufrida por someter el elemento de estudio a dicha fuerza (Young and Budynas, 1976, pp. 9-16).

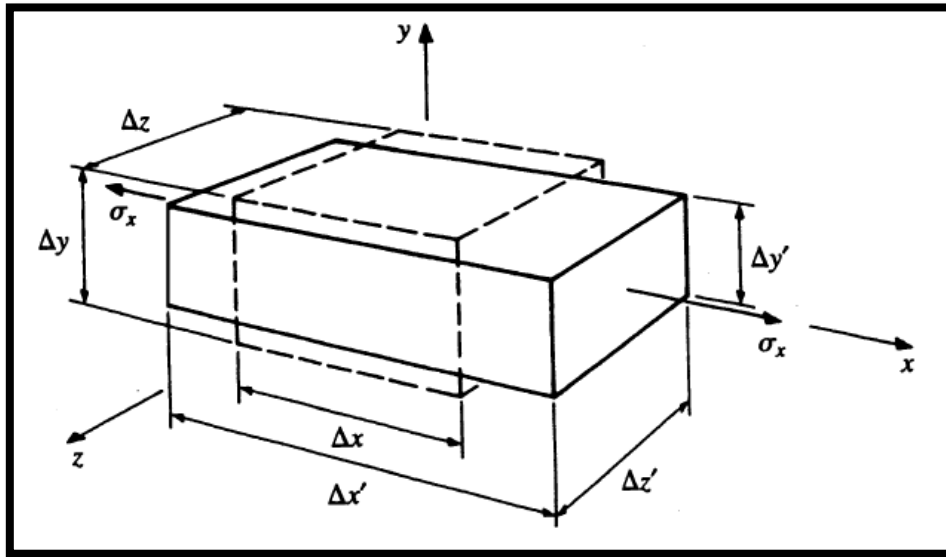


Figura 1-1: Deformación de un objeto rectangular atribuida a σ_x .
Fuente: Young and Budynas, 1976, p. 15.

Las pruebas de tensión-deformación proporcionan información básica sobre la rigidez, resistencia y ductilidad de un material. La forma de la curva resultante esfuerzo-deformación también puede revelar características del material como se muestra en la figura 2-1. Los materiales plásticos exhiben muy poca deformación antes de la fractura como se observa en la figura 2-1(c). En la figura 2-1(d), algunos polímeros presentan un esfuerzo de orientación significativo antes de la fractura (Budinski, 2002, pp. 42-43).

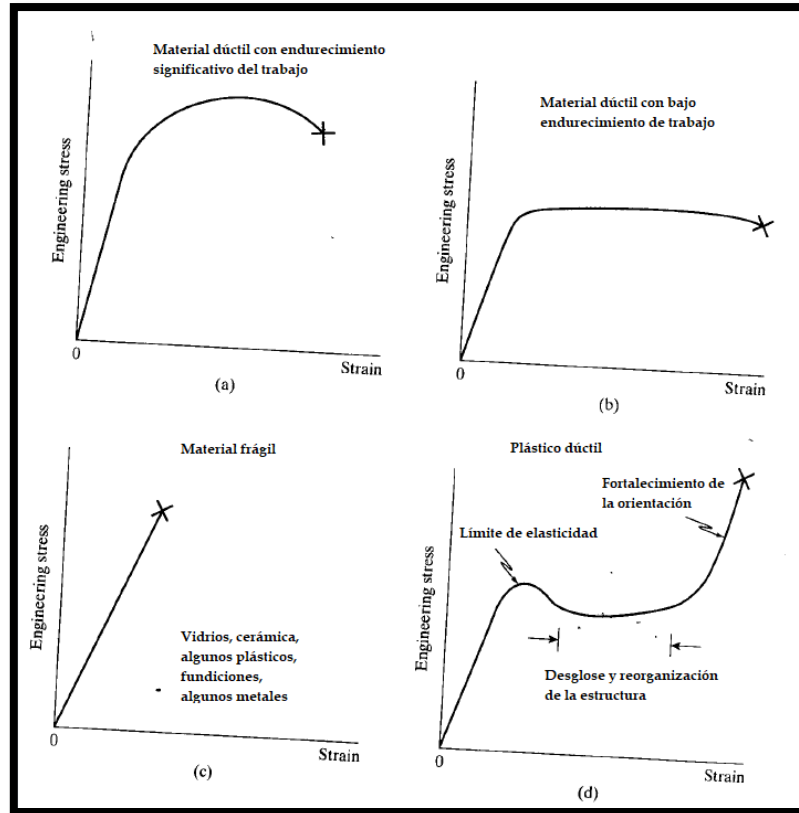


Figura 2-1: Ejemplos de respuesta esfuerzo-deformación de algunos materiales.

Fuente: Budinski, 2002, p. 45.

1.4 Magnitudes físicas en ensayos mecánicos

Tensión es la intensidad en un punto de un cuerpo de las fuerzas internas o componentes de dichas fuerzas actuando sobre un determinado plano donde se encuentra dicho punto (N/mm^2) (López-Elías *et al.*, 2011, p. 22).

Resistencia es la tensión máxima por lo cual un material es capaz de soportar (N/mm^2) pudiendo ser: tensión de compresión, de tracción o de esfuerzo cortante. La resistencia a compresión, tracción o corte se calcula a partir de la carga máxima durante un ensayo de compresión/tensión llevado a cabo hasta la rotura/corte o torsión, y del área de la sección transversal inicial o dimensiones originales de la sección transversal del espécimen (López-Elías *et al.*, 2011, p. 22).

Límite elástico es la tensión máxima en el cual un material puede soportar sin mostrar deformación unitaria permanente al eliminar completamente el origen de la tensión (N/mm^2) (López-Elías *et al.*, 2011, p. 22).

Punto de rotura es el punto de la curva tensión-deformación unitaria en donde se produce una rotura en la macroestructura del espécimen (N , m) o (N/mm^2 , m/m) (López-Elías *et al.*, 2011, p. 22).

El módulo de Young (E) establece la relación tensión/deformación unitaria por debajo del límite proporcional o elástico (N/mm^2 : m/m). Dicho límite proporcional es la tensión máxima en el cual un cuerpo es capaz de soportar sin mostrar desviación de la proporcionalidad de la tensión respecto a la deformación unitaria (porción lineal en la curva tensión-deformación unitaria, o fuerza-deformación) (Young and Budynas, 1976, pp. 9-16; Marrett and Peacock, 1999, pp. 1057-1063; López-Elías *et al.*, 2011, pp. 22-23).

En el gráfico 2-1, se observa la curva tensión-deformación, considerando el cambio de longitud, como resultado al aplicar una fuerza **F** a una pieza unidimensional donde **E** es módulo de elasticidad del material, denominado **módulo de Young**. σ es el esfuerzo axial y ϵ es la deformación unitaria (Young and Budynas, 1976, pp. 14-16).

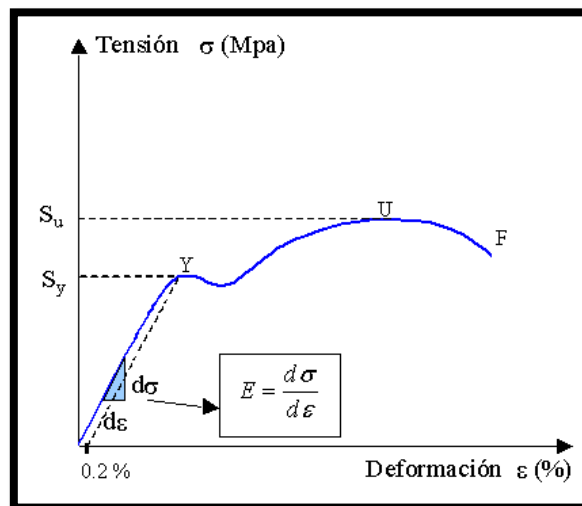


Gráfico 2-1: Curva Esfuerzo-Deformación.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

1.5 Máquinas comerciales para pruebas de ensayos mecánicos

Son herramientas fundamentales para el desarrollo de ensayos mecánicos en materiales sólidos. Se puede diferenciar dos tipos de máquinas universales en función al rango de la fuerza aplicada sobre los materiales, hidráulicas y electromecánicas. Las máquinas electromecánicas aplican fuerzas de hasta 600 kN, mientras las máquinas hidráulicas permiten cargas de hasta 4500 kN. Las máquinas comerciales, hidráulicas y electromecánicas, son implementadas basándose en estándares previamente establecidos, permitiendo el desarrollo de las pruebas de tracción en distintos tipos de materiales sólidos. Los modelos universales se clasifican según los requerimientos de diseño y diferentes parámetros de aplicación. En la tabla 1-1, se resumen las características de algunos modelos comerciales (Davis, 2004, pp. 65-84).

Tabla 1-1: Características de Máquinas Comerciales.

MARCA Y MODELO	Capacidad de Fuerza	Tipo de Prueba	Alimentación	Precisión	Velocidad de ensayo
SHIMADZU SERIES AGS-X	20 a 300 kN	Tensión, Compresión	AC	Alta precisión \pm 0.5%	0.001 a 1000 mm/min
INSTRON SERIES 3300	0.5 a 100 kN	Tracción, Compresión	AC		0.0005 a 1000 mm/min
MEM-101	50 a 300 kN	Tracción, Compresión	AC 220 V	0.5%	0.1 a 200 mm/min
SERIES FMS	500 N, 1 kN, 2,5 kN, 5 kN	Tracción, Compresión, Fatiga, Flexión, Cizalladura, Deformación, Coeficiente de Fricción.	AC	Mejor a 0.1%	0.02 a 1270 mm/min

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

1.6 Estructura de una máquina para ensayos mecánicos

Se encuentra conformada por varios tipos de dispositivos utilizados para aplicar cargas de tracción controladas sobre el espécimen. Las máquinas de ensayos mecánicos son capaces de medir e indicar la fuerza aplicada en libras-fuerza (lbf), kilogramo-fuerza (kgf) o newtons (N) con gran precisión. Uno de los mecanismos esenciales que conforman una máquina de ensayos mecánicos es un medio para medir y equilibrar la carga aplicada, el cual se denomina cruceta, siendo la parte que se desplaza de forma vertical u horizontal, dependiendo del diseño. El movimiento de la cruceta se realiza mediante un mecanismo de desplazamiento lineal en un solo eje, los cuales pueden ser por husillo o por correa, accionado por la intervención de actuadores electromecánicos, motores paso a paso, necesarios para proporcionar una velocidad de desplazamiento adecuada. Los motores paso a paso son capaces de definir trayectorias lineales con alta precisión. Por otro lado, las máquinas cuentan con módulos de sensores que permitan medir magnitudes físicas de tensión, compresión, elongación, dependiendo el diseño y la aplicación a la cual se encuentra dirigida la máquina. El uso de mordazas o agarres adecuados permiten el acople del espécimen entre la cruceta y la base fija. A menudo, resultados de prueba y error resolverán los problemas de agarre. En la figura 3-1, se observa la estructura interna de una máquina para realizar ensayos de tensión vertical (Budinski, 2002, pp. 38-41; Davis, 2004, pp. 65-84).

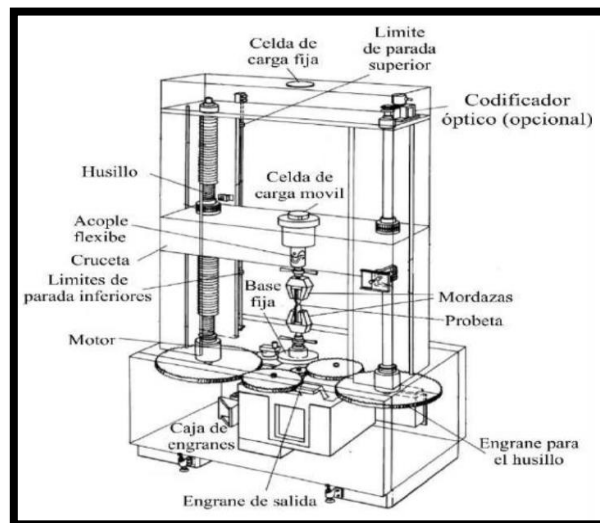


Figura 3-1: Estructura de una máquina para ensayos mecánicos.

Fuente: Davis, 2004, p. 67.

1.7 Sensores para medición de deformaciones

El principio piezorresistivo y el efecto piezoeléctrico es utilizado por varios tipos de sensores para medir fuerza, deformación, presión, entre otros parámetros físicos. Los sensores basados en el principio piezorresistivo logran una variación de la resistencia de un conductor o semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. El esfuerzo mecánico aplicado no debe llevar al sensor fuera del margen elástico de deformaciones y su medida solo será correcta si es transmitida totalmente al sensor. Por otro lado, el efecto piezoeléctrico considera la aparición de una polarización eléctrica en un material al deformarse bajo la acción de un esfuerzo (Pallás, 2005, pp. 60-64, 288).

1.7.1 Galgas extensiométricas

Son transductores pasivos mediante el cual permiten medir cambios relativos en la longitud basados en la variación de la resistencia eléctrica. Las terminales de la galga se encuentran conectadas a un circuito eléctrico capaz de medir los cambios en la resistencia correspondiente a la tensión. El tamaño, la forma y el material de las galgas influyen en la medición, considerando una mayor resistencia a la fatiga las galgas de mayor tamaño. El proceso de instalación de las galgas consiste en su colocación sobre el espécimen de manera que la estructura isostática atraviese la parte activa de la banda extensiométrica como se observa en la figura 4-1. Los transductores a base de galgas extensiométricas, normalmente, emplean 4 galgas extensiométricas conectadas eléctricamente en un circuito conocido como puente de Wheatstone, el cual es un circuito utilizado para detectar cambios pequeños de la resistencia eléctrica estática o dinámica. La tensión de salida del puente de Wheatstone se expresa en milivoltios de salida por voltaje de entrada. El uso de múltiples medidores de galgas conectadas al puente, permite compensar los efectos no deseados, como componentes de temperatura y deformaciones específicas (Pallás, 2005, p. 60; Alzate, Montes y Silva, 2007, pp. 7-11).

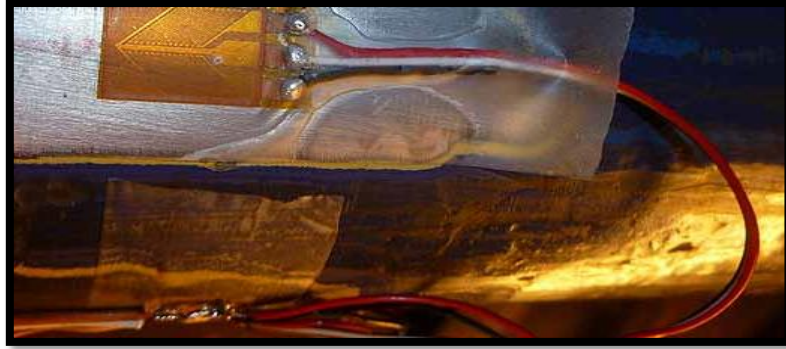


Figura 4-1: Galga extensiométrica.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

1.7.2 Celdas de carga

Son arreglos de galgas extensiométricas utilizados para la medición de fuerzas de tracción, de compresión y peso, las cuales son colocadas y orientadas de forma adecuada, permitiendo conocer la fuerza aplicada sobre un cuerpo como se observa en la figura 5-1. Si se considera un cuerpo cúbico en donde se colocan 4 galgas, una sobre cada cara perpendicular a la superficie de apoyo del cuerpo, se obtendrá un montaje de tal forma, en la cual dos galgas midan el cambio longitudinal del cuerpo en dirección normal a la superficie y las otras dos galgas restantes midan el cambio en la dirección tangencial al mismo cuerpo (Corona, Abarca y Mares, 2014, pp. 216-218).

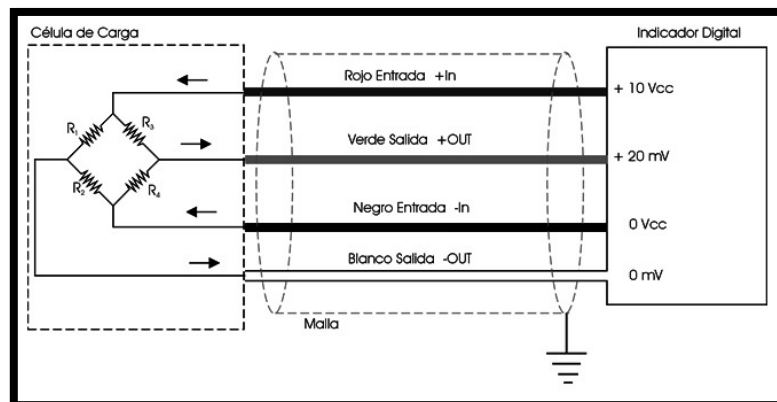


Figura 5-1: Esquema de conexión de una celda de carga.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

1.8 Actuadores

Son dispositivos capaces de generar una fuerza donde se induce un cambio en la posición, velocidad o estado sobre un elemento mecánico terminal mediante el principio de transformación de energía. Los actuadores se dividen en neumáticos, hidráulico y eléctricos. Los actuadores neumáticos a través de la energía acumulada del aire comprimido generan un trabajo mecánico rectilíneo o rotatorio. Los actuadores hidráulicos transforman la energía acumulada por un fluido en energía mecánica lineal o rotacional. Los actuadores eléctricos transforman la energía eléctrica en trabajo mecánico rotacional o lineal, cuyo funcionamiento está basado en el principio de inducción electromagnética (Corona, Abarca y Mares, 2014, pp. 25-28).

1.8.1 Motores paso a paso

Son actuadores electromecánicos rotativos que transforman una serie de impulsos eléctricos en desplazamiento mecánico angular, lo que permite girar una cantidad considerada de grados dependiendo de los pulsos de control. La cantidad de rotación es directamente proporcional al número de pulsos y la velocidad angular es relativa a la frecuencia de los pulsos. Entre las principales ventajas que presentan estos actuadores se encuentra en su capacidad de precisión y repetitividad en cuanto a su posicionamiento y alta confiabilidad. En la figura 6-1, se observa un motor paso a paso Nema 17 (Jennings, 2005, pp. 47-58).g

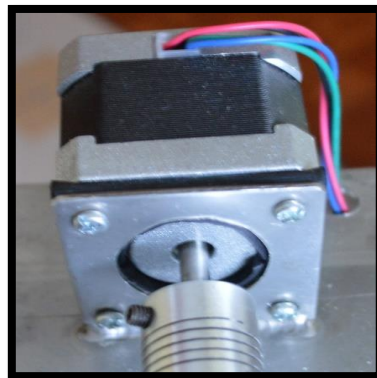


Figura 6-1: Motor paso a paso.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

1.9 Microcontroladores

Son circuitos integrados programables a una escala de integración muy amplia, las cuales contienen internamente una Unidad Central de Procesamiento, memorias, interrupciones y periféricos, los cuales componen los recursos necesarios para el desarrollo de aplicaciones específicas, y comúnmente realizan funciones de control interactuando con el mundo real para supervisar condiciones a través de sensores, y en respuesta, accionar dispositivos por medio de actuadores (Espinosa, 2012, pp. 15-30 ; Perles, 2017, p. 206).

1.9.1 AVR

Son microcontroladores que incluyen un procesador RISC de 8 bits, una arquitectura del tipo Harvard y sus operaciones se realizan bajo un esquema Registro-Registro. En la tabla 2-1, se observan las características de los microcontroladores ATmega8 y ATmega16 (Espinosa, 2012, pp. 35-70).

Tabla 2-1: Características de los microcontroladores ATmega8 y ATmega16.

Característica	ATmega8	ATmega16
Memoria de código	8 kbyte memoria flash	16 kbyte memoria flash
Memoria de datos	1 kbyte SRAM	512 bytes EEPROM
Terminales E/S	23	32
Frecuencia máxima de trabajo	16 MHz	
Voltaje de alimentación	2.7 a 5.5 V	
Temporizador	2 de 8 bits	1 de 16 bits
Canales PWM	3	4
Fuentes de interrupción	19	21
Interrupciones externas	2	3
Canales ADC	8 de 10 bits	
Reloj de tiempo real		
Interfaz SPI Maestro/Esclavo		
Transmisor/Receptor Universal Síncrono/Asíncrono (USART)		

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

1.9.2 STM32 SERIES F4

Es un microprocesador de la empresa ST, el cual incorpora la arquitectura ARM Cortex-M4, ofreciendo mayor rendimiento dedicado a aplicaciones típicas de microcontroladores. Entre las características destacables indica una unidad de coma flotante, posee una frecuencia de reloj de 168 MHz, 1 MB de memoria ROM, 196 kB de memoria RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMERS, 3 ADCs, 2 DACs. En la figura 7-1, se presenta la arquitectura general interna de una tarjeta de desarrollo STM32 Series F4 (Perles, 2017, pp. 206-270).

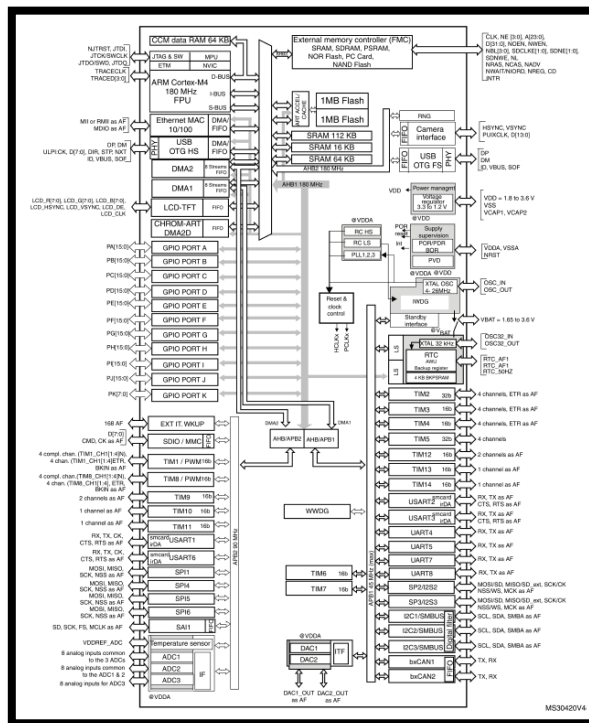


Figura 7-1: Arquitectura del microcontrolador. STM32 SERIES F4.

Fuente: Perles, 2017, p. 221.

1.10 Sistemas Embebidos

Son circuitos electrónicos digitales con recursos limitados capaces de realizar operaciones de computación en tiempo real cumpliendo una tarea en específico. Su arquitectura consiste en un microprocesador dedicado capaz de ejecutar instrucciones a una determinada velocidad, controlada por una señal de reloj. Considerando la arquitectura interna del microprocesador del sistema embebido, los recursos internos, periféricos y una frecuencia de operación, definen la potencia de procesamiento. El programa que ejecuta un sistema embebido es elaborado en lenguajes de programación como el ensamblador, ANSI C, C++ o Basic. Algunos sistemas embebidos son capaces de ejecutar sistemas operativos limitados RTOS (Real Time Operating Systems), que le permiten al procesador ejecutar diversas tareas asignándoles una prioridad y un orden de ejecución. Una de las características más importantes de todo sistema embebido es su bajo consumo de energía. Las aplicaciones obligan a los sistemas embebidos, a ser capaces de encontrarse conectados a ambientes físicos, requiriendo un diseño capaz de satisfacer las necesidades de aplicación mejorando el tamaño, costo, consumo, confiabilidad y rendimiento. Una tarjeta de desarrollo es un sistema embebido, la cual presenta un sistema computarizado completo que contiene en su interior un microprocesador, unidades de memoria, unidades de entrada-salida y periféricos. En la figura 8-1, se observa una tarjeta Arduino Mega 2560 que cuenta con un microprocesador ATmega2560, memoria flash 256 kB, velocidad de reloj de 16 MHz, SRAM de 8kB, EEPROM de 4 kB, 54 pines digitales de entrada-salida y 16 pines de entrada analógicos (Salas Arriarán, 2015, pp. 38-39).

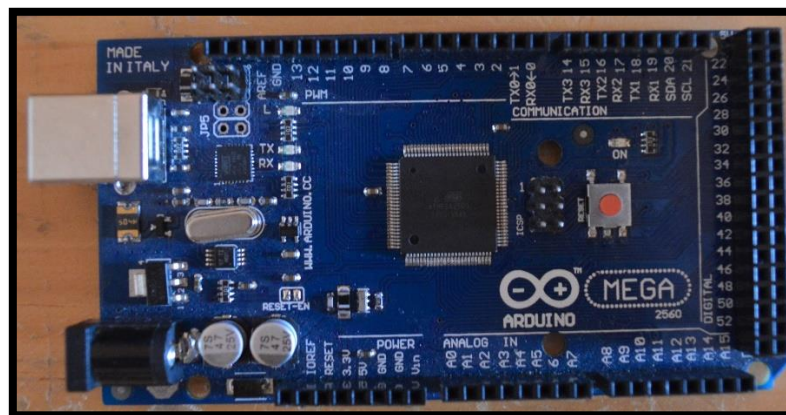


Figura 8-1: Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

1.11 Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

Es un software informático que crea un medio eficaz de comunicación entre los usuarios y la computadora como se presenta en la figura 9-1. El diseño de la interfaz gráfica de usuario es un proceso iterativo, en el cual cada etapa del diseño de la interfaz gráfica ocurre varias veces, en las que se elabora y refina la información desarrollada en la etapa anterior. El proceso de diseño comienza identificando los requerimientos del usuario, la tarea y el ambiente. Por otro lado, se define un conjunto de objetos y acciones de la interfaz, lo cual forma la base para crear una plantilla que ilustra el diseño gráfico y la colocación de herramientas interactivas específicas de aspectos mayores o menores en la interfaz (Pressman, 2012, pp. 265-266).

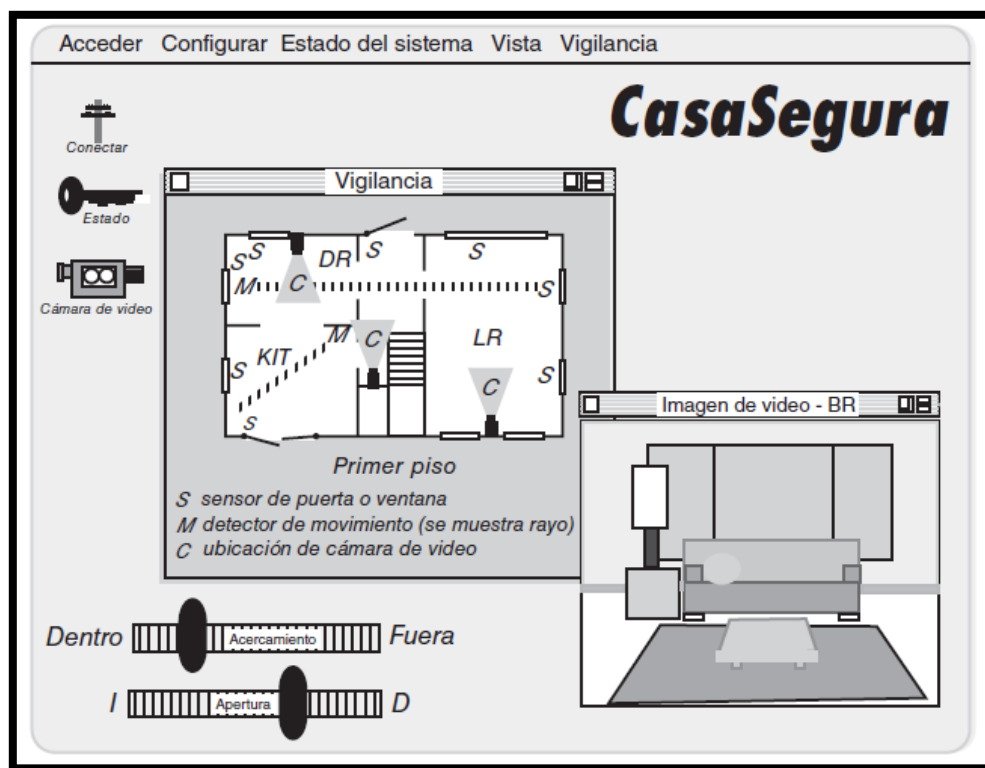


Figura 9-1: Distribución preliminar de una interfaz de usuario.

Fuente: Pressman, 2012, p. 281.

1.12 Acumuladores electroquímicos

También denominados baterías, son dispositivos que convierten la energía química obtenida de una reacción química en energía eléctrica. Una batería está compuesta por dos celdas galvánicas conectadas por un conductor metálico e inmersas en un mismo electrolito como se observa en la figura 10-1. Al estar conectados por medio del conductor metálico los electrones se transfieren de un electrodo a otro permitiendo que se produzca trabajo eléctrico. Cada celda galvánica incluye tres componentes: un electrodo negativo, un electrodo positivo y un separador. La clasificación de las baterías se da en dos categorías: las primarias o no recargables, las cuales se descartan luego de su vida útil, y las secundarias o recargables, que se pueden cargar al invertirse el flujo de corriente a través de los electrodos (Bockris, 2019, pp. 1333-1339; Alonso-Vante, 2005, pp. 124-125).

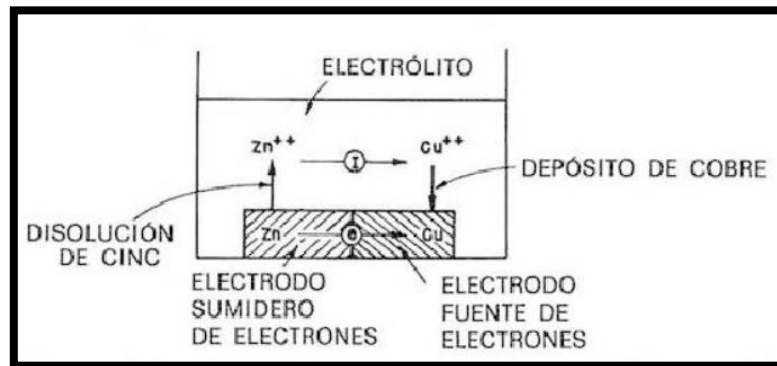


Figura 10-1: Estructura de un acumulador electroquímico.

Fuente: Bockris, 2019, p. 1339.

Los acumuladores electroquímicos se encuentran disponibles comercialmente a partir de diferentes tecnologías. Son empleados en dispositivos, máquinas, vehículos según los requerimientos de aplicación. La tabla 3-1, resume las características de los tipos más comunes de acumuladores electroquímicos.

Tabla 3-1: Características de acumuladores electroquímicos recargables más comunes.

	Níquel-cadmio	Níquel-metal hidruro	Plomo-ácido sellada	Cobalto de Ion de Litio	Polímero de Litio	Fosfato de Ion de Litio
Densidad de energía gravimétrica (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	150-180	100-135	90-120
Resistencia Interna (mΩ)	100-200, Paquete 6V	200-300, Paquete 6V	<100, Paquete 12V	150-300, Paquete 100-130 por celda	25-75 por celda	25-50 por celda
Ciclo de Vida (a 80% de capacidad inicial)	1500	300-500	200-300	300-500	Mejor que 300-500	>1000 en condiciones de laboratorio
Tiempo de carga rápida	1 h	2-4 h	8-16 h	1.5-3 h	1 h o menos	
Tolerancia de sobrecarga	Moderada	Baja	Alta	Baja, no puede tolerar la carga de goteo		
Auto descarga/Mes (temperatura ambiente)	20%	30%	5%	<10%		
Voltaje de celda (promedio nominal)	1.25V	1.25V	2V	3.6V 3.7V	3.6V 3.8V	3.3V
Corriente de carga (pico mejor resultado)	20C 1C	5C 0.5C o menor	5C 0.2C	<3C 1C o menor	>30C 10C o menor	
Temperatura de funcionamiento (solo descarga)	-40 hasta 60°C	-20 hasta 60°C				
Requisito de mantenimiento	30 a 60 días	60 a 90 días	3 a 6 meses	No requerido		
Seguridad	Térmicamente estable, fusible recomendado		Térmicamente estable	Circuito de protección obligatorio, estable hasta 150°C	Circuito de protección obligatorio, estable hasta 250°C	
Uso comercial desde	1950	1990	1970	1991	1996	2006
Toxicidad	Altamente tóxico, nocivo para el medio ambiente	Toxicidad relativamente baja, debe ser reciclado	Cables y ácidos tóxicos, nocivo para el medio ambiente	Baja toxicidad, se puede desechar en pequeñas cantidades		

Fuente: Alonso-Vante, 2005, p. 148.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta el diseño e implementación de hardware y software estableciendo un esquema secuencial para el desarrollo del prototipo electromecánico como se observa en la figura 1-2. Se describe y justifica cada una de las etapas y componentes electrónicos, eléctricos y requerimientos técnicos que debe cumplir el prototipo.

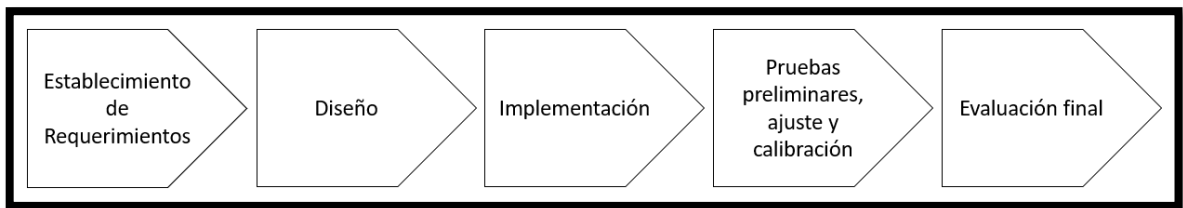


Figura 1-2. Estructura secuencial del diseño e implementación del prototipo.

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.1 Requerimientos del prototipo

Se plantea los siguientes requerimientos que debe cumplir el prototipo electromecánico considerando el análisis teórico establecido en el capítulo anterior.

Tabla 1-2. Descripción de los requerimientos técnicos del prototipo.

Descripción	Parámetros
Tipo de ensayo mecánico	Tracción
Fuerza máxima aplicada	< 1 kgf
Espacio mínimo de ensayo mecánico	83.26 mm
Espacio máximo de ensayo mecánico	180.80 mm
Interfaz Gráfica	Si
Duración de funcionamiento del prototipo	> 1 hora
Almacenamiento de Información	Si
Prototipo Portable	Si
Fuente de energía	Baterías recargables
Duración de baterías	> 1 hora en funcionamiento continuo

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.1.1 *Concepción general del diseño de la arquitectura del prototipo*

La concepción general se presenta en la figura 2-2, en donde se observa los módulos empleados para el desarrollo del prototipo electromecánico que permita el desarrollo de ensayos mecánicos de tracción. El esquema general se encuentra conformado por 2 etapas fundamentales. En primer lugar, se realiza el diseño de la estructura mecánica que aporta parámetros para la selección de los componentes electromecánicos, eléctricos y electrónicos. La segunda etapa comprende el desarrollo del diseño electrónico, así como el diseño del algoritmo de control (firmware). En el desarrollo del modelo electrónico, se emplea un módulo de adquisición de datos, el cual adquiere y acondiciona la señal analógica emitida por la celda de carga permitiendo la lectura de la fuerza aplicada al objeto de estudio, obteniendo como resultado el parámetro de deformación que sufre dicho objeto al ejercer sobre él una carga axial. La fuerza o carga axial es aplicada por un motor paso a paso. Los datos transmitidos, por el módulo de adquisición de datos, son adquiridos por una tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re que cuenta con dos convertidores analógicos-digital (ADC) internos de 12 bits mejorando la resolución de lectura analógica. La visualización del proceso en ejecución se logra mediante el desarrollo de una interfaz gráfica diseñada en computadora, la cual presenta en pantalla herramientas y parámetros de interés en el desarrollo de estudios mecánicos de tracción.

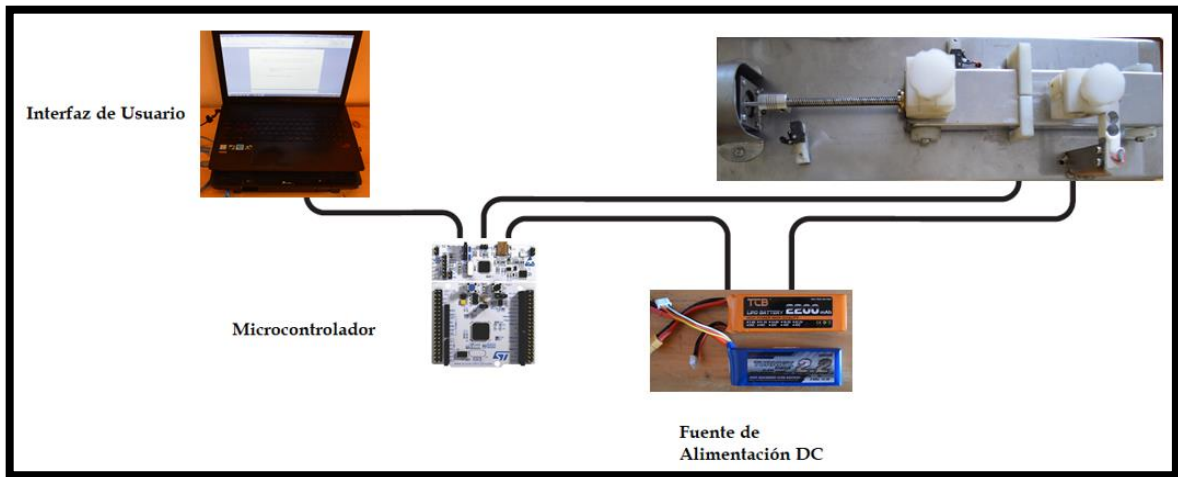


Figura 2-2. Diagrama de la concepción general del prototipo.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.2 Diseño del prototipo electromecánico

Una vez definido los requerimientos técnicos y la concepción general de las etapas que conforman el prototipo electromecánico, se proceden a realizar el diseño mecánico, electrónico y firmware considerando los parámetros de diseño.

2.2.1 *Diseño de la estructura mecánica*

El diseño del sistema mecánico se presenta en la figura 3-2, el cual se basa en un mecanismo de desplazamiento lineal en un solo eje, conformado por un tornillo trapezoidal que rota por la acción de un actuador generando el desplazamiento horizontal de la cruzeta. Bajo los criterios de diseño previamente establecidos, se diseña el marco estructural, el cual se encuentra conformado por piezas metálicas de acero inoxidable. La base tiene dimensiones de 400.00 x 150.00 mm x 15.00 mm, largo, ancho y alto, respectivamente. La cruzeta se encuentra diseñada con forma de C, tiene dimensiones de 248.50 x 50.00 mm x 27.50 mm. Se diseñan dos mordazas elaboradas en nylon, la mordaza fija cuenta con dimensiones de 25.00 x 30.00 mm que se acopla a la celda de carga y la mordaza móvil de 25.00 x 40.00 mm que se encuentra acoplada a la cruzeta. El desplazamiento

horizontal de la cruceta se logra por la iteración del movimiento angular de un tornillo trapezoidal de acero inoxidable y acero cromado con dimensiones de 8.00 mm de diámetro, una longitud de 300 mm y 2 mm por paso. Para la transferencia de movimiento entre el eje del motor paso a paso y el tornillo se utiliza un acople flexible de aluminio con una longitud de 25 mm y diámetros internos de 5 y 8 mm, los cuales se acoplan a los ejes del motor y al tornillo, respectivamente. El desplazamiento de la cruceta se obtiene con la relación de transmisión entre el valor numérico del paso del tornillo y el valor de giro del actuador. De acuerdo con esta relación, cuando el motor gire una vuelta completa, la cruceta se desplazará $18 \mu\text{m}$ ($x = \frac{1.8 \cdot 0.002}{200}$).

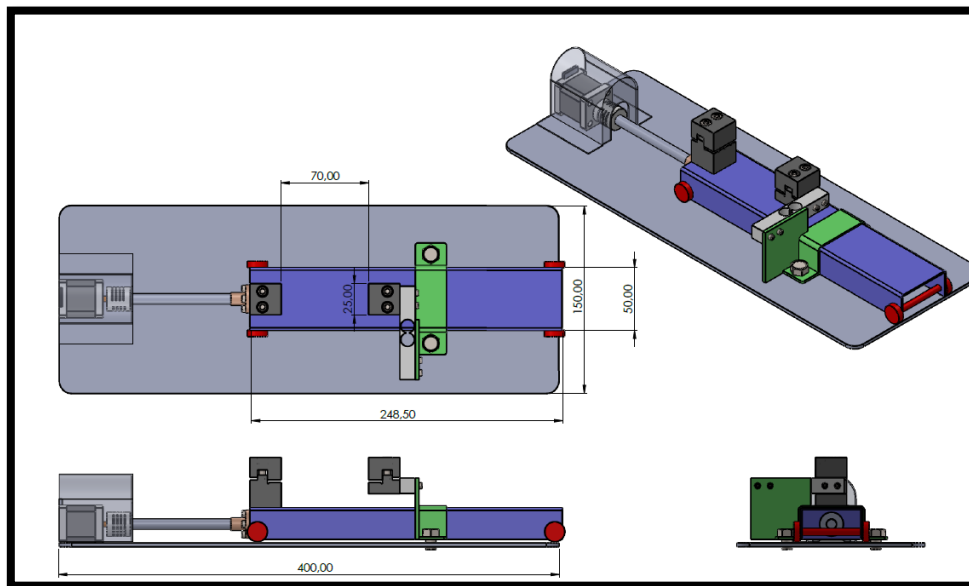


Figura 3-2. Diseño del sistema mecánico estructural para el prototipo electromecánico.

Realizado por: Sacaquirín Alexander, 2019.

2.2.1.1 Análisis de la fuerza de tracción y selección del motor paso a paso

Cumpliendo el requerimiento planteado de la fuerza máxima aplicada $< 1 \text{ kgf}$, el cual es un parámetro importante para elegir el adecuado actuador, se realiza un análisis de las fuerzas que interactúan en el desplazamiento horizontal de la cruceta. En la figura 4-2, se observa el esquema que representa la interacción de las fuerzas. El motor paso a paso para desplazar la cruceta de

izquierda a derecha realiza un giro que mueve el tornillo trapezoidal con un Torque T_1 y genera una fuerza F_1 que desplaza la carga (cruceta).

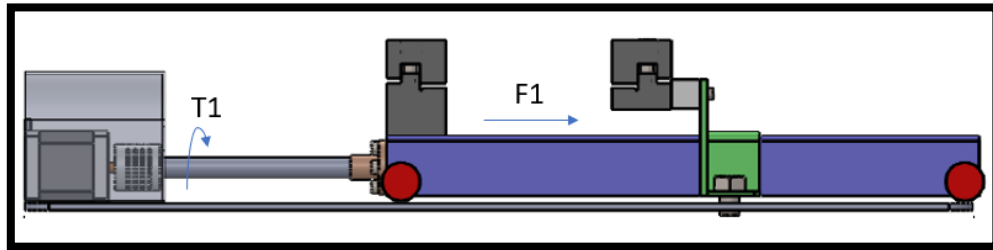


Figura 4-2. Diagrama de fuerzas que interactúan en el desplazamiento de la cruceta.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Considerando el sistema en equilibrio y que la fuerza axial, necesaria para ejercer el desplazamiento de la carga, actúa sobre un tornillo de rosca cuadrada con rosca simple se tiene las siguientes ecuaciones (1-2) para elevar la carga y (2-2) bajar la carga (Budynas y Nisbett, 2008, p. 403):

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec(\alpha)}{\pi d_m - f l \sec(\alpha)} \right) \quad (1-2)$$

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m \sec(\alpha) - l}{\pi d_m + f l \sec(\alpha)} \right) \quad (2-2)$$

Donde se tiene la siguiente tabla 2-2, con los parámetros para calcular el torque correspondiente a la dirección de desplazamiento de la cruceta.

Tabla 2-2: Parámetros para la selección del actuador electromecánico.

Parámetro	Valor
Coefficiente de fricción (f)	0.25
Diámetro medio del tronillo (d_m)	8 mm
Ángulo de rosca (α)	30°
Torque (T_R)	Elevar carga: 14.78998 N-mm (0.15076 kg-cm)
	Bajar carga: 8.02074 N-mm (0.08176 kg-cm)
Fuerza axial (F)	1 kgf (9.81 N)
Avance del tornillo (l)	2 mm

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Por lo tanto, considerando las opciones disponibles en el mercado de motores paso a paso, el actuador que cumple con la especificación de torque requerido para desplazar la carga es el motor paso a paso Nema 17 Bipolar de la empresa Pololu como se observa en la figura 5-2, el cual cuenta con las siguientes características técnicas:

- Dimensiones: 42 * 38 mm
- Dimensión del eje: 8 mm
- Corriente: 1.7 A/bobina
- Voltaje: 2.8 V
- Par motor: 3.7 kg-cm
- Número de pasos por vuelta: 200
- Resistencia: 1.65 Ohm
- Inductancia por fase: 3.2 mH
- Numero de cables: 4

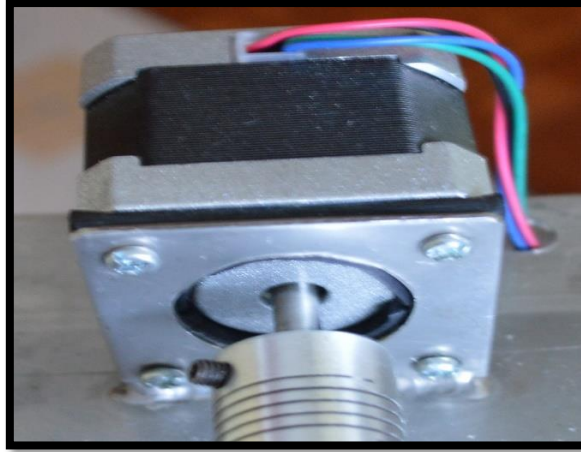


Figura 5-2: Motor paso a paso Nema 17.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.2.2 *Diseño de la estructura electrónica y eléctrica*

Se describe el diseño electrónico y eléctrico que se realiza para el funcionamiento del prototipo electromecánico. En la figura 6-2, se presenta el diagrama de bloques con cada uno de los elementos electrónicos y eléctricos necesarios para controlar el funcionamiento del prototipo. Las líneas trazadas de color rojo indican la transferencia de datos, y las líneas negras distribuyen el suministro de energía. Los bloques trazados de color rojo representan los diseños electrónicos a desarrollar. El diseño electrónico se encuentra conformado por un circuito electrónico para acondicionamiento, amplificación y filtrado de la señal emitida por el sensor, así como también, cuenta con un driver a4988, el cual es el encargado de controlar la corriente para regular el giro, velocidad y torque del actuador. Por otro lado, el diseño eléctrico se encuentra conformado por una fuente de alimentación y un circuito electrónico que se encarga de suministrar la tensión simétrica necesaria a los componentes electrónicos y electromecánicos. La celda de carga se alimenta a 3.3 V, voltaje referenciado de la tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re. Finalmente, la tarjeta de desarrollo cuenta con 2 convertidores analógico-digital de 12 bits, la cual se encarga de digitalizar las señales recibidas por el circuito electrónico de adquisición de datos, enviar y recibir datos hacia una interfaz gráfica y comandar las acciones del actuador.

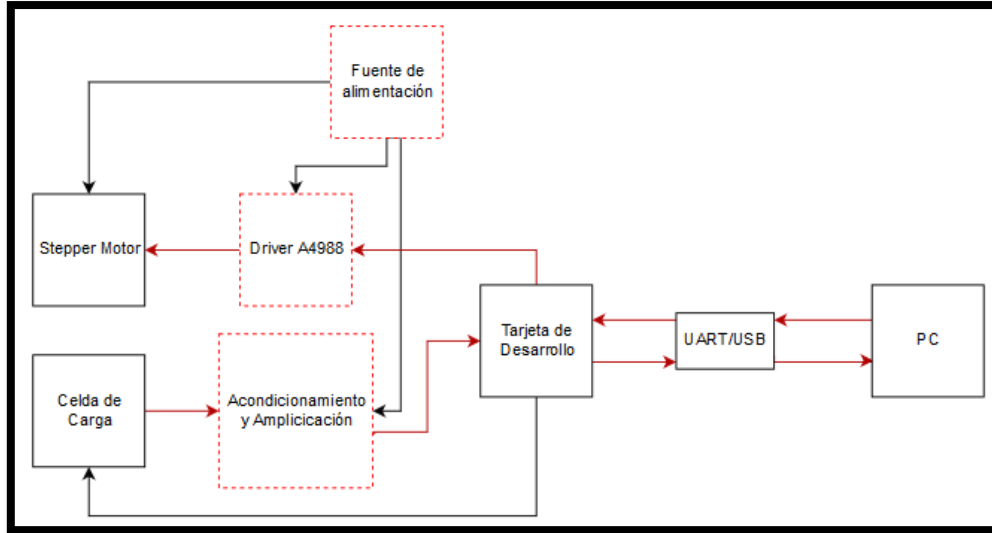


Figura 6-2. Diagrama de bloques del prototipo.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3 Implementación de los módulos electrónicos y eléctricos

En este acápite, se detallan las principales características de cada uno de los dispositivos electrónicos y eléctricos necesarias para la construcción del prototipo electromecánico.

2.3.1 Tarjetas de desarrollo

Basados en tecnologías comerciales de gran disponibilidad y muy útiles para aplicaciones electrónicas específicas, para el presente prototipo se utiliza como sistema de adquisición y procesamiento de datos la tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re.

2.3.1.1 Tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re

Las tarjetas de desarrollo Núcleo STM32 cumplen con las características requeridas por el prototipo. Estas tarjetas proporcionan una forma asequible y flexible con nuevos conceptos para

mejorar las aplicaciones, eligiendo entre las diversas combinaciones de rendimiento, consumo de energía y características. Las placas Núcleo STM32 integran el depurador y programador ST-LINK/V2-1, además de tener acceso directo a los recursos en línea de Arm Mbed. El término Mbed, consolidado por la empresa ARM, comprende todo el entorno del internet de las cosas (IoT) centrada en los procesadores de núcleo Cortex M7. La característica más sobresaliente de la tarjeta es contar con dos conversores internos analógico-digital de 12 bits proporcionando una mejora considerable en la resolución de adquisición de señales analógicas. La resolución de error se expresa como múltiplos de 1 LSB (Bit Menos Significativo o Least Significant Bit). El error en términos de voltaje se calcula multiplicando el número de LSB por el voltaje correspondiente a 1 LSB $\left(1 \text{ LSB} = \frac{+V_{ref}}{2^n} = \frac{3.3}{4096} = 805.6 \mu V\right)$, minimizando el error de lectura de la señal analógica. Particularmente, la tarjeta presenta la disponibilidad de hacer uso de un compilador en línea gratuito denominado Mbed, así como también, tener acceso a una biblioteca de programas y manuales. En la tabla 3-2, se observa la comparación entre las características más relevantes de algunas tarjetas de desarrollo STM32.

Tabla 3-2. Características técnicas de la tarjeta de desarrollo STM32.

Descripción	STM32 Núcleo F446RE	STM32 DISCO-F746NG	STM32 Núcleo F103RBT
Precio \$ (USA)	14.00	54.00	10.32
Procesador	Arm Cortex-M4	Arm Cortex-M7	Arm Cortex-M3
Voltaje (v)	1.7 / 3.6	1.7 / 3.6	2.0 / 3.6
Frecuencia de operación (Mhz)	180	216	72
Entradas/Salidas analógicas	16/2	24/2	16
FLASH (kB)	512	1024	128
RAM (kB)	128	320	20
ADC (canales de 12-bit)	16 pines	24 pines	16 pines
USB	Serial	Serial	Serial

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Para el módulo de adquisición y procesamiento de datos, así como también para el diseño del algoritmo de control, se opta por una tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re como se observa en la figura 7-2, por su alta velocidad de operación, la capacidad de almacenamiento de la memoria FLASH, además de contar con 16 canales de entradas analógicas y 2 convertidores analógico-digitales internos de 12 bits.



Figura 7-2. Tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446RE.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.2 Sensor de Fuerza: Celda de carga 1 kg

El sensor que se utiliza para detectar la fuerza aplicada a las fibras vegetales es una celda de carga de 1 kg comercial modelo YZC-133 como se muestra en la figura 8-2. Esta celda de carga permite medir la fuerza al aplicar cargas axiales iguales o menores a 1 kN en uno de sus extremos como lo indica el fabricante. Las características más relevantes de este sensor son las siguientes:

- Capacidad: 1.0 kg
- Salida nominal: 1.0 mV/V
- Error: 0.15 mV/V
- Repetitividad: 0.03% FS
- Impedancia de entrada: $1066 \pm 20\% \Omega$
- Impedancia de salida: $1000 \pm 20\% \Omega$

- Voltaje de alimentación: 3 – 14 VDC
- Temperatura de operación recomendada: -20° - +65° C
- Material: aleación de aluminio
- Grado de protección: IP65
- Tamaño total: 3.15 * 0.50 * 0.50 pulgadas

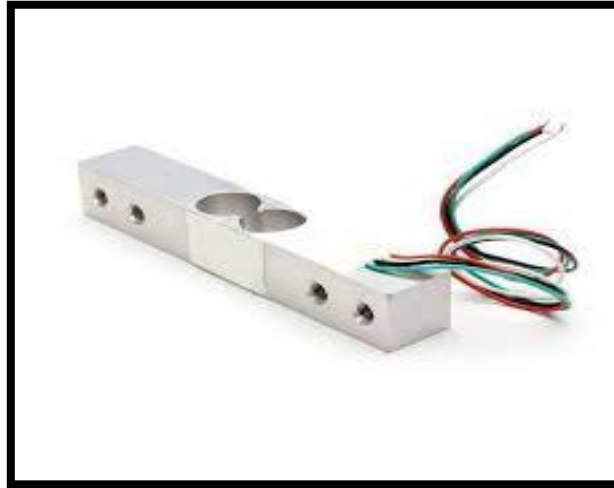


Figura 8-2: Celda de carga de 1 kg.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.2.1 Acondicionamiento de la señal analógica

El acondicionamiento de la señal analógica proveniente de la celda de carga cumple las siguientes etapas: amplificación, filtrado, conversión de señal analógica a digital, como se observa en la figura 9-2.



Figura 9-2. Diagrama para digitalizar una señal analógica.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

El sensor utilizado posee internamente un arreglo de 4 galgas extensométrica distribuidas uniformemente que componen un circuito electrónico denominado puente de Wheatstone como se muestra en la figura 10-2.

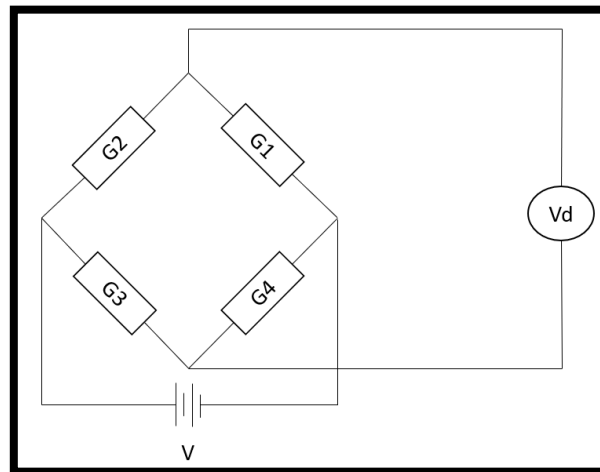


Figura 10-2. Circuito puente de Wheatstone.
Realizado por: Sacaquirin, Alexander, 2019.

El circuito puente de Wheatstone permite conocer la variación en la resistencia del arreglo de galgas extensiométricas emitiendo una señal de voltaje de salida, producto de aplicar una carga axial sobre el sensor. En la salida se adapta un amplificador de instrumentación AD620 como se muestra en la figura 11-2, el cual permite amplificar la señal emitida por el puente de Wheatstone que oscila en el orden de los mV minimizando el ruido generado en la medición.

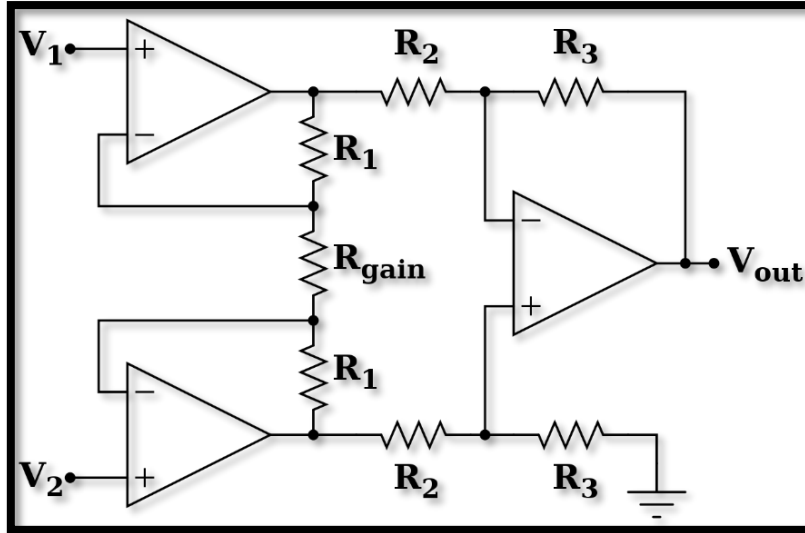


Figura 11-2. Esquema interno de AD620.
 Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Considerando la alimentación de la celda de carga a 3.3 V y la salida nominal de 1 mV/V, se amplifica la tensión de salida nominal a 0.1 V/V, obteniendo una ganancia de acuerdo con la ecuación (3-2).

$$G = \frac{0.33 V}{3.3 mV} = 100 \tag{3-2}$$

Para obtener un factor de ganancia de 100 en el amplificador de instrumentación AD620, se requiere de una $R_{GAIN} = 498.9898 \Omega$, obteniendo este valor de la ecuación (4-2) dada por el fabricante.

$$R_{GAIN} = \frac{49.4 k\Omega}{G-1} = 498.9898 \Omega \tag{4-2}$$

Basándose en elementos electrónicos disponibles en el mercado local, se considera una $R_{GAIN} = 220 \Omega$, obteniendo un factor de ganancia de 225.5454 de acuerdo con la ecuación (5-2).

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_{GAIN}} + 1 = 225.5454 \quad (5-2)$$

Suministrando tensión de alimentación al amplificador de instrumentación AD620 a $\pm 12 \text{ V}$, se obtienen los siguientes valores de tensión para el sensor a 0 kg y a 1kg, de -280 mV y 420 mV, respectivamente.

2.3.2.2 Filtrado de la señal

Se diseña un filtro pasa baja pasivo para reducir el ruido generado en la lectura analógica. Para determinar la frecuencia de corte se utiliza el software de ingeniería Matlab 2017a. En primer lugar, se adquiere un total de 1251 datos obteniendo la gráfica que se presenta en el gráfico 1-2.

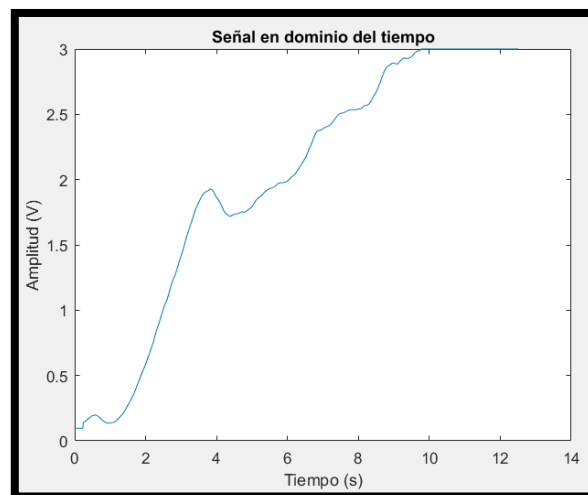


Gráfico 1-2. Señal en el dominio del tiempo.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Se procesa la señal adquirida y se obtiene una frecuencia de corte $f_c = 0.145 \text{ Hz}$ como se observa en el gráfico 2-2.

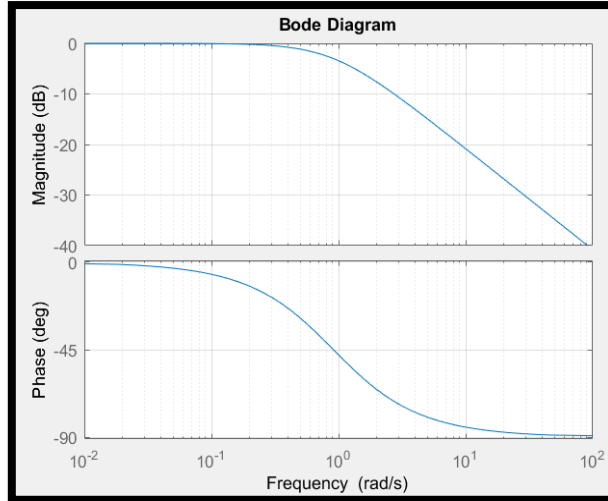


Gráfico 2-2. Señal en el dominio de la frecuencia.
Realizado por: Sacaquirin Alexander 2019.

Considerando la frecuencia de corte obtenida $f_c = 0.145 \text{ Hz}$ y un valor de capacitor $C = 100 \mu\text{F}$, se obtiene el valor de la resistencia con la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR} \quad (6-2)$$

$$R = 10.976 \text{ k}\Omega$$

2.3.3 Módulo de control del actuador

Se requiere de un módulo para controlar el funcionamiento del motor paso a paso Nema 17, por lo tanto, se elige un controlador A4988 como se observa en la figura 12-2, el cual cuenta con los requerimientos técnicos necesarios para realizar los desplazamientos angulares que debe cumplir el actuador. Las características del controlador son las siguientes:

- Control simple de dirección y paso.
- Cinco diferentes resoluciones de paso: full-step, half-step, quarter-step, eighth-step, y sixteenth-step.
- Corriente de salida ajustable mediante un potenciómetro para establecer la máxima corriente aplicado al motor.
- Control inteligente que selecciona automáticamente la corriente decay (fast decay y slow decay)
- Protección de temperatura, sobre voltaje y protección crossover-current

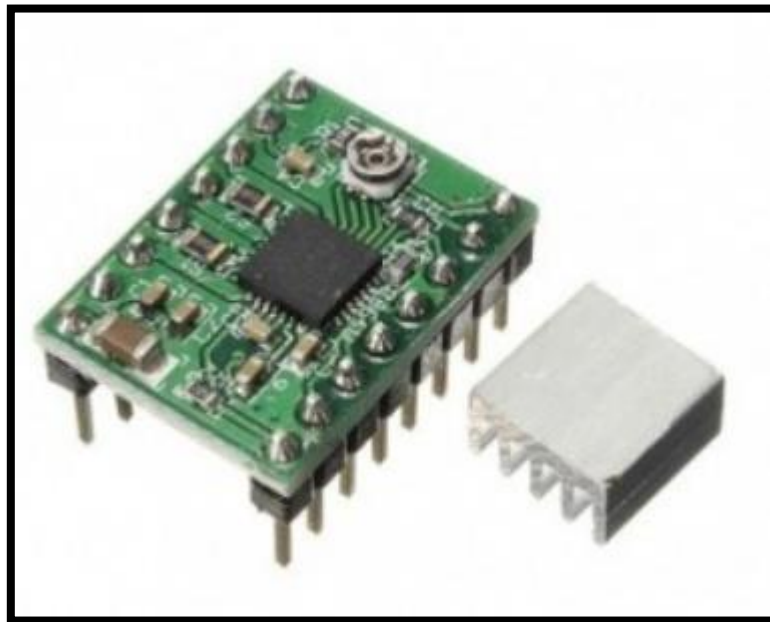


Figura 12-2. Driver a4988.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Se requiere definir la corriente nominal del controlador para suministrar al actuador electromecánico. Considerando que el motor paso a paso Nema 17 consume una corriente de 1.7 A por bobina, se establece la corriente que entrega el controlador a4988 según la ecuación (7-2) dada por el fabricante.

$$I_{TripMAX} = \frac{V_{REF}}{8 * R_S} \quad (7-2)$$

Para una corriente $I_{TripMAX} = 1.7 A$, se calcula el voltaje V_{REF} considerando que el controlador a4988 cuenta con una $R_S = 0.1 Ohm$, se tiene la siguiente ecuación (8-2):

$$V_{REF} = I_{TripMAX} * 8 * R_S = 1.36 V \quad (8-2)$$

La configuración de pasos del controlador se establece en FULL STEP (pasos completos), se añade un factor de 70% a la ecuación (7-2), obteniendo el siguiente resultado en la ecuación (9-2):

$$V_{REF} = 1.36 V * 70\% = 0.952 V \quad (9-2)$$

2.3.4 Visualización del proceso de ejecución del prototipo electromecánico

Para visualizar el proceso de ejecución y los parámetros mecánicos del ensayo de tracción, se desarrolla una interfaz gráfica en computadora diseñada en el Software Qt Creator, el cual proporciona un ambiente amigable para visualización y control del proceso llevado a cabo por el prototipo como se observa en la figura 13-2. El diseño de la interfaz gráfica cuenta con opciones para realizar la conexión y desconexión entre la interfaz gráfica y la tarjeta de desarrollo, además presenta opciones para elegir los parámetros de comunicación serial. Por otro lado, la interfaz gráfica cuenta con opciones interactivas para ajustar la distancia de la cruceta dependiendo de las dimensiones del espécimen, así como también botones de inicio y paro de ejecución del ensayo mecánico.

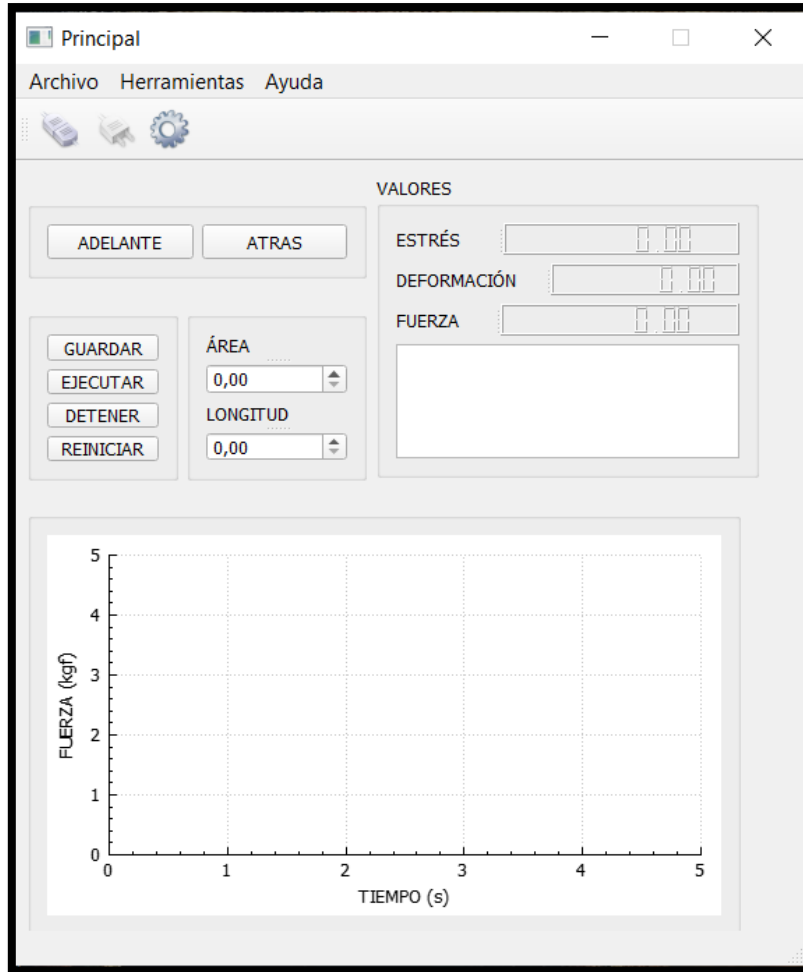


Figura 13-2: Interfaz gráfica diseñada en el software Qt Creator.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.5 Fuente de alimentación del prototipo

En base a los requerimientos de tensión y corriente establecidos por cada uno de los módulos electrónicos del prototipo, se implementa una fuente simétrica constituida por dos Baterías LIPO marca Turnigy y TCA recargables de 11.1 V a 2200 mAh como se observa en la figura 14-2. Las baterías constituyen la fuente de tensión y corriente asegurando la autonomía del prototipo.



Figura 14-2: Batería Lipo marca Turnigy recargables de 11.1 V a 2200 mAh.

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.6 Esquemas de conexión del prototipo

Una vez seleccionados los componentes eléctricos y electrónicos que conforman los diferentes módulos del prototipo electromecánico, se procede a desarrollar los esquemas de conexión de cada uno de los módulos. Los esquemas fueron desarrollados con ayuda de las herramientas de software Eagle PCB Design Software y NI Multisim por ser entornos confiables y accesibles en los cuales se puede diseñar y desarrollar diagramas de circuitos electrónicos impresos.

2.3.6.1 Esquema de conexión del módulo de adquisición de datos del sensor

El esquema de conexión se observa en la figura 15-2. Tiene como elemento principal la tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re, la cual se encarga de recibir los datos analógicos en el pin analógico A1. Por otro lado, se observa el circuito electrónico para una alimentación simétrica de energía a ± 12 V, la cual suministra la tensión a los amplificadores operacionales LM358, LM324, AD620 y componentes electrónicos. El circuito electrónico del acondicionamiento de la señal está conformado por un amplificador de instrumentación AD620, cuyos pines se conectan las salidas de la celda de carga, cable verde (señal positiva) al pin 3 y cable blanco (señal negativa) al pin 2. La salida del amplificador de instrumentación, pin 6, es conducida hacia un diseño electrónico,

conformado principalmente por un amplificador LM324, el cual se encarga de realizar un cambio de escala de tensión de salida entre -280 mV y 420 mV a 50 mV (Vmin) y 3.07 V (Vmax).

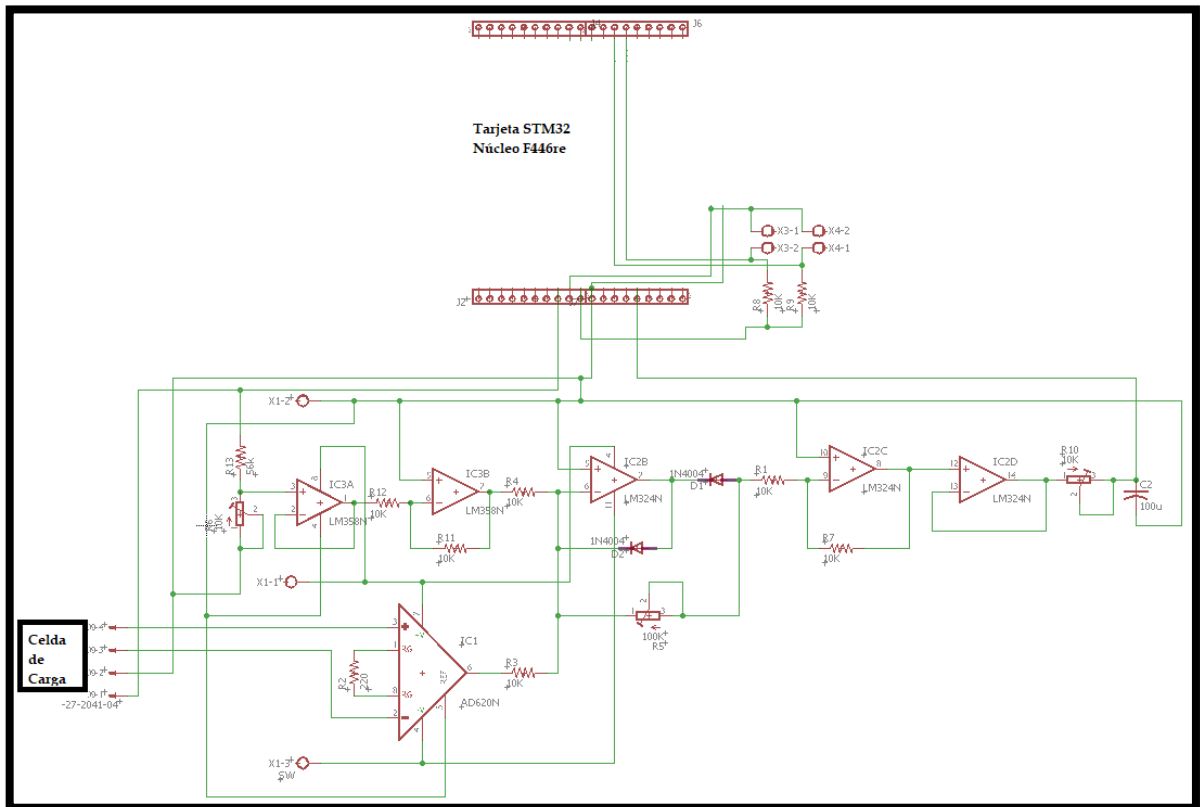


Figura 15-2: Esquemático de la etapa de adquisición de datos del sensor.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.6.2 Esquema de conexión del módulo para el motor paso a paso Nema 17

El diagrama esquemático que se presenta en la figura 16-2, contiene el circuito de conexión entre la tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re, el actuador Nema 17 y el controlador A4988. El control del motor paso a paso se realiza mediante un algoritmo diseñado en la tarjeta de desarrollo. El motor Nema 17 bipolar cuenta con 4 cables correspondiendo el cable negro y verde al primer bobinado, y el cable rojo y azul al segundo bobinado, los cuales se encuentran conectados a los pines del controlador 2A-2B y 1A-1B, respectivamente. La resolución de pasos del controlador A4988 es FULL STEP (pasos completos), los pines STEP, DIR y RESET son conectados a los

pinos D9, D8 y D10 de la tarjeta de desarrollo, respectivamente. El controlador es alimentado en el pin V_{MOD} a + 12 V y a 5 V en el pin V_{DD} .

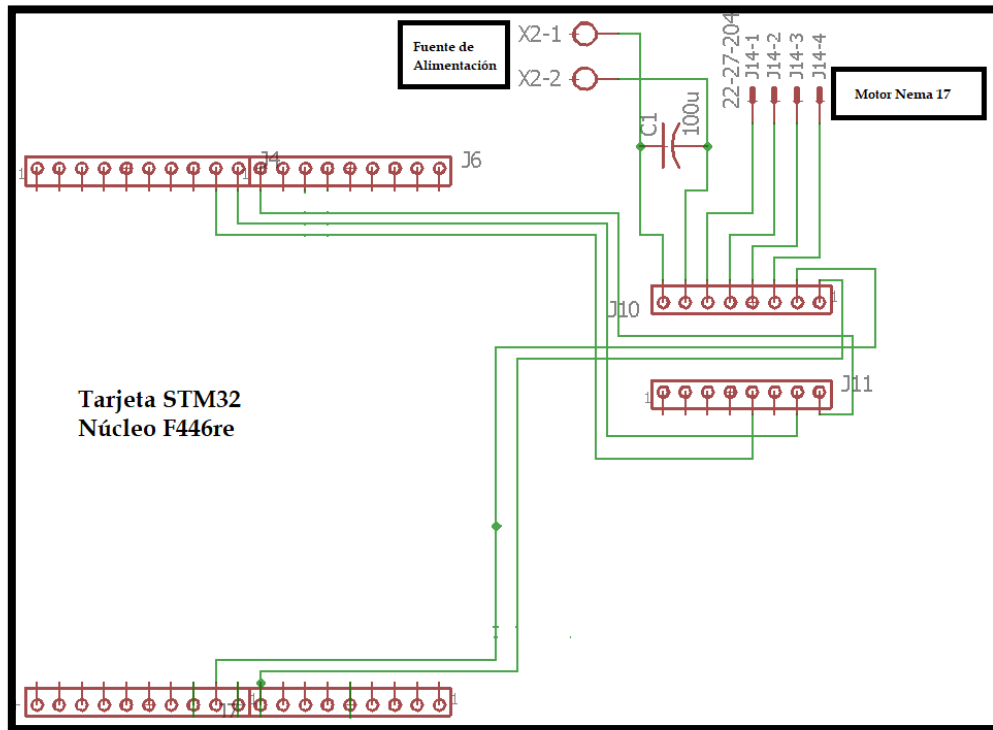


Figura 16-2: Esquemático de conexiones para el motor Nema 17.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.6.3 Esquema de conexión del módulo de Visualización

En la figura 17-2 se observa la conexión entre la tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re y la computadora, en la cual se encuentra disponible la interfaz gráfica. La comunicación es vía serial.

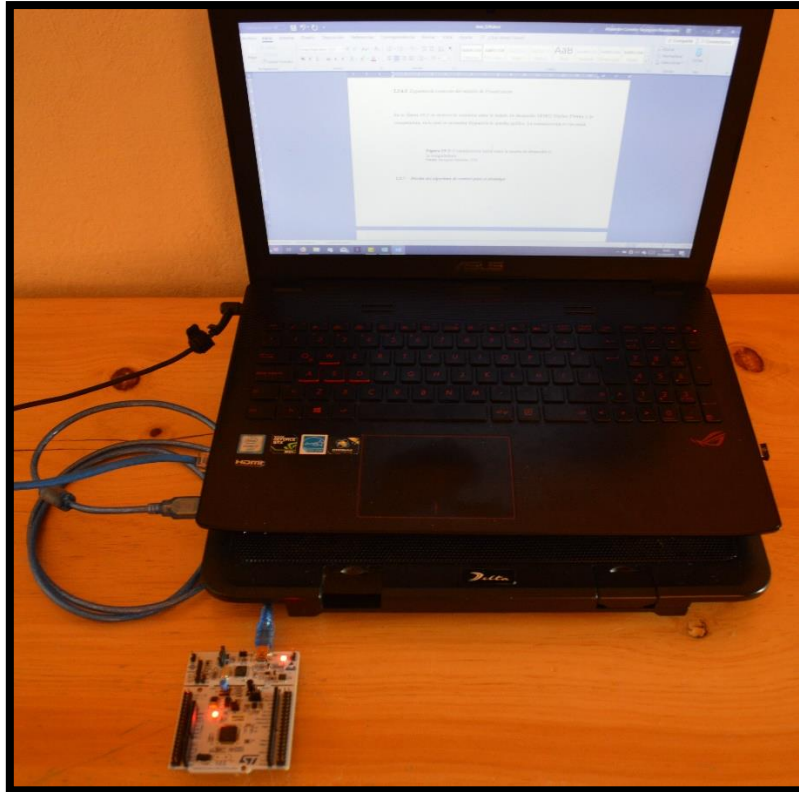


Figura 17-2: Comunicación serial entre la tarjeta de desarrollo y la computadora.

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.7 Diseño del algoritmo de control para el prototipo

Se requieren dos algoritmos de control para funcionamiento del prototipo, uno para realizar el control de la tarjeta de desarrollo y otro para el control de la interfaz gráfica. El diseño del algoritmo de control de la tarjeta se desarrolla en la IDE de Mbed como se observa en la figura 18-2. El entorno IDE de Mbed es confiable, trabaja en lenguaje de programación C++ y es un recurso que se puede utilizar en línea. Por otro lado, el algoritmo para la interfaz gráfica se desarrolla en el Software Qt Creator como se observa en la figura 19-2. Qt Creator cuenta con una versión gratuita, trabaja en lenguaje de programación C++, dispone una extensa gama de librerías para facilitar el desarrollo de aplicaciones graficas.

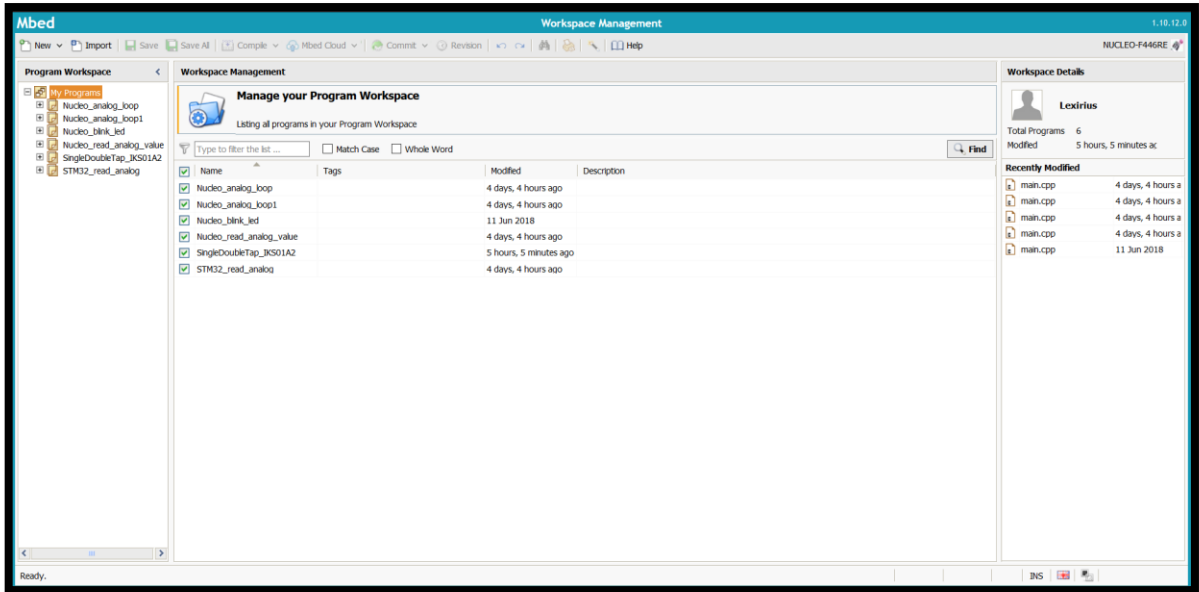


Figura 18-2: IDE de Mbed.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

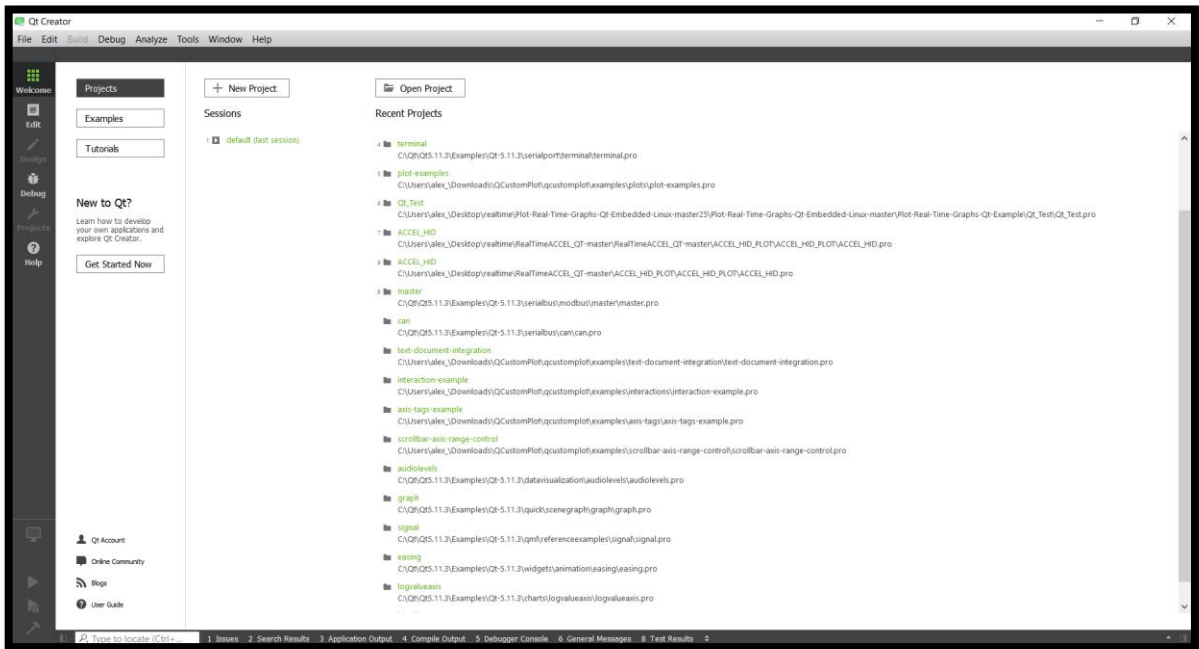


Figura 19-2: Entorno de desarrollo de Qt Creator.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.7.1 *Requerimientos de software*

Se definen los requerimientos de software específicos que debe cumplir el algoritmo de control del prototipo electromecánico.

- Obtener mediciones de las variables de fuerza y deformación.
- Determinar los valores máximos y mínimos para cada una de las variables medidas por el prototipo.
- Visualizar en la interfaz gráfica los parámetros medidos y la gráfica que estos valores representan.
- Permitir el almacenamiento de información.
- Interfaz interactiva y sencilla para el usuario.
- Emitir alertas en caso de terminar el ensayo mecánico o presentar alguna falla.

2.3.7.2 *Diagrama de flujo para el software de la tarjeta de desarrollo*

El control del prototipo electromecánico se realiza mediante un algoritmo de control que se ejecuta en la tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re. El algoritmo de la tarjeta se encarga del procesamiento analógico-digital de la señal emitida por el sensor, de las señales de control para el motor paso a paso, de accionar los pulsadores finales de carrera y de transmitir y recibir información de la interfaz gráfica. El diagrama de flujo diseñado para la tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446re cuenta con una rutina principal y una interrupción como se observa en la figura 20-2.

- El funcionamiento lógico del diagrama de flujo parte principalmente de la declaración de librerías, inicialización de variables globales y establecimiento de la comunicación serial entre la tarjeta y la computadora.

- El ciclo repetitivo `Seria.readable()` identifica que se ha establecido satisfactoriamente la comunicación serial entre la tarjeta de desarrollo y la computadora permitiendo la transmisión y recepción de información de la lectura analógica proveniente del sensor.
- Considerando los parámetros dimensionales establecidos y transmitidos desde la interfaz gráfica hacia la tarjeta, se ejecuta el proceso accionando el actuador permitiendo el desplazamiento de la cruceta y la adquisición de los datos analógicos digitalizados, la cual se efectúa en una función denominada `DAQ_Nucleo` que se encarga de adquirir, sumar y promediar cada 10 ms un total de 100 datos analógicos.
- Los datos digitalizados de fuerza y desplazamiento son transmitidos hacia la interfaz gráfica verificando que no excedan el valor máximo soportado por la celda de carga y la distancia máxima de trabajo permitida, respectivamente.
- Se comprueba si la fuerza es menor al rango permitido por la celda de carga o si el ensayo mecánico ha finalizado, se envía un comando desde la interfaz gráfica hacia la tarjeta de desarrollo, denominado `STOP` que detendrá el movimiento del actuador, visualizando en la interfaz gráfica un cuadro de mensaje “Ensayo mecánico finalizado”. Por otro lado, si la fuerza supera el rango permitido, se emite un mensaje “La fuerza sobrepasa el límite permitido” y se enviará un comando `STOP` deteniendo el proceso mecánico.
- La secuencia de interrupción está dedicada a detener el giro del motor en caso de ser accionados los pulsadores finales de carrera ubicados en cada uno de los límites del espacio de trabajo.

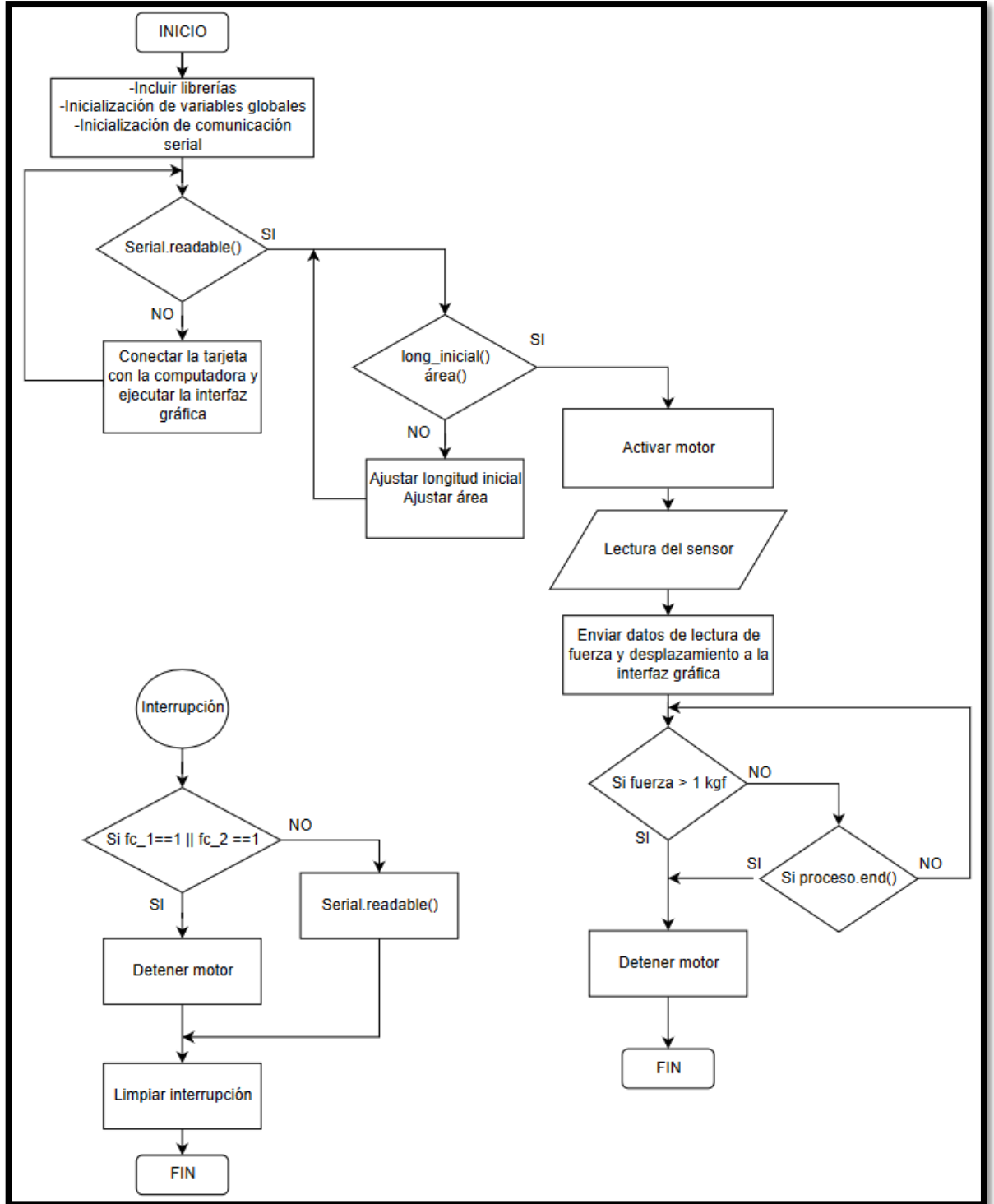


Figura 20-2: Diagrama de flujo para el control de tarjeta de desarrollo.
 Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.3.7.3 Diagrama de flujo para el software de la interfaz gráfica

El algoritmo de control para la interfaz gráfica se encarga de recibir la información enviada desde la tarjeta de desarrollo, ajustar la longitud inicial y área del espécimen, mostrar en pantalla el valor numérico de los parámetros del ensayo de tracción, graficar la curva de relación Fuerza-Tiempo y transmitir comandos de accionamiento del actuador. En la figura 21-2, se presenta la secuencia lógica del diagrama de flujo para el control de la interfaz gráfica.

- En primer lugar, se incluyen las librerías y se seleccionan las opciones de configuración de los parámetros de comunicación serial. Una vez establecidos los parámetros de comunicación serial, se procede a realizar la conexión entre la tarjeta de desarrollo y la interfaz gráfica.
- El evento repetitivo lon_inicial() y área() comprueban que se ha establecido los parámetros dimensionales de longitud y área del espécimen. El ajuste de longitud inicial se realiza por la intervención de dos botones dispuestos en la interfaz gráfica que permiten desplazar la cruceta de derecha a izquierda y viceversa.
- La ejecución del ensayo de tracción corresponde a la sentencia repetitiva INICIAR que se encarga de ejecutar el algoritmo principal enviando el comando START hacia la tarjeta que permite la activación del actuador y la función DAQ_Nucleo.
- Se reciben y procesan los datos numéricos de fuerza y desplazamiento transmitidos por la tarjeta.
- La interfaz gráfica cuenta con opciones que permiten visualizar la curva de relación Fuerza-Tiempo y los valores numéricos del ensayo de tracción.
- La detección de la ruptura de la fibra se realiza dentro del algoritmo de control de la interfaz gráfica, en donde se calcula la variación de fuerza ejercida en el espécimen, y se considera para un resultado positivo que el proceso continúa, y para un resultado diferencial de fuerza negativo que el proceso finaliza.
- Se almacena la información del proceso en un archivo con extensión .csv (valores separados por coma).

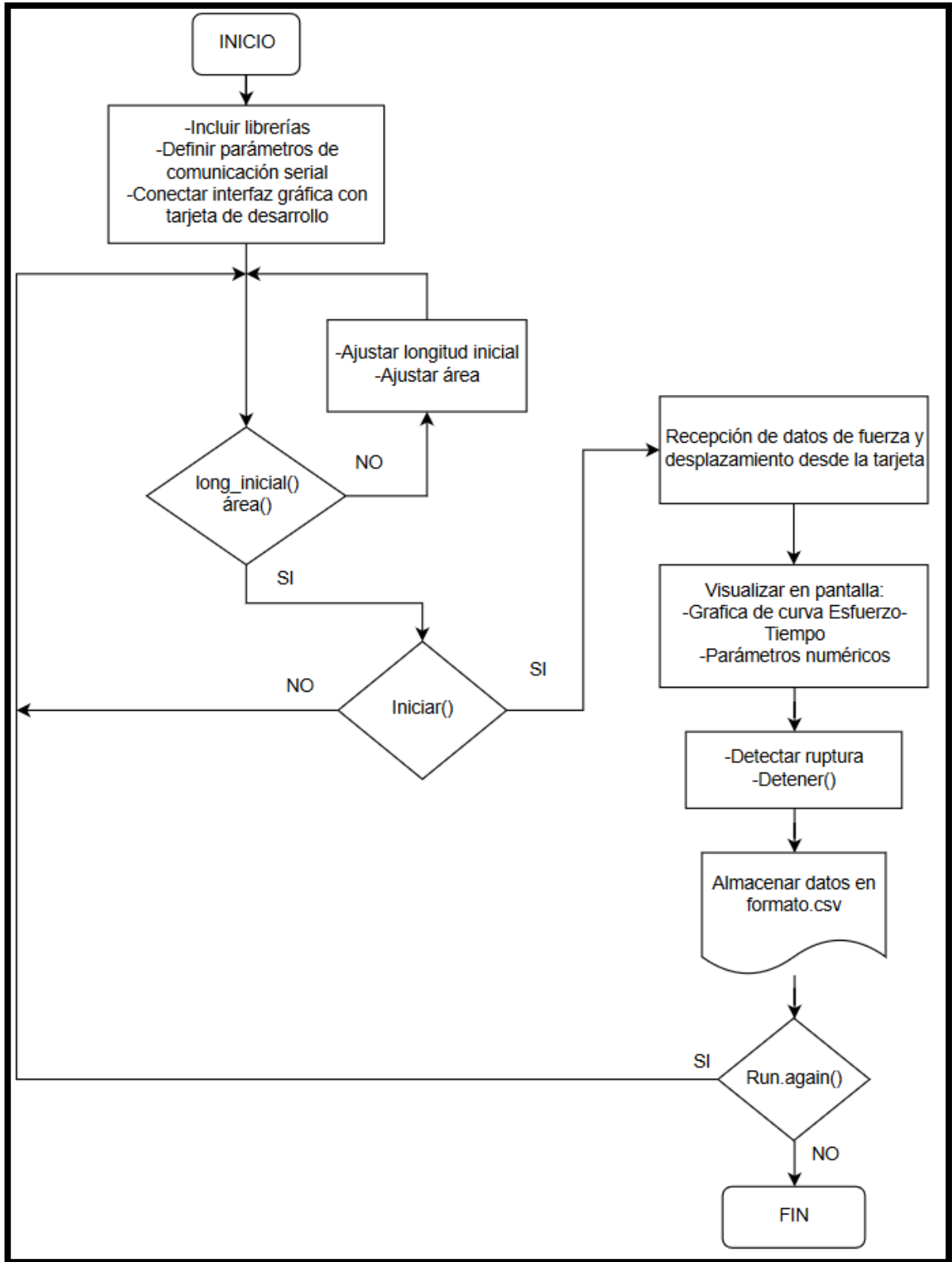


Figura 21-2: Diagrama de flujo para el control de la interfaz gráfica.
 Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

2.4 Pruebas preliminares, ajuste y calibración

Considerando el desplazamiento de la cruceta de 7.75 mm por vuelta como se observa en la figura 22-2, el número de 200 pasos por vuelta del motor Nema 17 y el paso del tornillo trapezoidal de 2 mm, se obtiene una relación con la ecuación (10-2).

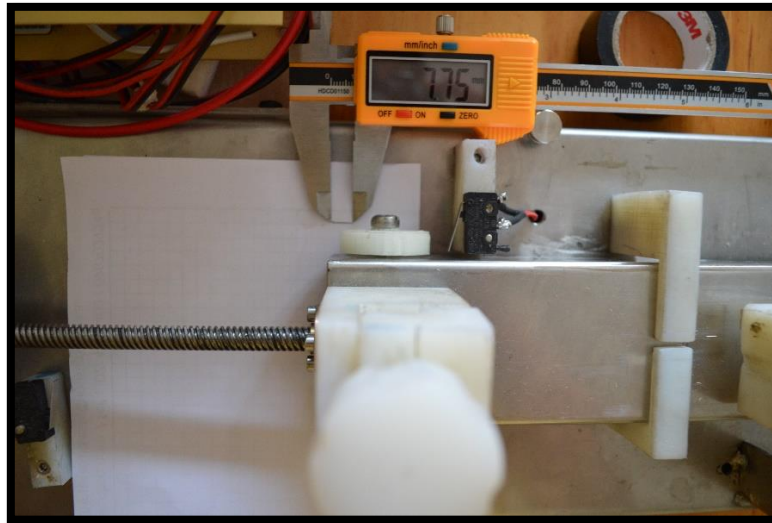


Figura 22-2: Desplazamiento horizontal de la cruceta.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

$$r = N^{\circ} \text{ de pasos} \frac{7.75 \text{ mm}}{200 \text{ pasos}} \quad (10-2)$$

Donde r representa el desplazamiento horizontal de la cruceta proporcional al número de pasos que gire el motor Nema 17.

2.5 Evaluación final del prototipo electromecánico

En el Capítulo III, se presenta la evaluación final y funcionamiento del prototipo electromecánico.

CAPÍTULO III

3. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

En este acápite se presenta los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en cada uno de los módulos electrónicos que comprenden tanto hardware y software. Para verificar que el funcionamiento del prototipo electromecánico corresponde a los requerimientos técnicos establecidos, se procede a efectuar pruebas de calibración para el sensor, comprobando el correcto funcionamiento y que cumple con los resultados esperados caracterizando las mediciones obtenidas. Por otro lado, se verifica el funcionamiento del prototipo sometiendo a especímenes de fibras vegetales a fuerzas controladas y visualizando los parámetros mecánicos resultantes en la interfaz gráfica, así como también, la curva gráfica de Fuerza-Tiempo.

3.1 Caracterización de la celda de carga de 1 kg

La determinación de los aspectos medibles del sensor se enfoca en adquirir lecturas de datos, las cuales mediante expresiones matemáticas de conversiones analógicas-digitales se convierten en información cuantificable orientada a establecer el rango de funcionamiento del sensor. La calibración de la celda de carga se realiza utilizando un juego de pesas de masas establecidas de 50, 100, 500 y 1000 gr. En la tabla 1-3, se registran los valores de las fuerzas obtenidas por la celda de carga de 1 kg tomando como referencia diferentes pesos definidos. Se pone en funcionamiento el módulo electrónico de adquisición y acondicionamiento de la señal del sensor tomando muestras periódicas cada 10 milisegundos por masa. Se obtiene un total de 1000 muestras por masa, cuyas mediciones son procesadas matemáticamente para comprobar que el sistema no introduce más error que el generado por el sensor dando un rango de 3.3 ± 0.15 mV/V. La adquisición de datos se realizó con la tarjeta de desarrollo STM32 Núcleo F446RE considerando la tensión de operación admitida por la tarjeta de +3.3V. Por lo tanto, se recurre a un circuito que permite realizar un cambio de escala determinando el rango admisible de lectura de tensión, dada la ecuación (1-3) y (2-3):

$$Y = mX - mX_{MIN} + Y_{MIN} \quad (1-3)$$

$$Y = \frac{Y_{MAX}-Y_{MIN}}{X_{MAX}-X_{MIN}} * (X - X_{MIN}) + Y_{MIN} \quad (2-3)$$

donde Y está limitado en el rango de operación entre 0.05 y 3.00 V.

Tabla 1-3. Mediciones realizadas para la caracterización de fuerza.

N°. Medición	Masa (gr)	Medida Referencial		Medida Sensor		Error absoluto
		Fuerza (N)	Peso (kgf)	Fuerza (N)	Fuerza (kgf)	
1	0	0	0	0	0	0
2	50	0.490335	0.05	0.52113	0.05314	0.00314
3	100	0.98067	0.1	0.97233	0.09915	0.00085
4	200	1.96134	0.2	1.64654	0.19679	0.00321
5	300	2.94201	0.3	2.96388	0.30223	0.00223
6	500	4.90335	0.5	0.49324	0.50728	0.00728
7	700	6.86469	0.7	6.8606	0.70116	0.00116
8	800	7.84536	0.8	7.83457	0.79890	0.0011
9	1000	9.8067	1	9.8067	1	0
Promedio						0,00210778
Desviación Estándar (%)						0,2275647

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

3.2 Funcionamiento del prototipo: ensayos mecánicos de tracción

Se desarrollan los ensayos de tracción horizontal en fibras vegetales de pita, paja toquilla y cabuya, así como también especímenes de hojas de canela y limón. La obtención de los especímenes de estudio se realiza a través de técnicas poco convencionales y de manera no probabilística. Considerando la diferente composición y propiedades físicas que presenta cada una de las fibras y hojas vegetales, se realizan los ensayos mecánicos de tracción clasificando la muestra según la observación de sus condiciones físicas en el que se encuentran los especímenes de estudio.

3.2.1 Pita

Conocida como agave americana perteneciente a la familia Agavaceae, es originaria de México y otras zonas de América Central. Dependiendo la región en donde se encuentre, la pita es conocida comúnmente con el nombre de fique, penca o cabuya. Las plantas de pita destacan por tener grandes hojas carnosas acabadas en punta y con los bordes espinosos. En algunas comunidades Shuar de la Amazonía ecuatoriana, los capullos de las flores de pita son preparados como alimento (Eynden, Cueva y Cabrera, 2003, p. 582).

3.2.1.1 Ensayos de tracción en fibras frescas de pita

En la figura 1-3, se presenta los ensayos experimentales de tracción horizontal realizado a especímenes de fibras frescas de pita. Se seleccionan un total de 5 especímenes en condiciones fisiológicas iguales. Los ensayos de tracción se realizan 1 hora después de extraer los especímenes de la planta. Las dimensiones longitudinales de cada espécimen son de 126.26 mm x 0.37 mm aproximadamente. Los especímenes son de color verde claro.

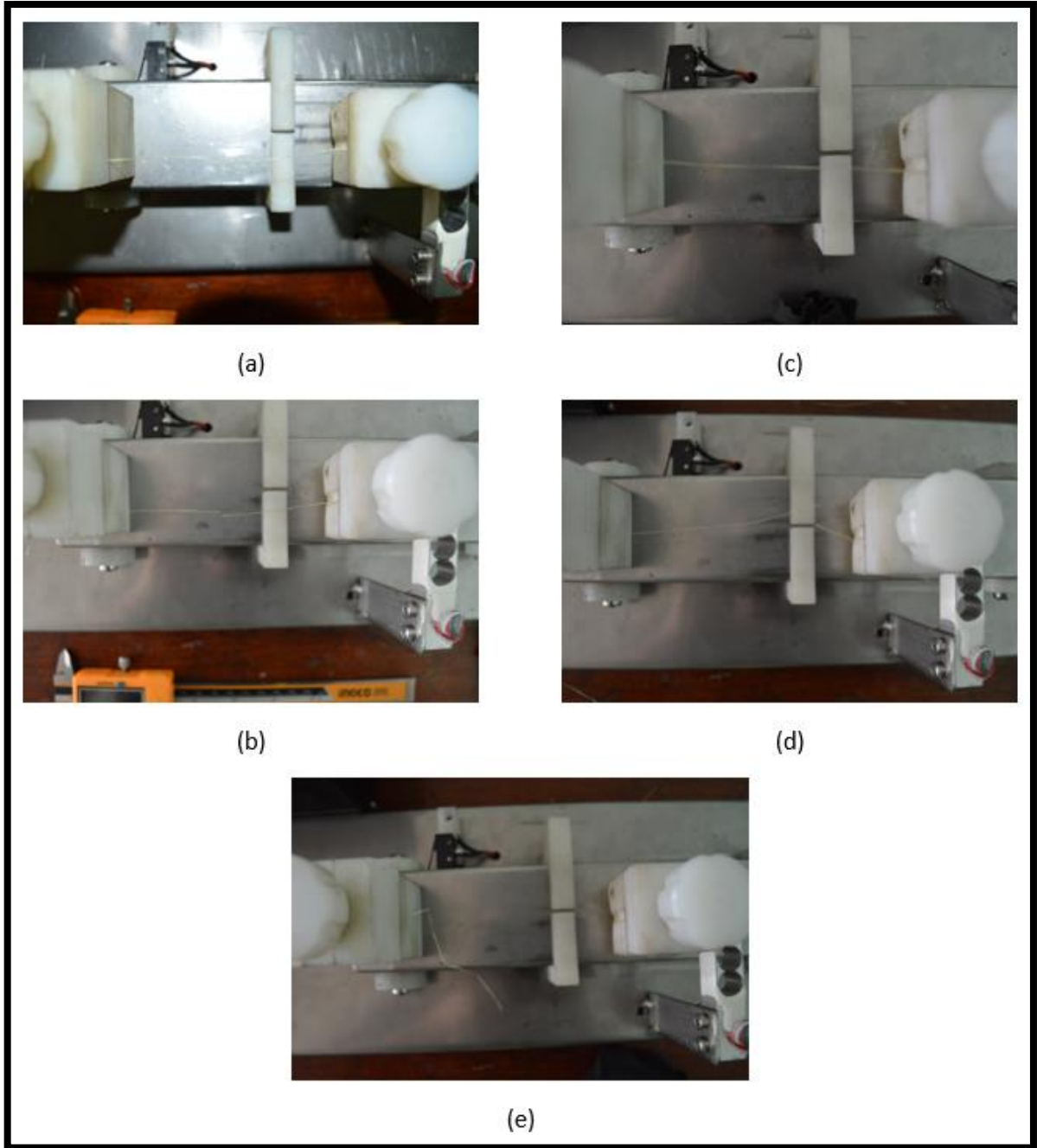


Figura 1-3. Ensayos experimentales de tracción en fibras frescas de pita.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En el gráfico 1-3, se observa las curvas de relación Fuerza-Tiempo para los 5 especímenes de fibras frescas de pita sometidos a ensayos de tracción horizontal. Las curvas se obtienen en la interfaz gráfica, en donde los datos de fuerza y desplazamiento son receptados y procesados en parámetros

mecánicos de interés. En las curvas del gráfico 1-3 se aprecia el comportamiento de cada espécimen frente a la prueba de tracción.

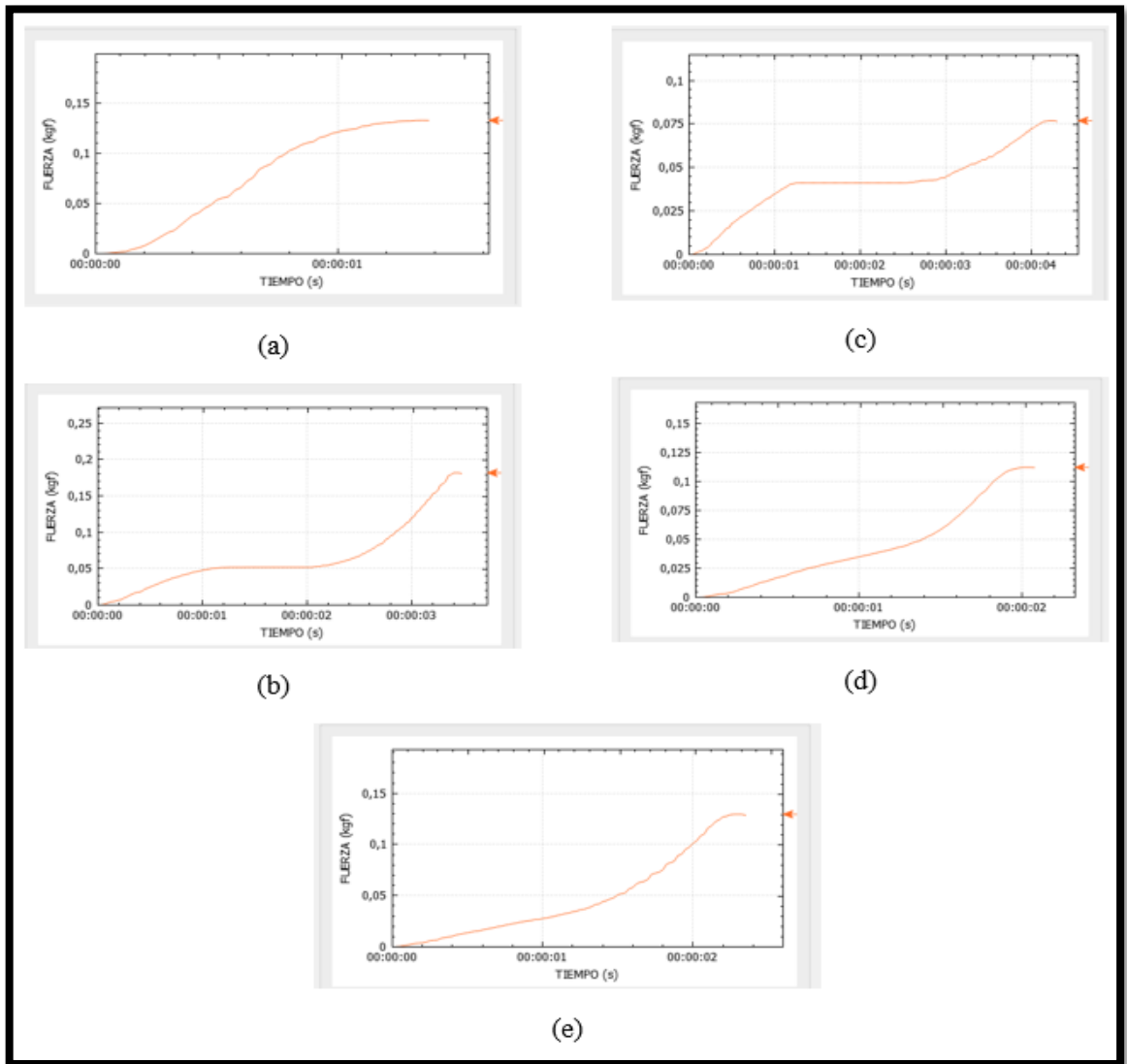


Gráfico 1-3. Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes frescos de pita.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Los parámetros característicos de Fuerza, Esfuerzo y Deformación obtenidos de las pruebas de tracción horizontal aplicado a 5 especímenes de fibras frescas de pita se presentan en la tabla 2-3. La longitud inicial para cada prueba es de 86.26 mm. El esfuerzo máximo a la tracción se calcula utilizando la ecuación (3-3).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3-3)$$

Donde σ representa la tensión ejercida sobre el área del material, F es la fuerza máxima antes de la ruptura, y A es el área transversal de la muestra.

La deformación se calcula con la ecuación (4-3).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4-3)$$

Donde ε es la deformación comprendida entre la relación del cambio longitudinal ΔL con respecto a la longitud inicial L_0 .

Tabla 2-3. Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras frescas de pita.

N°. Especímen	Longitud (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (kgf)	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	86,26	30,81	0,1325	42174	1,80639
2	86,26	30,81	0,1816	57708,6	5,73024
3	86,26	30,81	0,0769	24437,2	7,18232
4	86,26	30,81	0,1122	35654,8	2,96541
5	86,26	30,81	0,1295	40834,6	3,67283

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

3.2.1.2 Ensayos de tracción en fibras secas de pita

En la figura 2-3, se presenta los ensayos experimentales de tracción horizontal realizado a especímenes de fibras secas de pita. Se seleccionaron un total de 5 especímenes en condiciones fisiológicas iguales. Los ensayos de tracción se realizaron 1 mes después de extraer los especímenes de la planta. Las fibras fueron expuestas a una temperatura aproximada de 27° C para reducir la

humedad. Las dimensiones longitudinales de cada espécimen son de 126.26 mm x 0.33 mm aproximadamente.

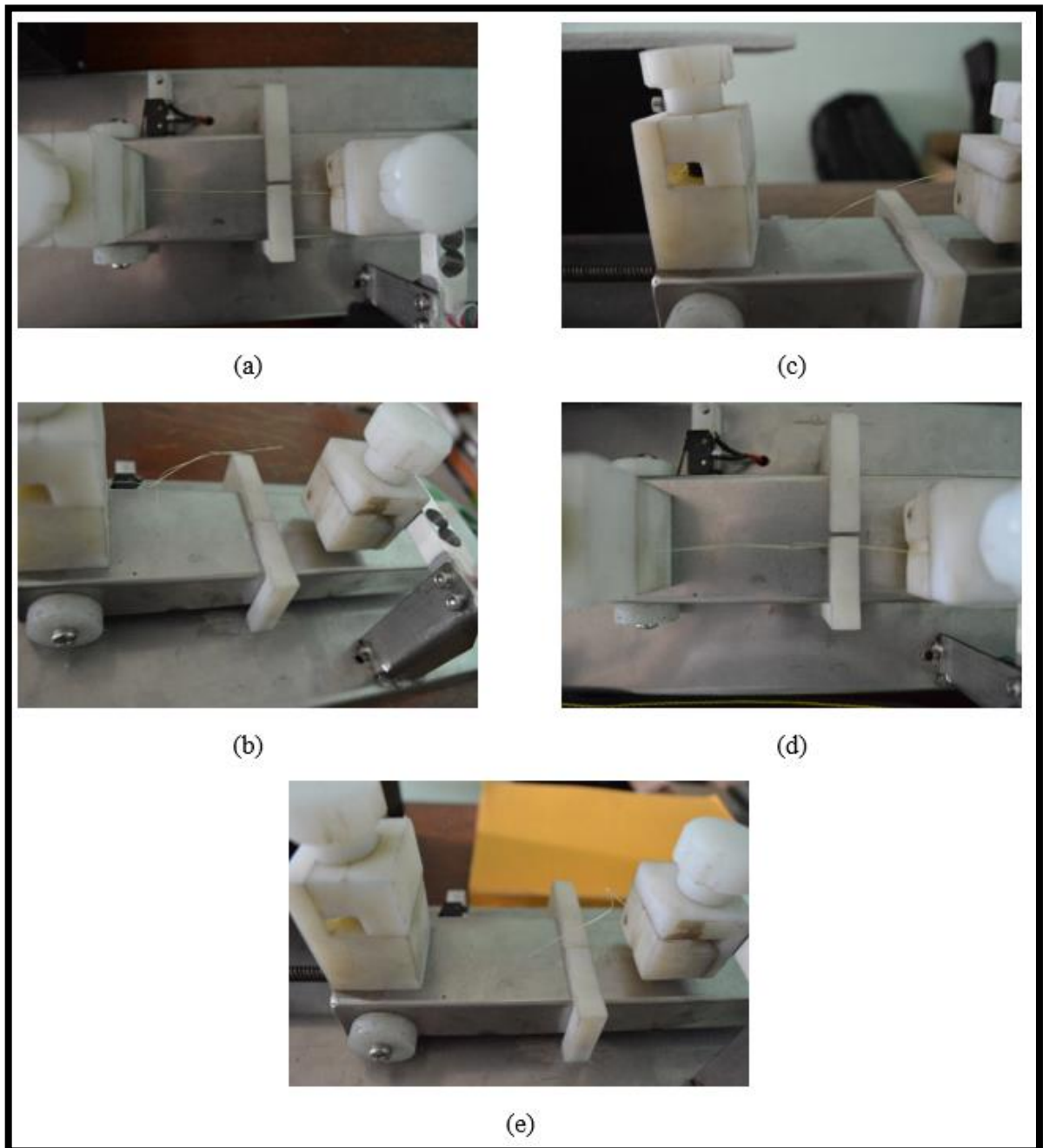


Figura 2-3. Ensayos experimentales de tracción en fibras secas de pita.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En el gráfico 2-3, se observa las curvas de relación Fuerza-Tiempo para los 5 especímenes de fibras secas de pita sometidos a ensayos de tracción horizontal. Las curvas se obtienen en la interfaz gráfica, en donde los datos de fuerza y desplazamiento son receptados y procesados en parámetros mecánicos de interés. En las curvas del gráfico 2-3 se aprecia el comportamiento de cada espécimen frente a la prueba de tracción.

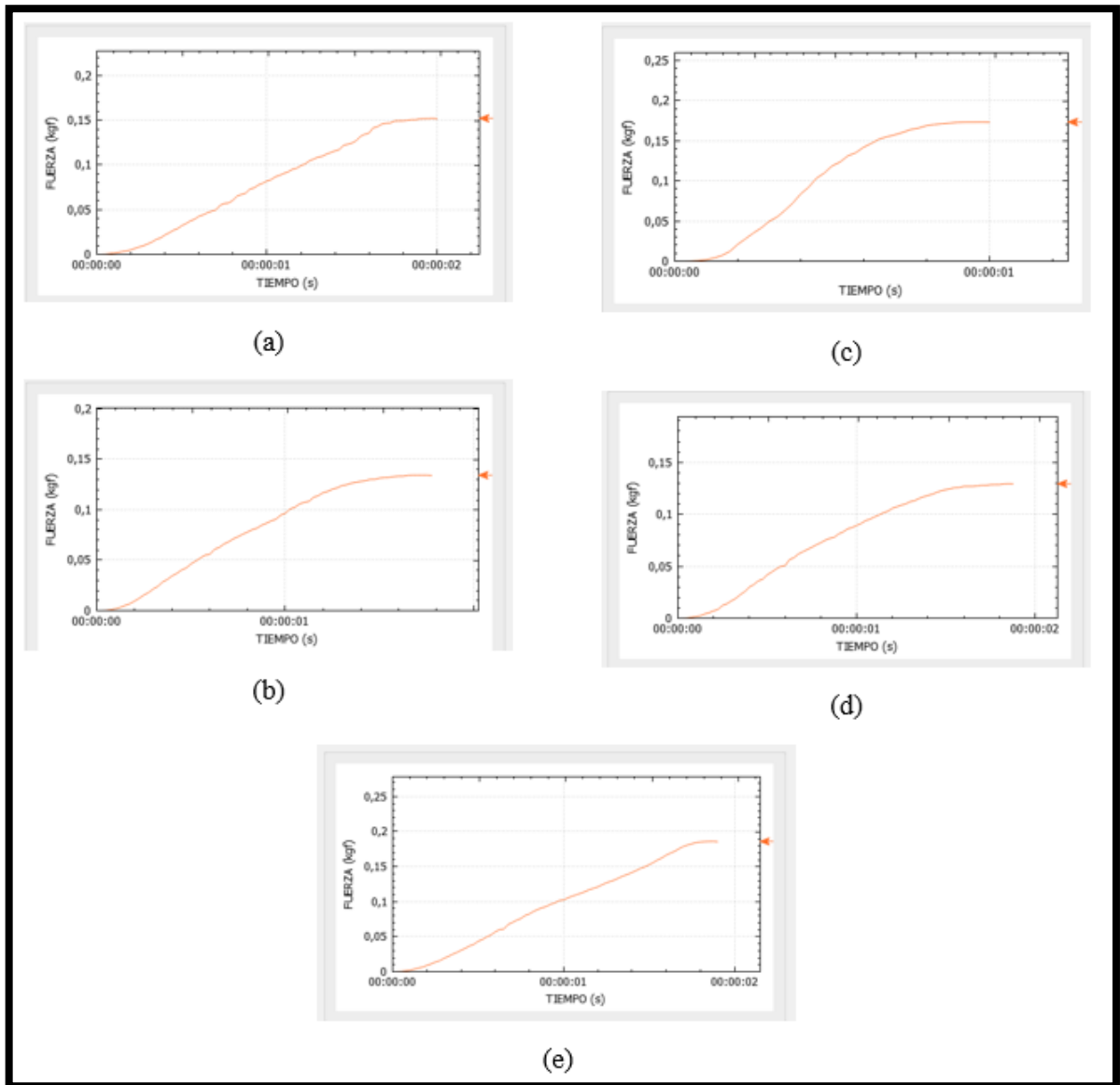


Gráfico 2-3. Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes secos de pita.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Se presenta en la tabla 3-3, los parámetros resultantes del comportamiento mecánico de 5 especímenes de fibra seca de pita frente a ensayos de tracción horizontal. La longitud inicial para cada prueba es de 86.26 mm. El esfuerzo máximo a la tracción se calcula utilizando la ecuación (3-3) y la deformación se calcula con la fórmula (4-3). Las pruebas mecánicas se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales.

Tabla 3-3. Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras secas de pita.

N°. Especimen	Longitud (mm)	Área (mm²)	Fuerza (kgf)	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	83,26	27,48	0,152	54243,5	3,11434
2	83,26	27,48	0,1342	47891,3	2,7324
3	83,26	27,48	0,1733	61844,7	1,33678
4	83,26	27,48	0,1294	46178,3	3,02546
5	83,26	27,48	0,1859	66341,2	2,69037

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Considerando los resultados correspondientes a las pruebas de tracción en fibras frescas y secas de pita como se observa en la tabla 2-3 y tabla 3-3, respectivamente, se evidencia que las fibras secas de pita presentan mayor resistencia a la tracción.

3.2.2 Paja toquilla

Conocida como Carludovica Palmata, perteneciente a la familia de las ciclantáceas, es una planta cuya morfología es parecida a la palma. Las hojas tienen forma de abanico con los bordes aserrados, llegando a medir de 1.5 a 4 m de largo. Es una de las principales fibras naturales que permiten obtener productos artesanales, lo cual convierte en una de las principales fuentes de desarrollo agro artesanal en Ecuador, siendo las plantaciones más importantes de Carludovica Palmata las que se encuentran en Manabí, Guayas y en diversas zonas de la Región Amazónica (Reyes Abad, 2015, pp. 12-13; López et al., 2013, p. 2).

3.2.2.1 Ensayos de tracción en fibras frescas de paja toquilla

En la figura 3-3, se presenta los ensayos experimentales de tracción horizontal realizado a especímenes de fibras frescas de paja toquilla. Se seleccionaron un total de 5 especímenes en condiciones fisiológicas iguales. Los ensayos de tracción se realizaron 1 hora después de extraer los especímenes de la planta. Las dimensiones longitudinales de cada espécimen son de 86.26 mm x 0.24 mm aproximadamente.

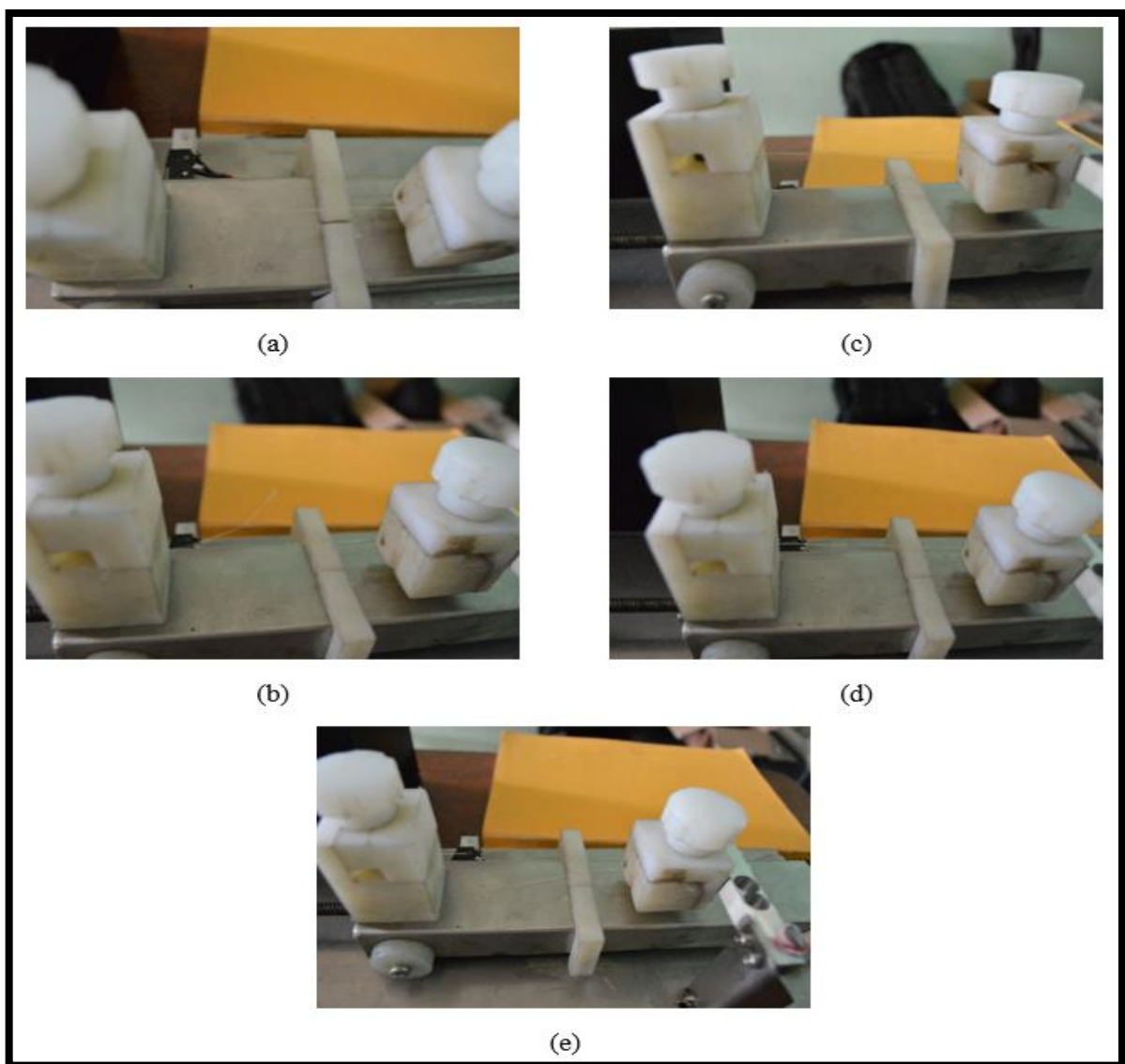


Figura 3-3. Ensayos experimentales de tracción en fibras frescas de paja toquilla.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En el gráfico 3-3, se observa las curvas de relación Fuerza-Tiempo para los 5 especímenes de fibras frescas de paja quilla sometidos a ensayos de tracción horizontal. Las curvas se presentan en la interfaz gráfica, en donde los datos de fuerza y desplazamiento son receptados y procesados en parámetros mecánicos de interés. En las curvas del gráfico 3-3 se aprecia el comportamiento de cada espécimen frente a la prueba de tracción.

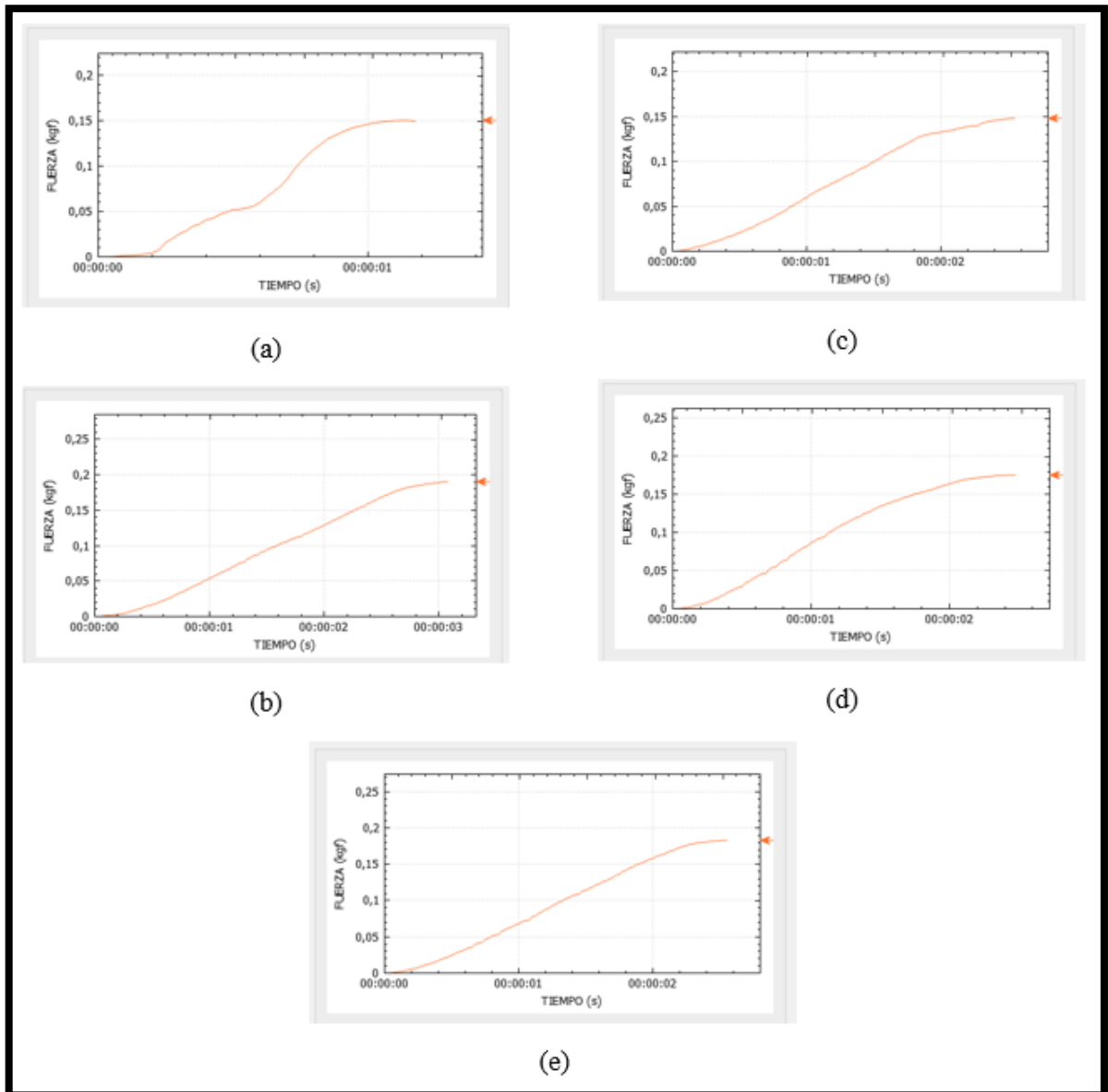


Gráfico 3-3. Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes frescos de paja toquilla.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

La tabla 4-3 recoge los parámetros dimensionales y los resultados mecánicos de 5 especímenes de fibras frescas de paja toquilla sometidos a ensayos de tracción con cargas controladas. La longitud inicial para cada prueba es de 83.26 mm. El esfuerzo máximo a la tracción se calcula utilizando la ecuación (3-3) y la deformación se calcula con la fórmula (4-3). Las pruebas mecánicas se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales.

Tabla 4-3. Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras frescas de paja toquilla.

N°. Especímen	Longitud (mm)	Área (mm²)	Fuerza (kgf)	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	83,26	19,98	0,1502	73181,8	1,56858
2	83,26	19,98	0,1901	93305,5	3,96109
3	83,26	19,98	0,1479	72592,8	3,5191
4	83,26	19,98	0,1754	86090,4	3,43983
5	83,26	19,98	0,1827	89673,4	3,57435

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

3.2.2.2 *Ensayos de tracción en fibras secas de paja toquilla*

En la figura 4-3, se presenta los ensayos experimentales de tracción horizontal realizado a especímenes de fibras secas de paja toquilla. Se seleccionaron un total de 5 especímenes en condiciones fisiológicas iguales. Los ensayos de tracción se realizaron 1 mes después de extraer los especímenes de la planta. Las fibras fueron expuestas a una temperatura aproximada de 27° C para reducir la humedad. Las dimensiones longitudinales de cada espécimen son de 86.26 mm x 0.33 mm aproximadamente.

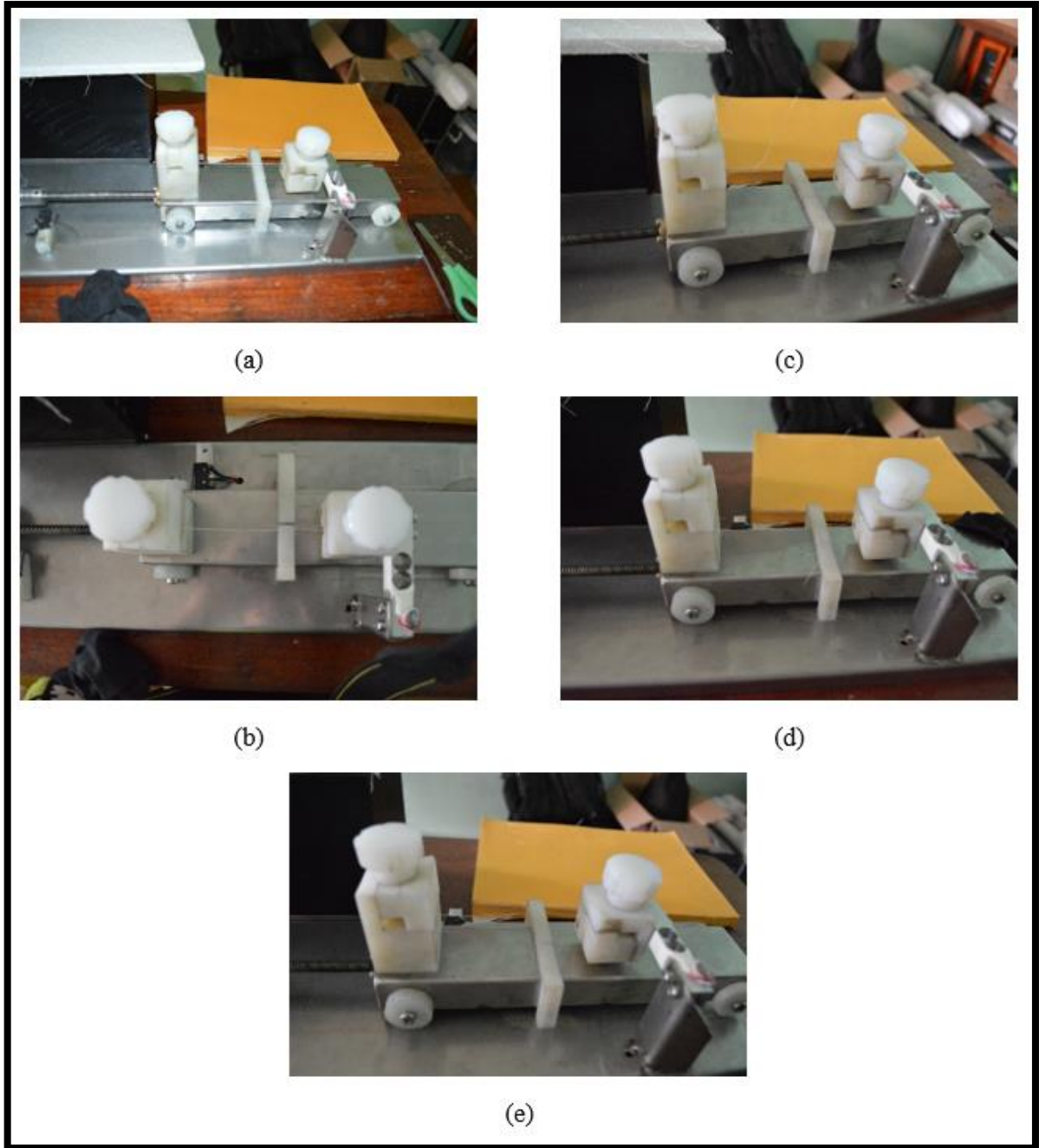


Figura 4-3. Ensayos experimentales de tracción en fibras secas de paja toquilla.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En el gráfico 4-3, se observa las curvas de relación Fuerza-Tiempo para los 5 especímenes de fibras secas de paja toquilla sometidos a ensayos de tracción horizontal. Las curvas se observan en la interfaz gráfica, en donde los datos de fuerza y desplazamiento son receptados y procesados en

parámetros mecánicos de interés. En las curvas del gráfico 4-3 se aprecia el comportamiento de cada espécimen frente a la prueba de tracción.

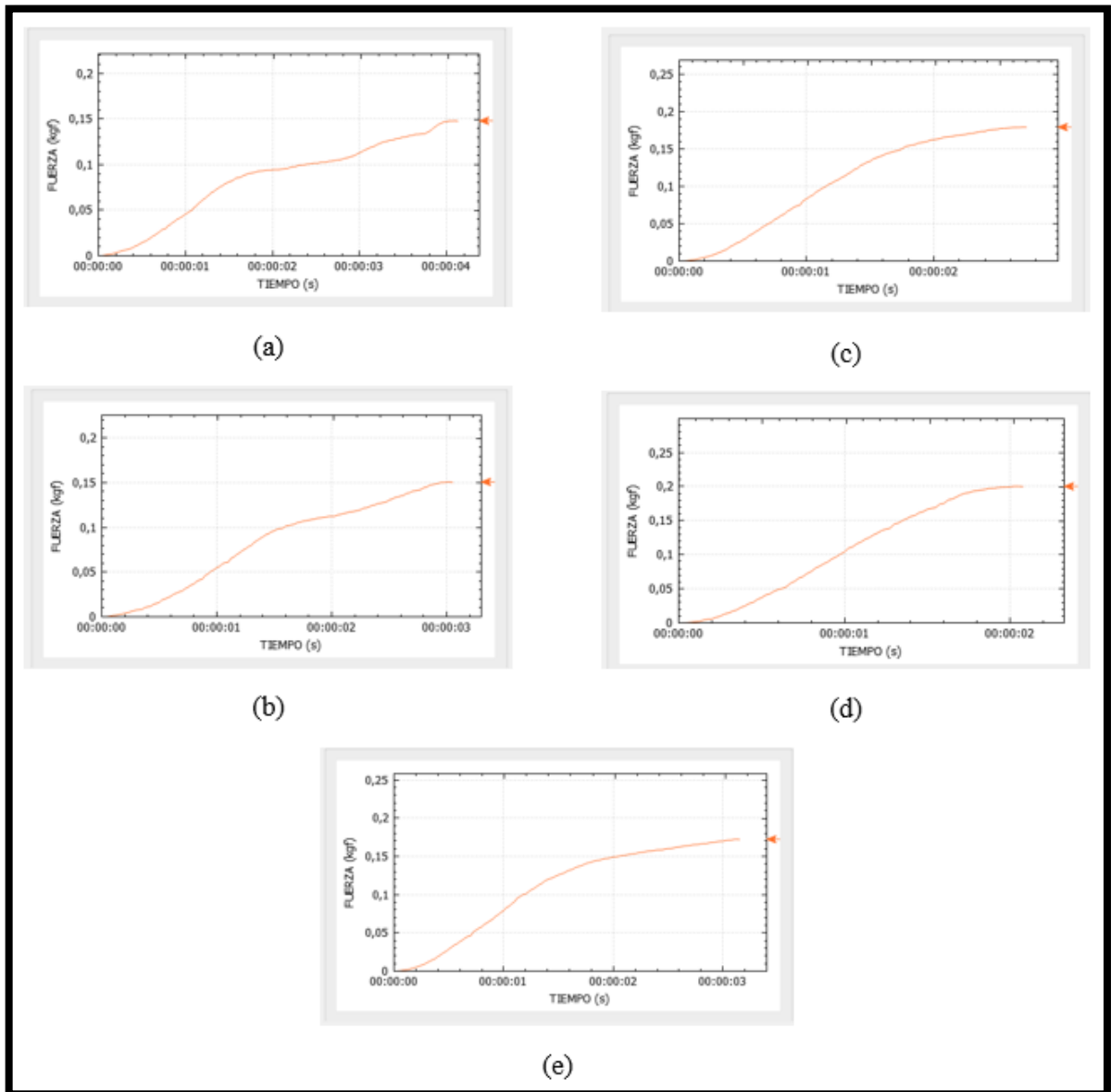


Gráfico 4-3. Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes secos de paja toquilla.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Se presenta en la tabla 5-3 los parámetros resultantes del comportamiento mecánico de 5 especímenes de fibra seca de paja toquilla frente a ensayos de tracción horizontal. La longitud inicial para cada prueba es de 83.26 mm. El esfuerzo máximo a la tracción se calcula utilizando la

ecuación (3-3) y la deformación se calcula con la fórmula (4-3). Las pruebas mecánicas se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales.

Tabla 5-3. Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras secas de paja toquilla.

N°. Especimen	Longitud (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (kgf)	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	83,26	22,48	0,1479	64519,7	6,42325
2	83,26	22,48	0,1506	65697,6	4,35263
3	83,26	22,48	0,1795	78304,9	3,64881
4	83,26	22,48	0,2002	87335,0	2,88134
5	83,26	22,48	0,1722	75120,3	4,65049

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Los resultados correspondientes a las pruebas de tracción en fibras frescas y secas de paja toquilla como se observa en la tabla 4-3 y tabla 5-3, ponen en evidencia que las fibras secas de paja toquilla presentan mayor resistencia a la tracción.

3.2.3 Cabuya

Es una planta vegetal nativa del Ecuador perteneciente a la familia de las Agaváceas, la cual se puede encontrar en forma silvestre o cultivada en los valles o laderas de los Andes. La cabuya es una fibra liviana que posee una densidad de 1.3 gr/cm³ y una composición química: celulosa 62.7 (% peso), lignina 15.5 (% peso), pentosas 17.7 (% peso), lo que la hace atractiva para el sector industrial. La cabuya al ser clasificada como fibra dura y por su origen natural es utilizada en cordelería y fabricación de sogas y cuerdas. Por otro lado, su uso para reforzar materiales compuestos de polímeros es cada vez mayor (Tamayo Duque, 2012, p. 3; Contreras *et al.*, 2009, pp. 57-58; Bennett *et al.*, 1992, pp. 233-234).

3.2.3.1 Ensayos de tracción en fibras frescas de cabuya

En la figura 5-3, se presenta los ensayos experimentales de tracción horizontal realizado a especímenes de fibras frescas de cabuya. Se seleccionaron un total de 5 especímenes en condiciones fisiológicas iguales. Los ensayos de tracción se realizaron 1 hora después de extraer los especímenes de la planta. Las dimensiones longitudinales de cada espécimen son de 86.26 mm x 0.36 mm aproximadamente.

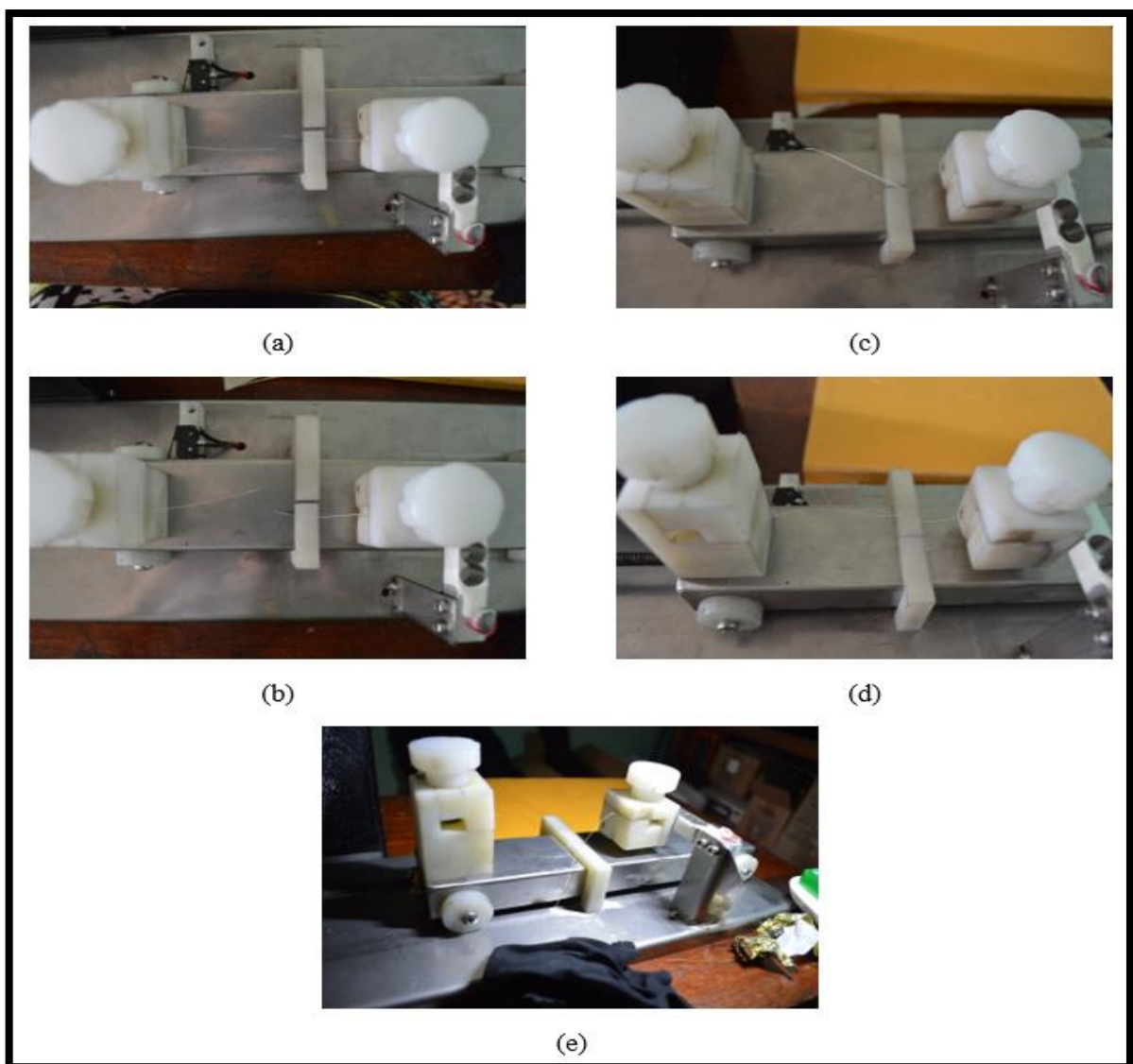


Figura 5-3. Ensayos experimentales de tracción en fibras frescas de cabuya.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En el gráfico 5-3, se presenta las curvas de relación Fuerza-Tiempo para los 5 especímenes de fibras frescas de cabuya sometidos a ensayos de tracción horizontal. Las curvas se observan en la interfaz gráfica, en donde los datos de fuerza y desplazamiento son receptados y procesados en parámetros mecánicos de interés. En las curvas del gráfico 5-3 se presenta el comportamiento de cada espécimen frente a la prueba de tracción.

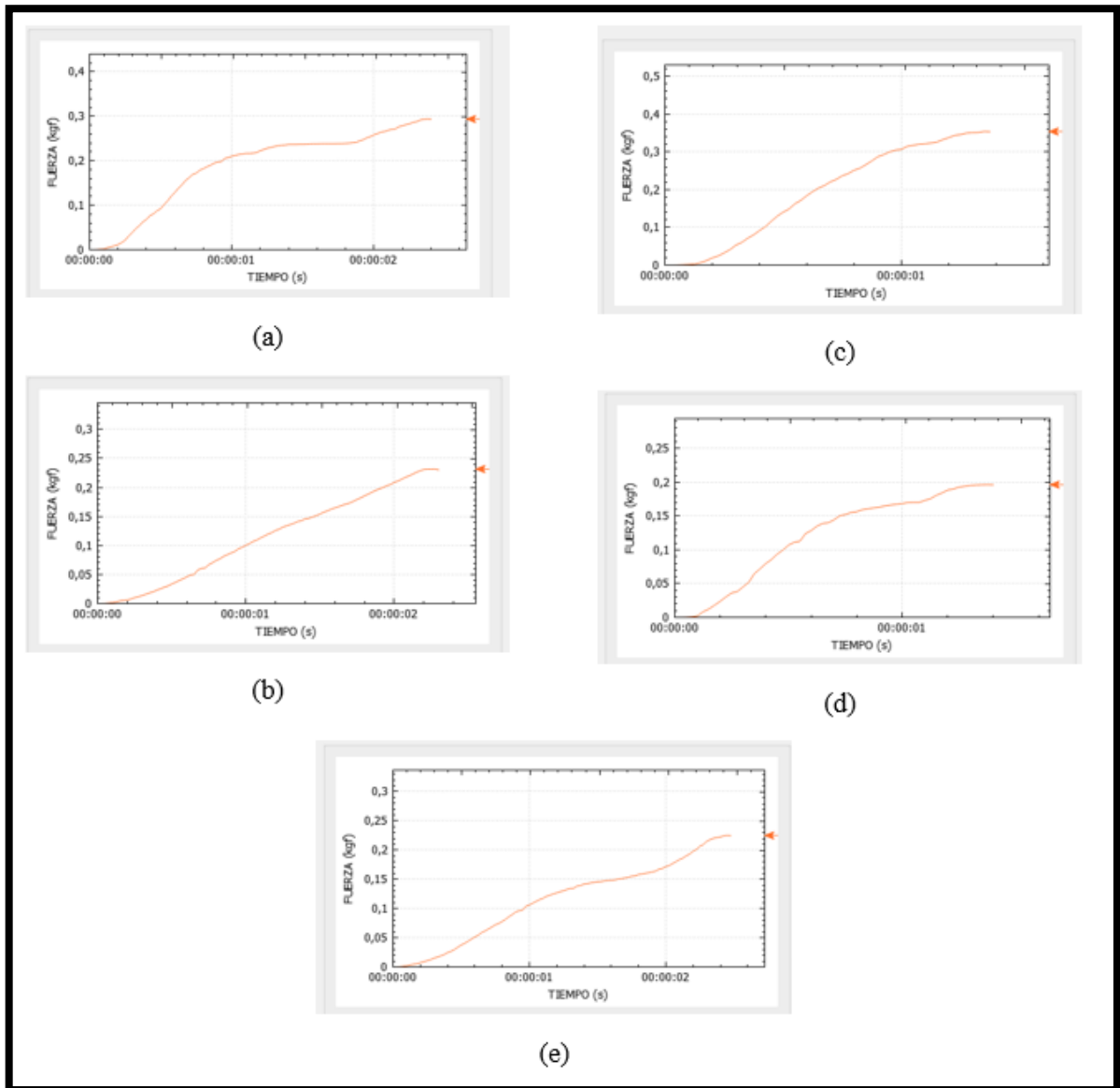


Gráfico 5-3. Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes frescos de cabuya.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Los ensayos mecánicos aplicados en fibras vegetales frescas de cabuya permiten conocer el comportamiento mecánico de la fibra bajo cargas axiales controladas. La caracterización se realiza a un total de 5 especímenes de iguales características dimensionales y se obtienen los siguientes resultados como se observa en la tabla 6-3. El esfuerzo máximo a la tracción se calcula utilizando la ecuación (3-3) y la deformación se calcula con la fórmula (4-3). Las pruebas mecánicas se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales.

Tabla 6-3. Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras frescas de cabuya.

N°. Especimen	Longitud (mm)	Área (mm²)	Fuerza (kgf)	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	83,26	26,64	0,2937	108116	3,84939
2	83,26	26,64	0,2316	85256	3,80735
3	83,26	26,64	0,3538	130240	2,14629
4	83,26	26,64	0,1964	72298,3	2,05741
5	83,26	26,64	0,2249	82642,4	4,18929

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

3.2.3.2 *Ensayos de tracción en fibras secas de cabuya*

En la figura 6-3, se presenta los ensayos experimentales de tracción horizontal realizado a especímenes de fibras secas de cabuya. Se seleccionaron un total de 5 especímenes en condiciones fisiológicas iguales. Los ensayos de tracción se realizaron 1 mes después de extraer los especímenes de la planta. Las fibras fueron expuestas a una temperatura aproximada de 27° C para reducir la humedad. Las dimensiones longitudinales de cada espécimen son de 86.26 mm x 0.32 mm aproximadamente.

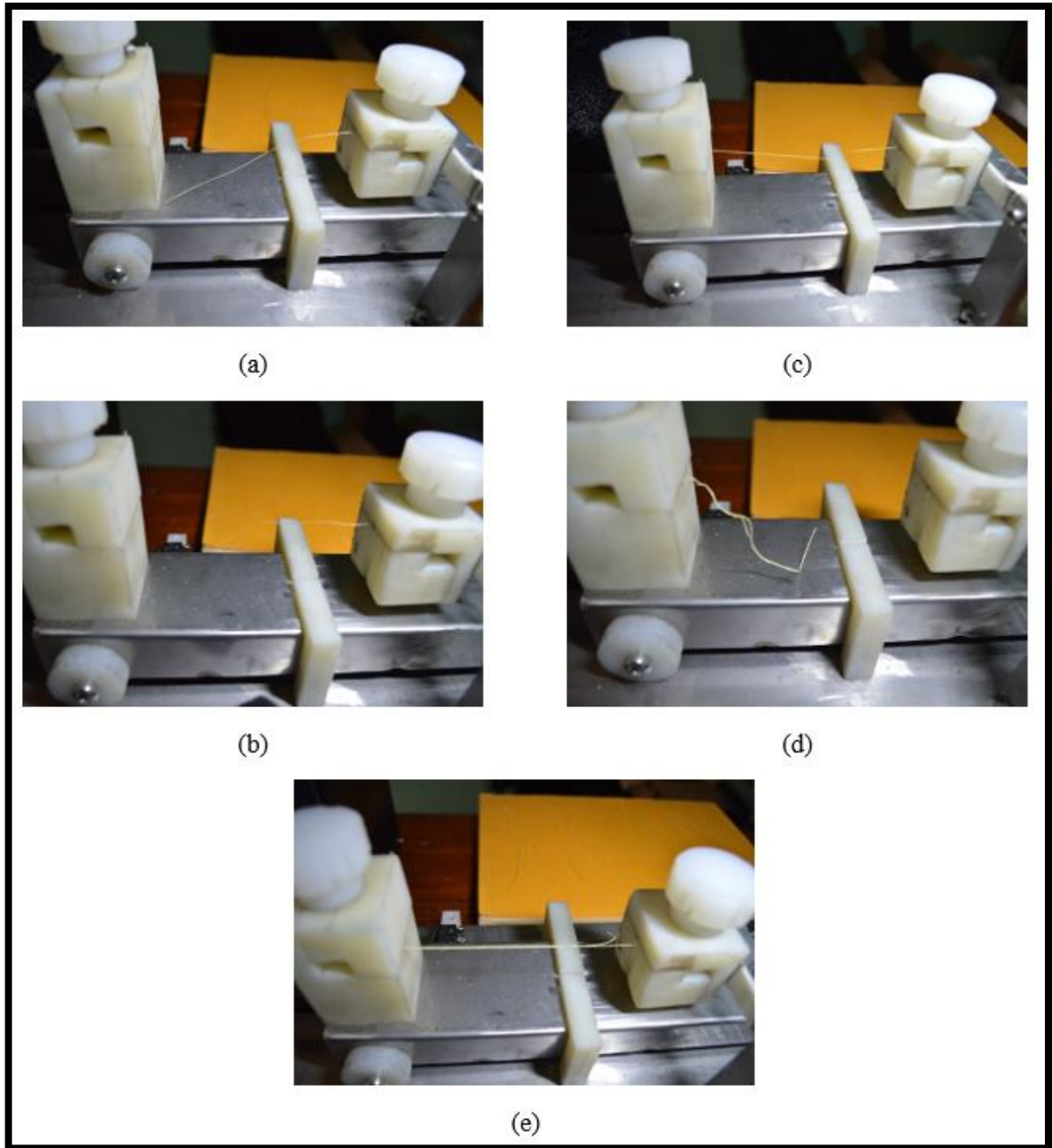


Figura 6-3. Ensayos experimentales de tracción en fibras secas de cabuya.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En el gráfico 6-3, se presenta las curvas de relación Fuerza-Tiempo para los 5 especímenes de fibras secas de cabuya sometidos a ensayos de tracción horizontal. Las curvas se observan en la interfaz gráfica, en donde los datos de fuerza y desplazamiento son receptados y procesados en parámetros

mecánicos de interés. En las curvas del gráfico 6-3 se aprecia el comportamiento de cada espécimen frente a la prueba de tracción.

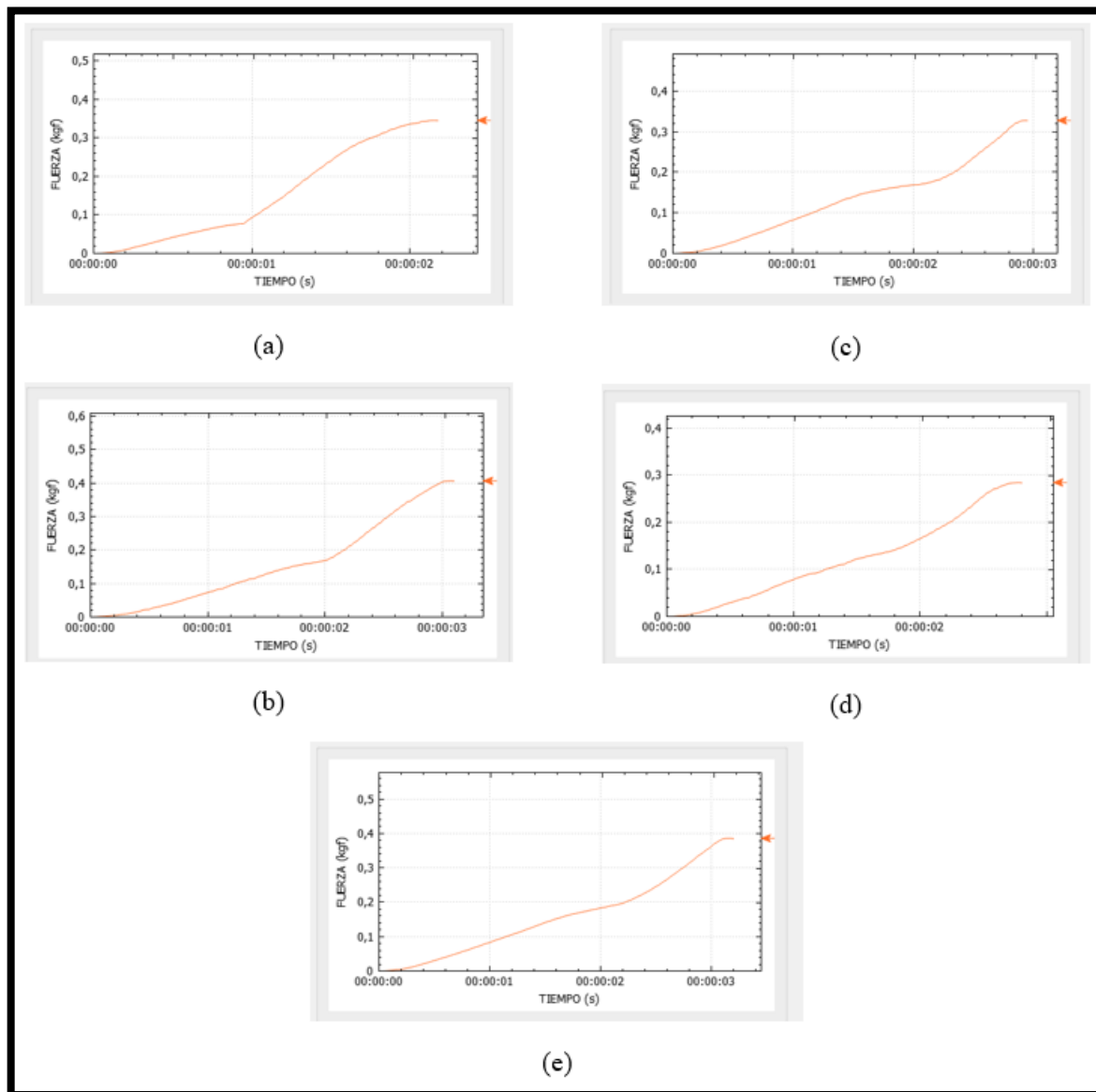


Gráfico 6-3. Curvas Fuerza-Tiempo de 5 especímenes secos de cabuya.

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

La caracterización de los parámetros mecánicos se realiza a un total de 5 especímenes de fibras secas de cabuya de iguales características dimensionales y se obtienen los siguientes resultados como se observa en la tabla 7-3. La longitud inicial para cada prueba es de 83.26 mm. El esfuerzo

máximo a la tracción se calcula utilizando la ecuación (3-3) y la deformación se calcula con la fórmula (4-3). Las pruebas mecánicas se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales.

Tabla 7-3. Parámetros mecánicos y dimensionales de fibras secas de cabuya.

N° Especimen	Longitud (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (kgf)	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	83,26	29,97	0,3454	127148	4,43827
2	83,26	29,97	0,4065	133013	4,87749
3	83,26	29,97	0,3274	107130	4,49195
4	83,26	29,97	0,2845	93092,8	4,35623
5	83,26	29,97	0,3859	126272	4,85948

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

Los resultados correspondientes a las pruebas de tracción en fibras frescas y secas de cabuya como se observa en la tabla 6-3 y tabla 573, respectivamente, evidencian que las fibras secas de cabuya presentan mayor resistencia a la tracción.

3.2.4 Canela

La canela es una de las especias más antiguas conocidas perteneciente a la familia Lauraceae, del género Cinnamomun. El árbol es nativo de la India e Indochina y alcanza alturas de 8-17 m. La corteza y hojas son generalmente utilizadas en la industria de alimentos y bebidas, perfumería y farmacéutica debido a sus propiedades aromáticas y sazadoras. El aceite esencial de la canela presenta una gran diversidad en su composición y es utilizado en la medicina popular por presentar propiedades medicinales (González Cabrera, 2010, pp. 93-94).

3.2.4.1 Ensayos de tracción en hojas de canela

Se realizan los ensayos de tracción a un total de 2 especímenes de hojas de canela con distintas condiciones fisiológicas como se observa en la figura 7-3. La primera prueba se realizó a una hoja

que presenta condiciones de vida sanas, mientras que el segundo espécimen muestra pequeñas aberturas en su cuerpo como consecuencia de la intervención de alguna plaga. Las pruebas de tracción se realizaron 15 minutos después de adquirir los especímenes vegetales.

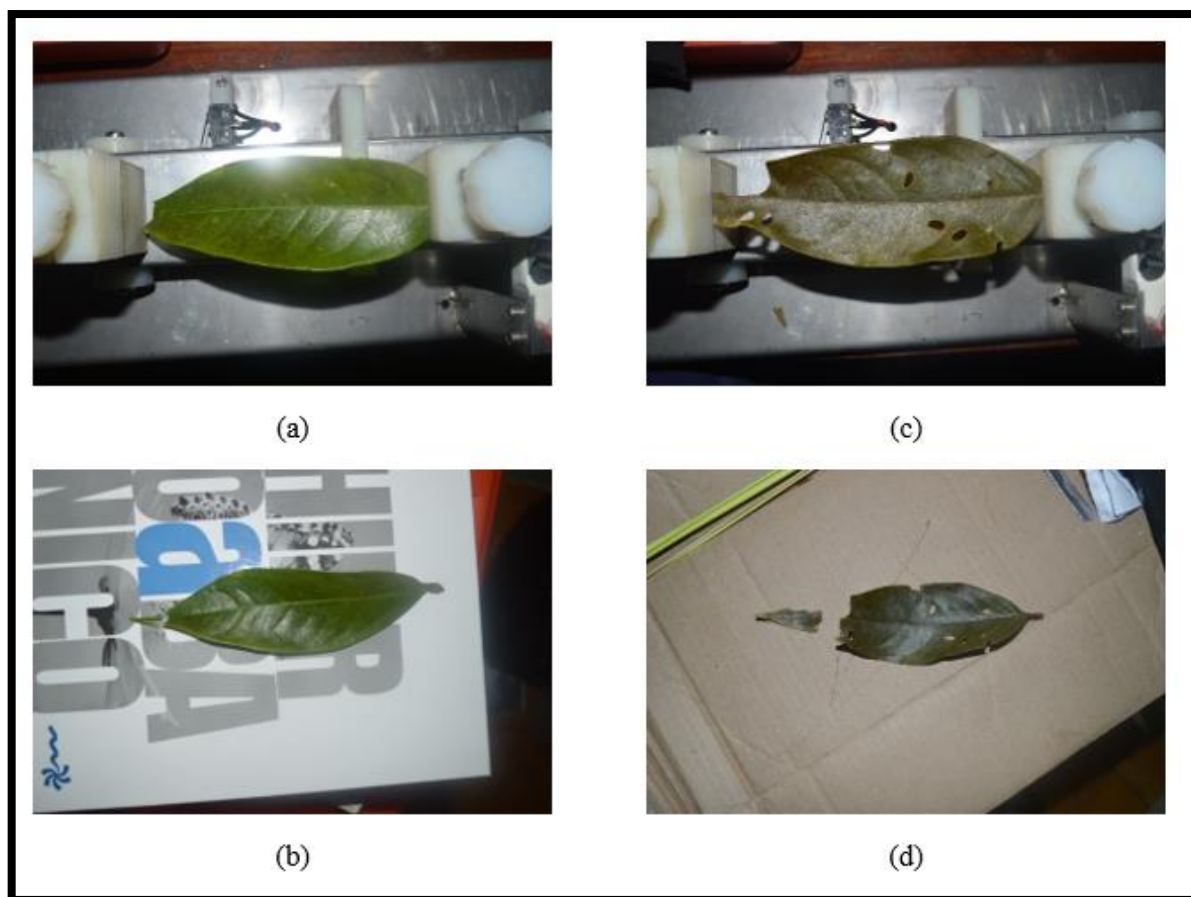


Figura 7-3. Ensayos experimentales de tracción en hojas de canela.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En el gráfico 7-3, se presenta las curvas de comportamiento de cada espécimen vegetal sometido a la prueba de tracción. En el gráfico 7-3(a), la curva de comportamiento mecánico presenta mayor elongación debido a las condiciones en las que se encuentra el espécimen.

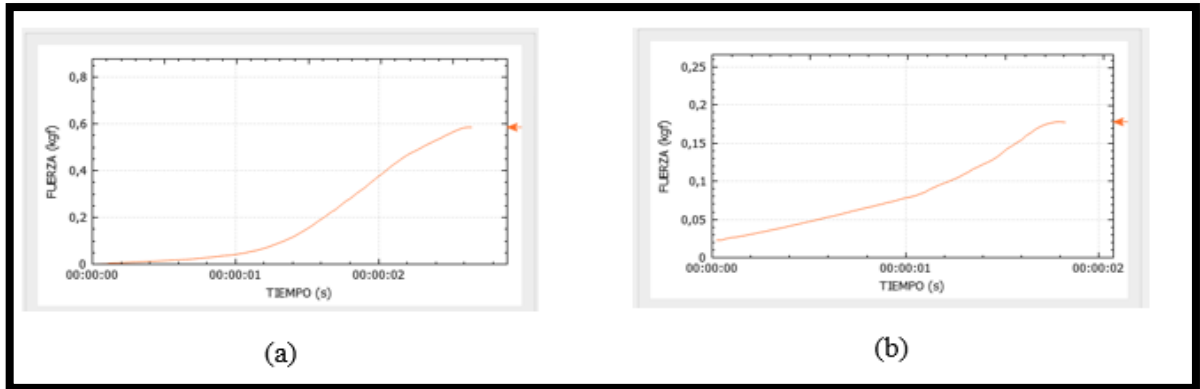


Gráfico 7-3. Curvas Fuerza-Tiempo de diferentes especímenes de hojas de canela.
Fuente: Sacaquirin Alexander, 2019.

En la tabla 8-3, se observa los resultados del comportamiento mecánico de los 2 especímenes de hojas de canela. Los especímenes tienen diferentes características dimensionales. El espécimen con condiciones de vida más sanas muestra una mayor resistencia a la tracción de 1059.6 Pa frente al espécimen con condiciones poco saludables que presenta una resistencia a la tracción de 311.162 Pa. El esfuerzo máximo a la tracción se calcula utilizando la ecuación (3-3) y la deformación se calcula con la fórmula (4-3). Las pruebas mecánicas se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales.

Tabla 8-3. Parámetros mecánicos y dimensionales de hojas de canela.

Nº. Especimen	Longitud (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (kgf)	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	139	5720,5	0,5858	1059,6	2,07725
2	147	5528,5	0,178	311,162	1,36289

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

3.2.5 Limón

En Ecuador se cultivan principalmente el limón Sutil y limón Tahití para el consumo local y la exportación, respectivamente. Los principales cultivos se encuentran en las provincias de Pichincha, Manabí y Guayas. En particular, el limón Tahití presenta un contenido de jugo del 40-60 % con un

índice de acidez de 5-10 %. Se consideran medicinales por sus altas propiedades de ácido cítricas (Badillo Perero, 2011, pp. 18-24).

3.2.5.1 Ensayos de tracción en hojas limón

Se realizan los ensayos de tracción a un total de 3 especímenes de hojas de limón, los cuales presentan distintas condiciones fisiológicas como se observa en la figura 8-3. La primera prueba se realizó a una hoja de color verde claro, la cual es una característica de una hoja tierna. El segundo espécimen exhibe características maduras y es de un color verde oscuro. El último espécimen muestra pequeñas anomalías de color oscuro en la lámina de la hoja. Las pruebas de tracción se realizaron 22 minutos después de adquirir los especímenes vegetales.

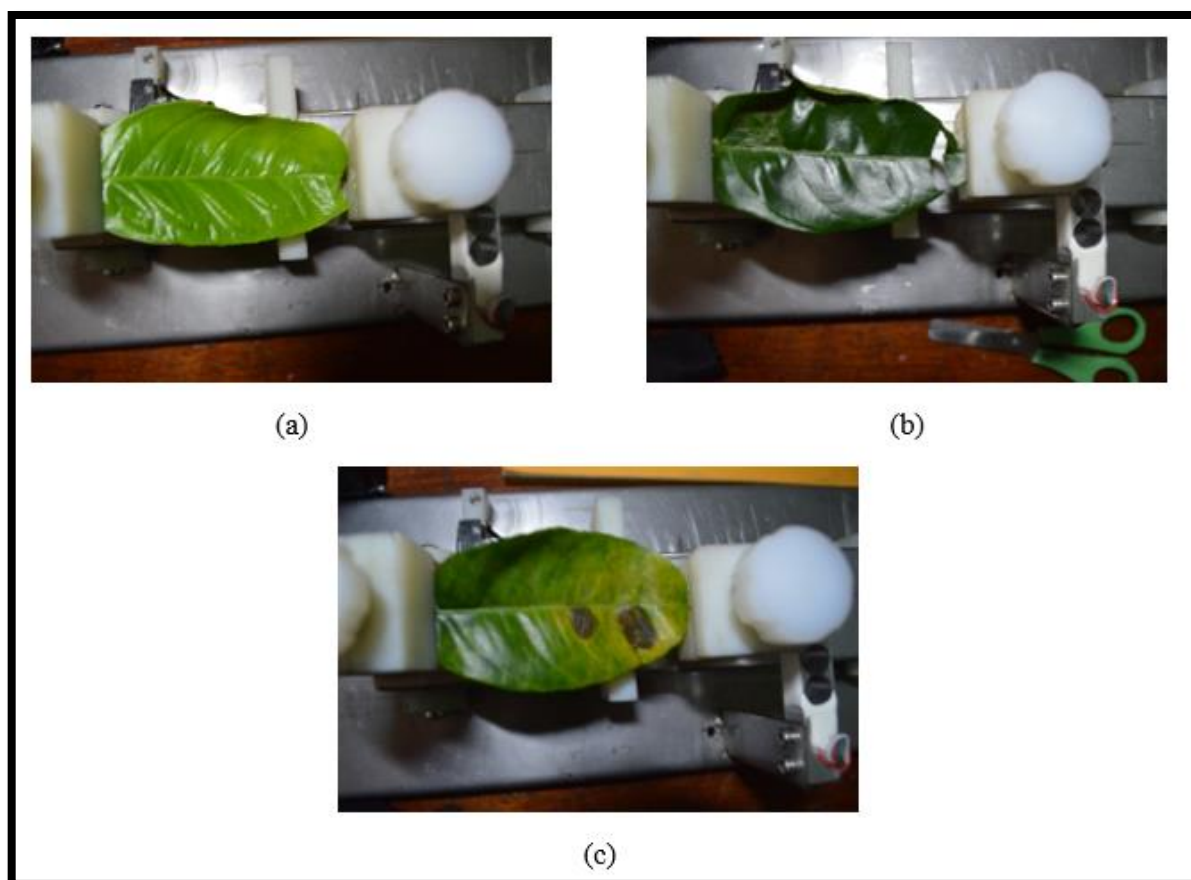


Figura 8-3. Ensayos experimentales de tracción en hojas de limón.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En el gráfico 8-3, se presenta las curvas de relación Fuerza-Tiempo correspondiente a cada uno de los especímenes de hojas de limón sometidos a ensayos de tracción horizontal.

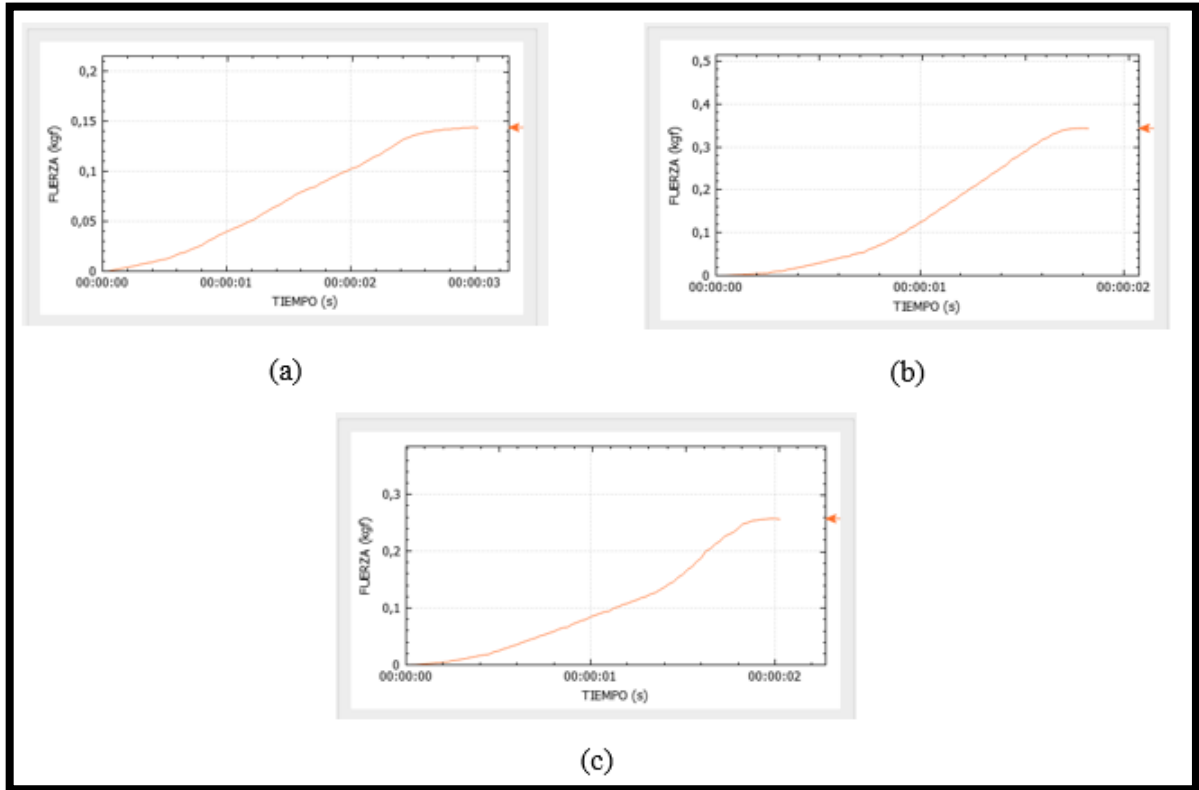


Gráfico 8-3. Curvas Fuerza-Tiempo de diferentes especímenes de hojas de limón.
Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

En la tabla 9-3, se observa los resultados del comportamiento mecánico de los 3 especímenes de hojas de limón. Los especímenes tienen diferentes características dimensionales. El primer espécimen muestra una resistencia a la tracción de 3524.43 Pa con una fuerza máxima de 0.1438 kgf. El segundo espécimen con características de vida adulta presenta una mayor resistencia a la tracción de 9013.96 Pa. El último espécimen tiene una resistencia a la tracción de 6808.3 Pa. El esfuerzo máximo a la tracción se calcula utilizando la ecuación (3-3) y la deformación se calcula con la fórmula (4-3). Las pruebas mecánicas se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales.

Tabla 9-3. Parámetros mecánicos y dimensionales de hojas de limón.

N°. Espécimen	Longitud (mm)	Área (mm²)	Fuerza (kgf)	Esfuerzo (Pa)	Deformación
1	83,26	400,12	0,1438	3524,43	4,22652
2	83,26	373,49	0,3433	9013,96	2,74682
3	83,26	370,47	0,2572	6808,3	3,03988

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

3.3 Determinación del consumo de energía del prototipo electromecánico

Considerando los requerimientos de corriente para cada módulo electrónico que se presenta en la tabla 10-3, se obtiene como resultado un total de corriente de 1704.3 mA requerida para el correcto funcionamiento del prototipo electromecánico. Por lo tanto, se utiliza dos baterías LIPO con las características mencionadas en el capítulo 2 con conexión en serie. Mediante cálculos matemáticos se estima que el prototipo en total funcionamiento tendrá una autonomía de 1.2 horas aproximadamente.

Tabla 10-3. Consumo de corriente de cada módulo electrónico.

Módulo	Corriente (mA)
Circuito Sensor y Adquisición de señal	1.6
Circuito Fuente	2.7
Driver a4988	1700
TOTAL	1704.3

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

3.4 Análisis de costos

En la tabla 11-3 se presenta el análisis económico para cada uno de los módulos diseñados con sus respectivos componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos utilizados para la implementación del prototipo. El prototipo tiene un costo total de \$472,00. Los valores económicos están dados en dólares americanos (USD).

Tabla 11-3. Análisis de costos.

MÓDULO	COMPONENTES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
CIRCUITO SENSOR Y ADQUISICIÓN DE SEÑAL	Amplificador de instrumentación AD620	1	10,00	10,00
	Tarjeta de desarrollo Núcleo F446re	1	59,00	59,00
	Celda de carga 1kg	1	15,00	15,00
	Driver a4988	1	5,00	5,00
	Componentes varios	1	35,00	35,00
CIRCUITO FUENTE	Batería LIPO	2	40,00	80,00
	Componentes varios	1	35,00	35,00
SISTEMA ESTRUCTURAL	Base	1	80,00	80,00
	Cruceta	1	25,00	25,00
	Mordaza	2	10,00	20,00
	Tornillo trapezoidal	1	10,00	10,00
	Acople flexible	1	5,00	5,00
	Motor paso a paso	1	28,00	28,00
	Carcaza circuitos	1	65,00	65,00
TOTAL				472,00

Realizado por: Sacaquirin Alexander, 2019.

CONCLUSIONES

Se implementó un prototipo electromecánico para medición de fuerzas de tracción horizontal aplicado a fibras vegetales que permiten conocer la deformación del material al aplicar una fuerza creciente controlada menor a 1 kgf.

La implementación del prototipo se realizó en 5 etapas, las cuales contribuyeron a definir los requerimientos técnicos de diseño y construcción del instrumento de medición, así como también los parámetros específicos de selección de los componentes electromecánicos, electrónicos y eléctricos.

La autonomía del prototipo electromecánico permite el funcionamiento constante mayor a 1 hora y su diseño portable hace posible el desarrollo de los ensayos mecánicos directamente en el campo donde las muestras son recolectadas.

Los parámetros resultantes obtenidos de los ensayos experimentales de tracción aplicado en fibras vegetales dependen mucho de las condiciones en las que se encuentra la fibra, en especial, su grado de humedad, y permiten conocer de manera general parámetros mecánicos de interés.

RECOMENDACIONES

Para mejorar la adquisición de la lectura analógica se recomienda minimizar o eliminar las vibraciones producidas por el actuador.

Para mejorar la precisión de las características dimensionales de la morfología de los especímenes de estudio se recomienda realizar un análisis de la longitud y sección transversal por medio de un estudio microscópico o microscopia de escaneo electrónico.

Para evitar errores en la lectura analógica del prototipo, se recomienda verificar la sensibilidad del sensor después de exponer el prototipo a condiciones ambientales de campo.

Se recomienda utilizar el instrumento de medición desarrollado en estudios de correlación de muestras vegetales y problemas fitosanitarios para investigaciones en el área biológica y agronómica.

BIBLIOGRAFÍA

ALONSO-VANTE, N. *Electroquímica y electrocatálisis Materiales: aspectos fundamentales y aplicaciones* [en línea]. Buenos Aires-Argentina: El Cid Editor, 2005. [Consulta: 23 octubre 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/detail.action?docID=3161117>

ALVES FIDELIS, M. E., PEREIRA CASTRO, T. V., GOMES MARTINS, O. F., DE ANDRADE SILVA, F. y TOLEDO FILHO, R. D. “The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers”. *Journal of Materials Research and Technology* [en línea], 2013, Brazil, vol. 2, no. 2, pp. 149-157. ISSN 22387854. DOI 10.1016/j.jmrt.2013.02.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>.

ALZATE RODRÍGUEZ, E. J., MONTES OCAMPO J. W. y SILVA ORTEGA, C. A. “Medidores de deformación por resistencia: galgas extensiométricas”. *Scientia et Technica* [en línea], 2007, (Colombia), vol. 1, no. 34, pp. 7-11. [Consulta: 28 enero 2019]. ISSN 0122-1701. DOI <http://dx.doi.org/10.22517/23447214.5519>.

BADILLO PERERO, Mayra Daniela. *Estudio comparativo del potencial nutritivo del limón persa (Citrus Latifolia Tanaka) deshidratado en secador de bandejas y en microondas* [En línea] (Tesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2011. pp. 18-24. [Consulta: 2019-10-25]. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/1577>.

BENNETT, B. C. ALARCÓN, R. y CERÓN C. “The ethnobotany of *Carludovica palmata* Ruiz & Pavón (Cyclanthaceae) in Amazonian Ecuador”. *Economic Botany*, vol. 46, no. 3 (1992), (USA) pp. 233-234.

BOCKRIS, J. *Electroquímica moderna* [en línea]. Volumen 2. Valencia: Editorial Reverté, 2019. [Consulta: 23 octubre 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/detail.action?docID=5885287>.

BUDINSKI, K. G. *Engineering Materials: Properties and Selection*. Séptima edición. Ohio-USA: Pearson Education, 2002, pp. 38-45.

- BUDYNAS, R. G. y NISBETT, J. K.** *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Octava edición. Ciudad de México-México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2008, p. 403.
- CONTRERAS, M., HORMAZA, W. A. y MARAÑÓN, A.** “Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster”. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 1, no. 1, (2009), (Venezuela) pp. 57-67.
- CORONA RAMÍREZ, L. G., ABARCA JIMÉNEZ, G. S. y MARES CARREÑO, J.** *Sensores y actuadores Aplicaciones con Arduino*. Ciudad de México-México: Grupo Editorial Patria, 2014, pp. 25-218.
- DAVIS, J.R.** *Tensile testing*. Second edition. Ohio-USA: Davis & Associates, 2004, pp. 65-84.
- ESPINOSA, F. S.** *Los microcontroladores AVR de Atmel*. Oaxaca-México: Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2012, pp. 15-70.
- EYNDEN, V., CUEVA, E. y CABRERA, O.** “Wild Foods from Southern Ecuador”. *Economic Botany*, vol. 57, no. 4 (2003), (United State of America) pp. 576-603.
- GONZÁLEZ CABRERA, María Verónica.** *Conservación de mora, uvilla y frutilla mediante la utilización del aceite esencial de canela (Cinnamomum zeynalicum)* [En línea] (Tesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 2010. pp. 93-94. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/737>.
- JENNINGS, S.** *Motores Paso a Paso* [en línea]. Colombia, 2005. [Consulta: 23 octubre 2019]. pp. 47-58. Disponible en: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/899
- KULKARNI, A. G., SATYANARAYANA, K. G., SUKUMARAN K. y ROHATGI P. K.** “Mechanical behaviour of coir fibres under tensile load”. *Journal of Materials Science*, vol. 16, (1981), (India) pp. 905-906.
- LÓPEZ, L., SARMIENTO, A., FAJARDO, J., VALAREZO, L. y ZULUAGA GALLEGU, R.** “Determinación del porcentaje de humedad, solubles e insolubles en agua de la fibra de

Carludovica Palmata (paja toquilla)". *Ingenius*, no. 9 (2013), (Ecuador) pp. 23-27. ISSN: 1390-650X. DOI: 10.17163/ings.n9.2013.03.

LÓPEZ-ELÍAS, J., RODRÍGUEZ, J., HUEZ, M., GARZA, S., JIMÉNEZ, J. y LEYVA E. "Producción y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero usando dos sistemas de poda". *Idesia* [en línea], 2011, (México), vol. 32, no. 2, pp. 21-27. [Consulta: 28 enero 2019]. ISSN 0718-3429. DOI 10.4067/S0718-34292011000200003. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292011000200003&lng=es&nrm=iso. ISSN 0718-3429. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000200003>.

MARRETT, R. y PEACOCK, D., "Strain and stress". *Journal of Structural Geology* [en línea], 1999, (United States of America) vol. 21, no. 8-9, pp. 1057-1063. [Consulta: 28 enero 2019]. ISSN 01918141. DOI 10.1016/S0191-8141(99)00020-6. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814199000206>

PALLÁS, R., *Sensores Y Acondicionadores De Señal*. Cuarta edición. Barcelona-España: Marcombo, 2005, pp. 60-288.

PERLES, Á. *ARM Cortex-M práctico Introducción a los microcontroladores STM32 de ST*. Valencia-España: Universitat Politecnica de Valencia, 2017, pp. 206-270.

PRESSMAN R. S. *Ingeniería del Software Un enfoque práctico*. Séptima edición. Ciudad de México-México: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2012, pp. 265-281.

REYES ABAD, Denisse Alexandra. *Experimentación con la Paja Toquilla como elemento expresivo en el diseño interior* [En línea] (Tesis). Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. 2015. pp. [Consulta: 2019-10-29]. Disponible en: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/4701>.

SALAS ARRIARÁN, S. *Todo sobre sistemas embebidos. Arquitectura, programación y diseño de aplicaciones prácticas con el PIC18F* [en línea]. Lima-Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2015. [Consulta: 22 octubre 2019]. Disponible: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/espochsp/detail.action?docID=4850235>.

TAMAYO DUQUE, Napoleón Andrés. *Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación* [En línea] (Tesis). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2012. pp. 3. [Consulta: 2019-1023]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4714>.

TOMCZAK, F., DEMÉTRIO SYDENSTRICKER, T. H. y SATYANARAYANA, K. G. “Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [en línea], 2007, (Brazil), vol. 38, no. 7, pp. 1710-1721. [Consulta: 28 junio 2019] ISSN 1359835X. DOI 10.1016/j.compositesa.2007.02.004. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X07000280>

YOUNG, W.C. y BUDYNAS, R. *Roark's Formulas for Stress and Strain* [en línea]. Séptima edición. United States of America: McGraw-Hill, 1976. [Consulta: 28 enero 2019]. Disponible en: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1403104>.

ANEXOS

ANEXO A: Manuel de Usuario

1.1 Requisitos de Software.

1.1.1 Windows 10.

1.1.2 TensileTestingSoftware.exe.

1.2 Instalación del archivo TensileTestingSoftware.exe.

1.2.1 Ejecutar el archivo TensileTestingSoftware.exe como administrador.

1.2.2 Elegir la carpeta de destino.

1.2.3 Elegir entre la opción Para todos los usuarios o Solo este usuario.

1.2.4 Clic en siguiente.

1.2.5 Esperar hasta que el proceso finalice.

1.2.6 Si aparece una ventana emergente hacer clic en Permitir o Si.

1.2.7 Clic en cerrar.

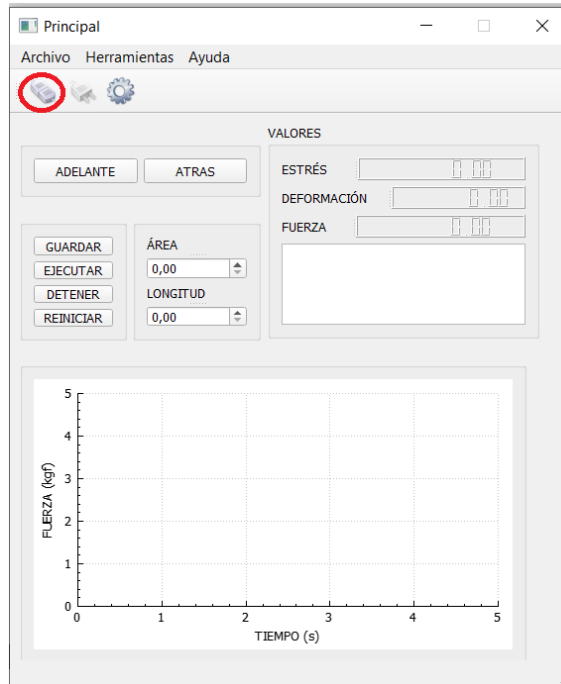
1.3 Ejecución del ensayo mecánico.

1.3.1 Verificar que el interruptor On/Off (de color rojo) se encuentre apagado (0).

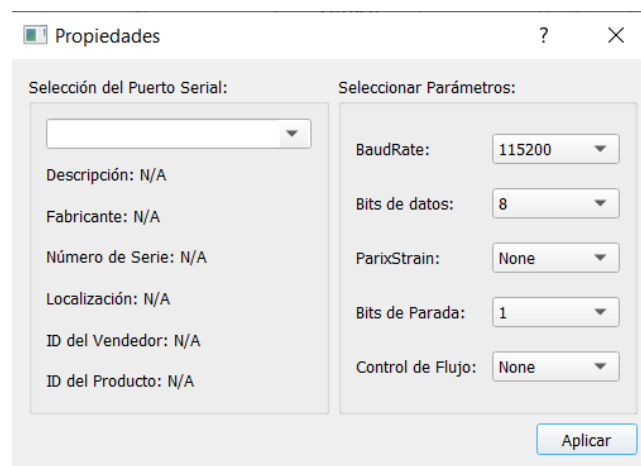
1.3.2 Conectar el cable de comunicación serial (cable azul) a la computadora y a la tarjeta de desarrollo.

1.3.3 Abrir la interfaz gráfica previamente instalada.

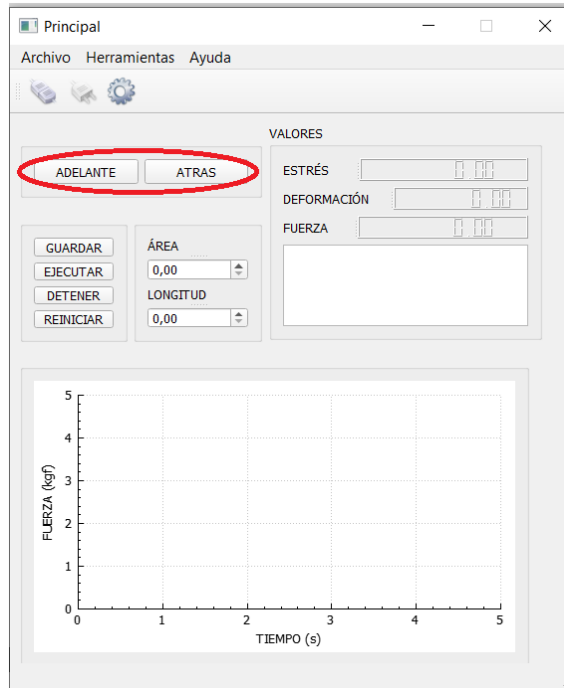
1.3.4 Se abre la siguiente ventana, en donde se elige la opción Conectar, señalada de color rojo.



Nota: Se realizará la comunicación serial con los parámetros establecidos por defecto como se muestra en la siguiente imagen.



1.3.5 Se procede a ajustar la longitud inicial para la prueba de tracción desplazando la cruceta con la ayuda de las opciones ADELANTE, ATRÁS como se muestra en la imagen.

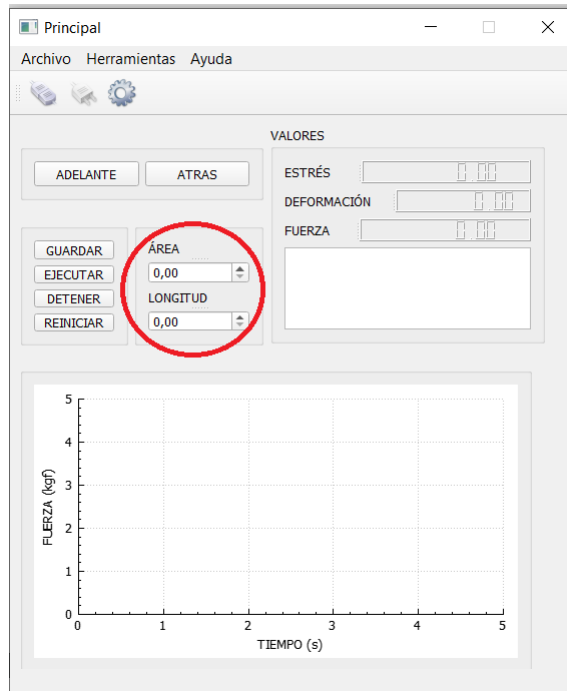


Nota: El espacio de trabajo se encuentra limitado por dos finales de carrera, teniendo la longitud mínima y máxima de 83.26 mm y 180.80 mm, respectivamente.

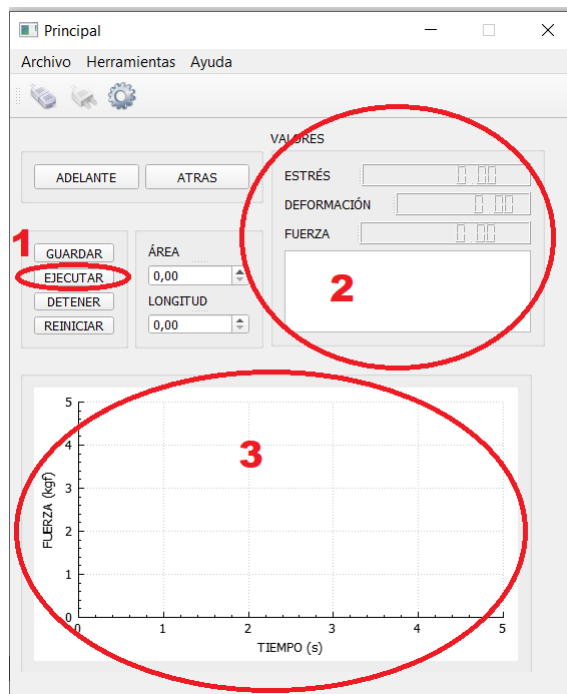
1.3.6 Se procede a colocar el espécimen de estudio entre las mordazas. Cada mordaza cuenta con unas perillas que permite ajustar el espécimen en cada extremo.



1.3.7 Teniendo ajustada la longitud inicial, se procede a escribir los parámetros de longitud y área en las opciones que presenta la interfaz como se observa en la imagen.

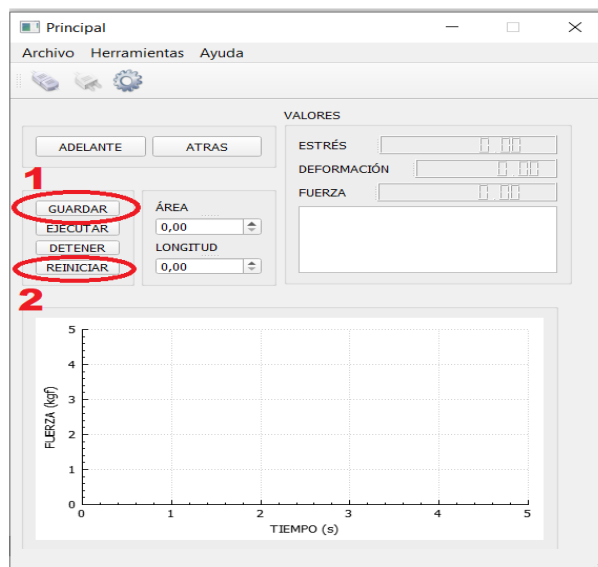


1.3.8 Se procede a ejecutar el ensayo mecánico. En primer lugar, se enciende la máquina accionando el interruptor (color rojo). Posteriormente, se hace clic en la opción EJECUTAR (1). Los parámetros de interés se observan en el panel de valores (2) y la curva Fuerza-Tiempo en la opción gráfica (3).

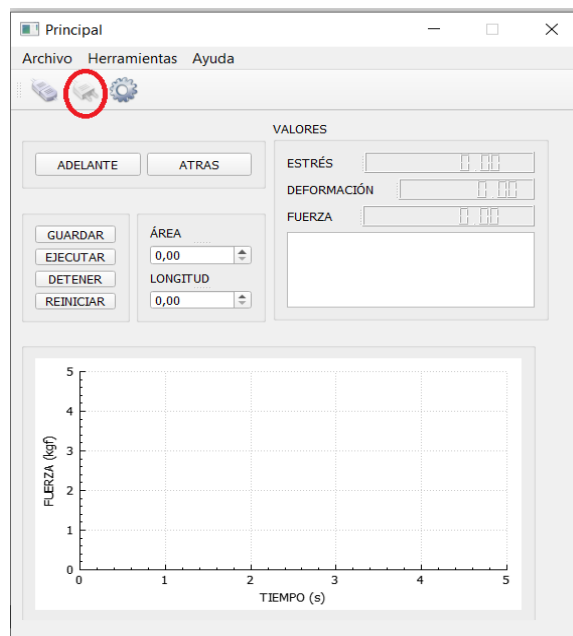


Nota: La interfaz gráfica emite mensajes de alerta cuando ha finalizado el ensayo mecánico o cuando la fuerza sobrepasa el rango permitido.

1.3.9 Terminado el ensayo mecánico, la opción GUARDAR (1) permite almacenar los parámetros del proceso en un archivo con extensión .csv. La opción REINICIAR (2) permite reestablecer la cruceta a su posición inicial definida en 83.26 mm.



1.3.10 Para finalizar, se apaga la máquina accionando el interruptor y se desconecta la comunicación serial haciendo clic en la opción Desconectar como se muestra en la imagen. Finalmente, se desconecta el cable azul de la computadora y la tarjeta de desarrollo.





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS PARA EL
APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 12 de noviembre de 2019

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres - Apellidos: Alexander Cornelio Sacaquirin Rivadeneira
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Informática y Electrónica
Carrera: Ingeniería en Electrónica, Control y Redes Industriales
Título a optar: Ingeniero en Electrónica, Control y Redes Industriales
Analista de Biblioteca responsable: