

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO DE ENSAYOS MECÁNICOS PARA TEJIDOS BIOLÓGICOS Y BIOMATERIALES

Por

MELANIE ADLER  
DARÍO FIANDRINO  
AGUSTÍN SOLDÁN  
TOMÁS SWINNEN

Proyecto Final de Carrera presentado al  
Instituto Tecnológico de Buenos Aires  
por los títulos de  
BIOINGENIERÍA E INGENIERÍA MECÁNICA



Departamentos de Bioingeniería e Ingeniería Mecánica  
Instituto Tecnológico de Buenos Aires  
Abril 2021

© Propiedad de MELANIE ADLER, DARÍO FIANDRINO, AGUSTÍN SOLDÁN, TOMÁS  
SWINNEN, 2021  
Todos los derechos reservados

Para el Instituto Tecnológico de Buenos Aires

Los miembros del comité encargados de examinar a MELANIE ADLER, DARÍO FIAN-  
DRINO, AGUSTÍN SOLDÁN, TOMÁS SWINNEN la encuentran satisfactoria y recomiendan  
que sea aceptada.

---

Sandra Wray, Dra. Ing., Tutora

---

Anibal Rodríguez, Ing., Tutor

---

Matías Pretel, Ing., Co-tutor

## RECONOCIMIENTOS

Queremos reconocer y agradecer la colaboración y compromiso de Juan Zubiri, Francisco Polano y Guillermo Ufinger, quienes fueron consultados a lo largo de todo el proceso de desarrollo del proyecto, y a quienes a través de las reuniones virtuales nos dieron su opinión y perspectiva frente a la problemática propuesta.

Se le agradece también a los profesores Nelson Fortunatti, Fernando Baidanoff, Nicolás Oyarzabál y Christian Zujew por su colaboración.

Un especial reconocimiento al Departamento de Bioingeniería del Instituto Tecnológico de Buenos Aires que colaboró en gran parte con la ayuda financiera para poder realizar este proyecto. También al Departamento de Investigación y Desarrollo que colaboró con el proyecto.

Por último, agradecemos a quienes forman parte de nuestras vidas, comparten nuestros sueños y han sido de sostén y acompañamiento durante todos los años de carrera. Entre tantas personas destacamos a: Jorge Adler, Adriana Ramirez Andreani, Federico Adler, Agustín Artero, Ibana Almada, Guillermo Ramirez, Amelia Andreani, Delfina Hiba, Clara Latour, Omar Soldán, Rodrigo Soldán, Patricia Cortés, Emilia Santoleri, 'La Oriental', Silvina Ovalles, Gerardo Fiandrino, Marco Fiandrino, Agustín Fiandrino, Lesley Reiderman, Tomás Swinnen, Maria Cecilia O'Reilly, Catalina Swinnen, Santiago Swinnen, 'Los Buitres'. Y en especial a nuestros tutores Sandra Wray, Anibal Rodriguez y Matias Pretel por guiarnos en nuestro Proyecto Final de Carrera.

## ABSTRACT

La caracterización mecánica de los materiales se logra a través de ensayos mecánicos que permiten calcular las propiedades que los describen. En la actualidad en el mercado mundial existen dispositivos de alto costo que cumplen con estas funciones. El creciente avance de la tecnología en general y de la bioingeniería en particular, obliga a desarrollar dispositivos que a menor costo permitan evaluar las propiedades de los tejidos biológicos y otros biomateriales sustitutos. El ensayo de estos tejidos y biomateriales requiere de máquinas específicas que emulen sus condiciones nativas de homeostasis electrolítica y temperatura y que sean adecuadas en términos de rangos de fuerza aplicados durante las experiencias. Este trabajo describe el desarrollo de un dispositivo de ensayos mecánicos específicos, de bajo costo, para tejidos biológicos y biomateriales que realiza ensayos dinámicos de tracción, carga y descarga, además de cuasiestáticos de relajación de tensiones y creep, y especialmente adaptado para obtener información de la mecánica de tejidos y biomateriales in-vitro en condiciones controladas análogas a las del cuerpo humano. Las máquinas industriales de ensayos disponibles actualmente en la Universidad para la formación académica, no cumplen con las condiciones que los tejidos biológicos y biomateriales necesitan. Durante el presente trabajo se logró la creación de una máquina específica de bajo costo que permitirá no solo mejorar el desarrollo profesional de estudiantes e investigadores, sino también ampliar la oferta de instrumentos disponibles en el mercado y proveer de este servicio a empresas externas. Para cumplir este último objetivo, es esperable que se realice una evolución sobre el dispositivo elaborado en el presente trabajo.

# Índice general

	Página
<b>1. Motivación y objetivos</b> . . . . .	1
<b>2. Marco de Referencia</b> . . . . .	4
2.1. Máquina de ensayos universal . . . . .	5
2.1.1. Definición . . . . .	5
2.1.2. Principio de funcionamiento . . . . .	6
2.1.3. Componentes . . . . .	7
2.2. Mecánica de los Materiales . . . . .	16
2.2.1. Cargas en los tejidos . . . . .	16
2.2.2. La respuesta de los tejidos a las fuerzas . . . . .	18
2.2.3. Rigidez y Tensiones Admisibles . . . . .	19
2.3. Viscoelasticidad y Elasticidad no-lineal . . . . .	21
2.4. Tipos de ensayo . . . . .	25
2.4.1. Ensayo de tracción cuasiestático . . . . .	25
2.4.2. Ensayo de tracción dinámico . . . . .	26
2.4.3. Ensayo de creep . . . . .	27
2.4.4. Ensayo de relajación de tensiones . . . . .	27
2.5. Probetas normalizadas y no normalizadas . . . . .	28
<b>3. Gestión de Proyectos</b> . . . . .	29
3.1. Stake Holders . . . . .	30
3.2. Alcance . . . . .	31
3.3. Control y organización del trabajo . . . . .	32
3.4. Gantt con hitos . . . . .	32
3.5. Estimación de recursos, restricciones y soluciones . . . . .	35
3.6. Calidad y entregables . . . . .	36
3.7. Liquidación de gastos . . . . .	37

<b>4. Diseño</b>	38
4.1. Control del desplazamiento	39
4.1.1. Motores	40
4.1.2. Tornillo sin fin	47
4.2. Medición de la carga	56
4.3. Medición del desplazamiento	57
4.4. Vinculación equipo-muestra	58
4.5. Potencia del equipo	59
4.6. Frame	60
4.6.1. Diseño y rigidez del frame	61
4.6.2. Análisis de tensiones	67
4.6.3. Verificación de guías lineales	69
4.7. Estanqueidad y movimiento de la cuba principal	72
4.8. Adquisición, procesamiento de datos e interfaz gráfica de usuario	73
4.9. Sistema de calentamiento	74
4.9.1. Calentamiento de la solución fisiológica	74
4.9.2. Estructura	75
4.9.3. Principios y diseño	76
4.9.4. Control de temperatura	78
4.9.5. Diagrama de conexiones del hardware	84
4.9.6. Software del dispositivo	92
4.9.7. Interfaz gráfica de usuario	96
4.10. Análisis de piezas críticas	104
4.10.1. Unión Placa-Celda de carga	106
4.10.2. Brida	110
4.10.3. Placa	119
<b>5. Ensamblaje y Construcción</b>	126
5.1. Ensamblaje del Frame	126
5.2. Eje del ensayo	127
5.3. Cuba principal y sistema de calentamiento	133
5.4. Incorporación de sensores y actuadores	135
<b>6. Conclusiones</b>	139
<b>7. Trabajo a futuro</b>	143

<b>8. Instructivo de Operación del Equipo</b> . . . . .	146
<b>Referencias</b> . . . . .	162
<b>Apéndices</b>	
<b>A. Propuesta de Proyecto</b> . . . . .	164
<b>B. Liquidación de gastos</b> . . . . .	168
<b>C. Planos Mecanizado</b> . . . . .	172
<b>D. Planos de conjuntos</b> . . . . .	185
<b>E. Diagrama del sistema de control PID</b> . . . . .	189
<b>F. Diagrama de flujo de la Interfaz Gráfica</b> . . . . .	191
<b>G. Código MatLab</b> . . . . .	193
<b>H. Código Arduino</b> . . . . .	241

# Índice de figuras

2.1. Ejemplo de máquina universal de ensayos Instron modelo 68TM-10 Dual Column Table Model con sus componentes principales . . . . .	7
2.2. Imagen ilustrativa de motor de CC con sus componentes . . . . .	11
2.3. Tipos de celdas de carga . . . . .	12
2.4. Vista frontal y superior de una galga extensométrica. . . . .	13
2.5. Extensómetro tipo clip on estático . . . . .	14
2.6. Diagrama de un LVDT básico . . . . .	15
2.7. Principales cargas axiales sobre huesos. . . . .	17
2.8. Curva característica de un ensayo de tracción cuasiestático para un sólido elástico lineal. . . . .	20
2.9. Curva característica de un ensayo de tracción cuasiestático para un tendón. .	23
2.10. Curva característica de un ensayo dinámico. . . . .	24
2.11. Diagrama de ensayo de tracción, donde las fuerzas son uniaxiales y en sen- tido opuesto. . . . .	26
2.12. Curvas características de un ensayo de creep. . . . .	27
2.13. Parámetros en un ensayo de relajación de tensiones. . . . .	28

3.1. Etapa 1 y Etapa 2 del Diagrama de Gantt. . . . .	33
3.2. Etapa 3 y Etapa 4 del Diagrama de Gantt. . . . .	34
3.3. Etapa 5 del Diagrama de Gantt. . . . .	34
3.4. Imagen representativa de la simplicidad en el diseño del frame mostrando la posibilidad de ensamblarse fuera de un taller . . . . .	36
4.1. Tipos de bobinados para motores paso a paso que determinan si son motores Bipolares, Unipolares o Multifase. . . . .	44
4.2. Esquema de una señal con microstepping. . . . .	46
4.3. Transmisión de movimiento y componentes que la integran. . . . .	48
4.4. Torque en función de la velocidad de giro del motor . . . . .	60
4.5. Configuración modelo 1 del análisis de rigidez. . . . .	63
4.6. Configuración modelo 2 del análisis de rigidez. . . . .	64
4.7. Configuración modelo 3 del análisis de rigidez. . . . .	64
4.8. Verificación deflexión transversal para el modelo 2 de análisis de rigidez. . .	67
4.9. Tensiones en cada miembro del modelo 2 analizado en el software Risa3D .	68
4.10. Representación de las guías lineales . . . . .	71
4.11. Armado del sistema de desplazamiento vertical de la cuba . . . . .	73
4.12. Diagrama del sistema de calentamiento. . . . .	75
4.13. Temperaturas en un intercambiador de calor según dirección del flujo. . . .	77
4.14. Diagrama en bloques del sistema de control PID . . . . .	78
4.15. Gráfico de temperaturas resultado de la simulación. . . . .	81
4.16. Diseño del sistema de calentamiento en 3D. . . . .	82

4.17.Gráfico para obtener las constantes del PID. . . . .	83
4.18.Tabla de conversión de constantes para hallar $K_p$ , $K_d$ y $K_i$ . . . . .	83
4.19.Diagrama de conexiones. . . . .	85
4.20.Diagrama de conexiones de los sensores de temperatura. . . . .	89
4.21.Diagrama de conexiones del módulo HX711. . . . .	90
4.22.Diagrama de conexiones del MOSFET IRF540. . . . .	90
4.23.Diagrama de conexiones del Stepper Motor Driver DQ542MA. . . . .	91
4.24.Diagrama de conexiones de los 3 pulsadores donde 1 se conecta al pin correspondiente a Arduino para la función programada. . . . .	91
4.25.Pulsos equidistantes y equidurables para el movimiento del motor. . . . .	94
4.26.Diagrama de flujo de la interfaz gráfica de usuario del equipo. . . . .	97
4.27.Pantalla emergente para conectar Arduino a la Interfaz Gráfica. . . . .	98
4.28.Pantalla de opciones para comenzar con la experiencia de la Interfaz Gráfica. . . . .	98
4.29.Pantalla de opciones para colocar la muestra y sus dimensiones. . . . .	99
4.30.Pantalla de la interfaz gráfica donde se elige la rutina a ensayar. . . . .	100
4.31.Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros para el ensayo de tracción. . . . .	101
4.32.Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros para el ensayo de creep. . . . .	102
4.33.Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros para el ensayo de relajación de tensiones. . . . .	103

4.34.Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros para el ensayo de tracción - distracción. . . . .	104
4.35.Primer diseño de análisis de rigidez a analizar. . . . .	107
4.36.Resultados del primer modelo propuesto de análisis de rigidez. . . . .	107
4.37.Diseño del segundo conjunto de análisis de rigidez. . . . .	108
4.38.Resultados del segundo modelo propuesto de análisis de rigidez. . . . .	109
4.39.Malla del análisis final de la brida. . . . .	111
4.40.Primer diseño de la brida. . . . .	112
4.41.Deformaciones y tensiones equivalentes de Von Mises para el primer diseño de la brida. . . . .	113
4.42.Segundo diseño de la brida. . . . .	113
4.43.Deformaciones y tensiones equivalentes de Von Mises del segundo diseño de la brida. . . . .	114
4.44.Tercer diseño de la brida . . . . .	115
4.45.Tensiones equivalentes de Von Mises y deformaciones del tercer diseño de la brida. . . . .	115
4.46.Tensiones equivalentes de Von Mises y deformaciones del cuarto diseño de la brida. . . . .	116
4.47.Diseño final de la brida. . . . .	118
4.48.Tensiones equivalentes de Von Mises del diseño final. . . . .	118
4.49.Medidas de la placa a analizar. . . . .	119
4.50.Disposición de fuerzas a analizar. . . . .	120

4.51. Mallado de la placa. . . . .	121
4.52. Tensiones equivalentes de Von Mises y deformaciones de la placa de 2 <i>mm</i> de espesor. . . . .	122
4.53. Tensiones equivalentes de Von Mises y deformaciones de la placa de 4 <i>mm</i> de espesor. . . . .	123
4.54. Tensiones equivalentes de Von Mises y deformaciones de la placa de 3/16 <i>in</i> de espesor. . . . .	125
5.1. Ensamblaje del Frame. . . . .	127
5.2. Instrucción y materiales de la sección inferior. . . . .	128
5.3. Ensamblaje de la sección inferior. . . . .	129
5.4. Instrucción y materiales de la sección superior. . . . .	130
5.5. Instrucción y materiales de los apoyos de la sección superior. . . . .	131
5.6. Conjunto y medidas de sección superior. . . . .	132
5.7. Ensamblaje de la sección superior. . . . .	132
5.8. Instrucción y materiales de la cuba principal. . . . .	134
5.9. Ensamblaje de la cuba principal. . . . .	134
5.10. Botonera adherida al frame. . . . .	136
5.11. Máquina de Ensayos totalmente ensamblada . . . . .	137
5.12. Máquina de Ensayos terminada y lista para su uso. . . . .	138
6.1. Curva obtenida al realizar un Ensayo de Tracción con una varilla de Polietileno de Alta Densidad. . . . .	139

6.2. Curva obtenida al realizar un Ensayo de Tracción - Distracción con una varilla de Polietileno de Alta Densidad. . . . .	140
8.1. Llave termomagnética en posición 'OFF' para el encendido del equipo. . . .	146
8.2. Archivo para ejecutar la interfaz gráfica de usuario en MatLab versión R2018a.	147
8.3. Cuadro emergente para introducir el puerto y así conectar el equipo a la Interfaz Gráfica. . . . .	148
8.4. Movimiento que se debe realizar para mover la Cuba principal hacia arriba, agarrándolo desde su base. . . . .	149
8.5. Imagen ilustrativa donde se muestra hasta dónde colocar la cuba principal para llenarla con la solución deseada. . . . .	149
8.6. Pantalla de opciones para comenzar encender el Sistema de Calentamiento.	150
8.7. Vista de la pantalla mientras el sistema aguarda a calentar la solución de la cuba principal. . . . .	150
8.8. Pantalla de opciones para comenzar con la experiencia de la Interfaz Gráfica.	151
8.9. Vista de la interfaz gráfica donde se colocan las dimensiones de la muestra a ensayar, se mueven las mordazas hacia arriba y abajo para colocar la muestra y se pone en cero la celda de carga. . . . .	152
8.10. Ajuste manual de la mordaza para una correcta sujeción de la muestra a ensayar. . . . .	153
8.11. Botonera física para mover la mordaza superior hacia arriba de modo que quede tirante la muestra a ensayar. . . . .	154
8.12. Botón para fijar la celda de carga en cero. El valor mostrado en pantalla será aquel que corresponde al inicio del ensayo para determinar el cero de carga.	154

8.13. Vista de la interfaz gráfica donde se elige la rutina a ensayar. . . . .	155
8.14. Ejemplo de los parámetros ingresados para el ensayo de Tracción. . . . .	155
8.15. Vista de la interfaz gráfica donde se frena el ensayo. . . . .	156
8.16. Vista de la interfaz gráfica donde se guardan los valores de la curva graficada y se desconecta la Interfaz del equipo. . . . .	157
8.17. Imagen ilustrativa donde se muestra como se debe girar el tornillo sin fin para regresar la mordaza superior a su punto más alto. . . . .	158

# Índice de cuadros

2.1. Componentes generales de una máquina de ensayos universal Instron modelo 68TM-10 Dual Column . . . . .	8
4.1. Parámetros fijados para el análisis del tornillo sin fin. . . . .	49
4.2. Valores de deflexión para distintos modelos propuestos de frame. . . . .	65
4.3. Propiedades de la sección de los perfiles utilizados. . . . .	66
4.4. Conexiones eléctricas . . . . .	87
4.5. Resultados del análisis del primer modelo propuesto de la unión Placa-Celda.	108
4.6. Resultados del segundo modelo propuesto de análisis de rigidez. . . . .	109
4.7. Comparación de resultados de los modelos propuestos de análisis de rigidez.	109
4.8. Comparación de resultados de los modelos propuestos. . . . .	116
4.9. Comparación de resultados de los modelos de placas propuestos . . . . .	123
B.1. Gastos en compras de componentes. . . . .	169
B.2. Detalle de costos del sin fin y accesorios. . . . .	170
B.3. Gastos en materiales + mecanizado. . . . .	171

# Capítulo 1

## Motivación y objetivos

Cómo debería desarrollarse la bioingeniería de un país emergente? Qué desafíos enfrenta y qué retos debe superar? Cómo llevar a cabo un diseño para transformar un dispositivo de alto costo en un dispositivo de bajo costo, que con los recursos disponibles, permita llegar a todos los ámbitos académicos y contribuir con el desarrollo de profesionales a la altura de los desafíos de la bioingeniería mundial?

El presente Proyecto Final de Carrera tiene por objetivo dotar a los laboratorios de la Universidad, y en especial a la materia Biomecánica, de un dispositivo que permita aplicar la teoría aprendida favoreciendo el conocimiento integral de los profesionales en formación.

Durante el proceso de selección de las alternativas posibles para el Proyecto Final de Carrera, el compromiso y la motivación de la profesora Wray, quien dicta clases de Biomecánica en la carrera de Bioingeniería del ITBA fueron una inspiración y una guía para la elección del tema.

De los desafíos planteados por ella, surgió la propuesta de desarrollar un dispositivo, una máquina de ensayos para tejidos biológicos y biomateriales bajo los parámetros definidos por una búsqueda bibliográfica previa acerca de los ensayos de tejidos. La mayor complejidad del equipo radicó en la necesidad de cumplir el objetivo de acuerdo al presu-

puesto otorgado, agudizando el ingenio y desafiando los límites en sucesivas etapas a lo largo del proceso de creación. Como dificultad adicional, las limitaciones que impuso el Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio durante la Emergencia Sanitaria declarada en Argentina en el año 2020 fomentaron la solidaridad de un grupo que trabajó a distancia bajo la tutela y la guía de quienes se comprometieron desde un inicio con el proyecto. El resultado es un equipo de bajo costo que cumple a la perfección con los objetivos definidos y que quedará en los laboratorios de la Universidad para la investigación y formación de futuros profesionales.

Los ensayos en tejidos biológicos son sumamente importantes en la investigación y en la industria tanto para encontrar nuevos biomateriales como para generar nuevos productos como solución a los incontables problemas en la salud, como es el ejemplo de apósitos para regeneración de tejidos. El desarrollo de la máquina de ensayos se estudiará en este informe desde distintos frentes, que fueron los necesarios para no dejar ningún detalle sin abarcar, desde el diseño, como los componentes principales, sollicitaciones con el análisis pertinente, y sistemas de control.

El objetivo principal del proyecto es diseñar y construir una máquina de ensayos universal cuyas características permitan realizar y registrar los parámetros obtenidos durante ensayos dinámicos y cuasiestáticos en biomateriales y tejidos biológicos. A su vez, se debe poder generar un ambiente controlable que simule el entorno natural del tejido.

En base a éste, se plantean los siguientes criterios con los que debe cumplir la máquina para llegar a estos objetivos:

- Realizar diversos ensayos, principalmente ensayos dinámicos y ensayos cuasiestáticos de tracción. También, ser capaz de realizar ensayos de creep y relajación de tensiones;
- Ensayar tejidos duros y blandos, así como biomateriales elásticos y viscoelásticos con geometrías irregulares comprendidas dentro del objetivo anterior;

- Ensayar muestras con geometrías irregulares comprendidas dentro de los 100 *mm* de largo, 30 *mm* de ancho y 10 *mm* de espesor.
- Contar con una capacidad asociada a la revisión bibliográfica.
- Realizar ensayos sumergidos dentro de solución fisiológica a una temperatura determinada con una tolerancia de  $\pm 1^\circ\text{C}$  controlada por un sistema de calentamiento de diseño propio.

Para poder cumplir con las mismas también se proponen metas particulares de la máquina en cuestión:

- Poseer un *frame* que soporte las solicitaciones a las que se encuentra sometida la misma aportando una rigidez adecuada haciendo uso eficiente de los materiales utilizados.
- Estar comandado por un sistema motor de control que produzca un rango de carga de hasta 500 *N*, y una velocidad máxima de ensayos cuasiestáticos de  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ .
- Poder manipularse a través de una interfaz que permita extraer los datos del ensayo en un formato adecuado y realizar gráficos de tensión-deformación y de histéresis.

Estos serán los puntos que delimiten el proyecto y que se utilizan de parámetro para cumplir con el mismo.

# Capítulo 2

## Marco de Referencia

La medicina regenerativa tiene como objetivo diseñar materiales para reemplazar o restaurar órganos dañados o enfermos. Las propiedades mecánicas de estos materiales deben imitar lo mejor posible a los tejidos humanos que buscan reemplazar. A este concepto se lo llama evitar un *mechanical mismatch*. Es decir, que idealmente el tejido nativo y su reemplazo deben tener propiedades mecánicas compatibles.

Para proveer la forma anatómica y la función requerida, los materiales deben ser capaces de soportar los esfuerzos a los que van a estar sometidos cuando sean implantados en el paciente. Estos materiales van desde el titanio utilizado en prótesis para reemplazo de fémur o rótula, entre las intervenciones más realizadas, hasta procedimientos como restauración de piel en el rostro de un paciente que sufrió quemaduras severas, con las propias células del paciente, para evitar el rechazo.

Del avance de la tecnología y la búsqueda continua de la ciencia para mejorar la calidad de vida, surge el análisis de las características de los materiales que no sólo permite analizar aquellos materiales que ya se conocen, sino encontrar nuevos materiales disponibles que se asemejen a los tejidos biológicos.

Para lograr un biomaterial lo más similar al cuerpo humano, se deben analizar y seleccionar aquellos materiales según sus propiedades mecánicas. Con el objeto de conocer

estas características surgen los ensayos de biomateriales y tejidos biológicos.

Los ensayos son una herramienta fundamental de la ingeniería que emplean equipos de gran sensibilidad y precisión. Entre los más realizados se encuentran los de tracción dinámica y tracción cuasiestática, creep y relajación. Estos ensayos logran caracterizar la naturaleza de los materiales y sus propiedades mecánicas.

## **2.1. Máquina de ensayos universal**

### **2.1.1. Definición**

Una máquina universal de ensayos como se observa en la Figura 2.1 es un dispositivo capaz de realizar ensayos mecánicos para caracterizar diferentes materiales. Algunos de los más comunes son los ensayos de tracción, compresión, flexión o impacto pero la selección de los mismos depende del material a ensayar y las características que se quieran conocer. De este modo, la máquina busca aplicar cargas controladas sobre una probeta, cuyas dimensiones se encuentran normalizadas, y se muestran los resultados obtenidos haciendo posible un análisis de los mismos. [1]

### 2.1.2. Principio de funcionamiento

Una máquina universal de ensayos tiene como objetivo determinar el comportamiento mecánico de diversos materiales mediante ensayos específicos. Los ensayos consisten en la aplicación de una carga controlada sobre una probeta hasta cierto momento, que en algunos casos, puede ser la rotura. En estos ensayos los parámetros mas importantes a tener en cuenta son:

- Velocidad de desplazamiento del cabezal [mm/min]
- Carga [N]
- Deformación máxima [mm]

Según el tipo de ensayo a realizar y las propiedades que se desean conocer del material se puede variar el parámetro principal a ser controlado de modo de obtener un:

- Ensayo de tracción dinámico
- Ensayo de tracción cuasiestático
- Ensayo de compresión
- Ensayo de creep
- Ensayo de relajación de tensiones

### 2.1.3. Componentes



**Figura 2.1** Ejemplo de máquina universal de ensayos Instron modelo 68TM-10 Dual Column Table Model con sus componentes principales detallados en el Cuadro 2.1 [2].

En cuanto a los componentes principales dentro de una máquina, podemos visualizar algunos en referencia a la Figura 2.1 listados en el cuadro 2.1.

ETIQUETA	COMPONENTE
1	Guías
2	Plato superior
3	Covertor de columna
4	Celda de carga y mordaza superior
5	Interruptor de límite superior
6	Interruptor del actuador
7	Interruptor límite inferior
8	Botón de parada de emergencia
9	Panel indicador
10	Interfaz
11	Control manual

**Cuadro 2.1** Componentes generales de una máquina de ensayos universal Instron modelo 68TM-10 Dual Column

1. Guías: Son barras cilíndricas de acero que tienen como objetivo guiar el desplazamiento del cabezal.
2. Plato superior: estructura que sujeta la mordaza superior para la correcta sujeción de la muestra a ensayar.
3. Covertor de columna: protector del mecanismo de transmisión.
4. Celda de carga: dispositivo encargado de medir el valor de la carga aplicado a la probeta en cada instante del ensayo.
5. Mordaza: vínculo mecánico entre la probeta y la máquina.

6. Interruptor de límite superior: final de carrera capaz de determinar el límite de movimiento del cabezal.
7. Guía lineal
8. Interruptor límite inferior: ídem interruptor de límite superior.
9. Botón de parada de emergencia: pulsador capaz de detener el ensayo para protección tanto de los usuarios como de la máquina en casos de emergencia.
10. Panel indicador: para el caso de la máquina desarrollada, el panel indicador estará integrado dentro de la Interfaz descrita a continuación.
11. Interfaz: software desarrollado en MatLab Graphical User Interface (GUI) que permite tener el control de la máquina y visualizar gráficos. Además, permite indicar temperatura de la solución usada, parámetros ingresados por el usuario y rutina seleccionada, entre otras.
12. Control manual: pulsadores que permiten la puesta a punto y el cerado (puesta en cero) de la muestra a través del movimiento manual del cabezal.

Además, para el caso particular de la máquina desarrollada para este proyecto, se incluyen los siguientes componentes:

1. Motor
2. Sensores
3. Galgas
4. Procesadores de datos
5. Calentador
6. Cubas

Si utilizamos el criterio del funcionamiento de la máquina, podemos dividir la misma en secciones incluyendo en cada una los componentes. La división según este criterio sería:

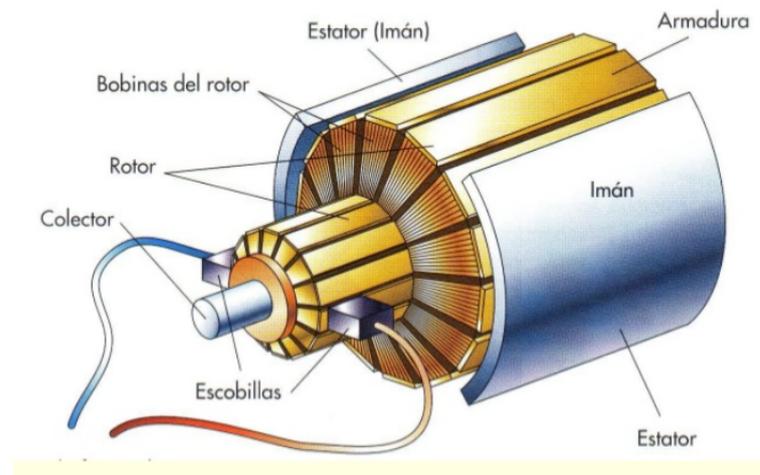
### **Generación del movimiento**

**Motor eléctrico** Un motor es aquel dispositivo capaz de brindar la energía suficiente a un conjunto de piezas para que estas tengan un funcionamiento adecuado y la máquina que compone pueda realizar sus actividades. En especial, un motor eléctrico de corriente continua (CC) es aquel que convierte energía eléctrica en energía mecánica. Esto se logra gracias a la acción de campos magnéticos que generan las bobinas que se encuentran dentro del motor. [3]

Normalmente un motor se compone de:

- Un estator. Da soporte mecánico y contiene los polos de la máquina. Puede ser un devanado de hilo de cobre sobre un núcleo de hierro o imanes permanentes. El estator cubre al rotor.[4]
- Un rotor. De forma cilíndrica generalmente, también devanado y con núcleo, es alimentado con corriente directa a través de delgas, que están en contacto alternante con escobillas fijas.[4]
- Escobillas. En los motores o generadores eléctricos es preciso establecer una conexión fija entre la máquina con las bobinas del rotor. Para esto, se fijan dos anillos en el eje de giro, aislados de la electricidad del eje y conectados a la bobina rotatoria, a sus terminales. Luego se encuentran unos bloques de carbón que realizan presión a través de unos resortes, para establecer el contacto eléctrico. Dichos bloques son las escobillas.
- Un conmutador. Se trata de una especie de interruptor que se encuentra en algunos generadores y motores, cuya función es cambiar periódicamente la dirección de la

corriente entre el rotor y el circuito externo.



**Figura 2.2** Imagen ilustrativa de motor de CC con sus componentes. [5]

Su funcionamiento se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos del imán permanente, de acuerdo con la Ley de Lorentz, con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en el rotor.

De este modo, cuando la corriente eléctrica circula por la bobina del electroimán giratorio, el campo electromagnético que se genera interactúa con el campo magnético del imán permanente o devanado. Si los polos del imán permanente y los polos del electroimán giratorio coinciden, se produce un rechazo y un torque magnético (par de fuerza que provoca que el rotor rompa la inercia y comience a girar sobre su eje) en sentido a la forma que se encuentre conectado el motor al circuito.[4]

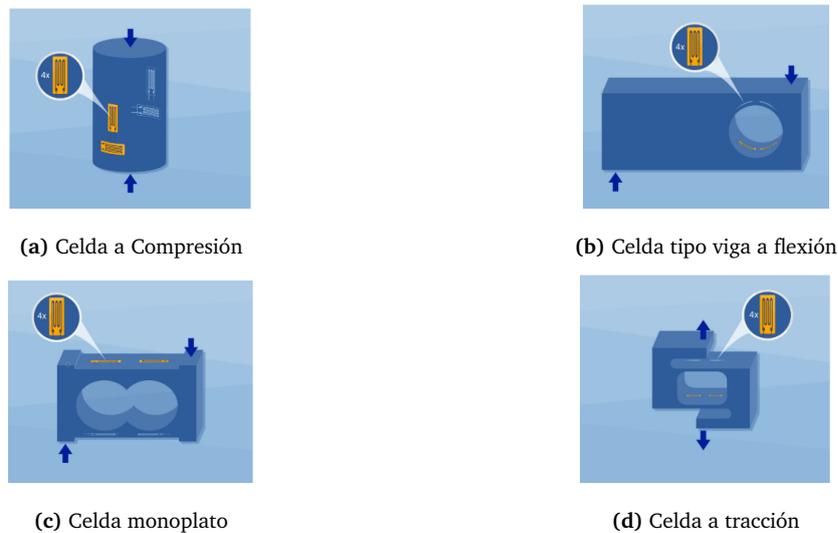
### Medición de la carga

**Celda de carga** Una celda de carga es un elemento que se deforma elásticamente en presencia de carga y, mediante el uso de un sistema de galgas extensométricas incorporado, puede medir dichas deformaciones para determinar la carga que fue aplicada.

Las celdas de carga tienen en su interior un *strain gauge* o galga extensiométrica, que cambia su resistividad con la deformación. A su vez, se amplifica la señal emitida por la

misma con un puente de *Wheatstone* para obtener una medida precisa. Es así, entonces, que al aplicarse una carga sobre la celda de carga, esta puede medirse en función de la deformación que la misma genera sobre la celda.

Como es posible observar en la figura 2.3, las celdas pueden clasificarse según la carga que se busca medir: compresión, tipo viga a flexión, monoplato o tracción. Ordenadas respectivamente en la figura.



**Figura 2.3** Tipos de celdas de carga. La ubicación y disposición de las galgas extensiométricas depende de el uso principal que tenga la celda, (a) a compresión, (b) a flexión, (c) en aplicaciones especiales (monoplato) y (d) a tracción. [6]

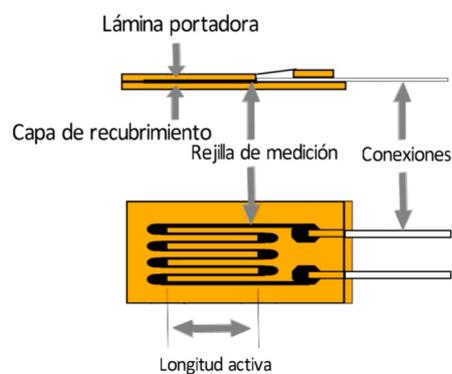
O pueden clasificarse según la señal que transmiten. Digitales, que son capaces de procesar resultados de medidas, y analógicas, incapaces de proporcionar la señal en un formato útil, de modo que requieren un amplificador de medida. [6]

### Medición de la deformación

**Galgas** Se trata de un dispositivo que mide deformaciones de manera indirecta. Es decir, al deformarse el material a analizar, se deforma la galga y eso genera una corriente. De este modo, tiene diversas aplicaciones como análisis de la vida de fatiga, análisis de tensiones

residuales o determinación de valor absoluto y dirección de tensiones mecánicas. En la figura 2.4 puede observarse la geometría y los componentes de una galga típica.

En cuanto a su funcionamiento, se debe suponer que la misma se encuentra unida, ya sea mediante adhesivo o soldadura, a la pieza a deformar. El esfuerzo externo también actúa sobre la galga, aumentando su resistencia eléctrica por su propiedad piezorresistiva, por lo que al medir dicha variación puede obtenerse indirectamente la deformación sufrida por la pieza.



**Figura 2.4** Vista frontal y superior de una galga extensométrica. La rejilla de medición de las galgas, que se ubican sobre una lámina portadora y se protege con una capa de recubrimiento, permite medir la deformación de la longitud activa de la galga. La recolección de los datos se hace a través de las conexiones para una posterior interpretación. [7]

**Extensómetros** Existen extensómetros de diversos tipos según la precisión requerida, el ensayo a realizar y la longitud de deformación esperada.

Los extensómetros, a diferencia de las galgas, llevan a cabo una medición directa, ya que miden la separación entre cuchillas.

La principal ventaja que presentan frente a las galgas es que al acoplarse a la probeta mediante las cuchillas, como se observa en la figura 2.5, elimina los errores provocados por distorsión. Además, se han desarrollado extensómetros de video que no ejercen ninguna influencia sobre la probeta de ensayo y que eliminan los problemas de deslizamiento de

las cuchillas, así como los errores provocados por la inercia de las piezas en movimiento. Se trata de una herramienta de medición de alta precisión y gran rango de aplicación que realiza una medición directa de la probeta, contrario a la galga que correspondería con una medición indirecta. [8]

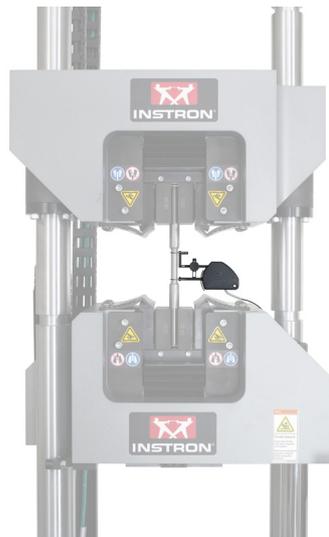


Figura 2.5 Extensómetro tipo clip on estático [8]

**LVDT** Un transductor de desplazamiento lineal variable o LVDT, tiene un principio de funcionamiento similar al de una galga extensométrica en el sentido que convierte movimiento lineal en señal eléctrica. Esto los hace susceptibles a las interferencias electromagnéticas y a la resistencia generada por largos cables de conexión.

Su estructura se compone de un cilindro metálico hueco en el que un eje de menor diámetro se mueve libremente de un lado a otro a lo largo del eje longitudinal del cilindro. El eje, o varilla de empuje, termina en un núcleo conductor magnético que debe estar dentro del cilindro, o conjunto de bobinas, cuando el dispositivo está en funcionamiento. Debido a esta disposición la varilla de empuje se fija al objeto móvil cuya posición se va a determinar, mientras que el conjunto de bobinas se fija a un punto de referencia fijo. El movimiento del mensurando desplaza el núcleo dentro del conjunto de bobinas; este

movimiento se mide eléctricamente.[9]

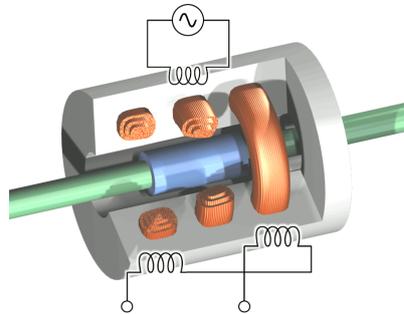


Figura 2.6 Diagrama de un LVDT básico[9]

## Driver

Un driver para motor es un circuito que controla cómo operar el motor. Se encarga de enviar corriente a través de impulsos al motor y facilita la comunicación entre la interfaz de control y el motor. El driver permite realizar un control del motor más eficiente y facilita la implementación del mismo en un proyecto.

## Adquisición, procesamiento de datos e interfaz

Para poder analizar de manera central toda la información que se obtiene de la máquina y para decidir la sucesión de operaciones, el equipo debe poseer un software de procesamiento y adquisición de datos.

Los adquirentes de datos toman muestras periódicas de múltiples señales físicas que brinda la máquina para generar datos que puedan ser procesados. De este modo, una señal que es analógica se convierte en una señal digital mediante la conversión de tensiones eléctricas, que puede ser procesada por el mismo controlador o un software en una computadora.

Los parámetros más importantes para poder analizar estos dispositivos son:[10]

- Tensión de operación
- Cantidad de pines de salida o entrada digital
- Cantidad de pines de entrada analógica
- Frecuencia del reloj

En función de lo que se necesite será el controlador que se elegirá.

Por otro lado, una interfaz gráfica de usuario es un programa que hace de intermediario entre el software de procesamiento de datos y el usuario. El mismo, muestra de forma visual y accesible todas las acciones posibles en una plataforma para que los usuarios puedan navegar con mayor comodidad, sin necesidad de conocimientos informáticos específicos.[11]

Esta interfaz facilita la manipulación de la máquina para el usuario e interpreta los datos provenientes de la máquina para poder enseñársela al usuario de la mejor manera.

## **2.2. Mecánica de los Materiales**

Para entender el comportamiento mecánico de los tejidos, se necesita saber primero cómo actúan las fuerzas externas sobre y entre los tejidos del cuerpo. Las deformaciones que generan, tanto fuerzas externas como internas creadas por las mismas estructuras en músculos, tendones y huesos, es sumamente relevante para estudiar el movimiento humano, las heridas y patologías que se generan [12].

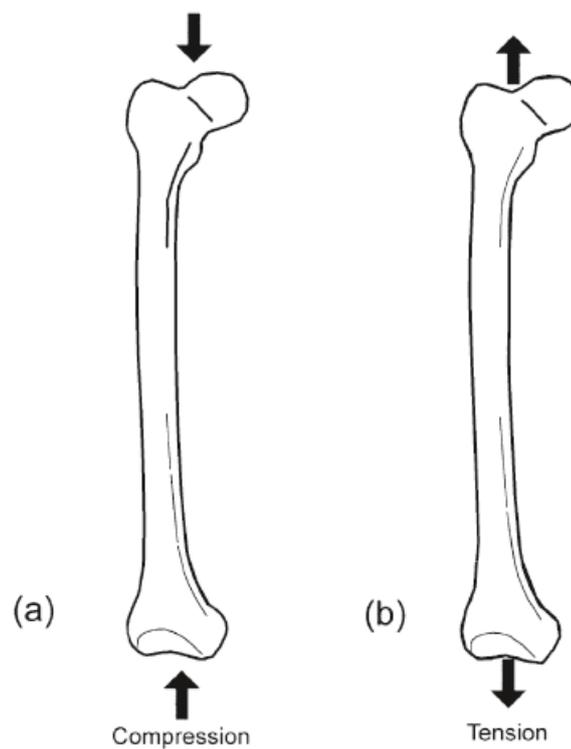
### **2.2.1. Cargas en los tejidos**

Cuando se aplican fuerzas sobre un material como el tejido musculoesquelético, se generan tensiones. Éstas pueden ser tensiones de compresión, tracción, flexión, torsión o

una combinación de alguna de ellas.[12]

La compresión ocurre cuando una fuerza externa tiende a acortar la dimensión del material en la dirección de la fuerza. La tracción es cuando la carga actúa de modo tal que estira un material. Por ejemplo, el peso del cuerpo tiende a comprimir la tibia cuando se apoya el pie en el suelo. Ante esta carga, la tibia la resiste ejerciendo una fuerza opuesta.[12]

Cuando muchas fuerzas actúan sobre un cuerpo se combinan de manera excéntrica pueden generar tensiones de torsión o flexión. Cuando un elemento está flexionado, el material a un lado del eje principal está comprimido mientras que el otro lado del mismo está traccionado.[12]



**Figura 2.7** Principales cargas axiales sobre huesos. En el (a) se tiene la compresión con fuerzas apuntándose sobre los extremos. En el (b) se tiene la tracción o *Tensile* con fuerzas con sentidos opuestos alejándose entre sí.[12]

## 2.2.2. La respuesta de los tejidos a las fuerzas

La respuesta inmediata de los tejidos a las cargas depende de varios factores. Por un lado, la magnitud y la dirección de las fuerzas y por otro lado, las tensiones admisibles y la forma del tejido, afectan cómo la estructura del material va a cambiar.[12]

### Tensión

La *tensión mecánica* o *Stress* es una magnitud que representa a una fuerza por unidad de área. La tensión se simboliza con la letra griega  $\sigma$  cuando la fuerza y el área son ortogonales, y se define con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

donde F es la fuerza [N] y A es el área de interés [ $m^2$ ], por ejemplo, la sección de un elemento sometido a una carga colineal a su normal.[12]

Dado que la tensión es una fuerza por unidad de área, tiene las mismas unidades que la presión ( $\frac{N}{m^2}$  o Pa), aunque normalmente se expresan en  $\frac{N}{mm^2}$  o MPa [12].

### Deformación Unitaria

Para medir la deformación de un material generada por una carga se utiliza el concepto de *Deformación Unitaria* o *Strain*. Esta deformación se expresa usualmente con respecto a la longitud inicial ( $L_0$ ) del elemento [12].

Se simboliza con la letra  $\epsilon$  y es adimensional, aunque en su uso cotidiano suele expresarse en  $\frac{mm}{mm}$ . Se calcula con la ecuación [12]:

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \left[ \frac{mm}{mm} \right] \quad (2.2)$$

## La Ecuación Constitutiva

Para caracterizar o prever el comportamiento mecánico de los materiales se plantean ecuaciones que relacionan las variables tensión y deformación unitaria. Las constantes de la ecuación son características de los materiales, y la cantidad de variables que incluya la ecuación constitutiva dependerá de la naturaleza mecánica de los materiales bajo estudio.

Las ecuaciones constitutivas se plantean eligiendo un modelo que describe el comportamiento mecánico de los materiales. Por ejemplo, la ley de Hooke plantea una relación entre tensión normal y deformación unitaria según la ecuación:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.3)$$

Otros modelos, como el modelo viscoelástico de Voigt, plantean ecuaciones constitutivas que incluyen otras variables, como el tiempo, y otras constantes descriptivas del material, como el módulo de viscosidad [13]:

$$\sigma = E \cdot \epsilon + \eta \cdot \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2.4)$$

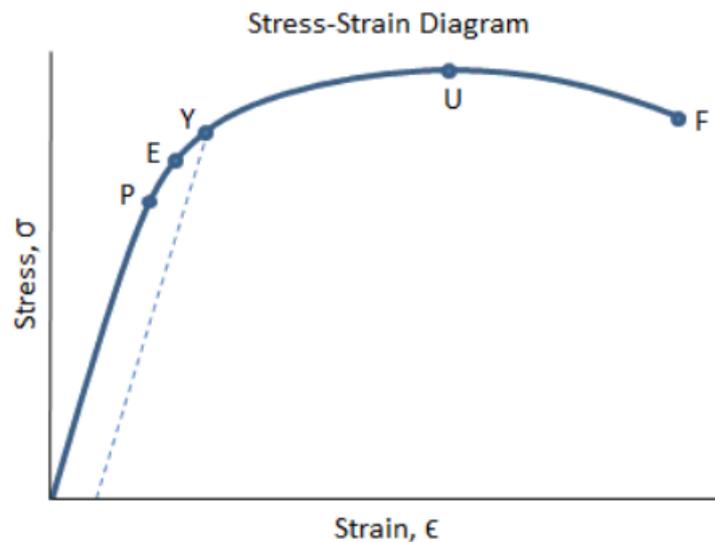
Donde:

- $E$  = Módulo de Young
- $\epsilon$  = Deformación unitaria
- $\eta$  = Módulo de Viscosidad

### 2.2.3. Rigidez y Tensiones Admisibles

Los ensayos de materiales se realizan sobre probetas standard o sobre elementos, para conocer las propiedades mecánicas de los materiales o de los elementos en sí, respectivamente. Las probetas son sometidas a deformaciones externas y se analizan las cargas de

reacción. La normalización de las cargas y deformaciones respecto a las dimensiones de la probeta dan como resultado las tensiones y las deformaciones unitarias, que se grafican y se analizan como se ve en la Figura 2.8, ejemplo de un gráfico característico de un material elástico lineal sometido a tensiones de tracción [12].



**Figura 2.8** Curva característica de un ensayo de tracción cuasiestático para un sólido elástico lineal, donde se aprecian los puntos característicos P (*Proportional Limit*), E (*Elastic Limit*), Y (*Yield Point*), U (*Ultimate Strength*) y F (*Fracture Point*). La línea punteada es una recta paralela a la porción lineal de la curva, con una abscisa de 0.2% de deformación y cuya intersección con la curva tensión-deformación determina el punto Y para un material sin *Yield Point* evidente. [14]

El punto P de la Figura 2.8 representa el límite proporcional o *Proportional Limit*, el máximo valor de tensión donde la curva tensión-deformación unitaria mantiene una proporción lineal. El punto E representa el límite elástico o *Elastic Limit*, el valor de tensión por encima del cual comienza a existir una deformación plástica o permanente en el elemento. Aunque la curva entre los puntos P y E no sea lineal, el material sigue siendo elástico en esta región y ante una descarga la muestra vuelve a su longitud inicial [12].

El punto Y representa el límite de fluencia o *Yield point*, un valor tensión a partir del

cual se observan grandes variaciones de deformación unitaria ante pequeñas variaciones de tensión. En materiales dúctiles la tensión de fluencia es fácil de determinar gráficamente, pero para materiales frágiles este punto es menos evidente y suele definirse, por convención, como la intersección entre una línea recta paralela a la porción proporcional de la curva tensión-deformación con una distancia en abscisas del 0.2 % de la deformación [12].

El punto U representa la tensión de rotura o *Ultimate Strength*, el máximo valor de tensión alcanzado en la probeta. Luego de alcanzarse este valor, los materiales dúctiles exhiben un comportamiento llamado *estricción*, donde se genera una abrupta disminución de la sección de la probeta en un plano perpendicular al eje principal de la muestra [12].

Por último, el punto F representa el punto de fractura o *Fracture Point* que es el punto en el cual se crean dos superficies de fractura y la pieza se separa en dos pedazos [12]. Técnicamente a este punto se lo llama 'Decohesión'.

### **2.3. Viscoelasticidad y Elasticidad no-lineal**

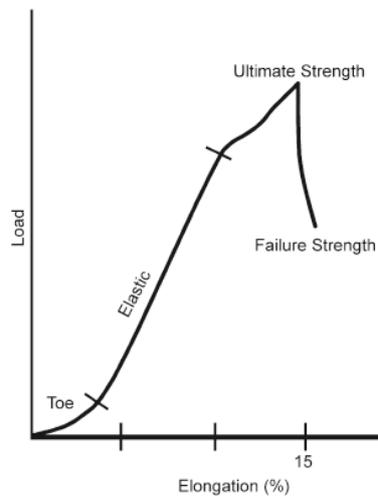
Ciertos materiales exhiben un comportamiento mecánico distinto al descrito en los apartados anteriores. Mientras que en los sólidos elásticos, las tensiones y deformaciones se dan instantáneamente las unas con las otras, existe un conjunto de materiales en donde se da un retardo temporal entre una tensión aplicada y una deformación consecuente. Este fenómeno ocurre porque estos materiales poseen propiedades viscosas además de elásticas. El comportamiento se observa principalmente en polímeros, pero también en tejidos biológicos.

Los tejidos biológicos son complejos estructuralmente. Sus propiedades mecánicas no sólo dependen de las propiedades de sus componentes individuales (por ejemplo, fibras de elastina y de colágeno, músculo liso y tejido conectivo), sino de cómo estos componentes están orientados y vinculados entre sí.

Los materiales viscoelásticos exhiben dos comportamientos característicos: el *creep* y la *relajación de tensiones*. El primero describe el incremento en deformación cuando el material es sometido a una tensión constante. El segundo describe cómo las tensiones disminuyen cuando el material es sometido a una deformación constante. Estos dos comportamientos son los que diferencian un material elástico de un material viscoelástico.

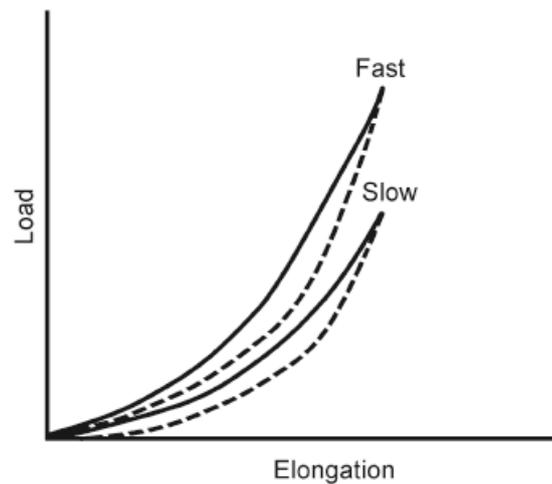
El retardo temporal que existe entre carga y deformación se exhibe al realizar ensayos dinámicos de carga y descarga cíclicos, a ciertas velocidades de deformación. La Figura 2.10 el gráfico de tensión-deformación unitaria muestra un área encerrada, o *histéresis*, característico de los materiales viscoelásticos, fenómeno que no se observa en materiales elásticos.

Otra característica de algunos materiales, en particular los tejidos biológicos, es la no-linealidad observada en ensayos cuasiestáticos, como puede verse en la Figura 2.9, que corresponde a un ensayo sobre un tendón. La relación tensión-deformación es no-lineal, a diferencia de los materiales elásticos lineales de la Figura 2.8. En la zona inicial, la deformación mayor proporcionalmente al aumento de carga corresponde a la elongación de las fibras de colágeno: el material se rigidiza conforme aumenta la tensión. Luego, en una región elástica puede calcularse un módulo de Young constante entre ciertos rangos de tensión. Sin embargo, este valor varía en función de la rapidez de la elongación, característica común en los materiales viscoelásticos.[12].



**Figura 2.9** Curva característica de un ensayo de tracción cuasiestático para un tendón.[12]

En la Figura 2.9 se puede ver el proceso de carga y descarga de un tejido a dos velocidades distintas. Al ser un material viscoelástico, la relación entre tensión y deformación depende de la velocidad a la que es aplicada la carga, por lo tanto, su ecuación constitutiva incluirá la variable tiempo.



**Figura 2.10** Curva característica de un ensayo dinámico. Los gráficos de carga (línea continua) y descarga (línea discontinua) toman distintos caminos por el retardo entre las variables tensión y deformación. La velocidad de deformación determina la rigidez del material, que no necesariamente se mantiene constante.

El área encerrada que se observa en la Figura 2.10 se denomina histéresis, propiedad de los materiales viscoelásticos donde la respuesta de descarga de tensiones es distinta a la respuesta de carga de tensiones. La histéresis también brinda una medida de la cantidad de energía perdida por la naturaleza viscosa del material, y representa la energía perdida en la recuperación de la longitud inicial de la muestra.

En resumen, existen sólidos elástico-lineales que sufren deformaciones al aplicarles cargas externas. Existen también sólidos elásticos no-lineales, que exhiben un comportamiento elástico al recuperar su estado inicial de deformación una vez que se retiran las cargas externas, pero cuya deformación no conserva una proporcionalidad con la carga aplicada. Los sólidos elásticos, sean lineales o no-lineales, no se ven afectados por la velocidad a la cual se aplican las cargas o deformaciones externas. Por el otro lado, están los sólidos viscoelásticos que sí son sensibles a la velocidad a la cual se aplican las perturbaciones externas. Si las perturbaciones son lo suficientemente lentas (ensayos cuasiestáticos),

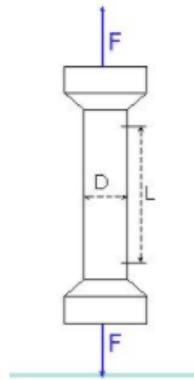
el comportamiento viscoelástico no se percibe. Pero si las cargas o deformaciones son aplicadas a una cierta velocidad (ensayos dinámicos), el sólido exhibirá un retardo temporal entre la carga aplicada y la deformación observada. Ejemplos de estos materiales incluyen ligamentos, tendones, huesos y piel.

Para poder caracterizar a los materiales viscoelásticos, incluidos los tejidos biológicos, determinar su ecuación constitutiva y calcular los parámetros que definen su comportamiento mecánico, se realizan ciertos ensayos descritos a continuación. La máquina de ensayos que se construyó en el marco de este proyecto busca replicar estos ensayos para la caracterización de tejidos y de otros materiales viscoelásticos.

## **2.4. Tipos de ensayo**

### **2.4.1. Ensayo de tracción cuasiestático**

En el ensayo de tracción cuasiestático se aplican fuerzas uniaxiales en sentidos opuestos en los extremos del material a ensayar (ver Figura 2.10), a baja velocidad, para despreciar la variable tiempo de la ecuación constitutiva. En la figura 2.8 se puede ver la curva característica de este ensayo para un material elástico.



**Figura 2.11** Diagrama de ensayo de tracción, donde las fuerzas ( $F$ ) son uniaxiales y colineales al eje principal de la probeta. Puede realizarse sobre probetas de dimensiones standard para obtener información sobre el material ensayado, o sobre elementos para obtener parámetros mecánicos propios de esa estructura.  $L$ : largo de la muestra,  $D$ : diámetro de la muestra [15]

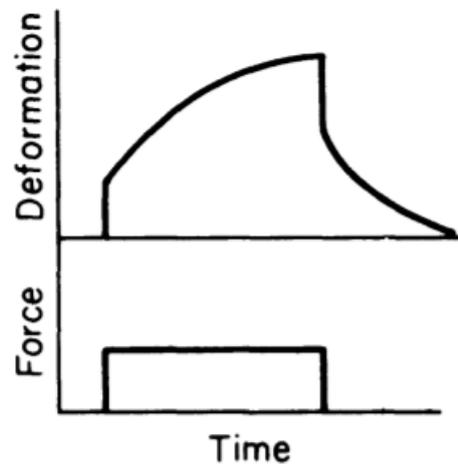
El ensayo puede terminar en la fractura de la muestra o detenerse a cargas menores según el objetivo del estudio [15].

#### 2.4.2. Ensayo de tracción dinámico

Los ensayos dinámicos se realizan en materiales viscoelásticos ya que su comportamiento difiere con la velocidad de deformación, por ende, depende de la variable tiempo. Este ensayo permite observar el fenómeno de histéresis y calcular la energía perdida. De esta manera, se puede analizar la carga y la elongación en cada ciclo de carga y descarga. Junto con los ensayos cuasiestáticos, de creep y de relajación de tensiones, se logra plantear modelos matemáticos que predigan los comportamientos mecánicos bajo ciertas condiciones de carga. El ensayo arroja gráficas como los de la Figura 2.10 cuando se ensayan materiales viscoelásticos.

### 2.4.3. Ensayo de creep

En un ensayo de tracción dinámico las cargas aplicadas oscilan entre valores establecidos, y las deformaciones varían consecuentemente, pero con un cierto retardo, dada la naturaleza viscoelástica de los materiales bajo estudio. Por el otro lado, en un ensayo de creep, se carga al material con una tensión que se mantiene constante en el tiempo mientras se observa la evolución de la deformación en el tiempo. Ver Figura 2.12.



**Figura 2.12** Curvas características de un ensayo de creep. La fuerza constante se aplica durante una cierta cantidad de tiempo, mientras se analiza la respuesta en deformación de la pieza. Evolución de la deformación respecto del tiempo. Panel inferior: Fuerza respecto al tiempo [13].

Obtenidas las gráficas de deformación respecto tiempo (panel superior, Figura 2.12), y planteada una ecuación constitutiva que relacione tensión con deformación que contenga los módulos elástico y viscoso, las curvas se ajustan a la ecuación para despejar los parámetros mecánicos de interés.

### 2.4.4. Ensayo de relajación de tensiones

El ensayo de relajación de tensiones consiste en mantener constante la distancia entre los extremos de la muestras a ensayar y observar cómo disminuye la tensión en el material. Las tensiones pueden desaparecer o tender a una asíntota, según el material y la

deformación inicial. Al igual que el ensayo de creep, este ensayo se realiza para analizar las gráficas obtenidas (Figura 2.13), ajustarlas a una ecuación constitutiva y obtener los parámetros mecánicos que describen el comportamiento del material. En la Figura 2.13, panel inferior, se boceta la aplicación súbita de la deformación, y en el panel inferior cómo van disminuyendo las tensiones a través del tiempo.

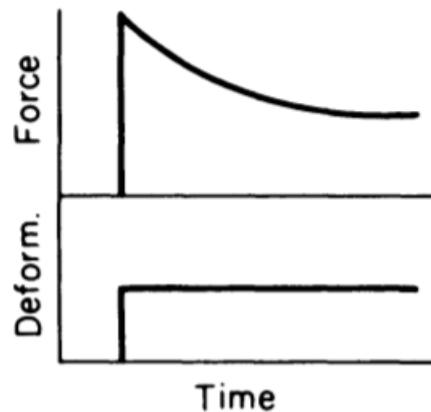


Figura 2.13 Parámetros en un ensayo de relajación de tensiones [13].

## 2.5. Probetas normalizadas y no normalizadas

En la mayoría de las máquinas de ensayos se utilizan *probetas normalizadas, calibradas* o *standard* en las que el objetivo es poder comparar las propiedades mecánicas de los materiales a ensayar y no la estructura de la probeta en sí [16].

Por otro lado, es habitual ensayar *probetas industriales*, es decir no estandarizadas, que no necesariamente son uniformes [16]. En estos casos, la información que se obtiene de los ensayos se usa para caracterizar el elemento ensayado como un todo, y no sólo su material.

El objetivo de esta máquina es ensayar tejidos y biomateriales: las muestras pueden no tener medidas standard. El dispositivo debe prever ensayar tanto probetas normalizadas como muestras no estandarizadas.

# Capítulo 3

## Gestión de Proyectos

En el presente capítulo se plantean los fundamentos y herramientas utilizadas para poder gestionar y llegar a cumplir con el proyecto.

Debido al tamaño y el número de participantes del mismo, se planteó la gestión del proyecto como una herramienta importante para su desarrollo.

Un proyecto es un conjunto único de procesos que consta de actividades coordinadas y controladas, con fechas de inicio y fin que se llevan a cabo para lograr los objetivos del mismo. El logro de los objetivos requiere la provisión de entregables que satisfagan requisitos específicos.

Algunas características importantes de este proyecto fueron los entregables, las partes interesadas que influenciaron el desarrollo del mismo (*stake holders*), los recursos utilizados, las restricciones y la forma en la que se adaptan los procesos para proveer los entregables. Para un adecuado desarrollo, se intentó mantener una metodología de trabajo que permitiese lograr resultados positivos de la manera más eficaz y eficiente posible considerando que se tuvo que adaptar a un trabajo en pandemia donde se hizo imposible el uso de los laboratorios del ITBA y se trabajó 100 % de manera remota.

La intención de este capítulo es dejar plasmado cuáles fueron las etapas que se llevaron a cabo para lograr diseñar y finalmente, construir todo lo que se detalló en los capítulos

anteriores.

### **3.1. Stake Holders**

En primer lugar, se puede considerar que la parte interesada mas importante es la Universidad en la que se desarrolló el presente trabajo. Fue quien dio la posibilidad de la realización, el financiamiento y enmarcó el trabajo a una serie de reglas generales.

Como parte de la institución se pueden destacar los departamentos tanto de Ing. Mecánica como Bioingeniería. Estos fueron los encargados de definir el alcance enmarcando el trabajo como proyecto de fin de carrera. Además, tuvieron total influencia en el presupuesto del proyecto, al ser los encargados de asignar este recurso.

Por otro lado, se involucraron docentes de la Institución. Los tutores fueron aquellos que más influencia tuvieron, no sólo fueron quienes plantearon el proyecto sino que también guiaron el desarrollo. Además, sugirieron diversas ideas que significaron en grandes mejoras al trabajo.

En segundo lugar, se involucraron expertos técnicos que aportaron su experiencia y conocimientos sobre los temas que involucraron el proyecto. Se organizaron reuniones para obtener recomendaciones y/o sugerencias de modificaciones de profesionales experimentados, de manera que pudiesen ofrecer una mirada crítica del avance del diseño y reducir la probabilidad de falla de la toma de decisiones. Entre ellos, quienes más sugerencias aportaron fueron los Ings. Francisco Polano, Juan Zubiri, Christian Zujew, Nelson Fortunatti, Matias Pretel y el Dr. Fernando Baidanoff.

Ya con un diseño concreto del equipo, se sumó otro input por fuera de la Institución por parte de proveedores y empresas, consultadas tanto para la compra de insumos como para el asesoramiento técnico. Se realizaron diversas comunicaciones telefónicas con distintas empresas que fueron clave en la toma de decisiones. Un ejemplo es Flexar SRL, con cuyos representantes se entabló una fluida comunicación para la implementación de una celda

de carga.

## 3.2. Alcance

A la hora de realizar un proyecto, existen distintos tipos de variables a definir. Un concepto comúnmente utilizado en estos casos es la triple restricción. Esta define tiempo, costo y alcance. En lo que respecta el alcance, se buscó construir un equipo funcional y modular, que pudiera ser diseñado y finalmente fabricado en el transcurso de un año, con los recursos tanto monetarios como humanos que se disponían. Para una correcta planificación, se definió el alcance de una manera precisa. En todos los casos se llevaron a cabo ideas que contemplaran la posibilidad de mejora futura y que fuesen compatibles con material biológico, entre otros factores. Los alcances definidos son los siguientes:

- Construir un frame o bastidor capaz de soportar las solicitaciones de los ensayos con dimensiones adecuadas para su uso en el ámbito de un aula, capaz de realizar ensayos de  $500N$  de carga,  $1200\frac{mm}{min}$  de velocidad máxima de desplazamiento y con un desplazamiento de cabezal de  $50mm$
- Lograr un sistema de ensamblado simple y del tipo modular
- Realizar diversos ensayos, en primera instancia ensayos de tracción cuasiestáticos
- Ensayar probetas del tamaño definido en los objetivos del Capítulo 1
- Poder llevar a cabo ensayos sumergidos y a temperatura controlada en un intervalo de  $20^{\circ}C$  a  $60^{\circ}C$  con  $\pm 0,5^{\circ}C$  de tolerancia
- Desarrollar un sistema de control capaz de llevar a cabo ensayos de tracción, controlar la temperatura del baño según lo definido y ingresar variables en una interfaz gráfica así como visualizar los resultados.

### **3.3. Control y organización del trabajo**

Un aspecto fundamental para el correcto desarrollo de un proyecto es la organización de las actividades. Para esto, se tomaron distintas medidas.

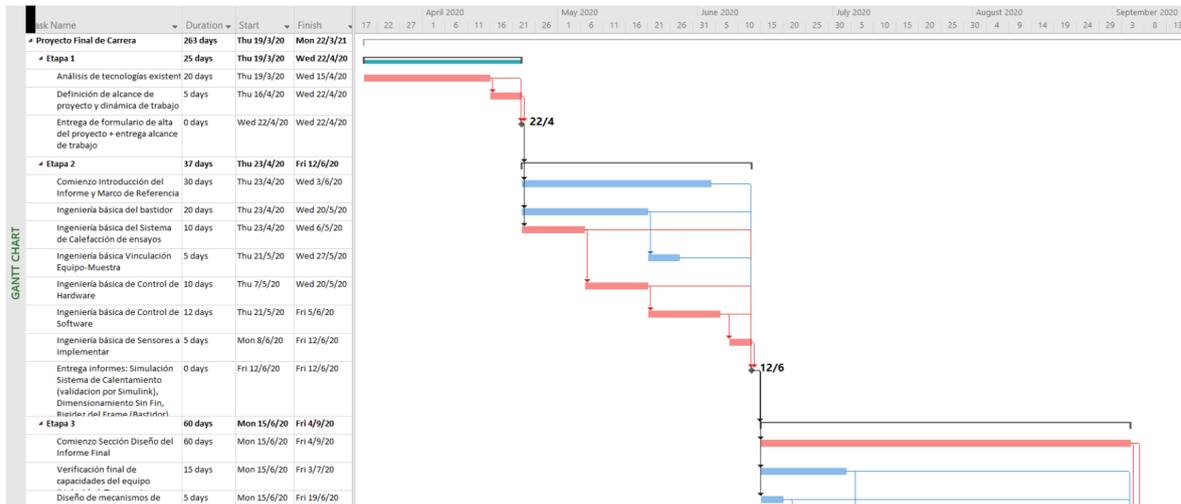
El 12 de marzo de 2020 se decretó la emergencia sanitaria a través del Decreto de Necesidad y Urgencia 260/20. Hasta esa fecha el equipo se había reunido de manera presencial en las instalaciones de la Universidad dos veces. En primer lugar se establecieron reuniones virtuales semanales de todo el equipo incluyendo a los tutores. A lo largo de estas reuniones, se comunicaba el avance respecto de la semana anterior y los pasos concretos a seguir. Estas reuniones resultaron de una herramienta muy importante, facilitando la intercomunicación y el trabajo en equipo. Se logró un trabajo en conjunto donde todos colaboraban con lo necesario. Se detalló un esquema de desglose de trabajo con las actividades a desarrollar donde la dinámica fuera un responsable de actividad apoyado por el grupo de trabajo, de modo que el proyecto no significara personas trabajando por su cuenta sino un grupo amalgamado trabajando con cooperación y coordinación. De esta manera, se trabajó generando un aporte de conocimiento de cada uno de los integrantes y con una mirada crítica más objetiva.

Las reuniones significaron poder desglosar el trabajo a través de la búsqueda de objetivos a corto plazo. Este proyecto se subdividió constantemente en distintas áreas. Para el desarrollo de estas diversas actividades, se establecieron órdenes de prioridad. Además, se repartieron en los diferentes integrantes dependiendo de la disponibilidad de horarios y conocimiento que tenga de estos.

### **3.4. Gantt con hitos**

En las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se presentan las distintas etapas y correlatividades entre ellas, para definir el camino crítico. El diagrama de Gantt puede verse con mejor resolución

ingresando al siguiente link <https://n9.cl/58iz> descargando el archivo 'Proyecto Final de Carrera Gantt..



**Figura 3.1** Etapa 1 y Etapa 2 del Diagrama de Gantt detallando los períodos de tiempo de cada tarea con el camino crítico marcado en rosa. Este diagrama puede verse con mejor resolución ingresando al siguiente link <https://n9.cl/58iz> descargando el archivo 'Proyecto Final de Carrera Gantt.

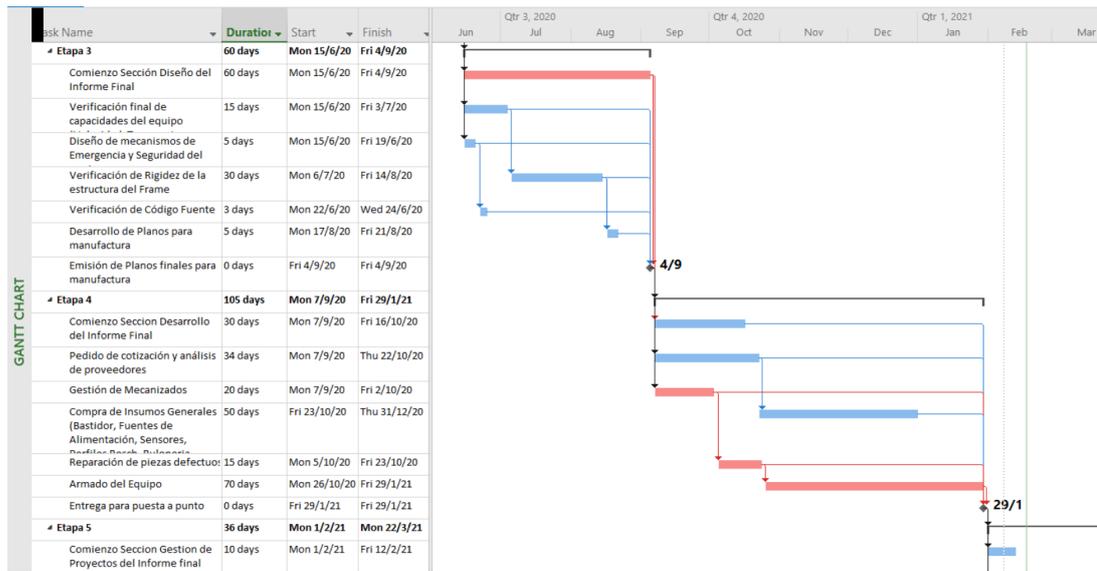


Figura 3.2 Etapa 3 y Etapa 4 del Diagrama de Gantt detallando los períodos de tiempo de cada tarea con el camino crítico marcado en rosa. Este diagrama puede verse con mejor resolución ingresando al siguiente link <https://n9.cl/58iz> descargando el archivo 'Proyecto Final de Carrera Gantt'.

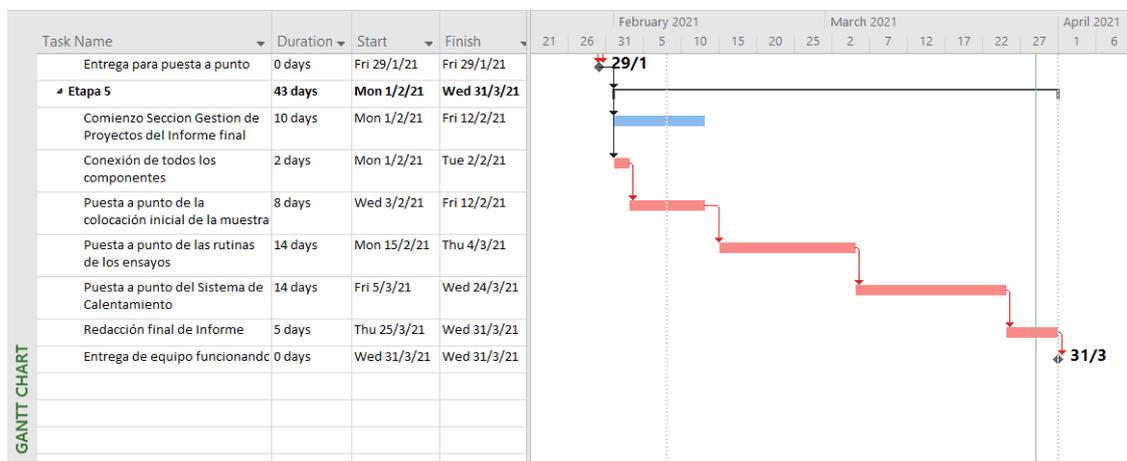


Figura 3.3 Etapa 5 del Diagrama de Gantt detallando los períodos de tiempo de cada tarea con el camino crítico marcado en rosa. Este diagrama puede verse con mejor resolución ingresando al siguiente link <https://n9.cl/58iz> descargando el archivo 'Proyecto Final de Carrera Gantt'.

### 3.5. Estimación de recursos, restricciones y soluciones

A lo largo del desarrollo del trabajo se estimaron constantemente recursos de toda índole: monetarios, tiempo disponible y recursos humanos. En primera medida, se debió hacer una estimación aproximada del costo del proyecto para coordinar con los distintos departamentos, es decir el presupuesto asignado.

Este punto fue la principal limitación del proyecto. Se debió pensar un alcance acorde tanto al presupuesto como al tiempo disponible y cumpliendo además, la calidad buscada.

Otra restricción muy importante con la se enfrentó este proyecto, como se mencionó al principio de este capítulo, fue el aislamiento obligatorio. Se estableció una primera etapa en la que se hizo hincapié en el diseño. Asimismo, se realizaron simulaciones para validar los diseños planteados y constató con profesionales que pudieran aportar su experiencia para producir un mejor diseño con variables que no se habían tenido en cuenta.

Se evitó al máximo posible la compra de insumos o componentes hasta no tener total seguridad de lo que se realizaría en un paso futuro. Muchas veces esta restricción fue agravada debido a condiciones económicas. Por ejemplo, componentes como la celda de carga, estuvieron sujetos al precio del dolar, por lo tanto se les dio prioridad en su definición para evitar cambios en la estimación de costos.

Aparejado con esta restricción, se orientó desde un principio el diseño utilizando componentes intercambiables y minimizando las horas de mecanizado. Por este motivo se puede observar en distintas partes de la máquina simplicidad en el diseño. Claros ejemplos de esto son el *frame* con perfilera modular (ver Figura 3.4) o el 'acople celda - placa'(ver apéndice C, plano n° 10, Union placa-celda).



**Figura 3.4** Imagen representativa de la simplicidad en el diseño del frame mostrando la posibilidad de ensamblarse fuera de un taller

### 3.6. Calidad y entregables

Como cuenta la Sección 3.3 en la página 32, se llevaron a cabo numerosas reuniones virtuales. Entre diversos propósitos, las reuniones fueron de suma utilidad para el control de calidad de lo que se fue realizando. A través de las minutas de reuniones anteriores, se verificó el cumplimiento de objetivos a largo de todo el desarrollo, evitando que queden factores sin analizar por completo.

Además, para el cumplimiento de los objetivos y gracias a la fuerte sugerencia de los tutores, se emitieron una serie de informes técnicos. Estos informes sirvieron para plasmar y dejar asentado el avance del proyecto. De este modo, se aseguró preservar la información

a lo largo del tiempo y así poder utilizarla en etapas subsiguientes. Los informes técnicos fueron los entregables de cada etapa realizada. Por ejemplo, se emitieron informes del diseño del sistema de calentamiento, del sistema de movimiento del cabezal, de las distintas cotizaciones de proveedores de celda de carga, entre otros.

### **3.7. Liquidación de gastos**

En todos los proyectos los costos son un aspecto fundamental para analizar. En ocasiones la viabilidad del proyecto depende de ellos. Durante la realización, se debieron optimizar los gastos para poder acotarlos al presupuesto brindado por la institución.

En el Apéndice B se desglosa en una lista todos los componentes que se necesitaron con sus costos asociados.

A través de las tablas de los Apéndices B.1 y B.3 se puede obtener un valor total de AR\$ 121.208,87. Este fue el monto total necesario para la construcción de la máquina de ensayos. Se puede decir que a pesar de no ser un monto menor, se cumplió el objetivo de finalizar el proyecto con el dinero disponible. El presupuesto en cuestión, se dividió en AR\$ 30.000 del departamento de Ing. Mecánica, AR\$ 64.800 del departamento de Bioingeniería y AR\$ 26.000 del Concurso de Iniciación a la Investigación y Desarrollo llevado a cabo en el ITBA. Sumando las partes obtenemos un presupuesto de AR\$ 120.800.

Además, una propiedad importante a destacar, es que el valor de construcción resulta muy competitivo frente a los altos precios en el mercado de dispositivos similares.

# Capítulo 4

## Diseño

El desarrollo de este proyecto comenzó conociendo las necesidades establecidas en el Capítulo 1. Estos criterios técnicos fueron establecidos por la profesora Wray, basados en una búsqueda bibliográfica previa acerca de ensayos de tejidos, detallado en el Apéndice A.

Una vez definidos los componentes básicos de la máquina, se tomaron decisiones acerca de las distintas alternativas tecnológicas. Cada componente (el motor, la celda de carga, los sensores de temperatura, el procesador de datos, etc.) se eligió en base a la disponibilidad de proveedores, el mantenimiento posterior y el presupuesto disponible. Estas decisiones se tomaron con la asistencia de profesionales que colaboraron a lo largo de este proyecto.

Para el diseño de los componentes, y luego la simulación del ensamblaje del equipo, se utilizó el software Catia v5-6 de Dassault Systems versión , Paris, Francia. Para análisis de piezas que se consideraron críticas, en cuanto a la funcionalidad de la máquina, se utilizaron tanto el programa Risa 3D 5.0 de Risa Technologies, California, Estados Unidos, así como Nx 12.0.2 de Siemens PLM Software, Munich, Alemania. Por último, para simular los sistemas de control y sus respuestas se hizo uso de los programas Matlab versión R2018a de MathWorks, Nueva México, Estados Unidos y Arduino Software (IDE) versión 1.8.7 de Arduino, Ivrea, Italia.

## 4.1. Control del desplazamiento

En una primera etapa se estudiaron y analizaron los funcionamientos de las máquinas de ensayos comerciales para identificar las partes en común y esenciales. A partir de esto se analizaron las variantes posibles para realizar cada función. Además, se adaptó la búsqueda a los parámetros requeridos buscando realizar un diseño lo más compacto, versátil y eficiente posible.

Inicialmente, se analizó cómo realizar el movimiento del cabezal como el que se ve en la Figura 2.1, en forma de pórtico, responsable de ejercer la carga sobre la muestra a ensayar. También se investigó acerca de cómo medir y controlar el mismo.

Una de las primeras opciones incluyó la posibilidad de utilizar un actuador eléctrico lineal que pudiera realizar la carga. Se consideró que, estando alineado correctamente, se podrían minimizar los momentos generados por realizar un desplazamiento en el mismo eje del ensayo. Este tipo de solución es utilizada en múltiples aplicaciones, aunque no ofrece un buen nivel de precisión en su posición, motivo por el cual se descartó.

Por otro lado, en las máquinas comerciales de similares características, aunque a cargas mayores, se utiliza para este fin un servo-motor que ofrece excelentes prestaciones en cuanto a precisión de la posición y de la fuerza entregada. En su contra, los servomotores tienen la desventaja de poseer un costo elevado frente a otras soluciones. Debido a los fines del proyecto en cuestión se decidió descartar esta solución también.

Finalmente se evaluaron dos opciones para realizar el sistema motriz del equipo: un motor paso a paso y la aplicación de un motor universal.

Los motores universales suelen utilizarse en equipos pequeños como electrodomésticos que requieren altas velocidades con bajas demandas de potencia [17]. Su eficiencia suele ser muy baja, aproximadamente del 51 % pero que en estos equipos no se considera importante al demandar baja potencia. Además, su diseño no soporta largos períodos de actividad [18].

Se optó, entonces, por el uso de un motor paso a paso. Estos motores son la mejor solución para casos donde la precisión del desplazamiento es de gran importancia. A diferencia de los motores de corriente continua, poseen excitación independiente que resuelve el problema de la falta de precisión en el arranque y parada del motor. De este modo, para variar la velocidad basta con modificar y controlar la corriente de excitación. Tienen mayor exactitud en la posición y repetición de movimientos, error de paso inferior al 5 %, perfecta respuesta de arranque y parada, son confiables y duraderos por no haber contacto entre escobillas, y poseen gran rango de velocidades de rotación [18].

Los motores paso a paso convierten pulsos digitales en movimiento de rotación mecánica. Por lo tanto, la rotación es proporcional a la cantidad de pulsos que se le hayan enviado mientras que la velocidad de rotación se relaciona con la frecuencia de estos pulsos.

Dado que la elección del motor es una pieza primordial y esencial en la máquina, se desarrollará el análisis que se hizo para su elección. Comenzando con una breve descripción de los distintos motores eléctricos que hay en el mercado hasta las características técnicas y accesorios con los que se deben manipular. En los párrafos siguientes se detallan las características principales de aquellos que se analizaron.

#### **4.1.1. Motores**

Si bien el concepto básico de un motor fue explicado en el capítulo anterior, hay distintas variantes de motores como por ejemplo motores sin escobillas, servomotores y motores paso a paso que se construyen con un motor de corriente continua (CC) como base.

##### **Motores sin escobillas**

Los motores de CC sin escobillas están diseñados para conmutar la tensión en sus devanados sin sufrir desgaste mecánico. Para esto, utilizan controladores digitales y sensores de posición.[4]

## Motores paso a paso

Los motores paso a paso (PAP) se pueden ver como motores eléctricos sin escobillas. Es típico que todos los bobinados del motor sean parte del estator y el rotor puede ser un imán permanente o, en el caso de los motores de reluctancia variable (que serán explicados más adelante), un cilindro sólido con mecanizado en forma de dientes (similar a un engranaje), construido con un material magnéticamente *blanco* (como el hierro dulce, el hierro más puro que aparece en la naturaleza [19]).

La conmutación se debe manejar de manera externa con un controlador electrónico, y los motores y sus controladores, se diseñan de manera que el motor se pueda mantener en una posición fija y que se lo pueda girar en un sentido y el otro. Con el controlador apropiado, se los puede hacer arrancar y detenerse en un instante en posiciones controladas.

Los motores PAP tienen un comportamiento muy diferente al de los motores de CC. En primer lugar, no giran libremente por sí mismos. Esto conduce a una dificultad para el caso de emergencias, donde el equipo tenga que frenarse como resultado de un accidente. En estas situaciones, el motor paso a paso deberá moverse mediante un mecanismo de acción manual.

También difieren de los motores de CC en la relación entre velocidad y torque (conocido como *par motor* o *par de giro*). Los motores de CC no ofrecen un buen torque a baja velocidad sin la ayuda de un mecanismo de reducción. Por otro lado, los motores PAP trabajan de manera opuesta: su mayor capacidad de torque se produce a baja velocidad. Para el caso de este proyecto, esto es conveniente ya que las velocidades que requieren los ensayos son relativamente lentas, dado que los materiales biológicos en condiciones fisiológicas están sometidos a procesos lentos comparado con las velocidades de las máquinas industriales.

Una característica adicional que poseen los motores paso a paso es el *torque de detención* o *par de detención* que no existe en los motores de CC. Esto permite que un motor PAP se

mantenga firmemente en su posición cuando no está girando. Esto es muy útil cuando el motor deja de moverse y, mientras está detenido, la fuerza de carga permanece aplicada a su eje. Se elimina así la necesidad de un mecanismo de freno como en el caso de los motores de CC permitiendo que el movimiento sea preciso de a pasos.

Lograr que un motor común de CC gire una fracción de vuelta o una cantidad precisa de vueltas es prácticamente imposible. Esto se debe a que sin mecanismo de frenado, al cortar la corriente, no se detendrá y seguirá moviéndose por inercia. Esta inercia tiene un valor muy difícil de determinar ya que depende de variables como el peso del rotor, la temperatura de las bobinas, núcleos de hierro, imanes y la del propio ambiente entre otras variables del entorno [20].

El motor PAP elegido para este proyecto es el Motor Stepper 57BYGH633 1.8° 3 A 135  $N \cdot cm$  Unipolar 190  $N \cdot cm$  Bipolar.

Las características básicas de los motores PAP son:

- Tensión de trabajo: en el caso del motor elegido para este proyecto es de 24V - 48V de CC;
- Resistencia eléctrica: resistencia de los bobinados. Esta resistencia determina la corriente que consume y a su vez, su valor afecta la curva de torque del motor y su velocidad máxima de operación;
- Grados por paso: este factor define la cantidad de grados que rotará el eje para cada paso completo. Una operación de medio-paso o semi-paso del motor duplicará la cantidad de pasos por revolución al reducir la cantidad de grados por paso. En el caso del motor usado en este proyecto, el paso del motor es de 1.8°.

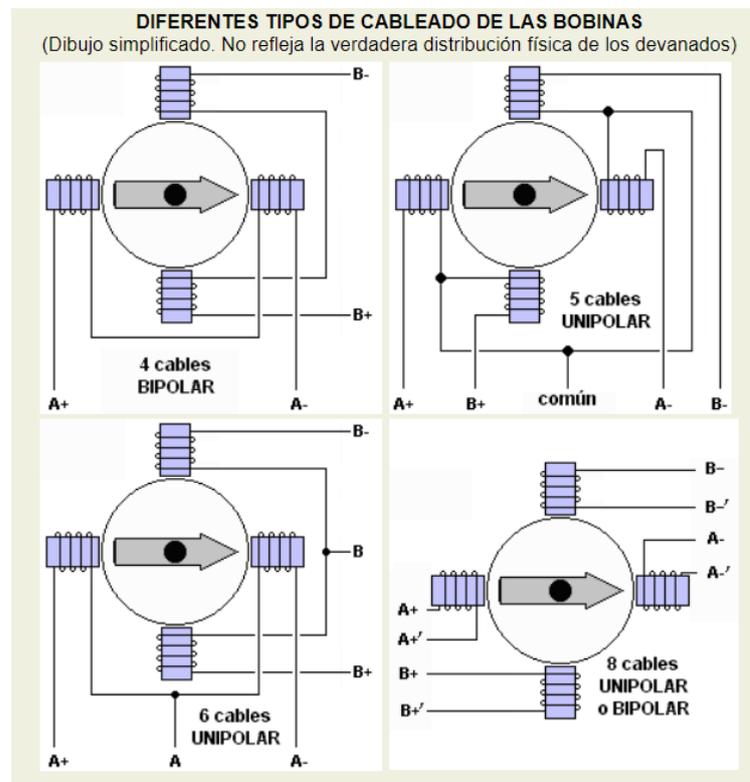
Existen 3 tipos de motores paso a paso: de reluctancia variable, de imán permanente e híbridos.

**Motores de imán permanente** Este tipo de motores son lo más conocidos, ya que se usan en las impresoras 3D. Se utilizan también en el avance del papel y del cabezal de impresión de las impresoras. Como su nombre lo indica, poseen un imán que aporta el campo magnético para la operación [20].

**Motor paso a paso de reluctancia variable** Este tipo de motores poseen un rotor de hierro dulce que, en condiciones de excitación del estator y bajo la acción de su campo magnético, ofrece menor resistencia a ser atravesado por su flujo en la posición de equilibrio. Su mecanización es similar a los de imán permanente y su principal inconveniente radica en que, en condiciones de reposo (sin excitación), el rotor queda en libertad de girar y, por lo tanto, su posicionamiento de régimen de carga dependerá de su inercia y no será posible predecir el punto exacto de reposo. El rotor y el estator tienen un número diferente de dientes. Ya que el rotor no dispone de un imán permanente, gira libremente si no tiene corriente alimentándolo, por lo tanto, no tiene torque de detención [20].

**Motores híbridos** Este tipo de motores combinan las mejores características de los otros dos tipos de motores. Se construyen con estatores multidentados y un rotor de imán permanente. Los motores híbridos estándar tienen 200 dientes en el rotor y giran en pasos de  $1.8^\circ$ . Existen también de otras configuraciones como de  $0.9^\circ$  y  $3.6^\circ$ . Dado que poseen un alto torque estático y dinámico, se mueven a muy altas velocidades de pulso [20]. Para el proyecto se eligió este tipo de motor porque abarca las ventajas de los dos tipos de motores anteriormente mencionados.

Por otro lado, los motores se diferencian en unipolares, bipolares o multifase según el tipo de bobinado que posean.



**Figura 4.1** Tipos de bobinados para motores paso a paso que determinan si son motores Bipolares, Unipolares o Multifase según las conexiones de su cableado [20]. Panel superior izquierdo: forma bipolar de 4 cables (A+, A-, B+, B-), 2 bobinas en serie; Panel superior derecho: conformación unipolar de 5 cables (A+, A-, B+, B- y común). Panel inferior izquierdo: forma unipolar con 6 cables (A+, A-, A, B+, B- y B), de esta manera se puede elegir si utilizar una sola bobina por ejemplo, A+ y A, o 2 bobinas en serie, A+ y A-. Por último, conformación Unipolar o bipolar, donde hay 8 cables para que el usuario decida cómo desea utilizarlo.

**Motores paso a paso unipolares** Este tipo de motores son relativamente fáciles de controlar, gracias a que poseen devanados duplicados. Aunque para facilitar el esquema se dibuja este devanado como una bobina con punto medio, en realidad tienen dos bobinas en cada eje del estator, que están unidas por extremos opuestos, de tal modo que al ser alimentada una u otra, generan cada una un campo magnético inverso al de la otra. Nunca se energizan juntas, por eso lo correcto es decir que tienen una doble bobina. Esta duplicación se hace para facilitar el diseño del circuito de manejo.

**Motores paso a paso bipolares** Los motores bipolares requieren de circuitos de control y de potencia más complejos. En la actualidad esto no es problema, ya que estos circuitos se suelen implementar en un integrado, que soluciona esta complejidad en un solo componente.

Como no tienen el doble bobinado de los unipolares, los motores bipolares ofrecen una mejor relación entre torque y tamaño/peso [20].

Este tipo de motor, bipolar de 4 cables, fue el elegido para este proyecto dado su ventaja por sobre los unipolares.

### **Driver para motor paso a paso**

Hay cuatro tipos de control de un motor paso a paso.

**Secuencia normal** Con esta secuencia el motor siempre alcanza un paso por vez debido a que siempre existen dos bobinas activadas. Al circular corriente por 2 bobinas contiguas, el motor se para entre estas dos. Luego, van turnándose las bobinas encendidas para ir moviendo el motor de a pasos. Con esta secuencia se obtiene un alto torque de paso y retención.

**Secuencia de Wave drive o paso completo** En este tipo de control se activa sólo una bobina por vez, lo que ocasiona que el eje del motor gire hacia la bobina activada. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave, pero es contraproducente para el torque.

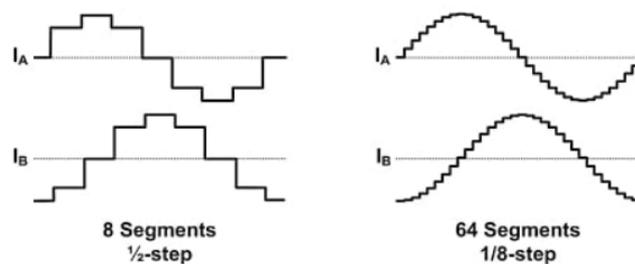
**Secuencia medio paso** Para este tipo de control se activan las bobinas de tal manera que se combinan las secuencias de paso completo y normal. Se obtiene así un paso más corto, la mitad del paso de las secuencias anteriores. Primero se activan dos bobinas, luego una sola (la más adelantada según el sentido del giro) y a continuación, nuevamente dos

bobinas: la que estaba encendida y la siguiente. De este modo se completa la vuelta de giro. El eje entonces se detiene primero entre dos bobinas, luego en la bobina encendida y nuevamente entre las dos bobinas siguientes.

**Microstepping** Esta técnica de control del motor PAP permite conseguir pasos inferiores al paso nominal del motor. Es decir, divide el giro en porciones para poder avanzar más lentamente o de forma más precisa.

Para ello, se hace variar la corriente aplicada a cada bobina emulando un valor analógico con las señales digitales de las que se dispone. Si se consiguen señales analógicas sinusoidales perfectas y desfasadas  $90^\circ$  entre sí, se consigue la rotación deseada.

Como no se puede conseguir una señal analógica por tratarse de señales digitales con las que se trabaja, se intenta simular una señal analógica mediante pequeños saltos de la señal eléctrica. De ello depende la resolución del motor:  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$ ,  $1/32$ ,...



**Figura 4.2** Esquema de una señal con microstepping [21], donde en el panel superior se ve  $I_A$  que es la corriente que pasa por un par de bobinas e  $I_B$ , en el panel inferior, la corriente en el otro par de bobinas, defasada en el tiempo. En el panel izquierdo puede verse la señal con un microstepping de medio paso, y en el de la derecha, microstepping de un octavo de paso.

Para este proyecto, se optó por este tipo de control del motor paso a paso. Se escogió el Stepper Motor Driver DQ542MA que permite obtener hasta 25.000 microsteps por revolución. De este modo, se cumple con los parámetros exigidos para la máquina independizándose de un sistema de feedback, convirtiéndose así en un circuito a lazo abierto.

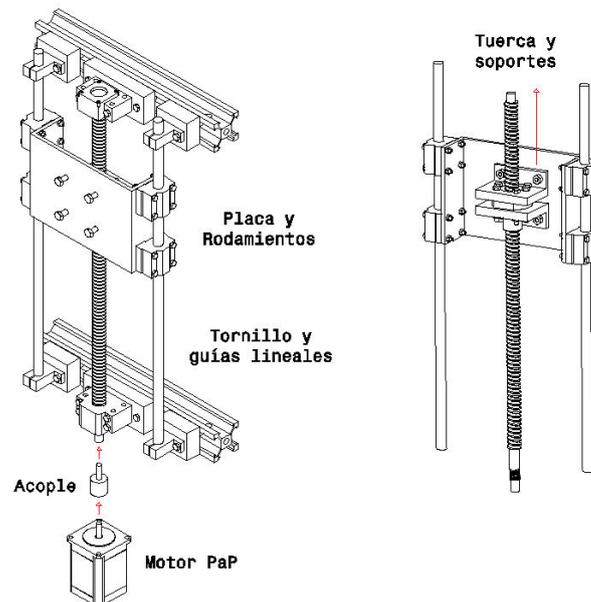
Para la transformación de movimiento angular que realiza el motor paso a paso a un movimiento lineal, se utilizó un tornillo de bolas recirculantes con dos guías lineales. El mecanismo de transformación de movimiento de rotación a traslación lineal se detalla en la sección a continuación.

#### **4.1.2. Tornillo sin fin**

Este elemento tiene el objetivo de convertir el movimiento de rotación generado por el motor paso a paso en movimiento de traslación lineal.

En primer lugar, la rotación del motor se transmite directamente al tornillo sin fin a través de un acople. Un acople es aquel mecanismo encargado de unir dos ejes para transmitir la potencia mecánica de un eje al otro [22]. En este caso, se transmite el movimiento del motor paso a paso al tornillo sin fin. El husillo (o eje) lleva enroscada una tuerca de bolas recirculantes, un conjunto de bolas pequeñas confinadas dentro de una carcasa [23].

En segundo lugar, esta tuerca debe estar fija a algún otro componente para evitar que gire junto con el tornillo. En este caso, se encuentra fija a dos ejes o guías lineales. Al evitar la rotación, la tuerca desarrolla el movimiento lineal deseado. Cuando las bolas giran por el camino de la rodadura entre el eje y la tuerca, realizan un movimiento rotativo infinito, que minimiza la fricción. La velocidad de movimiento dependerá tanto de la velocidad de rotación del motor como del paso de rosca del husillo. Lo descrito se observa con mayor detalle en la Figura 4.3



**Figura 4.3** Transmisión de movimiento y componentes que la integran. El motor transmite la rotación al tornillo sin fin a través del acople. La tuerca transforma la rotación del tornillo en movimiento lineal. Este movimiento es dirigido por las guías lineales con los rodamientos.

Para la elección de este componente se utilizó la guía de diseño disponible en el manual de husillos de la marca THK [24]. A través de este procedimiento se determinaron una serie de características en base a los requerimientos de la máquina a construir. En base a estos datos obtenidos, se pudo elegir el tornillo acorde. Los parámetros determinados a lo largo del análisis son:

- Paso mínimo necesario
- Cargas estáticas y dinámicas asociadas al ensayo
- Carga crítica de pandeo
- Velocidad de rotación crítica del husillo
- Torque asociado al desplazamiento de la tuerca

Ciertos parámetros no poseían restricción por lo que se tomaron valores de referencia encontrados en el catálogo antes citado.

## Resultados obtenidos

A continuación se detalla el procedimiento de cálculos realizados: como primer paso, se especificaron varios parámetros propios del ensayo. Cabe aclarar que algunos de ellos fueron sobredimensionados ya que su valor no se conocía con exactitud y se buscó obtener un cálculo conservador.

Los parámetros detallados son:

Variable	Notación	Valor	Unidad
Peso del sistema a mover	$W = W_1 + W_2$	200	N
Máximo desplazamiento	carrera	50 <sup>1</sup>	mm
Máxima velocidad lineal	$v_{max}$	1200	mm/min
Módulo de fricción superficie guía	$\mu$	0.25	-
Velocidad máxima motor	$N_{max}$	400	rpm
Máxima carga del ensayo	$F_{ensayo}$	500	N
Diámetro del husillo	$d_{tornillo}$	16	mm
Distancia entre apoyos	$L$	400	mm

Cuadro 4.1 Parámetros fijados para el análisis del tornillo sin fin.

## Paso mínimo

Se calculó el paso mínimo ( $l_{min}$ ) requerido por el sin fin para poder satisfacer las necesidades del equipo. El paso adecuado garantiza poder cumplir la velocidad de desplazamiento requerida en los ensayos. Este se obtiene a partir de la relación entre velocidad necesaria de desplazamiento y velocidad de rotación del motor según la ecuación 4.1.

<sup>1</sup>Carrera asociada a determinados ensayos estándar. Podría diferir dependiendo del tipo de ensayo seleccionado

$$l_{min} \geq \frac{v_{max}}{N_{max}} = \frac{1200\left(\frac{mm}{min}\right)}{400\left(\frac{rev}{min}\right)} = 3\left(\frac{mm}{rev}\right) \quad (4.1)$$

### Carga axial

Es necesario saber a cuánta carga estará solicitado el tornillo sin fin con la intención de asegurar la resistencia del mismo (según especificación técnica de producto). Para esto, se tuvo en cuenta la máxima carga requerida en el ensayo incluyendo la carga por inercia asociada a una aceleración ascendente del peso a mover.

Para esto se calculó la aceleración según:

$$a = \frac{v_{max}}{t_{aceleracion}} = \frac{20\left(\frac{mm}{s}\right)}{0,05(s)} \cdot \frac{1m}{1000mm} = 0,4\left(\frac{m}{s^2}\right) \quad (4.2)$$

El tiempo de aceleración se determinó en base a la observación de otros dispositivos similares ya desarrollados y siguiendo ejemplos resueltos en los manuales [1] y [2]. Además, el tiempo de aceleración se disminuyó para obtener una aceleración mayor y de esta manera lograr magnificar la fuerza asociada a este movimiento.

Con lo anterior se determinó:

$$F_{aceleracion} = a \cdot \frac{W}{g} = 0,4\left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot \frac{200N}{9,81\frac{m}{s^2}} = 0,4(m/s^2) \cdot 20,39(kg) = 8,15(N) \quad (4.3)$$

También se calculó la fuerza asociada a la fricción entre el rodamiento y la superficie guía. Nuevamente, magnificamos los valores involucrados, en este caso el coeficiente de fricción, para tener la libertad de elección de superficies guías que no necesariamente estuviesen pulidas con tolerancias demasiado exigentes.

$$F_{friccion} = \mu \cdot (W_1 + W_2) = \mu \cdot W = 0,25 \cdot 200(N) = 50(N) \quad (4.4)$$

Finalmente se obtuvo la fuerza total. Nuevamente se coloca factor de seguridad para obtener resultados conservadores y minimizar discrepancias entre el modelo y la realidad.

$$F = F_{friccion} + F_{aceleracion} + F_{ensayo} = 50 + 8,15 + 500 = 558,15(N) \quad (4.5)$$

$$\Rightarrow F_{max} = FS \cdot F = 1,4 \cdot 558,15 \simeq 800(N) \quad (4.6)$$

La fuerza de fricción genera esfuerzos de compresión sobre el husillo. Esto es una aproximación observada en el manual [24] ya que esta podría estar generando un momento torsor y en consecuencia, esfuerzos de corte. Todas estas variables están contenidas en el proceso de diseño que se detalla a lo largo de esta sección.

Para el coeficiente de seguridad se buscó incrementar la carga en valores que aseguraran el correcto funcionamiento del dispositivo. Por otro lado, no se consideró un factor de seguridad más exigente debido a que este influye directamente en los costos del husillo, rodamientos de apoyo, tuerca de bolas recirculantes y motor. Un pequeño ajuste en este factor significa grandes aumentos en el costo de los componentes de la máquina.

### Carga crítica por pandeo

El pandeo es un tipo de falla por flexión que aparece en elementos comprimidos [25], es decir que puede ocurrir una deflexión lateral en lugar de una compresión en el elemento.

La carga crítica de pandeo es aquella a la que dadas la geometría y apoyos del sistema, este está al límite de convertirse en un sistema inestable [25].

Se calculó la carga crítica de pandeo para el husillo seleccionado según la ecuación del procedimiento de cálculo del manual [24]:

$$P_{critica} = \frac{\alpha \cdot \pi^2 \cdot N \cdot E \cdot I}{L^2} = \frac{0,5 \cdot \pi^2 \cdot 1 \cdot 200000 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{\pi \cdot 16^4}{64} mm^4}{400^2 mm^2 \cdot 1000} \simeq 19,84(kN) \quad (4.7)$$

Siendo:

- $\alpha = 0,5$  : coeficiente de seguridad (en este caso se tomó un valor promedio de referencia de los ejemplos resueltos del manual citado [24])

- $N=1$ : coeficiente para condición simplemente apoyada (peor condición)
- $E=200000$ : módulo elástico aproximado del acero  $[\frac{N}{mm^2}]$
- $I=\frac{\pi \cdot 16^4}{64}$ : Mínimo momento de inercia del husillo  $[mm^4]$
- $L$ : distancia entre apoyos = 400 (rodamientos del husillo)  $[mm]$

Se observó que la carga crítica por pandeo es ampliamente superior a las cargas involucradas en el sistema (19,8(kN) vs 800(N)). Se logró asegurar que variaciones en el diámetro del husillo, distancia entre apoyos o en la carga máxima del ensayo, no son factores determinantes en cuanto a la carga por pandeo.

### Velocidad crítica de rotación

La velocidad crítica de rotación es aquella a la cual el sistema entra en resonancia dado a que coincide con el primer armónico de la frecuencia natural del sistema analizado.

Se calculó la velocidad de rotación crítica del tornillo nuevamente según ecuación del catálogo [24]:

$$\eta_{critica} = \frac{\beta \cdot 60 \cdot \lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I \cdot g}{\gamma \cdot A}} = \frac{0,8 \cdot 60 \cdot \pi^2}{2 \cdot \pi \cdot 400^2} \cdot \sqrt{\frac{20000 \cdot \frac{\pi \cdot 16^4}{64} mm^4 \cdot 9,8 \times 10^3 \frac{mm}{s^2}}{7,8 \times 10^{-6} \frac{kgf}{mm^3} \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4} mm^2}} \simeq 9500rpm \quad (4.8)$$

Donde:

- $\eta$ : Velocidad de rotación admisible [rpm]
- $\beta = 0,8$ : Coeficiente de seguridad (valor de referencia utilizado por el fabricante consultado)
- $\lambda = \pi$ : Factor de apoyos correspondiente a configuración simplemente apoyada (peor condición).

- $\gamma = 7.8 \times 10^{-6}$ : Gravedad específica [ $\frac{kgf}{mm^3}$ ]
- $g = 9.81 \times 10^3$ : Aceleración de la gravedad [ $\frac{mm}{s^2}$ ]
- $A = \frac{\pi \cdot 16^2}{4}$ : Área de sección del husillo [ $mm^2$ ]
- $E = 20000$ : Rigidez promedio del acero [ $\frac{kgf}{mm^2}$ ]
- $I = \frac{\pi \cdot 16^4}{64}$ : Momento de inercia polar [ $mm^4$ ]

Nuevamente, se observa que el valor crítico calculado es mucho más elevado que los parámetros definidos. En este caso se recuerda que la velocidad de rotación máxima planteada es de  $\eta_{max} = 400(rpm)$ .

### Torque asociado

Se calculó el torque máximo necesario para lograr el desplazamiento de la carga, de acuerdo a:

- Fuerzas asociadas al ensayo
- Aceleración de las masas

En primer medida se obtuvo el valor del torque asociado a la carga axial máxima calculada en 4.1.2:

Donde

$$T_1 = \frac{F_{max} \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{800 \cdot 5}{2 \cdot \pi \cdot 0,8} = 0,8(N \cdot m) \quad (4.9)$$

- $T_1$ : Torque asociado a la carga axial máxima
- $\eta$ : Coeficiente de magnificación según el manual [24]
- $F_{max} = 800N$  calculada en 4.1.2

- $l = 5(mm)$  cumpliendo la restricción calculada en 4.1

Se calcularon los momentos de inercia (J) asociados a la rotación de cada componente del sistema.

$$J_{\text{tornillo}} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot d^4 \cdot L}{8} = \frac{\pi \cdot 7.8 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \cdot (1,6\text{cm})^4 \cdot 40\text{cm}}{8} = 0,8(\text{kgf} \cdot \text{cm}^2) \quad (4.10)$$

- $\rho = 7.8 \times 10^{-3}(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3})$ : densidad del acero
- $d = 1,6(\text{cm})$ : diámetro del husillo
- $L = 40(\text{cm})$  : largo del tornillo según 4.1

$$J_{\text{partesmoviles}} = W \cdot \left(\frac{l}{\pi}\right)^2 = 0,5(\text{kgf} \cdot \text{cm}^2) \quad (4.11)$$

El momento de inercia del acople se determinó en base a un promedio de los momentos de inercia de acoples compatibles con el tornillo y torque en cuestión.

$$J_{\text{acople}} = 0,04(\text{kgf} \cdot \text{cm}^2) \quad (4.12)$$

El momento de inercia del motor se obtuvo de la observación de datasheets de motores paso a paso con torque nominal cercano al estimado.

$$J_{\text{motor}} = 0,21(\text{kgf} \cdot \text{cm}^2) \quad (4.13)$$

Finalmente se obtuvo el momento de inercia total:

$$J_{\text{total}} = \sum_i J_i = J_{\text{tornillo}} + J_{\text{partesmoviles}} + J_{\text{acople}} + J_{\text{motor}} = 1,55(\text{kgf} \cdot \text{cm}^2) \quad (4.14)$$

Además, se calculó el torque necesario para realizar una aceleración acorde a una velocidad y tiempo determinado. Esto se calculó según la ecuación del catálogo [24] que se muestra a continuación:

$$T_{aceleracion} = J_{total} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{max}}{60 \cdot t_{aceleracion}} = 1,55 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 400}{600 \cdot 0,05} = 1298 \left( \frac{kgf \cdot cm^2}{s^2} \right) \simeq 0,13(N \cdot m) \quad (4.15)$$

donde

- $t_{aceleracion}$ : tiempo de aceleración desde velocidad 0 a la velocidad buscada [s]

Para finalizar el análisis, se obtuvo el torque total máximo necesario en la peor condición de desplazamiento como la suma de los torques provocados por la carga máxima así como también torques generados por aceleraciones y fricción.

$$T_{max,necesario} = T_1 + T_{aceleracion} = 0,13 + 0,8 = 0,93(N \cdot m) = 93(N \cdot cm) \quad (4.16)$$

### Conclusión del análisis

En conclusión, se obtuvo que todos los parámetros verificados a lo largo del proceso fueron satisfactorios. Además, los esfuerzos necesarios son inferiores a los valores admisibles calculados con las dimensiones elegidas. Los cálculos que se llevaron a cabo fueron de tipo geométrico y estructural por lo que no se involucró ningún concepto particular del diseño de husillos del fabricante referenciado. Se puede extender y utilizar lo anterior para un tornillo análogo de otro fabricante, que cumpla con las especificaciones geométricas detalladas. En el proceso de diseño se seleccionó un husillo de bolas recirculantes de 16 mm de diámetro y 5 mm de paso sabiendo que este podrá soportar las sollicitaciones involucradas en el proceso.

## 4.2. Medición de la carga

Una vez definida la forma de realizar la carga se estudiaron los distintos métodos existentes para lograr medirla. Luego de analizar las soluciones utilizadas por proyectos similares y por fabricantes reconocidos como Instron o HBM [26], se decidió utilizar una celda de carga tipo S en la cual de acuerdo a la polaridad permite medir fuerzas de tracción o de compresión, la misma puede observarse bajo el nombre de 'celda de tracción' en la Figura 2.3d.

Se eligió una celda de carga de 100 *kg* considerando que el requerimiento máximo para las probetas ensayadas es de 50 *kg*. Esto se debe a que, con la precarga y el peso de la mordaza, sumado a factores de seguridad, se podría exceder el límite de 50 *kg* impuesto. Además, la celda de carga de 100 *kg* ofrece mayor versatilidad para la realización de otro tipo de ensayos en el futuro y le brinda al dispositivo la capacidad de adaptarse a nuevos proyectos. Sin embargo, debido al posicionamiento que se le dio en este diseño, el desafío a tener en cuenta es la humedad, ya que para este tipo de instrumentos el agua y la humedad son extremadamente dañinos.

La celda de carga elegida es la CZ de Flexar SRL. Se trata de una celda tipo S de media capacidad en acero para aplicaciones de tracción en la industria. La misma consta de las siguientes características [27]:

- Capacidad: 100 *kg*.
- Sensibilidad:  $3 \frac{mv}{V} \pm 10\%$
- Rango de temperatura: -10 a 40°C
- Balance de cero:  $\pm 1\%$  de la carga nominal ( $C_n$ )
- Alinealidad: 0,03
- Histéresis: 0,02 %  $C_n$

- Repetibilidad:  $0,02\% C_n$
- Creep: :  $0,03\% C_n$
- Sobrecarga:  $150\% C_n$
- Corrimiento cero por temperatura:  $\pm 0.003\% C_n/^\circ\text{C}$
- Grado de protección: IP67

Según el proveedor, la celda de carga tiene una resolución de carga  $50\text{ g}$  (es decir, 3000 intervalos en un rango de  $150\text{ kg}$ ). Esto corresponde a una resolución de  $0.5\text{ N}$ . La linealidad de la medición se asegura a partir de los  $30\text{ g}$ , o su equivalente  $0.3\text{ N}$  [27]. Si bien el proyecto original requería garantizar mediciones de mínimo  $0.1\text{ N}$  (ver Apéndice A), éste valor era muy ambicioso. Se decidió que la celda de carga es adecuada.

### 4.3. Medición del desplazamiento

Esta elección se consideró quizás una de las más complejas ya que la utilización de un extensómetro eliminando todo tipo de errores de rigidez y desalineación, no fue posible debido a su elevado costo. Además, en este caso el extensómetro debía ser capaz de sumergirse y sujetarse a tejidos, lo cual también presentaba una dificultad. Por este motivo se debieron analizar otras variantes, como por ejemplo, la utilización de un LVDT (transformador diferencial de variación lineal) o la realización de una medición indirecta mediante el establecimiento de una relación entre el giro del motor y el *stroke* del cabezal.

Debido a que las muestras a ensayar tienen un bajo módulo de Young frente al módulo de Young de la máquina, se decidió la implementación de un sistema de medición indirecto calculando la cantidad de pasos realizados por el motor. Esto significa que se considera que la máquina es tanto más rígida que la pieza a ensayar, que las deformaciones medidas por el sistema de medición indirecto pueden ser atribuidas a la deformación de la pieza

ensayada y no a las deformaciones en la máquina en sí. Por este motivo se buscó minimizar al máximo la distancia entre el eje del ensayo y el eje del cabezal para lograr disminuir notablemente los momentos flectores generados, logrando mantener la rigidez buscada. Teniendo en cuenta esta simplificación, se establece una relación entre la deformación de la muestra y la cantidad de pasos que se mueve el motor. Utilizando el paso de rosca del tornillo sin fin, se puede decir que cada vuelta del motor representan 5 *mm* de desplazamiento en el cabezal. Por lo tanto, sabiendo la cantidad de pasos por revolución que posee el motor, se puede obtener la relación buscada.

Si bien este sistema de medición trae errores asociados por desarrollarse de una manera indirecta, se determinó que era la mejor solución frente a las restricciones de tecnología asociadas al presupuesto del trabajo.

#### **4.4. Vinculación equipo-muestra**

Para sujetar las muestras de tejido o las probetas al dispositivo, se pensó en un sistema flexible que pueda admitir la mayor cantidad de tipos de muestras posible, dado que la cátedra que nos solicitó desarrollar este equipo planea trabajar tanto con probetas estándar como con muestras de dimensiones irregulares.

Las muestras abarcan desde tejidos blandos como muestras de piel hasta tejidos duros como huesos. Pero, inicialmente se comenzó por un juego de mordazas muy versátil y abarcativo. Se repensó los mandriles de los taladros como tales y se implementaron dos mandriles para que sujeten tejidos -tanto cilíndricos como amorfos- de ancho o diámetro de entre 3 *mm* y 16 *mm* como podría ser un conjunto de fibras de músculos, una arteria o cualquier otro tejido cilíndrico.

Las mordazas se montan sobre un sistema removible que permite intercambiarlas por otras que permitan ensayar otra geometría. De este modo, estas mordazas nos ofrecen una simple vinculación con la máquina mediante unión roscada y la posibilidad de generar

luego otro tipo de mordazas para tejidos planos que, teniendo la misma rosca, se puedan intercambiar fácilmente.

Es importante mencionar que una solución existente en las máquinas comerciales resulta en vincular las piezas a las mordazas con papel de lija y de este modo aumentar los coeficientes de fricción y evitar que las muestras se desprendan o deslicen de las mordazas.

## 4.5. Potencia del equipo

En esta sección se verifica de una manera simplificada la potencia requerida por el motor paso a paso. La potencia se calcula como el producto entre la velocidad máxima de desplazamiento del cabezal y la fuerza máxima de ensayo. En este proyecto se estimó una velocidad máxima del cabezal de  $1200 \frac{mm}{min}$  y una fuerza máxima de  $500 N$ . No se consideran pérdidas de potencia debido a roce.

$$P_{requerida} = F_{ensayo} \cdot v_{max} = 500(N) \cdot 1200\left(\frac{mm}{min}\right) \cdot \frac{1m}{1000mm} \cdot \frac{1min}{60s} = 10(W) \quad (4.17)$$

De los datos encontrados en los gráficos de testeo del motor [28], se pueden obtener valores de torque entregado por el motor en función de la velocidad de giro  $\omega$ .

$$P_{motor} = T_{entregado} \cdot \omega = 0,7(N \cdot m) \frac{240 \cdot 2\pi}{60} \left(\frac{1}{s}\right) = 17,6(W) \quad (4.18)$$

- El valor de  $\omega$  corresponde a la velocidad de rotación del motor obtenida mediante la división entre la velocidad y el desplazamiento vertical buscada por el paso del tornillo sin fin utilizado  $\omega = \frac{1200(\frac{min}{mm})}{5(mm)}$
- El valor de  $T_{entregado}$  corresponde el valor de torque que el motor es capaz de generar a esas revoluciones

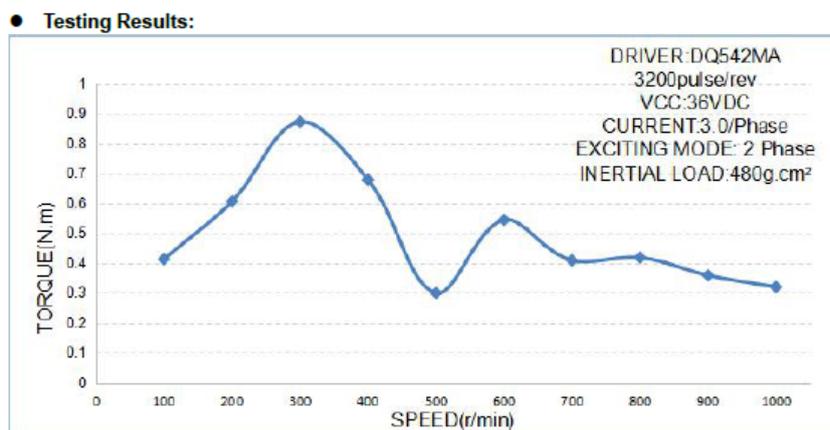


Figura 4.4 Torque en función de la velocidad de giro del motor según el fabricante [28].

A pesar de no considerar pérdidas de potencia por roce, se puede observar que el valor de potencia calculado a partir de los datos de la figura 4.4 es ampliamente superior al valor de potencia de 10 (W) requerida por la condición mas exigente de ensayo calculada en la ecuación 4.18.

## 4.6. Frame

Una vez definidas las partes fundamentales de la máquina de ensayos, se estudiaron las variantes para el armado de un conjunto. Debido a la situación epidemiológica y de aislamiento del país en la que se desarrolló el proyecto, desde un inicio se buscó reducir el tiempo de mecanizado. Por este motivo se definió realizar el *frame* o bastidor utilizando perfiles del tipo Bosch que permiten un fácil ensamblaje.

Estos perfiles, en particular la serie 'ranura 10, retículo 40' de la marca antes citada [29], son utilizados en casos de cargas elevadas. La ranura de esta serie permite realizar uniones de una gran resistencia. Estas características resultan adecuadas para las necesidades de este trabajo.

Al contar con un diseño constructivo especialmente fuerte, esta ranura permite efectuar uniones de una gran resistencia.

En cuanto a la estructura, se optó por un diseño con una columna en la que el sistema que realice el movimiento estuviera desplazado respecto al eje del ensayo. Esta configuración es la más utilizada en dispositivos que ensayan cargas de similares magnitudes.

#### **4.6.1. Diseño y rigidez del frame**

Se analizaron distintas posibilidades para el diseño de la estructura soporte de la máquina. Estas posibilidades tuvieron en cuenta distintos tipos de materiales, así como también de uniones. Además, se analizó la rigidez de dos distintas estructuras mediante el software RISA-3D (versión 5.0) buscando las menores deflexiones asociadas a las cargas del ensayo. Cabe considerar que, aunque se analizaron valores concretos de deflexiones, el estudio se realizó de manera cualitativa dado que el modelo real posee múltiples aspectos adicionales influyentes en los valores de deflexión. Finalmente, se consideró el costo de cada una de las opciones en conjunto con la complejidad del ensamblado. También se reparó en la opinión de profesores de la Institución para lograr seleccionar el modelo más adecuado.

El diseño final utilizado varía de acuerdo con las opciones disponibles y la metodología más favorable durante el ensamblado.

#### **Análisis del frame**

Inicialmente se pensó en una estructura de tubos de sección cuadrada de acero. Esta variante ofrece el beneficio de requerir materiales de fácil acceso y bajo costo, que beneficia al proyecto. En oposición a esto, se destacan dos desventajas. Por un lado, el peso no es el adecuado para una máquina que busca, en principio, su explotación en el ámbito universitario, en particular en el entorno de un aula. Por el otro lado, las vinculaciones de los distintos perfiles deben ser soldadas o realizarse mediante el maquinado de piezas que hacen posible su unión con bulones. En ambos casos, pueden cometerse errores de

escuadrado, además de requerir más horas de taller lo que conlleva a una complicación durante el período de Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio.

Como solución a esta problemática se eligió la perfilería modular de aluminio para el desarrollo del *frame*. Esta metodología ofrece ligereza, fácil ensamblaje, flexibilidad de construcción y acceso a los materiales y costos accesibles, entre otras ventajas. Se destaca también, su gran aplicación en proyectos de escala similares a este.

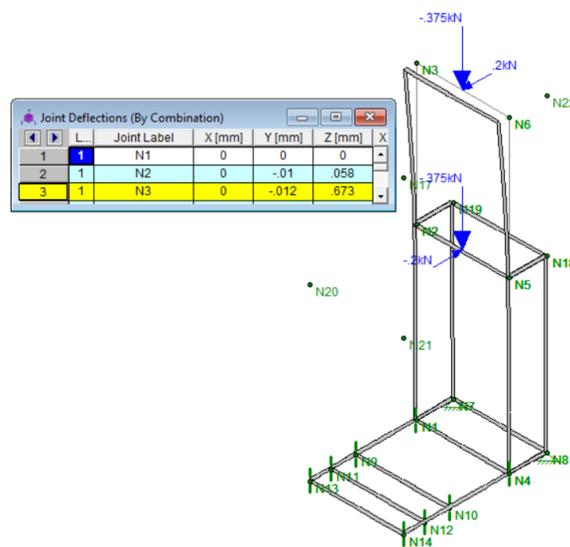
### **Análisis estructural mediante software RISA-3D**

En este capítulo se detalla el procedimiento de cálculo de rigidez del *frame* o estructura de la máquina de ensayos.

En primer lugar se modelaron tres estructuras diferentes, basadas en diseños existentes. Se cargaron las propiedades correspondientes a la sección correspondiente a perfiles tipo Bosch 4040. En cuanto a las cargas, se utilizaron cargas magnificadas para obtener deflexiones mayores y así contrarrestar la idealidad del modelo 3D, y aproximarlos más precisamente al modelo real. En esta mayoración de cargas se incluye, por ejemplo, el peso de componentes que irán apoyados en la estructura como el tornillo sin fin y las mordazas. Para el cálculo de las cargas, se tomó como referencia la máxima fuerza especificada de ensayos  $F_{max} = 500(N)$ . Debido a que las columnas del *frame* están alejadas  $150(mm)$  del eje del ensayo o tornillo sin fin, el par generado será de  $M = F \cdot d = 75(Nm)$ . Al descomponer estas fuerzas en los apoyos del tornillo, los cuales están separados por una distancia de  $\delta_{apoyos} = 450(mm)$ , obtenemos dos fuerzas en la misma dirección y sentido opuesto de un valor  $F_{frame} = 166(N)$ . Estas fuerzas son internas si analizamos el conjunto en su totalidad, pero al retirar el tornillo del análisis estructural y generar el modelo mostrado, se consideran como fuerzas externas. Posteriormente, las fuerzas obtenidas mediante la descomposición se aumentaron con un factor de 1,2 resultando en  $F_{frame}^* = 200(N)$  para realizar un cálculo conservador que absorba cualquier error de dimensiones, idealidades, o bien incluir factores que pueden surgir en un futuro.

En resumen, se trasladó la fuerza máxima en el eje de ensayo hacia el eje de la columna principal del frame. Es por este motivo, que se genera el par  $M = F \cdot d = 75(Nm)$ . Luego, este par se descompuso en 2 fuerzas ubicadas en los apoyos del husillo para que sea posible cargar las fuerzas en el modelo realizado.

A continuación, se muestran los tres modelos analizados seguido de valores de deflexión obtenidos mediante la simulación de cada uno de estos modelos. Los valores de deflexión corresponden a las deflexiones máximas ubicadas en el punto más alto de la máquina.



**Figura 4.5** Modelos analizados en el Software Risa-3D para el cálculo de las deformaciones del frame. Configuración modelo 1 del análisis de rigidez.

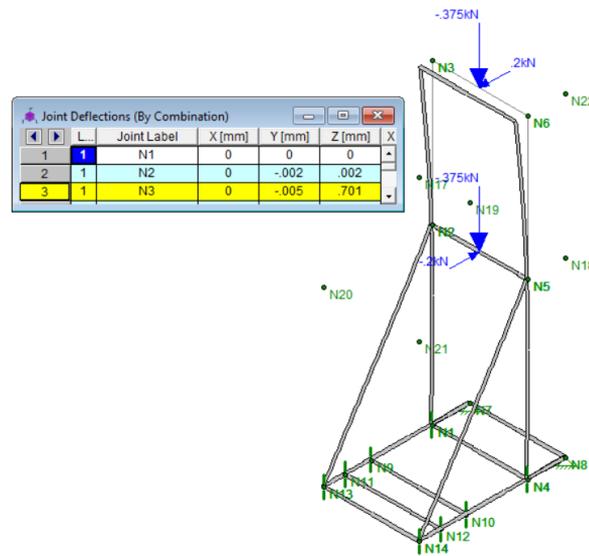


Figura 4.6 Modelo analizado en el Software Risa-3D para el cálculo de las deformaciones del frame. Configuración modelo 2 del análisis de rigidez.

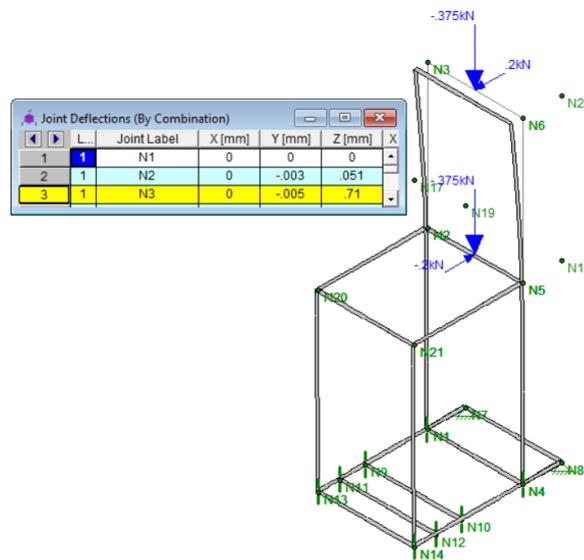


Figura 4.7 Modelo analizado en el Software Risa-3D para el cálculo de las deformaciones del frame. Configuración modelo 3 del análisis de rigidez.

---

<b>Modelo</b>	<b>Deflexión máx [mm]</b>
<b>1</b>	<i>0.673</i>
<b>2</b>	<i>0.701</i>
<b>3</b>	<i>0.710</i>

**Cuadro 4.2** Valores de deflexión para distintos modelos propuestos de frame.

### **Elección del modelo**

Se optó por la utilización del modelo 2, ya que este es el que menores deflexiones ofrece junto con el modelo 1. Además, se consideró su fácil ensamblado, el ahorro de material y en consecuencia, menores costos. Otra característica que influyó fue mantener la zona del ensayo libre de perfiles, para un fácil y cómodo acceso a la misma. Asimismo, se redujo el número de uniones entre perfiles frente a los demás modelos analizados, esto significa menores juegos, mayor similitud al modelo ideal y por lo tanto, mayor rigidez. Todo lo anterior también fue consultado con profesionales de la Institución.

### **Perfilería utilizada**

Se utilizaron perfiles modulares de aluminio “tipo Bosch”. A continuación, se muestran la geometría y propiedades de la sección. Todos los tramos utilizados poseen la misma sección para la estandarización del sistema, así como también la fácil reposición en caso de avería.

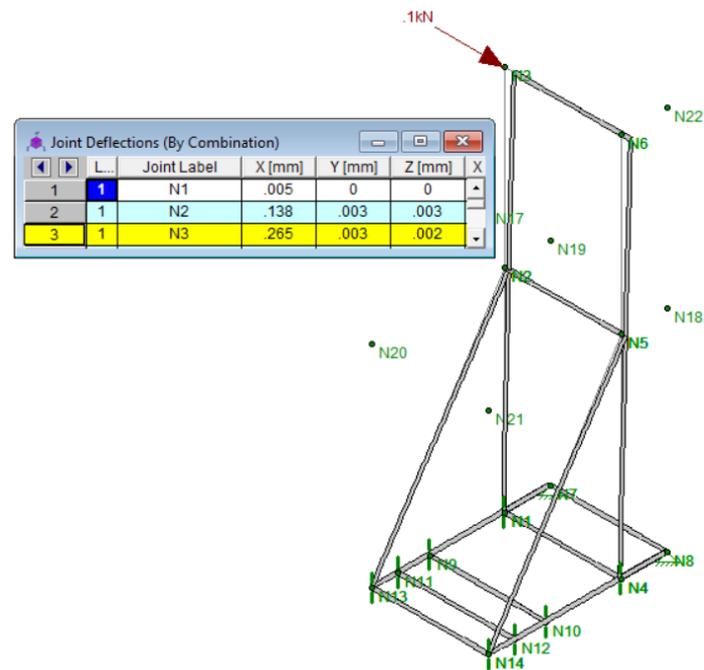
Propiedad	Valor
$A$	$5,6cm^3$
$I_x$	$49,1cm^4$
$I_y$	$9,1cm^4$
$m$	$1,5\frac{kg}{m}$

**Cuadro 4.3** Propiedades de la sección de los perfiles utilizados.  $A$ : Área,  $I_x$ : Momento inercia x,  $I_y$ : Momento inercia y,  $m$ : masa por unidad de longitud.

### Verificación deflexiones transversales

Para mayor seguridad, se verificó el modelo 2 a cargas en la dirección del eje  $x$ . Se colocó una carga de  $100(N)$  en el punto más alto y en la dirección  $x$ . Aunque esta carga es ficticia y no existe en la dinámica del ensayo, se utilizó como carga de prueba para observar la respuesta de la estructura a aceleraciones en esa dirección, tal como pueden ser vibraciones o un mal uso del dispositivo.

El resultado mostró que el *frame* se comporta de una manera aceptable ya que la deflexión obtenida es considerablemente menor al milímetro.



**Figura 4.8** Verificación deflexión transversal para el modelo 2 de análisis de rigidez.

Se obtuvo un valor de deflexión transversal máxima de  $0.265(mm)$  para una carga de  $100(N)$ .

#### 4.6.2. Análisis de tensiones

Se analizaron las tensiones generadas en la estructura del modelo 2. Se pudo observar mediante el mismo software que estas son muy inferiores a las tensiones admisibles del aluminio. A continuación se muestran los valores obtenidos para cada miembro.

L...	Member Label	S...	Axial[MPa]	y Shear[MPa]	z Shear[MPa]
1	M5	1	.064	.335	-.179
		2	.064	.335	-.179
		3	.064	-.335	.179
		4	.064	-.335	.179
		5	.064	-.335	.179
1	M7	1	-.009	0	0
		2	-.009	0	0
		3	-.009	0	0
		4	-.009	0	0
		5	-.009	0	0
1	M8	1	0	-.088	-.007
		2	0	-.088	-.007
		3	0	-.088	-.007
		4	0	-.088	-.007
		5	0	-.088	-.007
1	M9	1	0	-.088	.007
		2	0	-.088	.007
		3	0	-.088	.007
		4	0	-.088	.007
		5	0	-.088	.007
1	M10	1	-.112	.055	.003
		2	-.112	.055	.003
		3	-.112	.055	.003
		4	-.112	-.053	.001
		5	-.112	.268	.016
1	M11	1	-.112	.055	-.003
		2	-.112	.055	-.003
		3	-.112	.055	-.003
		4	-.112	-.053	-.001
		5	-.112	.268	-.016
1	M12	1	0	0	0
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		5	0	0	0
1	M13	1	.001	0	0
		2	.001	0	0
		3	.001	0	0
		4	.001	0	0
		5	.001	0	0
1	M14	1	-.014	0	0
		2	-.014	0	0
		3	-.014	0	0
		4	-.014	0	0
		5	-.014	0	0

(a) Tensiones de un bloque de miembros. Calculadas a través de la simulación del modelo 2 en el software Risa3D

1	M15	1	.014	0	0
		2	.014	0	0
		3	.014	0	0
		4	.014	0	0
		5	.014	0	0
1	M16	1	.347	.083	-.002
		2	.347	.083	-.002
		3	.347	.083	-.002
		4	.347	.083	-.002
		5	.347	.083	-.002
1	M17	1	.347	.083	.002
		2	.347	.083	.002
		3	.347	.083	.002
		4	.347	.083	.002
		5	.347	.083	.002
1	M14A	1	.331	.013	.112
		2	.331	.013	.112
		3	.331	.013	.112
		4	.335	.064	-.179
		5	.335	.064	-.179
1	M15A	1	.331	-.013	.112
		2	.331	-.013	.112
		3	.331	-.013	.112
		4	.335	-.064	-.179
		5	.335	-.064	-.179
1	M15B	1	-.049	.335	.179
		2	-.049	.335	.179
		3	-.049	-.335	-.179
		4	-.049	-.335	-.179
		5	-.049	-.335	-.179

(b) Tensiones de un bloque de miembros. Calculadas a través de la simulación del modelo 2 en el software Risa3D

**Figura 4.9** Tensiones en cada miembro del modelo 2 analizado en el software Risa3D

Como podemos observar en cada una de las figuras de 4.9, no existe ningún miembro que este sometido a más de 1 MPa, por lo que verifica un buen comportamiento de la estructura y valida el análisis de deformaciones antes analizado.

## Conclusión del análisis del frame

Se eligió el modelo 2 como el más apropiado de acuerdo a los criterios contemplados. Se obtuvieron valores de deflexión aceptables frente a las deformaciones de las muestras a ensayar. Se espera un adecuado comportamiento durante estos ensayos.

El método de rigidización posee la estructura definida en las elecciones de este análisis, sin embargo, no se utiliza (para las diagonalizaciones) la sección del perfil descrito. En cambio, se utilizó una planchuela de acero de  $3/16$  in de espesor formando una geometría de escuadra que mantiene la lógica de diagonalización del modelo elegido. Esto se debió a la minimización de costos y a la simplificación en el armado del equipo.

Respecto al comportamiento dinámico de la estructura se desprecian los efectos provocados debido a que las velocidades de operación del equipo no resultan significantes.

### 4.6.3. Verificación de guías lineales

Se utilizaron guías lineales como medio de desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos. El elemento motriz del cabezal es el tornillo sin fin, mientras que las guías se utilizan para poder hacer efectivo el giro del tornillo. Además, son las encargadas de soportar el momento flexor generado por la fuerza durante el ensayo y la separación entre el eje del ensayo y el eje de desplazamiento del cabezal.

En cada una de estas guías se colocó un rodamiento lineal con una separación aproximada de 10 veces el diámetro de la guía. Cada uno de los rodamientos se unió a la tuerca del tornillo a través de una placa de acero plegada con agujeros para pasar bulones.

Se realizó una verificación de tensiones y deflexiones de las guías lineales. El diámetro de las guías fue seleccionado de acuerdo con la disponibilidad y costos en el mercado, y porque los análisis de tensiones y deflexiones (mostrados a continuación) fueron aceptables. Se utilizaron guías de acero templadas con el propósito de obtener buenas terminaciones y tolerancias para un buen funcionamiento de los rodamientos, minimizando los

juegos presentes durante el funcionamiento. Una vez más, se utilizó un valor de momento mayorado de  $K_{seguridad} = 1,5$  para realizar un cálculo más conservador.

Las dimensiones<sup>2</sup> son las siguientes:

- $L = 450(mm)$
- $D = \Phi = 12(mm)$

En cuanto a los apoyos, se consideraron 2 empotramientos. Este tipo de apoyo es el más representativo de las condiciones en las que se encontrarán ensambladas. Si bien en la realidad los rodamientos poseen un grado de libertad en el sentido vertical, se consideró una situación estática.

### Verificación

Se partió de un valor de momento de  $82.5(Nm)$ . Este valor surge de una carga del ensayo máxima, ubicada a una distancia  $\delta_{palanca}$  del eje de desplazamiento. Además, se utilizó un factor de corrección para absorber cualquier discrepancia tanto en la carga como en la distancia. Esto se calculó según:

$$F_{ensayo} \cdot \delta_{palanca} \cdot K_{seguridad} = 500(N) \cdot 0,11(m) \cdot 1,5 = 82,5(Nm) \quad (4.19)$$

### Aplicación del software RISA-3D

Mas allá de que el modelo estudiado es simple, se utilizó el software para poder realizar cambios de dimensiones y cargas con mayor facilidad y observar el comportamiento del sistema.

A continuación se muestra el modelo analizado:

---

<sup>2</sup>Las dimensiones de longitud utilizadas podrían diferir del modelo real. Se utilizó un valor que asegure una condición igual o más solicitada que la real

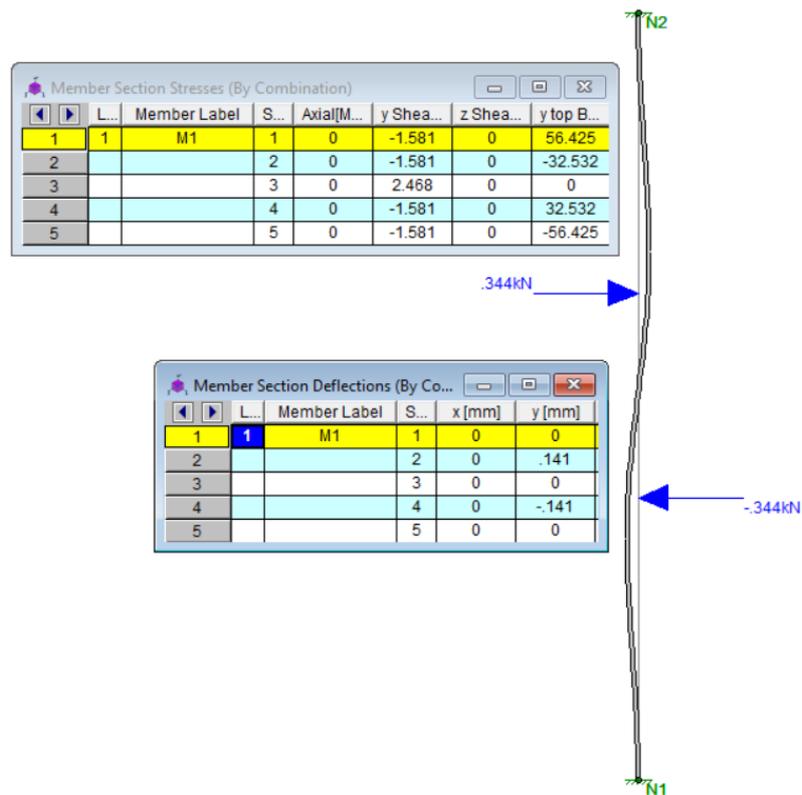


Figura 4.10 Representación de las guías lineales

Como se puede observar en el cuadro de la figura 4.10, se obtuvieron los resultados:

- $\sigma_{max} = 56,5(MPa)$
- $\delta_{max} = 0,141(mm)$

### Conclusión de la verificación

Se consideraron aceptables los resultados obtenidos debido a los siguientes motivos:

- La tensión máxima obtenida es considerablemente inferior a la tensión de fluencia de las aleaciones de acero (210 MPa AISI 1020HR). El grado y calidad del acero no se especificó debido a que el proveedor al que se accedió no ofrece esta información. Se buscó obtener un bajo valor de tensión debido a la imprecisión en la resistencia del material.

- La deflexión máxima observada se estableció como pequeña frente a las dimensiones de la máquina por lo que se aceptó la rigidez obtenida. Se observó también que las deflexiones son del orden de las obtenidas en el análisis del bastidor. Además, las deflexiones generadas en este sistema ocurren en una dirección perpendicular al eje del ensayo y, por lo tanto, no afectan a este directamente.
- Las cargas utilizadas fueron mayoradas.

## 4.7. Estanqueidad y movimiento de la cuba principal

El equipo se diseñó para trabajar sumergiendo las muestras en solución fisiológica en caso de ser necesario. Para lograr la puesta a punto del ensayo se debe poder acceder cómodamente a la mordaza inferior. Para esto se pensó en un sistema que permita desplazar la cuba principal verticalmente. Este sistema de recipientes será explicado en la sección Sistema de calentamiento.

Se diseñó un sistema con o-rings en la tapa inferior de la cuba junto con un eje pulido de acero. Este eje debió poseer la misma longitud que el recipiente cilíndrico para que este pueda deslizar hacia abajo y dejar la mordaza inferior al descubierto.

Sin embargo, esta solución trae otro tipo de inconvenientes como el notable incremento en la altura final de la máquina. Por consiguiente, se requirió un diseño más estable tanto para el eje pulido y la cuba como para la torre donde se monta el sistema que genera el desplazamiento vertical. Para el primer caso, se abulonó una placa de acero en los perfiles. A ésta se le abulonó luego una brida para la sujeción del eje que restrinja, al mínimo, los desplazamientos o desalineaciones que pudieran ser generados por un uso incorrecto de la máquina si se aplicara una fuerza en sentido horizontal a la cuba.

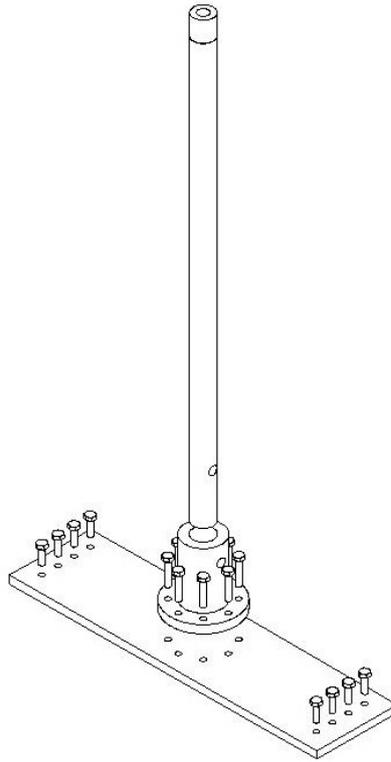


Figura 4.11 Armado del sistema de desplazamiento vertical de la cuba

## 4.8. Adquisición, procesamiento de datos e interfaz gráfica de usuario

La adquisición de datos se lleva a cabo a través de Arduino, una plataforma de creación de electrónica *open-source* (de código abierto) basada en hardware y software libre, flexible y fácil. De esta manera, se puede desarrollar la electrónica que se desee y el código que se pretenda con una sola placa estándar.

Para este proyecto se utilizó el Arduino Mega 2560, basada en el microcontrolador ATmega2560, de ahí su nombre. Posee 54 pines de entrada/salida digitales, 16 entradas analógicas, puerto USB y un cristal de 16MHz [30].

Se adaptaron códigos creados por otros usuarios de Arduino publicados en foros y se

los integró creando un código fuente capaz de leer todas las señales de la máquina para luego procesarlas.

Para el procesamiento de los datos, se utilizó MatLab (Matrix Laboratory), un software para hacer análisis de datos, desarrollo de algoritmos y creación de modelos [31]. Permite también hacer GUIs (Graphical User Interface), interfaz gráfica de usuario para un control sencillo de las aplicaciones del software. En el caso de este proyecto, se podrá comandar a la máquina desde esta interfaz y visualizar los datos y gráficos como resultado, además de poder ingresar los parámetros necesarios para el ensayo [32], por ejemplo dimensiones de las muestras a ensayar, desplazamientos máximos, frecuencia de los ensayos dinámicos.

## 4.9. Sistema de calentamiento

Para aquellos casos en el que la muestra deba ensayarse en un medio con condiciones controladas, parecidas a las fisiológicas, se diseñó un sistema de calentamiento que permite conservar solución fisiológica a temperatura constante de  $37 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

### 4.9.1. Calentamiento de la solución fisiológica

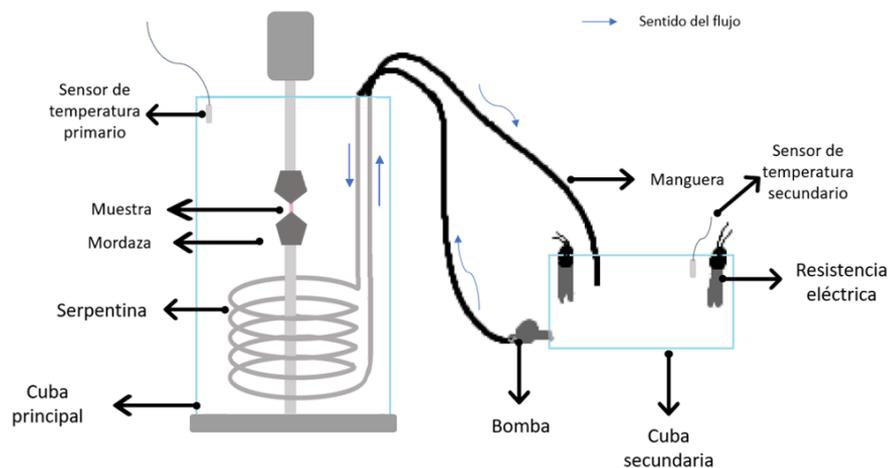
Los ensayos de tejidos suelen realizarse en condiciones externas parecidas a las nativas, tanto en términos de temperatura como de balance electrolítico. Suelen sumergirse las muestras en soluciones adecuadas y a temperaturas controladas. Esto permite resultados repetibles y comparables con otras líneas de investigación.

La solución fisiológica tiene electrolitos, los cuales pueden decantar y obstruir tanto las mangueras de entrada y salida de la bomba como el interior de la serpentina, o adherirse a las resistencias, creando una película aislante. Todos estos factores pueden generar problemas al usuario.

Para evitar estos inconvenientes y simplificar el mantenimiento y limpieza del circuito

de calentamiento se eligió utilizar el concepto de intercambiador de calor indirecto de superficie. Otra razón radica en que dentro de la cuba, donde se realiza el ensayo, podrían haber fragmentos de tejido que se desprendan de la muestra como resultado del ensayo. Si se utilizara un intercambiador de mezcla, estas fracciones de tejido desprendidas podrían comenzar a circular por el sistema de mangueras, o hasta quemarse al estar en contacto con las resistencias eléctricas. Se eligió agua destilada como fluido caliente para proteger y simplificar la limpieza del circuito secundario como indica la Figura 4.12.

#### 4.9.2. Estructura



**Figura 4.12** Diagrama del sistema de calentamiento. La cuba principal, donde se sostiene a la muestra con dos mordazas, contiene solución fisiológica como simulación del medio nativo. La cuba secundaria contiene agua destilada que es calentada por dos resistencias eléctricas. Una bomba hace circular el agua destilada a través de mangueras y una serpentina. La serpentina, sumergida en la solución fisiológica, la calienta paulatinamente, conformando un intercambiador de calor indirecto de superficie. El agua destilada retorna a la cuba secundaria, formando un circuito cerrado. Cada cuba tiene un sensor de temperatura como feedback para el sistema de control que se encarga de alcanzar y matener la temperatura objetivo del ensayo.

El sistema se compone de un recipiente de  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  de base y  $15\text{ cm}$  de altura de acrílico que contiene agua destilada, que llamaremos *cuba secundaria*. Dentro de esta cuba pequeña se colocan dos resistencias eléctricas conectadas en serie de  $1,8\ \Omega$  cada una. Estas resistencias logran una potencia total teórica de  $120\text{ W}$  y  $80\text{ W}$  de potencia real que calientan el agua destilada. Se utiliza agua destilada para evitar incrustaciones o precipitaciones que dañen el circuito.

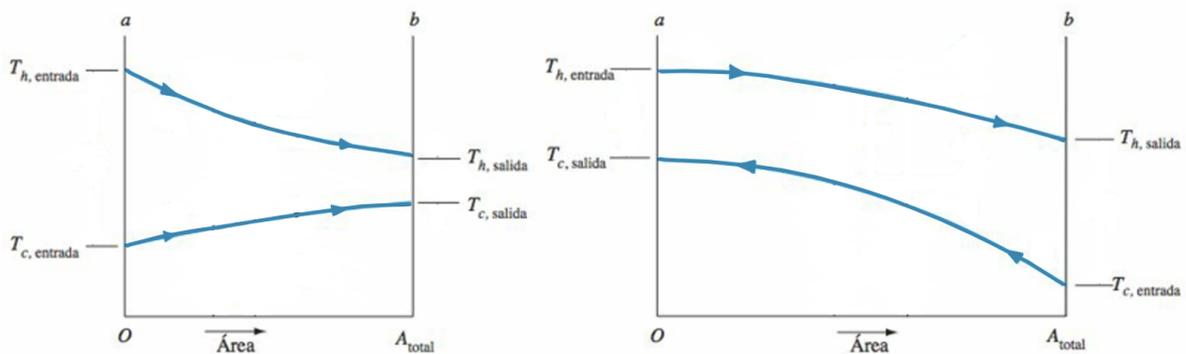
Este recipiente posee un orificio que conduce a una bomba que hace circular el agua que recibe a través de mangueras de goma resistentes a las altas temperaturas.

A continuación de las mangueras, cerrando el circuito, se conecta una serpentina de aluminio de  $3\text{ m}$  de largo y  $7,5\text{ mm}$  de diámetro interno, enrollada con un diámetro de  $12,5\text{ cm}$  y paso de  $0,9\text{ cm}$ , por donde circula el agua destilada y luego vuelve a ser calentada nuevamente a la cuba secundaria. La serpentina se encuentra entonces sumergida en solución fisiológica dentro de una cuba cilíndrica de  $45\text{ cm}$  de alto y  $13\text{ cm}$  de diámetro interior con un espesor de  $3\text{ mm}$ , la *cuba primaria* donde se lleva a cabo el ensayo.

### 4.9.3. Principios y diseño

Se eligió una cuba cilíndrica a modo de minimizar los gradientes de temperatura con respecto a una cuba con estructura prismática. Este diseño de calentamiento de la solución fisiológica a través del agua destilada conforma un intercambiador de calor indirecto de superficie, es decir que dos fluidos intercambian calor a través de la superficie de una pared que los separa. Este sistema nos permite que el calentamiento de la solución fisiológica sea paulatino y uniforme. Por otro lado, la convección natural en ambos fluidos se tuvo en cuenta para determinar la ubicación de la entrada y la salida de la bomba y de la serpentina. En la cuba primaria, la entrada del agua destilada a través de la serpentina se encuentra a mayor altura, mientras que la salida se encuentra por debajo. Por otro lado, la solución fisiológica a calentar se encuentra más fría en el fondo de la cuba que en su

parte superior. Así, las temperaturas de las fuentes caliente y fría configuran un intercambiador de calor con flujo a contracorriente, donde la temperatura máxima de la fuente caliente se enfrenta a la temperatura máxima de la fuente fría, con la consecuente ventaja de lograr que la temperatura de salida de la fuente caliente sea menor [33]. En nuestro caso, esta configuración permitiría bajar la temperatura del agua destilada, manteniendo la temperatura logarítmica media de la solución fisiológica en 37°C, temperatura objetivo de la mayoría de los ensayos. Ver Figura 4.13



**Figura 4.13** Temperaturas en un intercambiador de calor según dirección del flujo. Panel izquierdo: distribución de temperatura en un intercambiador de calor de flujo paralelo. Panel derecho: temperatura en un intercambiador de calor de flujo a contracorriente.  $T_c$ : temperatura de la fuente fría;  $T_h$ : temperatura de la fuente caliente; a, b: extremos del intercambiador de calor. Modificado de [33].

En la cuba secundaria, el agua caliente sale desde el fondo y se devuelve a la cuba desde la superficie ligeramente más fría. Esto garantiza que haya un efecto de mezclado dentro de la cuba secundaria por el flujo a contracorriente del agua recirculada y el agua que permanece en la cuba, fomentando la homogeneidad de la temperatura de la cuba.

#### 4.9.4. Control de temperatura

A nivel electrónica, el sistema se conforma de una fuente switching de 24 V y 10 A. A esta fuente se conectan las resistencias, en serie, que calientan el agua destilada en la cuba secundaria y luego un transistor MOSFET de canal N (de modo que se enciende con un HIGH) que regula la corriente que envía a las mismas, para llegar a la temperatura deseada.

Esto se logra con un sistema de control PID (proporcional, integrative, derivative) como puede verse en la Figura 4.14.

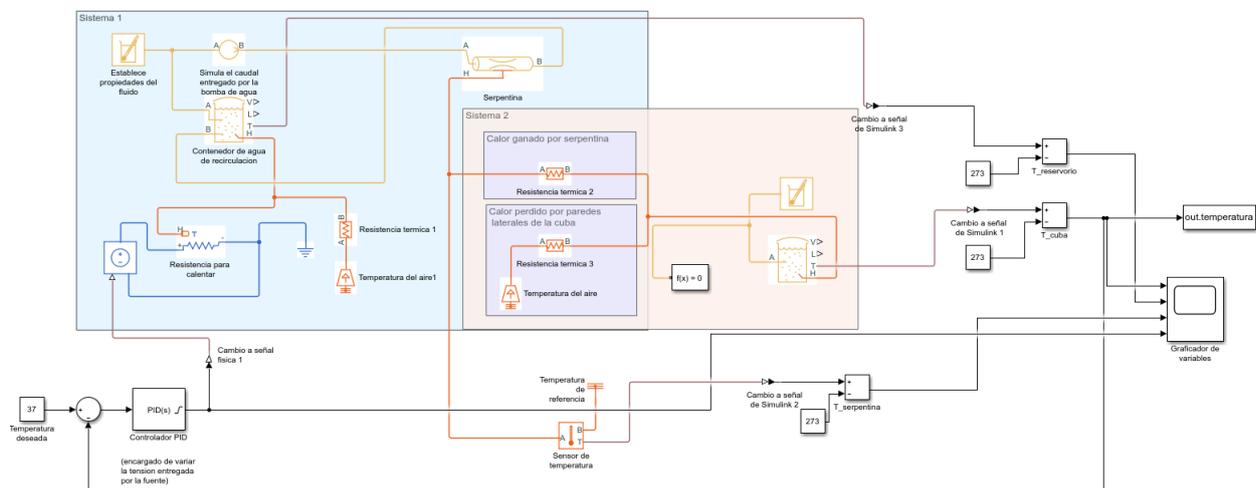


Figura 4.14 Diagrama del sistema de control PID. Versión de mayor resolución en el Apéndice E.

Este diagrama fue desarrollado en la plataforma Simulink de MatLab R2019b para llevar a cabo una simulación del sistema. Esta herramienta provee de bloques que representan eventos físicos, de modo que permite vincular estos bloques para generar sistemas de flujo de calor y cambios de temperatura entre otras. Además, permite la medición de variables en distintos puntos importantes del sistema logrando observar la evolución de las mismas.

En este caso, se utilizó la herramienta para medir cambios de temperatura en distintos

---

lugares de acuerdo con la energía entregada al sistema por medio de dos resistencias. Asimismo, se agregó al sistema un control de tipo PID encargado de controlar la corriente que circula a través de las resistencias y así la temperatura del agua destilada.

Es importante destacar que este diagrama se pretendió usar como referencia para predecir la dinámica del sistema y no ser la predicción exacta debido a la gran cantidad de variables que participan en este evento físico. Además, se intentó obtener una primera aproximación a las constantes necesarias para definir el controlador PID.

El sistema se basó en dos circuitos de fluidos independientes. Se llamó *Sistema 1* al que circula agua destilada por medio de la bomba a través de la serpentina y *Sistema 2* a la cuba primaria con agua fisiológica.

El fluido en el Sistema 1 se calienta debido al calor cedido por las resistencias. Luego, a través de la serpentina, entrega calor por medio de conducción y convección, volviendo a la cuba secundaria a una temperatura menor. Además, una porción de calor se transfiere al ambiente por medio de las paredes de la cuba que lo contiene.

La solución del Sistema 2 recibe el calor cedido por el Sistema 1, en la serpentina, aumentando su temperatura. Por otro lado, también pierde calor al entorno mediante las paredes del recipiente que la contiene.

Para la simulación de todas estas variables se calcularon resistencias térmicas dependientes de la geometría y los materiales de los elementos. Se utilizaron temperaturas de referencia necesarias para la simulación, como por ejemplo la temperatura ambiente. La geometría, las propiedades de los materiales y las temperaturas utilizadas son claros ejemplos de la dificultad de obtener un modelo en el cual se puedan obtener valores cercanos a los del sistema real, debido a que los valores utilizados pueden fácilmente diferir de los reales.

Para el Sistema 1, se eligió una fuente de tensión de  $24\text{ V}$  y  $10\text{ A}$  a modo de generar  $120\text{ W}$  de potencia en cada una de las dos resistencias en serie. El calor entregado por la resistencia es entregado a la masa de fluido contenida en el recipiente pequeño. El fluido

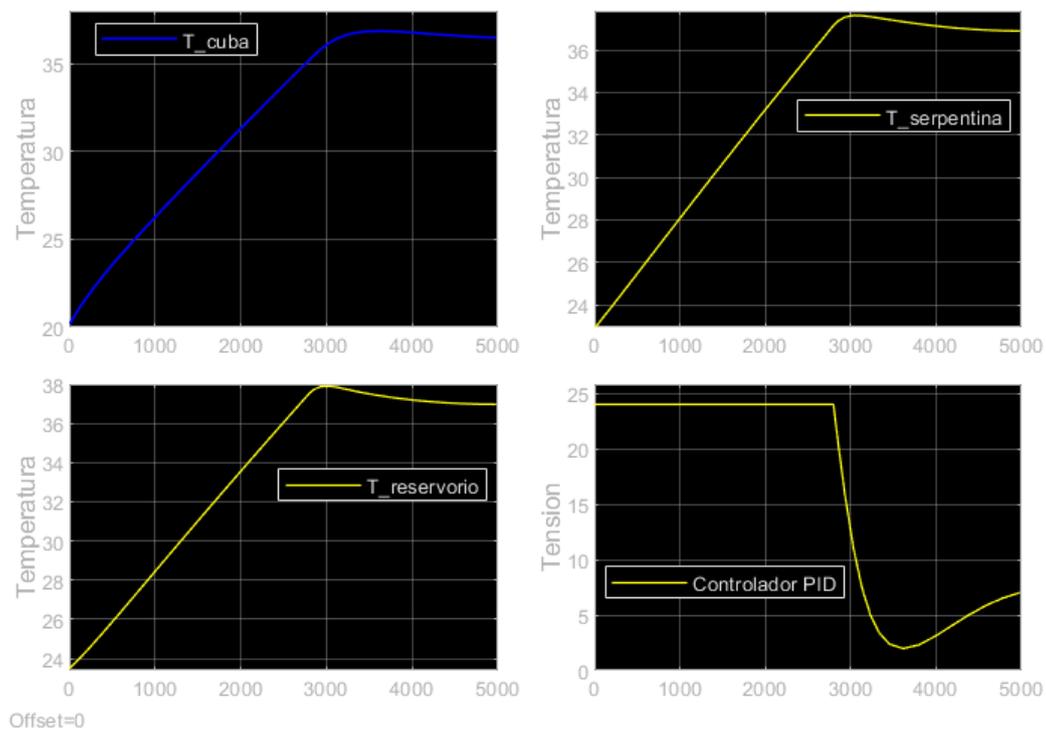
es impulsado por una bomba, donde en el modelo es una fuente de flujo volumétrico ideal, que circula a través de la serpentina para volver nuevamente a la cuba secundaria. Este fluido varía su temperatura de acuerdo al balance entre 3 distintos fenómenos: disipación de calor al ambiente mediante las paredes del contenedor, disipación hacia el otro sistema a través de la serpentina y calor ganado por medio de las resistencias eléctricas. Los fenómenos de transferencia de calor se representan como bloques de *Resistencias térmicas* que modifican el flujo de calor de acuerdo con la diferencia de temperatura entre los distintos nodos del modelo. Las resistencias térmicas, como se mencionó anteriormente, se estimaron según los materiales y geometrías de los distintos elementos involucrados.

El Sistema 2 se desarrolló mediante un recipiente de volumen constante, la cuba principal, y sin recirculación, que cede calor al ambiente a través de sus paredes. Además, toma el calor proveniente de la serpentina del sistema descrito anteriormente. Así, varía su temperatura desde la temperatura ambiente hasta alcanzar el punto de equilibrio buscado (por lo general  $37 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ).

Un sensor de temperatura colocado en la cuba principal y otro sensor colocado en la cuba secundaria realimentan el controlador. De esta manera, el controlador puede variar la tensión en el Sistema 1 para aumentar o disminuir su temperatura e indirectamente ajustar la temperatura del Sistema 2.

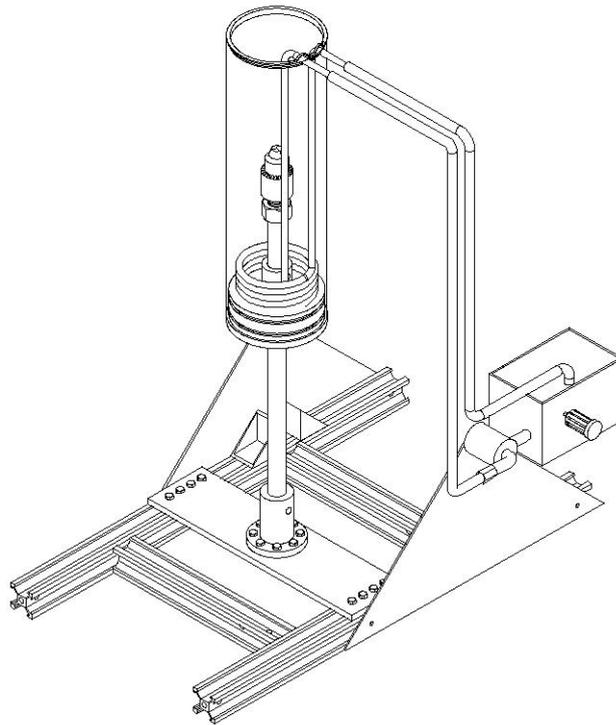
En la Figura 4.15 puede observarse los gráficos de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) o tensión ( $V$ ) resultado de la simulación donde el eje abscisas está en segundos. En el panel superior izquierdo, se tiene la temperatura de la cuba principal que llega a los  $37 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  en aproximadamente 3000 segundos (50 minutos) luego de tener un leve sobrepico. En el panel superior derecho se observa la temperatura de la serpentina con un sobrepico más pronunciado que en la cuba principal que luego disminuye hasta estabilizarse. En el panel inferior izquierdo, se grafica la temperatura de la cuba secundaria que posee un sobrepico más pronunciado que en la cuba principal y por último, en el panel inferior derecho se observa la tensión ( $V$ ) en función del tiempo ( $s$ ) del controlador PID que se le envía a

las resistencias para controlar la temperatura. En esta experiencia no se tuvo en cuenta el transistor que se agregó más adelante para simplificar la simulación.



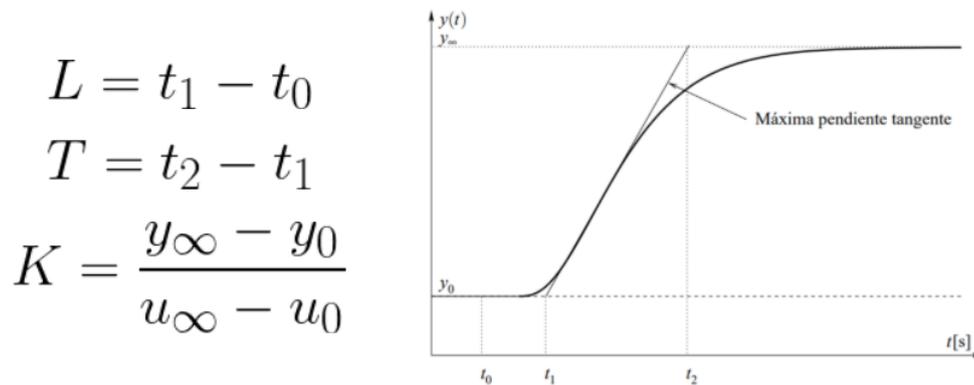
**Figura 4.15** Gráficos de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) o Tensión ( $\text{V}$ ) resultado de la simulación donde el eje abscisas está en segundos. Panel superior izquierdo: temperatura de la cuba principal, se llega a los  $37^{\circ}\text{C}$  en aproximadamente 3.000 segundos (50 minutos) luego de tener un leve sobrepico. Panel superior derecho: Temperatura de la serpentina con sobrepico más pronunciado que en la cuba principal. Panel inferior izquierdo: temperatura de la cuba secundaria con sobrepico más pronunciado que en la cuba principal. Panel inferior derecho: Tensión ( $\text{V}$ ) en función del tiempo ( $s$ ) del controlador PID.

La Figura 4.16 muestra el diseño del sistema de calentamiento realizado en Catia de la disposición final del sistema.



**Figura 4.16** Diseño del sistema de calentamiento en 3D.

Una vez diseñado el sistema de control y simulado en Matlab, se armó un prototipo y se llevaron a cabo pruebas para analizar el comportamiento de la temperatura y la relación con los componentes que conforman el sistema. De este análisis, se extrapolaron las constantes para el PID, según el gráfico de la Figura 4.17:



**Figura 4.17** Gráfico para obtener las constantes  $L$ ,  $T$  y  $K$  que caracterizan al sistema para luego hallar las constantes para el PID en función del comportamiento del sistema, al aplicarle un pulso constante de excitación, es decir, al encender el sistema hasta que se estabilice en el valor deseado.[34]

	$K_p$	$K_i$	$K_d$
$P$	$\frac{T}{KL}$	0	0
$PI$	$0.9\frac{T}{KL}$	$\frac{3.33}{L}$	0
$PID$	$1.2\frac{T}{KL}$	$2L$	$0.5L$

**Figura 4.18** Tabla de conversión de constantes para hallar  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$  y conformar la ecuación característica del sistema de control PID. Las primeras 2 filas indican las constantes para el caso en el que el sistema tenga solo una componente proporcional o tenga una componente proporcional y una integrativa.[34]

Siguiendo la Figura 4.17 se encendió el sistema y se registró la temperatura de la cuba principal durante todo el proceso, desde el inicio a temperatura ambiente hasta que se

---

estabilizara. A continuación, se calcularon las constantes que se encuentran a la izquierda del gráfico 4.17 L, T y K y luego se obtuvieron las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , con la tabla de la Figura 4.18 ya que se buscó realizar un sistema de control bien preciso, que requeriría del valor proporcional, integrativo y derivativo. En caso de querer hacer sistemas menos precisos, por la utilidad que se le da, se puede usar solo la constante  $K_p$ , proporcional o esta más la constante  $K_i$ , por integrativo. Luego, se colocaron estas constantes en el código fuente para ensayar toda la experiencia de usuario.

Las constantes resultaron ser en función de la teoría  $K_p = 211$ ,  $K_i = 0.1$  y  $K_d = 0.0252$ . Estas constantes se ajustaron empíricamente por el método de Ziegler-Nichols. Este método permite regular el sistema sin saber las ecuaciones que caracterizan a la planta (al conjunto de componentes que forman el dispositivo) de lazo abierto, es decir, sin realimentación.[35]

#### **4.9.5. Diagrama de conexiones del hardware**

La Figura 4.19 muestra un esquema de los componentes electrónicos del sistemas con sus especificaciones técnicas.



traduce la señal sensada por la celda y la amplifica para comunicársela al sistema de control.

Como parte del sistema de calentamiento, se tiene un Mosfet canal N IRF540 de 10.5 A con un disipador de calor To-220 conectado a 2 resistencias en serie de 12 V a continuación, una fuente switching de 24 V que entrega 10 A al sistema. Esta fuente esta conectada asimismo a la llave termomagnética. El Mosfet regula la corriente que circula por las resistencias para mantener la temperatura constante.

Para el sistema de circulación de solución, se emplea una bomba de agua magnética de 12 V con un caudal de  $9 \frac{L}{min}$  conectada a una fuente de alimentación tipo switching de 12 V y 2 A. Es importante destacar que se buscó una bomba con un buen caudal para reducir los retardo en el sistema de control de temperatura.

La máquina de ensayos tiene partes móviles; en caso de situaciones que signifiquen un peligro o daño para los usuarios o para el equipo, se incluyó sistema de frenado de emergencia con un pulsador de emergencia que, al ser presionado, frena el movimiento del motor de inmediato cortando la alimentación de toda la máquina.

El diagrama también muestra pulsadores para el movimiento manual del motor, que se utilizan para mover la mordaza superior hacia arriba y hacia abajo y para frenar el motor. Este sistema permite una experiencia de usuario más cómoda, que la pantalla de la interfaz, aunque de todos modos todo se puede controlar por allí también.

Por último, se tienen sensores de temperatura que se colocan en las cubas principal y secundaria para tener un control continuo y preciso de la temperatura de las ambos fluidos.

A continuación puede verse en el Cuadro 4.4 las conexiones entre Arduino y cada sensor.

<b>Arduino</b>	<b>Stepper Motor Driver</b>	<b>Arduino</b>	<b>Módulo Relé</b>
GND	PUL-	GND	GND
GND	DIR-	41	IN1
5V	ENA+	5V	VCC
6	DIR+	<b>Arduino</b>	<b>Sensores de Temp.</b>
7	PUL+	GND	GND
<b>Arduino</b>	<b>Módulo HX711</b>	9	DQ
GND	GND	5V	VCC
A1	DT	<b>Arduino</b>	<b>MOSFET IRF540</b>
A0	SCK	11	G
5V	VCC	GND	S
<b>Arduino</b>	<b>Pulsador Amarillo</b>	<b>Arduino</b>	<b>Display LCD</b>
3	1	GND	GND
GND	2	20	SDA
<b>Arduino</b>	<b>Pulsador Verde</b>	21	SCL
4	1	5V	VCC
GND	2	<b>Stepper Motor</b>	<b>Stepper Motor Driver</b>
<b>Arduino</b>	<b>Pulsador Negro</b>	A	A+
5	1	$\bar{A}$	A-
GND	2	B	B+
		$\bar{B}$	B-

Cuadro 4.4 Conexiones eléctricas

Para tener una mejor comprensión de las conexiones y que se pueda reproducir, se diagramaron las conexiones entre los componentes y los cables hacia Arduino. Los 2 sensores de temperatura se colocaron en serie utilizando una resistencia de  $4,7\text{ K}\Omega$  ya que los mismos utilizan un sistema de envío de datos llamado 1-Wire Bus. Es decir, se envía un bus de datos hacia Arduino con las mediciones de cada uno en 'fila'. A pesar de que el pin de entrada de Arduino (Pin 9) sea digital (PWM) la señal enviada es de tipo analógica (Figura 4.20). En el caso de este proyecto, se utilizaron los sensores DS18B20 sumergibles, es decir, se utiliza el transistor DS18B20 que se encuentra recubierto y con cables de 60cm de colores negro, amarillo y rojo para denotar el cable a tierra (GND), cable de datos (DQ) y cable de alimentación (5V), respectivamente como puede verse en la tabla 4.4.

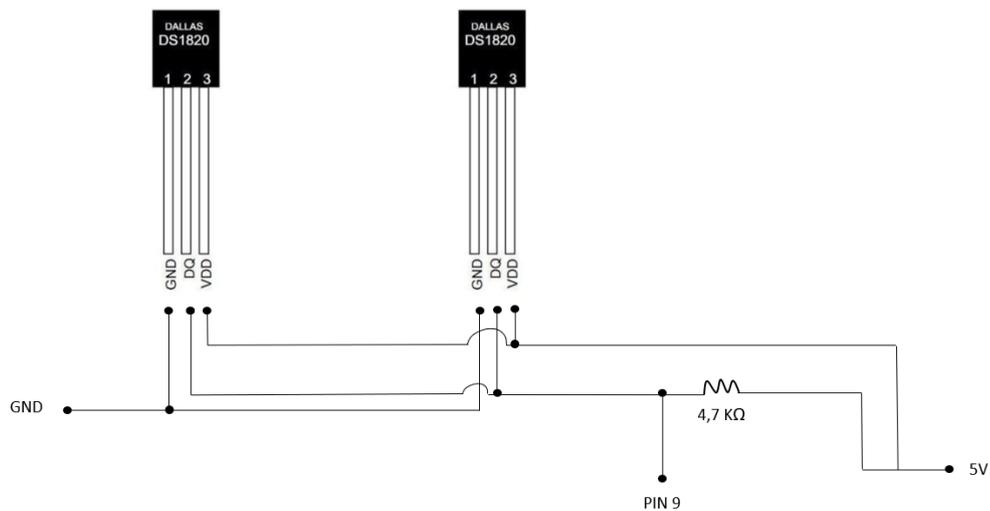
Para la lectura de las mediciones de la celda de carga, se incorporó un módulo HX711 para adaptar la señal recibida por la celda de carga CZ de Flexar hacia Arduino (Figura 4.21). Este módulo viene programado para simplificar la programación del usuario y sólo tener que calibrar la celda una vez. En la tabla 4.4 pueden verse los pines utilizados en Arduino para conectar al módulo.

Para el caso del sistema de calentamiento, se utilizó un regulador de corriente, un MOSFET IRF540. El Mosfet es un tipo de transistor y se conecta el Pin de Drain a las resistencias resistencias térmicas de  $1,8\ \Omega$ , el Pin de Gate al Pin 11 de Arduino y el Source tanto a la tierra de Arduino como a la tierra de la fuente de alimentación (Figura 4.22). Esto último es sumamente importante ya que de lo contrario no funcionará como corresponde.

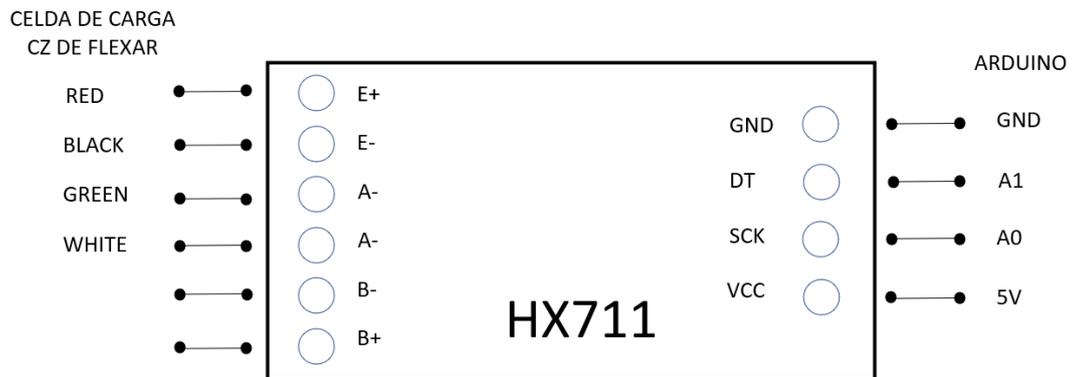
Para el caso del motor, las conexiones entre el motor y el driver pueden verse en la tabla 4.4. Para las conexiones entre Arduino y el Motor Stepper Driver DQ542MA se deben conectar las entradas DIR+ y PUL+ a los pines de Arduino 6 y 7, respectivamente. DIR- y PUL- se conectan a la tierra de Arduino (GND) y ENA+ a 5V de Arduino. Aquí, también, es importante remarcar que la entrada ENA- no debe conectarse a nada de acuerdo a las funciones programadas (Figura 4.23).

Por último, en la Figura 4.24 se dibujó un boceto general de las conexiones de los pul-

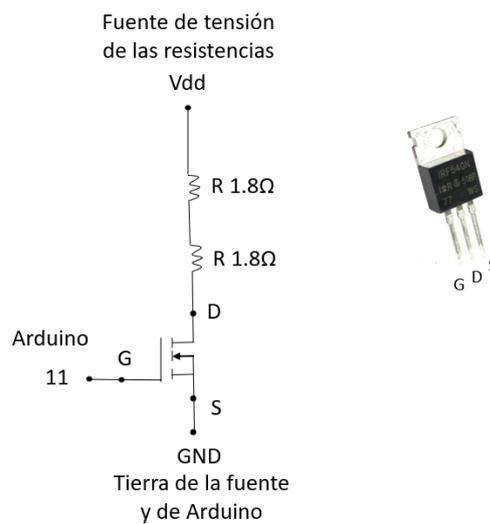
sadores. Es necesario para esta conexión colocar una resistencia PULL UP de  $10\text{ k}\Omega$  entre el pulsador y la fuente de alimentación de  $5\text{ V}$ . Se le colocó al cable que va hacia Arduino un 1 como referencia. Este cable debe conectarse a Arduino en el Pin correspondiente, para el pulsador amarillo el Pin 3, para el pulsador verde el Pin 4 y para el negro el Pin 5. Esto también puede verse en la tabla 4.4.



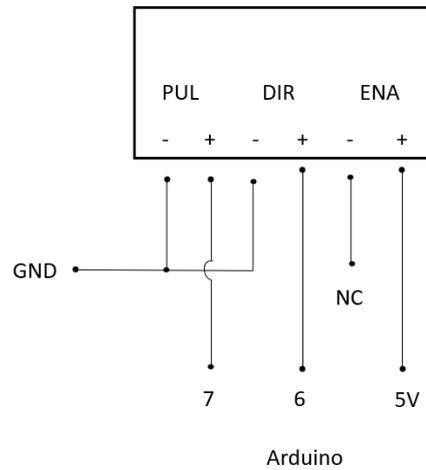
**Figura 4.20** Diagrama de conexiones de los sensores de temperatura sumergibles DS18B20.



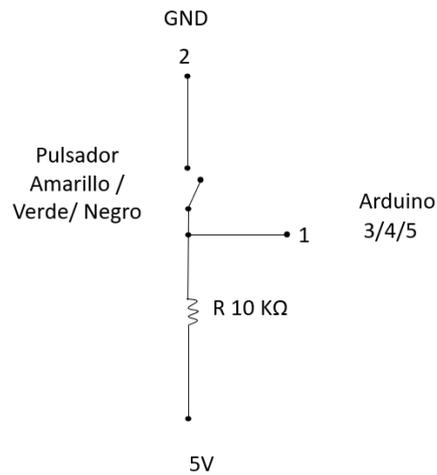
**Figura 4.21** Diagrama de conexiones del módulo HX711 de la celda de carga hacia la celda de carga y hacia Arduino.



**Figura 4.22** Diagrama de conexiones del MOSFET IRF540 donde G: Gate, D: Drain y S: Source.



**Figura 4.23** Diagrama de conexiones del Stepper Motor Driver DQ542MA donde NC denota que ese Pin debe quedar sin conectar.



**Figura 4.24** Diagrama de conexiones de los 3 pulsadores donde 1 se conecta al pin correspondiente a Arduino para la función programada, el pulsador amarillo se encuentra conectado al Pin 3, el verde al Pin 4 y el negro al Pin 5.

#### 4.9.6. Software del dispositivo

El software del equipo desarrollado en la plataforma de programación de Arduino incluye fragmentos de códigos estándar desarrollados por usuarios de la plataforma y publicados para el uso del público, que se agregaron al código fuente desarrollado específicamente para este equipo.

Como puede verse en el Apéndice H en el inicio del código se establecen todos los pines del Arduino a utilizar con su correspondiente nombre y se inicializan las variables y funciones a utilizar.

El código se diseñó para actuar según la información que le envía la interfaz gráfica en función del accionar del usuario. De este modo, en el *loop* (el esqueleto del código) se analiza la información recibida desde la interfaz y se 'matchea' con una función correspondiente al pedido de acción. Estas pueden variar entre:

- Encender el sistema de calentamiento
- Setear la celda de carga en 0 (cero)
- Establecer a la máquina en su estado base (estado de reposo donde el cabezal se encuentra en su punto máximo)
- Mover el cabezal hacia arriba
- Mover el cabezal hacia abajo
- Parar el ensayo, dejar de mover el motor
- Realizar el ensayo de tracción
- Realizar el ensayo de carga y descarga (tracción + distracción)
- Realizar el ensayo de creep
- Realizar el ensayo de relajación de tensiones

Todas estas funciones son asistidas mediante banderas (*flags*) que permiten tener un conocimiento de lo que está realizando el dispositivo en ese momento, para tomar las precauciones y establecer los límites necesarios.

Por otro lado, para poder tener un manejo correcto del motor, es decir, para poder enviarle pulsos equidistantes y de la misma duración para su movimiento, se implementaron interrupciones en el código. Estas interrupciones se setean en el inicio del código (*setup*) y son de  $6 \mu s$ . De este modo, cada  $6 \mu s$  el código del loop se interrumpe y se lee el código establecido en la interrupción.

El código de la interrupción determina la dirección y velocidad de giro del motor en caso de estar realizando un ensayo, en caso de necesitar mover el motor levemente hacia arriba o hacia abajo para poder colocar la muestra y en el caso de haber terminado el ensayo, donde el dispositivo vuelve a su estado base.

Como se comentó en la sección 4.1, los motores paso a paso se manejan con pulsos. Es así entonces que el usuario ingresa la velocidad de ensayo a la interfaz y esta la transforma a frecuencia mediante la ecuación:

$$PulseSpeed[Hz] = \frac{v[\frac{mm}{min}] \cdot 360^\circ}{stepangle[^\circ/step] \cdot 60 \cdot 5mm} \quad (4.20)$$

Donde la velocidad, medida en  $\frac{mm}{min}$  es la velocidad de movimiento lineal de la mordaza superior y step angle es  $0.0144^\circ/step$  según los microsteps que se eligieron para este dispositivo, 25.000 micropasos por revolución. Se divide además por  $5 mm$  ya que este es el paso del tornillo sin fin. Una revolución del motor PAP corresponde a un movimiento lineal de  $5 mm$  del tornillo.

Por lo tanto, la ecuación queda para este caso de la siguiente manera.

$$PulseSpeed[Hz] = \frac{v[\frac{mm}{min}] \cdot 360^\circ}{0,0144^\circ \cdot 60 \cdot 5mm} \quad (4.21)$$

Una vez convertida en frecuencia, se le transmite la información a Arduino y este calcu-

la cuántas interrupciones debe dejar pasar para mover el motor en el momento indicado.

Como las velocidades requeridas para el dispositivo se encontraban entre  $0,05 \frac{mm}{min}$  y  $1000 \frac{mm}{min}$  esto equivale a frecuencias de entre  $4,1 Hz$  y  $83333 Hz$  según la ecuación anterior.

Para terminar de procesar la información de la velocidad, es necesario convertir la frecuencia en período, para poder comparar ese tiempo con la interrupción empleada. Es decir, se necesita saber cuántas interrupciones equivalen a un pulso (estos se cuentan mediante contadores). Por lo tanto, se calcula la inversa de la frecuencia, el período. Estos valores varían entre  $0,012ms$  y  $234,9ms$ . El valor limitante en este caso es el menor,  $0,012ms$  que equivalen a  $12\mu s$ . Como un paso de motor se conforma de un pulso *HIGH* y un pulso *LOW* de igual duración, como puede verse en la Figura 4.25, cada uno de ellos debe durar  $6\mu s$ . Por ende, en la velocidad más rápida, en cada interrupción debe cambiar el comando *LOW* a *HIGH* o viceversa.



**Figura 4.25** Pulsos equidistantes y equidurables para el movimiento del motor donde al punto mas alto se le llama 'HIGH' y al punto mas bajo 'LOW'. Cada par pulsos HIGH y LOW que se le envía al motor se realizan desde la interrupción del código de Arduino [36]

Es importante mencionar que la duración de la interrupción no puede ser mayor que el período de interrupciones ( $6\mu s$ ). Es decir, la interrupción no puede durar mas de  $6\mu s$  ya que a los  $6\mu s$  el código leerá nuevamente la interrupción y por un lado, nunca puede terminar de leer la interrupción completa y por el otro, no tiene tiempo para leer el código que se encuentra en el loop, donde se determinan otras funciones como el sensado de la temperatura, la recepción de datos de la interfaz gráfica, etc.

Por lo tanto, funciones que tengan un período de ejecución muy largo como es el caso de la función *Serial.Write(#)*, donde Arduino le transmite datos a la interfaz para graficar-

---

los y demora aproximadamente  $10\mu s$ , deben realizarse fuera de la interrupción.

Otras funciones que se encuentran en el loop, es decir fuera de la interrupción ya que no deben realizarse con mucha frecuencia pero sí cada tanto, son:

- Control de ruptura de muestra: el software se encarga de frenar el ensayo y parar el motor en caso de que se haya llegado al punto de ruptura la muestra mediante un sistema de control de tensión.
- Función adicional para el ensayo de tracción: en caso de ingresar el desplazamiento máximo el ensayo finaliza al llegar a esta deformación.
- Función adicional para el ensayo de tracción y distracción (carga y descarga): en caso de ingresar la cantidad de ciclos, el software se encarga de finalizar el ensayo al alcanzar este valor.
- Función para transmisión de datos a Matlab.

Para la comunicación entre Arduino y la interfaz gráfica se utilizó el puerto serie mediante el puerto USB de la computadora. Este tipo de comunicación tiene la ventaja de que toda computadora posee un puerto serie para que utilice el usuario y la desventaja de no regirse por un clock. Es decir, no tiene su propio sincronizador de datos. Una analogía de este concepto es cuando se inicia una conversación con otra persona: si la otra persona está distraída o no está esperando a que se le hable, si el comunicador comienza a hablar con un mensaje importante, es posible que el destinatario no entienda las primeras palabras y le pida al comunicador que las repita. Lo mismo sucede con la comunicación serie entre Arduino y Matlab. Por lo tanto, para utilizarlo, es recomendable instalar varios mecanismos de seguridad y prevención de errores en la programación del código fuente.

Un mecanismo de seguridad y prevención de errores es la sincronización enviando desde Matlab varios datos para descartar antes de enviar la información que realmente se quiere comunicar. Esto permite que si Arduino está realizando otra función, sin estar

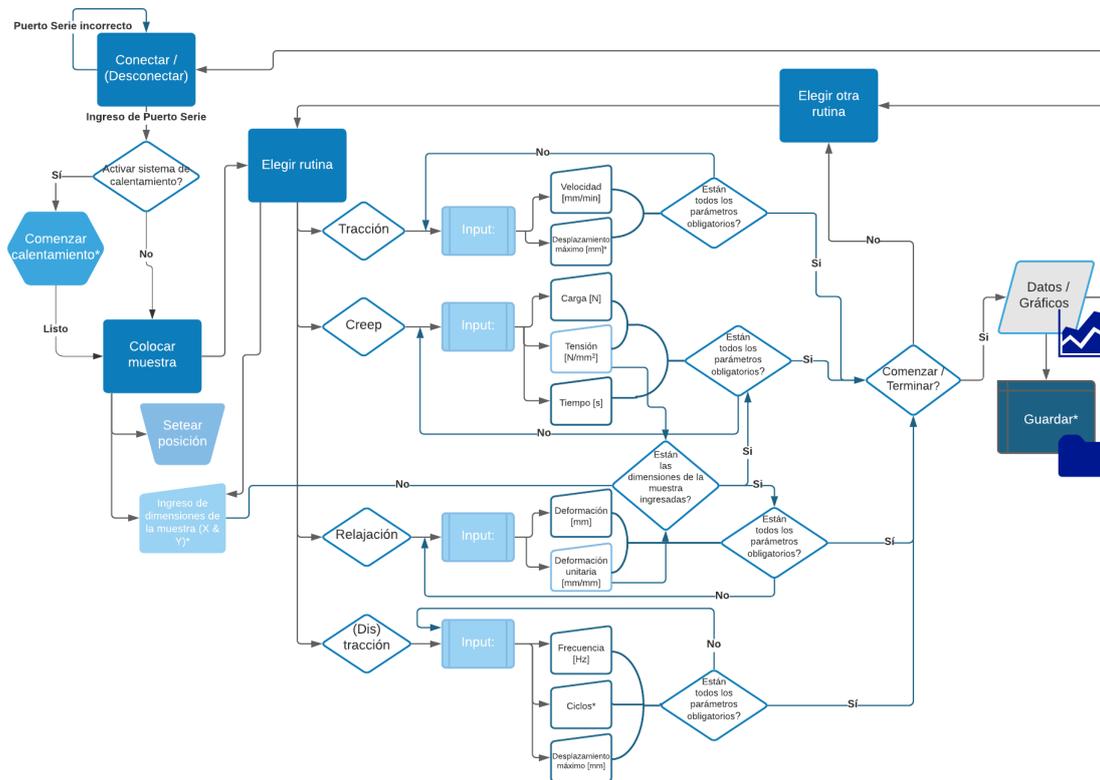
preparado para recibir datos, los primeros valores se pierden hasta que recibe un dato que sabe que es importante. Para el desarrollo de este software se utilizó el envío de múltiples '1' hasta que luego se envía un '255', señal de que la siguiente información es valiosa. Esto permitió no perder ningún dato en la transmisión Matlab - Arduino.

Para la transmisión Arduino - Matlab, se estableció otro mecanismo de seguridad. Este consiste en enviar cada paquete de datos (tensión y deformación, dato de tipo *long* de 4 bytes) con un valor de comienzo y un valor de final, separados en 4 bytes también para simplificar la lectura de esta información. Esto permite que al recibirse la información en Matlab, si no se reciben los bytes de inicio y fin, ese paquete se descarta y se procede a utilizar el siguiente paquete de información.

Con respecto a la velocidad de transmisión de datos entre Arduino y Matlab (*Baud Rate*), se estableció en  $115200 \frac{\text{bits}}{\text{s}}$ . Este valor representa la cantidad de bits que son transmitidos en una dirección y en otra por unidad de tiempo. Este es un valor estándar y considerando que se envía información de Arduino a Matlab cada 15 ms (período de muestreo equivalente a una frecuencia de  $66,66 \text{ Hz}$ ) y en cada transmisión se envían 16 bytes: 4 bytes para el valor de control de inicio, 4 bytes que conforman la deformación de la muestra, 4 bytes que conforman la tensión de la muestra y 4 bytes para el valor de control de fin.

#### 4.9.7. Interfaz gráfica de usuario

El código de la interfaz gráfica diseñada para el usuario puede verse resumida en la Figura 4.26 a través de un diagrama de flujo. A su vez, el código puede encontrarse en el Apéndice G.



**Figura 4.26** Diagrama de flujo de la interfaz gráfica de usuario del equipo. Los cuadros marcados con un asterisco (\*) no son obligatorios. Los cuadros celestes en el paso de input reflejan las dos opciones disponibles de parámetros a utilizar para el ensayo. En el Apéndice F puede verse una versión ampliada.

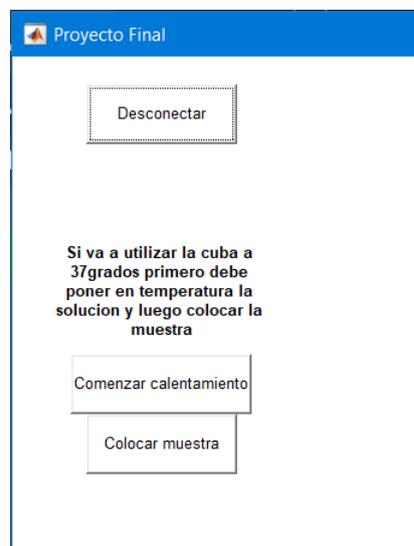
La interfaz comienza con un botón que conecta el Arduino a la computadora que el usuario desea conectar a la máquina. Al clicar sobre ese botón, se despliega un cartel que pide ingresar el puerto USB al que esta conectado el Arduino en el ordenador como puede verse en la Figura 4.27. Esta información se puede obtener desde la configuración y luego dispositivos USB de cada computadora. En caso de que haya un error en la conexión, porque la información del puerto sea incorrecta, se le hará saber al usuario y tendrá la posibilidad de introducir la información nuevamente.



**Figura 4.27** Pantalla emergente para conectar Arduino a la Interfaz Gráfica.

Una vez conectado el Arduino, debe establecerse si se utilizará el sistema de calentamiento, en el caso de que el ensayo requiera condiciones de temperatura y medio controladas, o no.

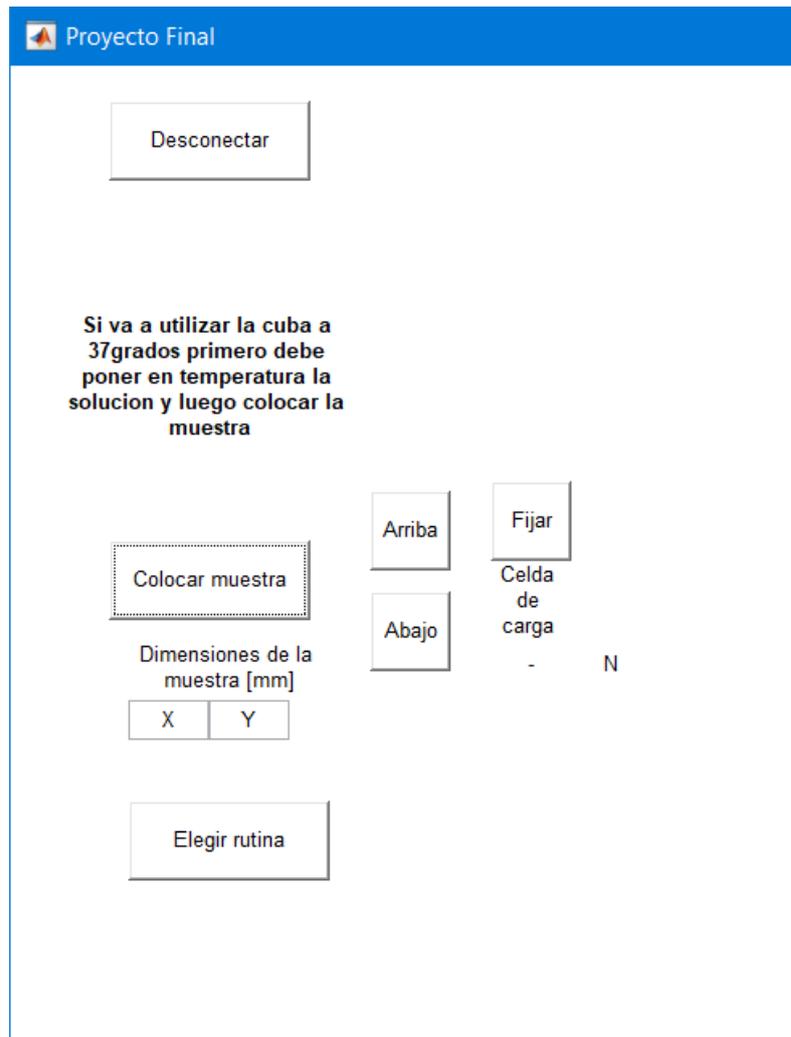
En caso de seleccionar 'Comenzar calentamiento', el sistema comenzará a calentar la cuba con la solución que se le haya colocado y permitirá seguir con la colocación de la muestra una vez que ya esté a temperatura fisiológica. Esto puede verse en la Figura 4.28



**Figura 4.28** Pantalla de opciones para comenzar con la experiencia de la Interfaz Gráfica.

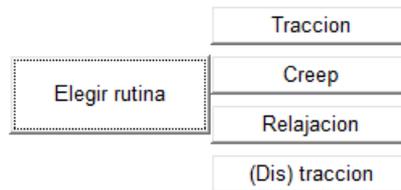
Para colocar la muestra, se podrá utilizar las flechas de arriba o abajo para poder mover

la mordaza superior o bien utilizar los botones en el panel de control manual del equipo como se muestra en la Figura 4.29. Una vez colocada la muestra, se debe clicar en 'Fijar' para poder establecer el cero del ensayo. Además, se pueden ingresar las dimensiones de la muestra, para aquellos ensayos en los que sea conveniente ver los resultados normalizados.



**Figura 4.29** Pantalla de la interfaz gráfica donde se colocan las dimensiones de la muestra a ensayar, se mueven las mordazas hacia arriba y abajo para colocar la muestra y se fija la precarga, es decir, se deja la celda de carga en cero.

Una vez listo el proceso de colocación de muestra y datos, se procede a elegir la rutina de ensayo. Figura 4.30



**Figura 4.30** Pantalla de la interfaz gráfica donde se elige la rutina a ensayar.

Empezando por tracción, se debe ingresar la velocidad en  $\frac{mm}{min}$  al que se debe ensayar la muestra. También puede ingresarse un desplazamiento máximo en  $mm$  al que se quisiera no superar. Esto puede observarse en la Figura 4.31. Si están todos los datos necesarios se puede comenzar el ensayo. En el caso en que falte algún dato necesario, emerge un *pop-up* y se bloquea el botón Comenzar, llevando al usuario a la pantalla de Input nuevamente.

---

Elegir otra rutina

**Traccion**

<b>Velocidad</b>	<b>Maximo desplazamiento</b>
<input type="text" value="--"/>	<input type="text" value="--"/>
[mm/min]	[mm]
	opcional

Comenzar

**Figura 4.31** Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros para el ensayo de tracción.

Para ensayos de Creep, los parámetros necesarios son la Carga en  $N$  o la tensión en  $MPa$ . Figura 4.32 En caso de utilizarse la tensión como parámetro, se corroborará que las dimensiones de la muestra hayan sido colocadas. De no haberlo hecho, se llevará a la pantalla para que el usuario pueda ingresar los datos.

The figure displays two side-by-side screenshots of a software interface for creep testing. Both screens feature a button at the top labeled 'Elegir otra rutina' (Choose another routine) and a large title 'Creep'.  
 Screenshot (a) shows the 'Carga' (Load) option selected with a checked checkbox, and the 'Tension' option unselected. Below the 'Carga' label is a dashed box containing two dashes '--', and below that is the unit label '[N]'.  
 Screenshot (b) shows the 'Tension' option selected with a checked checkbox, and the 'Carga' option unselected. Below the 'Tension' label is a dashed box containing two dashes '--', and below that is the unit label '[MPa]'.  
 Both screens have a blue 'Comenzar' (Start) button at the bottom center.

(a) Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros de carga para el ensayo de creep, donde no se necesitan las dimensiones iniciales de la muestra.

(b) Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros de tensión para el ensayo de creep, donde se necesitan las dimensiones iniciales de la muestra.

**Figura 4.32** Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros para el ensayo de creep.

Otra opción de rutina es el ensayo de relajación de tensiones. Para este ensayo se debe ingresar como input la deformación en  $mm$  o la deformación unitaria en  $\frac{mm}{mm}$ , Figura 4.33. En caso de elegir la segunda, la interfaz chequeará que se hayan ingresado las dimensiones de la muestra o en caso contrario, mostrará el panel de ingreso de información necesaria.

The figure shows two screenshots of a software interface for stress relaxation tests. Both screens have a title bar 'Elegir otra rutina' and a main title 'Relajacion'.  
Screenshot (a) shows the 'Desplazamiento' option selected with a checked checkbox, and the 'Deformacion unitaria' option unselected. Below the options is a text input field containing '--' and the unit label '[mm]'. A 'Comenzar' button is at the bottom.  
Screenshot (b) shows the 'Desplazamiento' option unselected and the 'Deformacion unitaria' option selected with a checked checkbox. Below the options is a text input field containing '--' and the unit label '[mm/mm]'. A 'Comenzar' button is at the bottom.

(a) Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros de desplazamiento para el ensayo de relajación de tensiones, donde no se necesitan las dimensiones iniciales de la muestra.

(b) Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros de deformación unitaria para el ensayo de relajación de tensiones, donde se necesitan las dimensiones iniciales de la muestra.

**Figura 4.33** Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros para el ensayo de relajación de tensiones.

Por último, el ensayo de tracción - distracción. Para este ensayo se debe ingresar como input la frecuencia a la que se quiere realizar la carga y descarga en  $Hz$  y el desplazamiento máximo al que se quiere alcanzar. Como puede verse en la figura 4.34 en valor ciclos es opcional. Este hace referencia a la cantidad de ciclos que se quiere alcanzar y luego se para el ensayo.

Elegir otra rutina

**Traccion - Distraccion**

Frecuencia	Ciclos	Maximo desplazamiento
--	--	--
[Hz]	opcional	[mm]

Comenzar

**Figura 4.34** Pantalla de la interfaz gráfica donde se ingresan los parámetros para el ensayo de tracción - distracción.

Es importante notar que en todo momento aparecerá el botón de 'Elegir otra rutina' en caso de querer hacerlo, como se vieron en las imágenes anteriores.

Una vez ingresados todos los parámetros necesarios para ensayar y cuando corresponda las dimensiones de la muestra, se podrá dar en 'Comenzar' para iniciar el ensayo deseado y se comenzará a graficar los valores obtenidos en pantalla. En cualquier momento del ensayo se podrá dar en 'Parar' para finalizar el ensayo y guardar los valores obtenidos.

Al finalizar con el uso de la máquina, se deberá desconectar el Arduino desde la consola para terminar la conexión de la computadora del usuario y el equipo.

## 4.10. Análisis de piezas críticas

A lo largo del diseño de la máquina de ensayos se realizaron diferentes análisis tensionales en las piezas que se consideraron más comprometidas o en aquellas en las que se pudiera realizar un diseño optimizando los recursos y el tiempo de mecanizado. El objetivo

de estos trabajos fue analizar las deflexiones y tensiones a las que se someten las piezas analizadas y obtener un orden de magnitud de las mismas.

Las hipótesis que se tuvieron en cuenta para realizar estos análisis fueron las siguientes:

- Problema 3D
- Formulación de pequeños desplazamientos y pequeñas deformaciones
- Material isótropo, lineal y homogéneo
- Acero 1045 y Aluminio 2024
- Factor de seguridad 1.5
- Se establece una fuerza en el eje del ensayo de 500 N.
- El apoyo definido es un apoyo fijo en los agujeros donde va abulonada la pieza.

Propiedades del acero utilizado:

- $E = 200 \text{ GPa}$
- Módulo de Poisson = 0,25
- $G = 80 \text{ GPa}$
- Densidad =  $7829 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Tensión admisible =  $350 \text{ MPa}$  [37]

Propiedades del aluminio utilizado:

- $E = 73,119 \text{ GPa}$
- Módulo de Poisson = 0,33
- $G = 27,5 \text{ GPa}$ .
- Densidad =  $2794 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Tensión admisible =  $300 \text{ MPa}$  [37]

En el caso de la placa en lugar de considerarse un problema 3D, dadas las dimensiones y el espesor de la misma, se decidió utilizar elementos cáscara.

Respecto al mallado se estableció una cota de error del 3 % para todos los casos. Además, se aseguró la convergencia de las mallas al realizar los análisis con mallas sucesivamente más finas hasta lograr llegar a la cota de error mencionada. De este modo, se observaron los sucesivos resultados verificando una convergencia al resultado final obtenido.

#### **4.10.1. Unión Placa-Celda de carga**

Como se mencionó anteriormente el objetivo de este trabajo fue obtener un orden de magnitud de las deflexiones y tensiones a las que se somete la pieza diseñada para unir la placa con la celda de carga. Es decir, se trata de una pieza crítica en la máquina dado que es la que representa la unión entre los ejes principales de la misma, el eje donde se lleva a cabo el ensayo y el que suministra la fuerza y el desplazamiento para el mismo.

Por este motivo, la misma requiere ser rígida y que las deflexiones máximas generadas por las fuerzas máximas del ensayo sean lo menores posible y así no comprometer la precisión de la máquina debido a una deformación por parte de la pieza en cuestión.

#### **Desarrollo**

Para realizar el análisis por elementos finitos del conjunto de piezas se hace uso del programa de simulación ANSYS con las hipótesis previamente mencionadas.

En el primer caso se establece una estructura cuadrada de 30 mm por lado que será manufacturada a partir de un cuadrado de 80x70 *mm* de acero 1045 mediante una fresa.

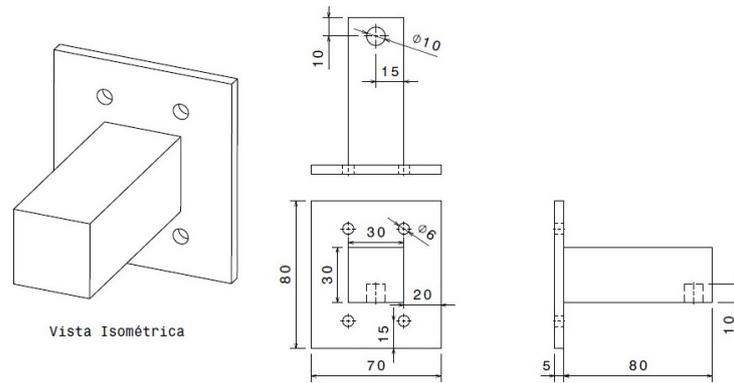
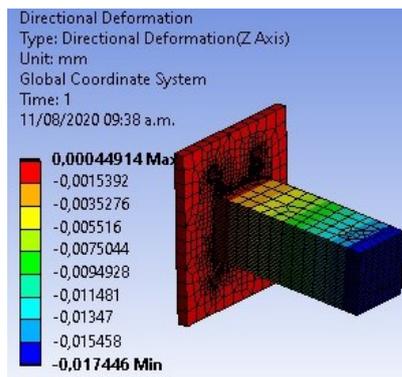
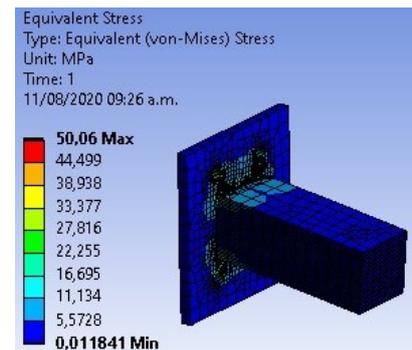


Figura 4.35 Primer diseño de análisis de rigidez a analizar.

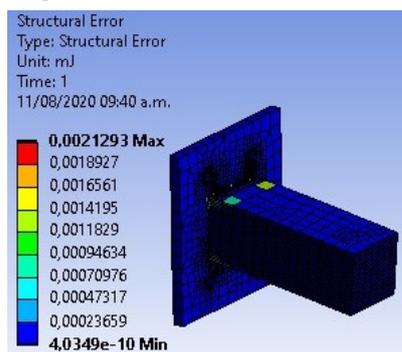
A partir de dicha estructura y tomando en cuenta la fuerza vertical producida por el ensayo se obtienen los siguientes resultados:



(a) Deformaciones direccionales en milímetros en el eje Z del primer diseño.



(b) Tensiones equivalentes de Von Mises del primer diseño de análisis de rigidez en MPa.



(c) Error estructural en el mallado en mJ.

Figura 4.36 Resultados del primer modelo propuesto de análisis de rigidez.

Las tensiones máximas se encuentran en la base de la pieza. Se buscó la deformación

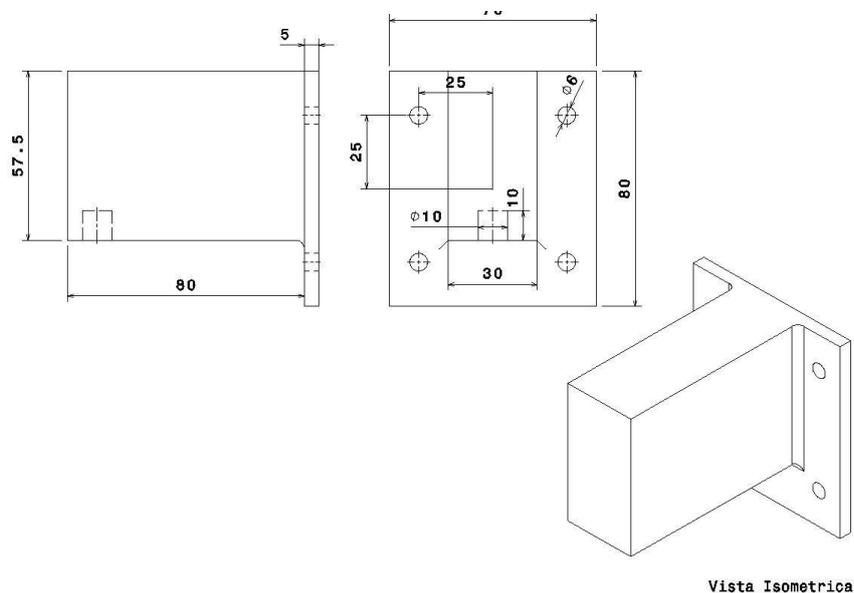
máxima en el eje Z ya que sería la de mayor importancia en la máquina. Se hizo un primer modelo y al calcular el error se realizó un mallado más fino en los lugares donde este era máximo y así se redujo su valor para que se corresponda con la cota propuesta.

<b>Modelo 1</b>	
Deflexión Máxima en el eje Z	0.017464mm
Tensión Equivalente de Von Mises	50.06MPa

**Cuadro 4.5** Resultados del análisis del primer modelo propuesto de la unión Placa-Celda.

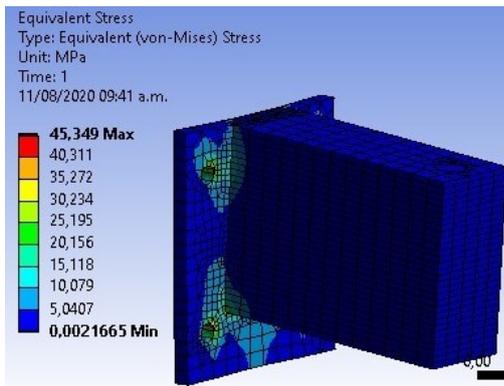
En un segundo diseño se establece un rectángulo del alto del agarre de la placa, es decir, en lugar de un cuadrado de 30mm por lado pasamos a un rectángulo de  $30 \times 57,5 \text{mm}^2$ . Esta modificación tiene como objetivo aumentar el momento de inercia de la pieza en la dirección solicitada para obtener una menor deformación en el eje z.

De esta manera la pieza consta de las siguientes dimensiones:

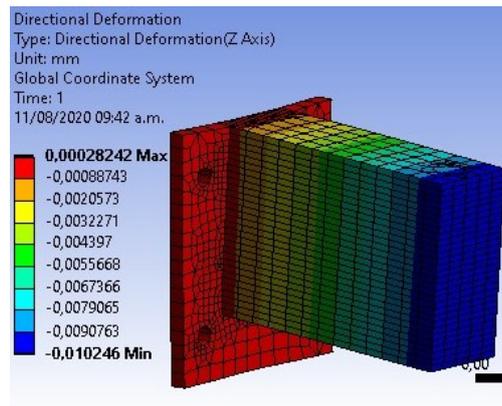


**Figura 4.37** Diseño del segundo conjunto de análisis de rigidez.

En igualdad de condiciones que el caso anterior se obtienen los siguientes resultados:



(a) Tensiones equivalentes de Von Mises del segundo diseño de análisis de rigidez en *MPa*.



(b) Deformaciones direccionales en milímetros en el eje Z del segundo diseño.

**Figura 4.38** Resultados del segundo modelo propuesto de análisis de rigidez.

<b>Modelo 2</b>	
Máxima Tensión Equivalente de Von Mises	45,349 MPa

**Cuadro 4.6** Resultados del segundo modelo propuesto de análisis de rigidez

Comparando los resultados se obtiene el siguiente cuadro:

<b>Modelo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Deflexión Máxima en el eje Z [mm]	0,017464	0,010246
Máxima Tensión Equivalente de Von Mises [MPa]	50,06	45,349

**Cuadro 4.7** Comparación de resultados de los modelos propuestos de análisis de rigidez.

## Conclusión

A modo de conclusión, se puede observar que las deformaciones y tensiones decrecen de un modelo a otro aunque no significativamente. Se observa que las principales deformaciones se originan en la base de la pieza por lo que se decidió aumentar el espesor de

la misma. Pero, también hay que tener en cuenta que esa base va abulonada con otras dos piezas que también tomarán carga y deformación.

Además, se hizo una optimización topológica del segundo diseño para encontrar una geometría más conveniente pero teniendo en cuenta el proceso de manufactura que se utilizará, la pieza inicial y los resultados obtenidos. Ensayando la pieza optimizada se concluyó que no es conveniente el uso de la misma.

Por otra parte, se analizó la posibilidad de realizar la pieza con un reticulado utilizando el corte por agua y soldando las diferentes partes pero debido al contexto de cuarentena en el que se realizó la máquina se decidió utilizar el mismo proceso de manufactura de mecanizado convencional para todas las piezas.

#### **4.10.2. Brida**

El objetivo del análisis es el de diseñar de manera adecuada la base a partir de una fuerza transversal aplicada en la barra soporte de la cuba. Esta fuerza no corresponde con cualquier tipo de ensayo, sino que se establece como una que puede darse por un mal uso de la máquina o un movimiento ajeno a la misma. De modo que este análisis busca evitar que la máquina de ensayo se voltee o falle por dicha fuerza.

#### **Desarrollo**

Para realizar el análisis por elementos finitos del conjunto de piezas se hace uso del programa de simulación Siemens NX 12.

En cuanto al análisis:

- Se utilizaron tetraedros 3D, compuestos por 10 nodos, para mallar las piezas del conjunto. (Elemento Ctetra10 en Nx 11)
- Se estableció una fuerza transversal de 200 N distribuida en 10 *mm* a lo largo de la barra desde el borde superior de la misma.

- El apoyo definido fue un empotramiento en la parte inferior de la base. Se determinó de dicho modo ya que la unión de la misma hacía una placa debajo de esta, será mediante 8 bulones distribuidos a lo largo del diámetro.

Finalmente se evalúa realizar la base en aluminio o en acero y se proponen 4 diseños distintos de los cuales se elegirá la pieza final.

La malla utilizada en cada caso varía levemente pero mantiene la cota de error. Como referencia, en la Figura 4.39 se muestra la malla del análisis final.

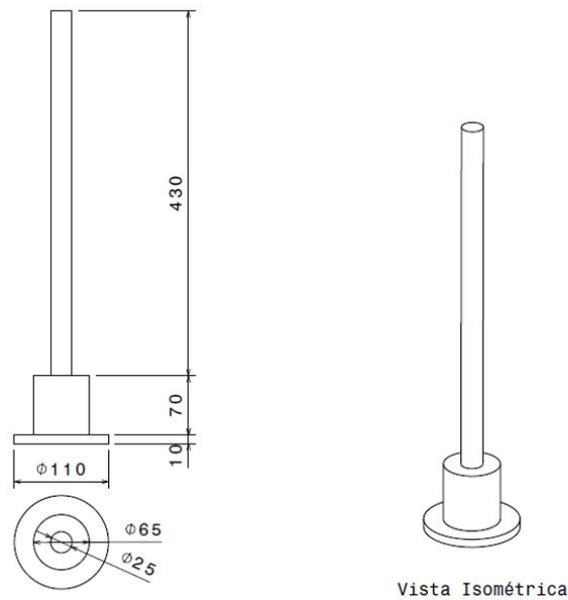


**Figura 4.39** Malla del análisis final de la brida. Análisis de elementos finitos utilizando tetraedros de 10 nodos.

## Resultados de rigidez

En el primer caso se analiza una base de aluminio, partiendo de un bloque cilíndrico de 110 *mm* de diámetro. Tras operaciones de torneado, se busca darle a la base la geometría

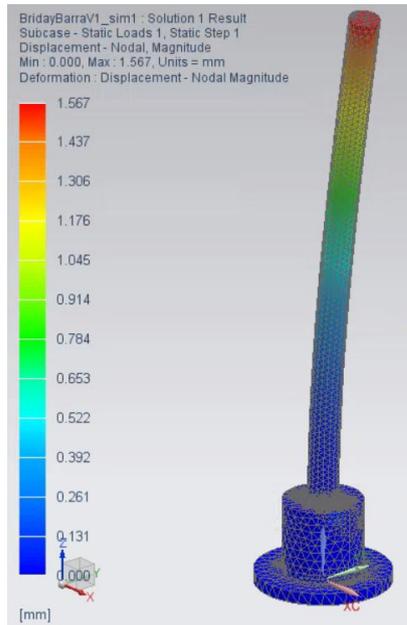
establecida en la Figura 4.40:



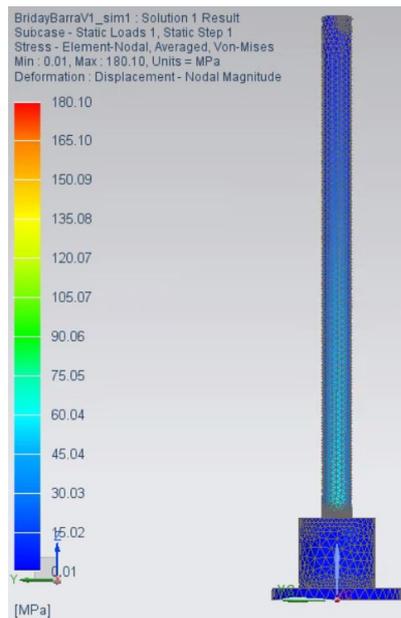
**Figura 4.40** Primer diseño de la brida.

Dado que el largo de la barra pulida de acero se establece de 500 *mm*, esto permite establecer la fuerza de 200 *N* a 430 *mm* del punto más crítico, la intersección entre la barra y la base.

A partir de este planteo se obtienen los resultados descriptos en la Figura 4.41.



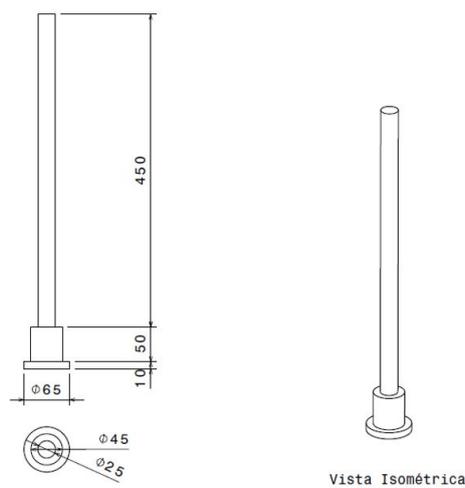
(a) Deflexiones del primer diseño en milímetros.



(b) Tensiones equivalentes de Von Mises del primer diseño en *MPa*.

**Figura 4.41** (a) Deformaciones y (b) tensiones equivalentes de Von Mises para el primer diseño de la brida.

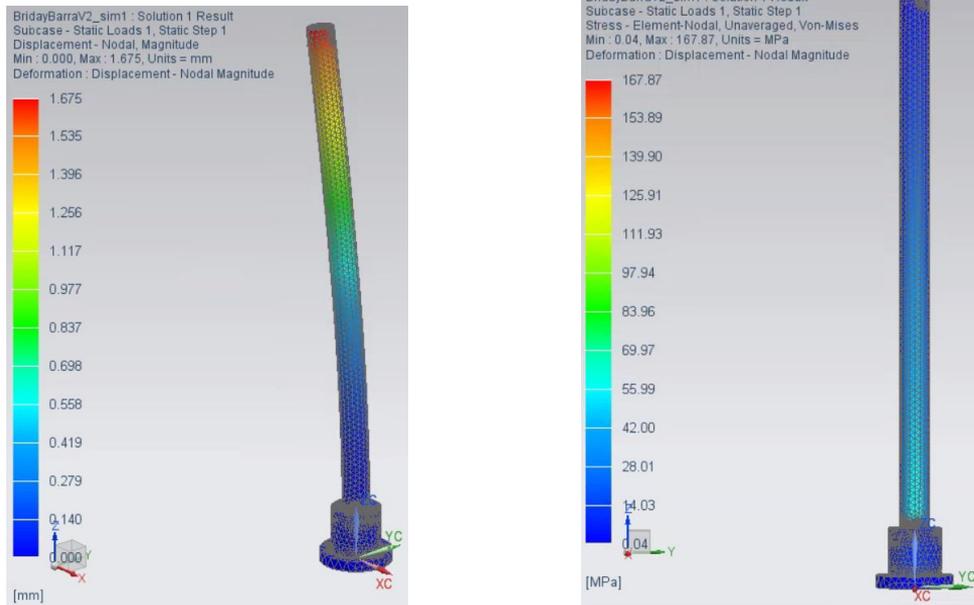
Para el segundo caso, se analiza una base de acero, partiendo de un redondo de 65 *mm* de diámetro. Tras operaciones de torneado, se busca darle a la base la geometría del plano de la Figura 4.42.



**Figura 4.42** Segundo diseño de la brida.

Nuevamente, la barra pulida se establece de 500 *mm* de longitud, estableciendo la fuerza de 200 *N* a 450 *mm* del punto más crítico, la intersección entre la barra y la base.

A partir de este planteo se obtienen los siguientes resultados:



(a) Deflexiones del segundo diseño de la brida en milímetros.

(b) Tensiones equivalentes de Von Mises en MPa del segundo diseño de la brida.

**Figura 4.43** (a) Tensiones equivalentes de Von Mises y (b) deformaciones del segundo diseño de la brida.

En este caso se repite el modelo anterior variando únicamente el cuello de la base llevándola nuevamente a 70 *mm* como indica la Figura 4.44, arrojando los resultados de la Figura 4.45.

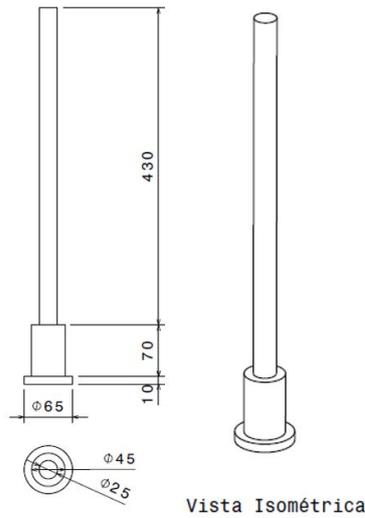
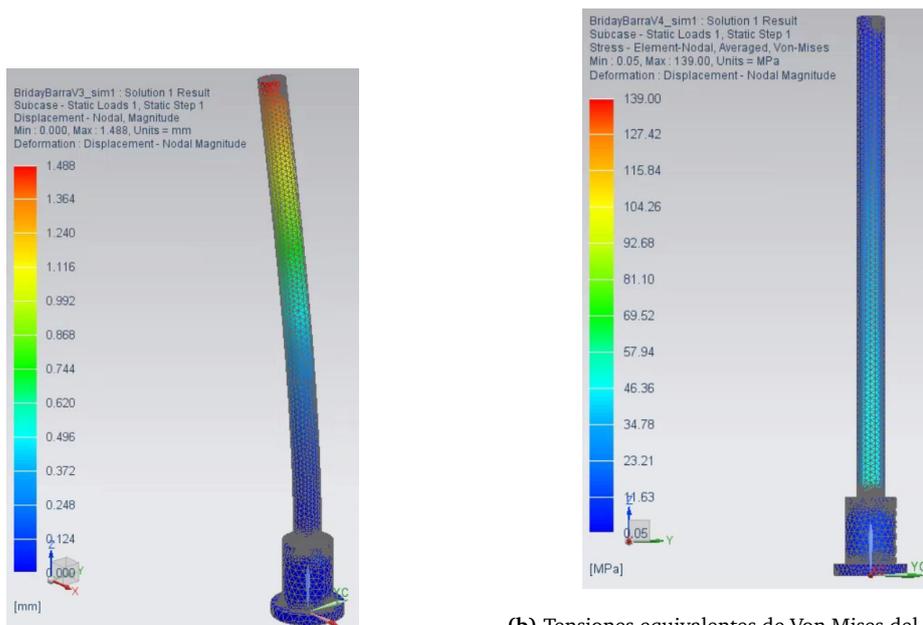


Figura 4.44 Tercer diseño de la brida

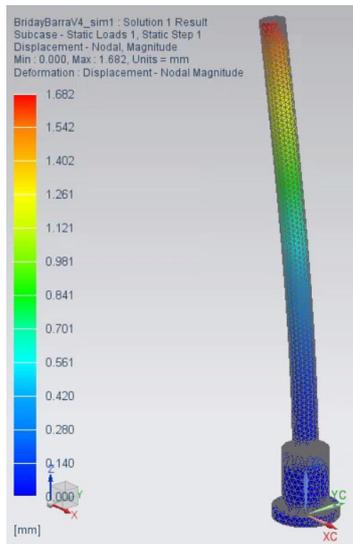


(a) Deflexiones del tercer diseño de la brida.

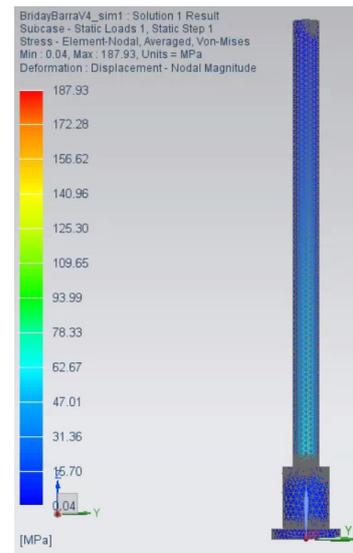
(b) Tensiones equivalentes de Von Mises del tercer diseño de la brida.

Figura 4.45 (a) Tensiones equivalentes de Von Mises y (b) deformaciones del tercer diseño de la brida.

El cuarto y último caso a analizar se trata de una base de aluminio (en lugar de acero) con igualdad de dimensiones al caso anterior (Figura 4.44), arrojando los resultados de la Figura 4.46.



(a) Deflexiones del cuarto diseño de la brida.



(b) Tensiones equivalentes de Von Mises del cuarto diseño de la brida.

**Figura 4.46** (a) Tensiones equivalentes de Von Mises y (b) deformaciones del cuarto diseño de la brida.

### Comparación de resultados

Modelo	1	2	3	4
Deflexión Máxima [mm]	1.567	1.675	1.488	1.682
Tensión máxima equivalente de Von Mises en los nodos [MPa]	180.10	167.87	139.00	187.93

**Cuadro 4.8** Comparación de resultados de los modelos propuestos.

### Conclusión

A partir de los resultados obtenidos en cada modelo es posible concluir que el diseño originalmente planteado, el modelo 1, constaba de dimensiones excesivas y las mismas

---

podían reducirse de un diámetro de base de 110 *mm* y un diámetro de cuello de 65 *mm* a un diámetro de base de 65 *mm* y uno de cuello de 45 *mm* sin grandes cambios en las tensiones a las cuales se somete.

Además, luego se realizó una variación en la altura del cuello de la base soporte (modelo 2) para observar los cambios que se presentaban en cuanto a tensiones y deflexiones. Como puede observarse en el Cuadro 4.8, una mayor longitud de cuello conduce a una menor deflexión y menores tensiones máximas.

Finalmente se efectuó una comparación entre dos modelos idénticos dimensionalmente, pero con distintos materiales, acero y aluminio (modelo 3 y 4). En estos puede observarse que la deflexión aumenta en el caso de utilizar aluminio, así como las tensiones máximas en los nodos.

En base a dichas comparaciones se concluye que el mejor diseño entre los propuestos para la base soporte es de acero con las dimensiones del tercer modelo (Figura 4.44). Además, se sugiere aumentar el cuello de la pieza para lograr incluso menores deflexiones.

### **Resultados finales**

Finalmente, el modelo a utilizar se compone de una barra pulida de acero y una base de aluminio, consta de las dimensiones detalladas en el plano de la Figura 4.47.

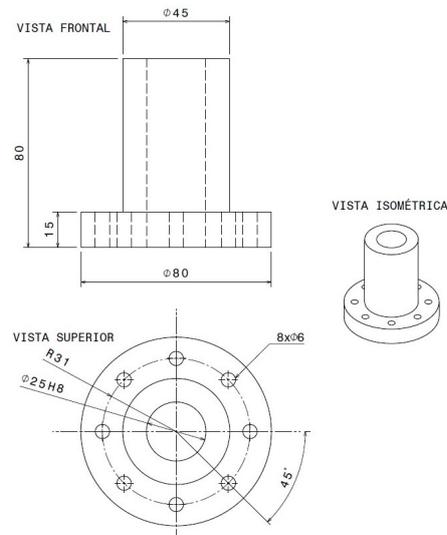
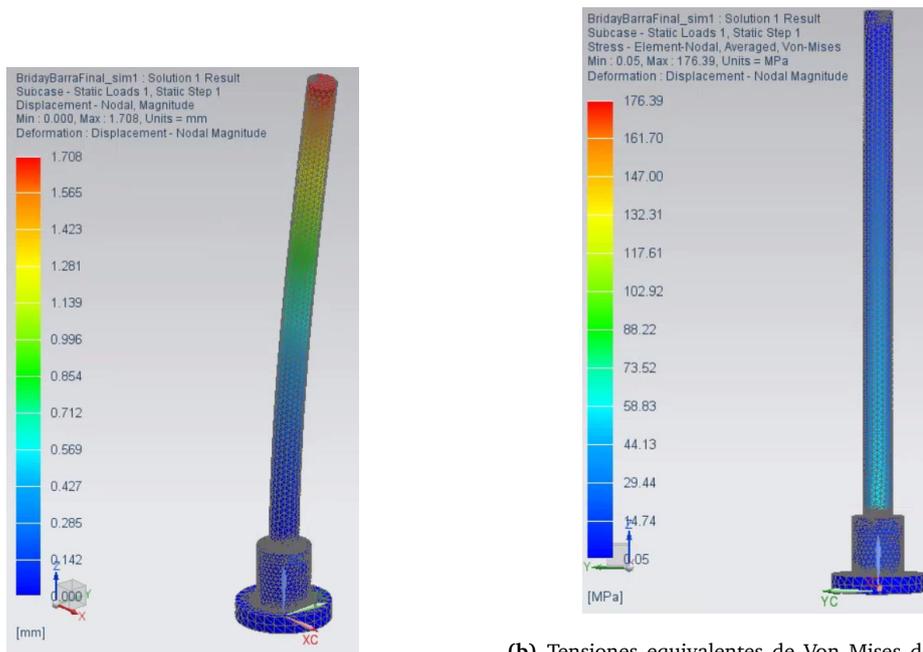


Figura 4.47 Diseño final de la brida.

Repitiendo el análisis previo se observan las deflexiones y tensiones en la Figura 4.48:



(a) Deflexiones del diseño final.

(b) Tensiones equivalentes de Von Mises del diseño final.

Figura 4.48 Tensiones equivalentes de Von Mises del diseño final.

Como se observa en las figuras correspondientes al diseño final, el mismo presenta una deflexión máxima de 1,708 *mm* y una tensión equivalente máxima de Von Mises de 176,39

$MPa$  en la barra. Las distribuciones de tensiones se observan representadas en la Figura 4.48b, la estructura no se encuentra comprometida frente a una fuerza horizontal como la del análisis cumpliendo con el objetivo del mismo.

### 4.10.3. Placa

Se busca establecer el espesor ideal de la placa diseñada para soportar las tensiones y deflexiones en el tornillo debidas a las cargas máximas de los ensayos a realizar.

En un principio se establece un espesor de  $2\text{ mm}$ , dado que es el máximo posible de plegar en el taller disponible del ITBA utilizando máquinas destinadas a dicho proceso. Por este mismo motivo, en caso que los resultados evaluados no sean adecuados, se repetirá el análisis para un espesor de  $4\text{ mm}$  ya que la precisión del plegado para una placa es de  $3\text{ mm}$  la misma y los precios son similares.

Las mediciones correspondientes a la placa se muestran en la Figura 4.49:

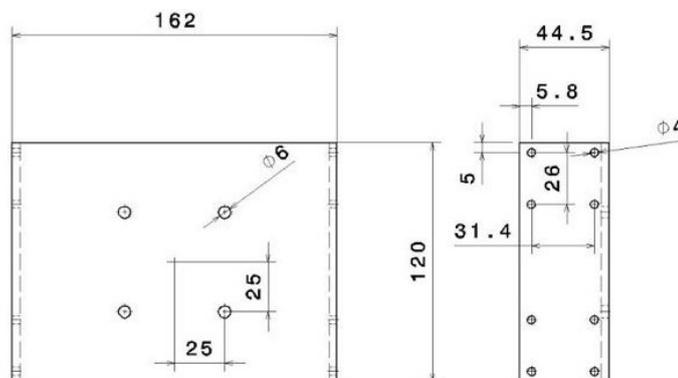


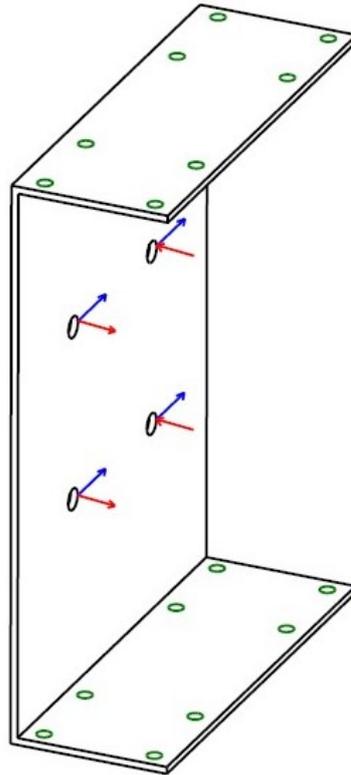
Figura 4.49 Medidas de la placa a analizar.

### Desarrollo

Para realizar el análisis por elementos finitos se hace uso del programa de simulación Siemens NX 12 utilizando elementos cáscara, compuestos por 6 nodos (CTRIA6), para el mallado de la pieza. En este caso particular también se debe destacar que no se toma radio

de plegado dado que se desconoce su valor, se hace uso de esta idealización siendo la misma más conservativa.

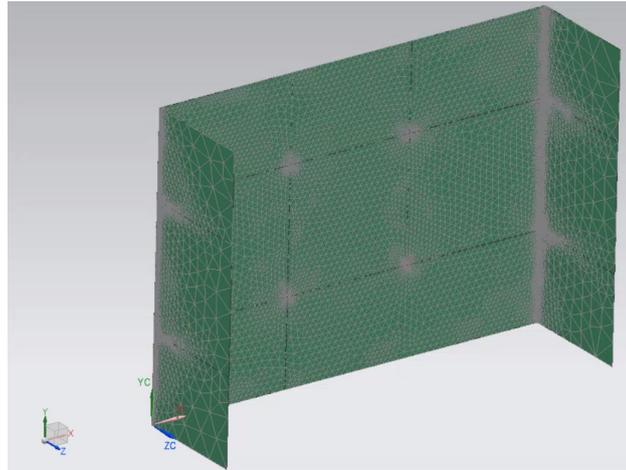
En cuanto a las fuerzas, tomando las de color rojo como  $375\text{ N}$  y las de color azul de  $125\text{ N}$ , se distribuyen como indica la Figura 4.50:



**Figura 4.50** Disposición de fuerzas a analizar.

El momento total en el centro de la placa es de  $37500\text{ Nmm}$ , equivalente al que produciría un brazo de palanca generado por la fuerza máxima requerida por el ensayo ( $500\text{ N}$ ) y un brazo de  $75\text{ mm}$  (distancia entre la placa y el eje de la mordaza). Además de tomar en cuenta la fuerza del ensayo en sí ( $500\text{ N}$  en el eje del ensayo) también distribuida en las 4 uniones.

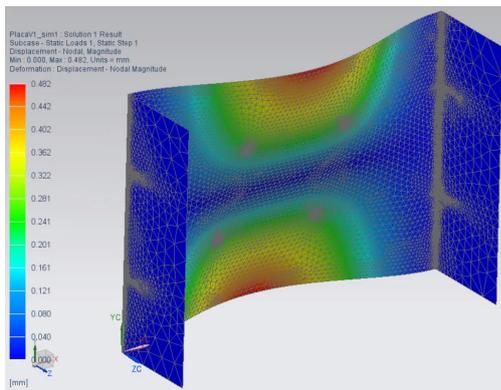
Los apoyos se colocaron empotrados en la sección que cubren los agujeros de las alas, en los cuales se sujeta la placa a las guías, y el mallado se realiza como se observa en la Figura 4.51:



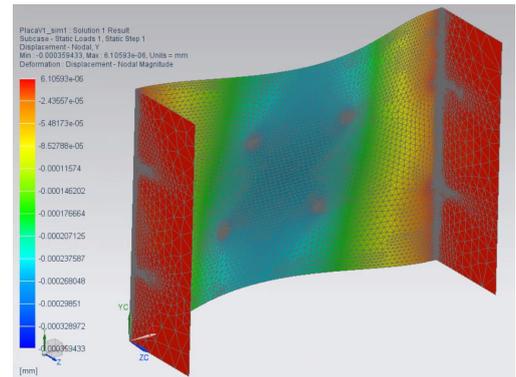
**Figura 4.51** Mallado de la placa utilizando elementos cáscara (CTRIA6).

### Resultado de rigidez

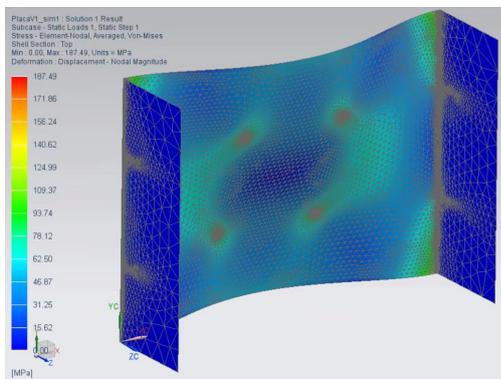
Acorde a la disposición de fuerzas presentada en la Figura 4.49 y los apoyos mencionados, se realiza el primer análisis en una placa de acero de 2 *mm* de espesor obteniendo los resultados de la Figura 4.52:



(a) Deflexiones en la placa de 2 mm.



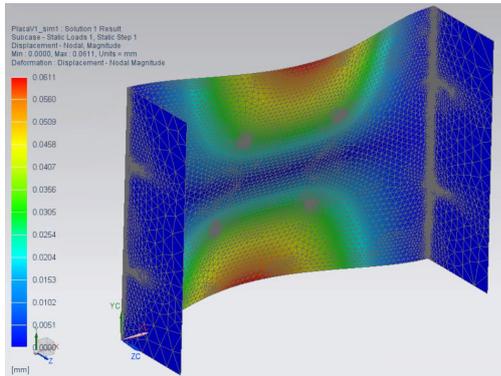
(b) Deflexiones en el eje del ensayo en la placa de 2mm.



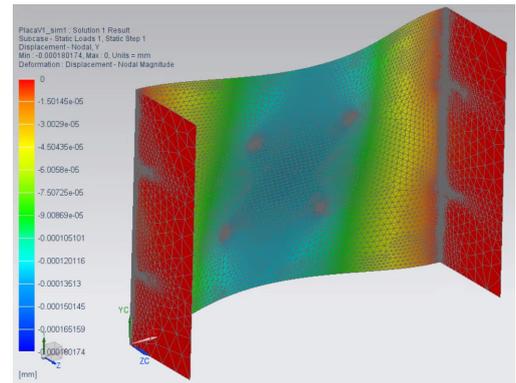
(c) Tensiones equivalentes de Von Mises en los nodos de la placa de 2 mm.

**Figura 4.52** Tensiones equivalentes de Von Mises y deformaciones de la placa de 2 mm de espesor.

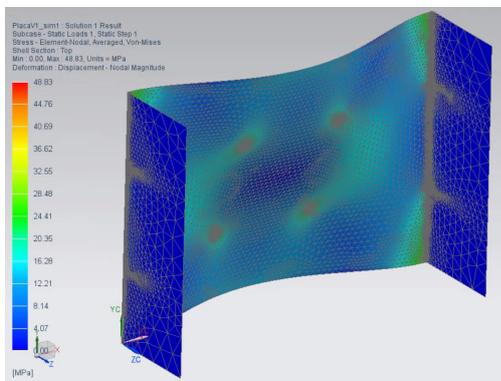
Se analizó otro caso duplicando el espesor anterior de la placa, por lo que se ajusta el espesor de las cascaras de 2 a 4 mm y se repite el análisis previamente para observar las variaciones (Figura 4.53).



(a) Deflexiones en la placa de 4 mm.



(b) Deflexiones en el eje del ensayo en la placa de 4 mm.



(c) Tensiones equivalentes de Von Mises en los nodos de la placa de 4 mm.

**Figura 4.53** Tensiones equivalentes de Von Mises y deformaciones de la placa de 4 mm de espesor.

Espesor de la Placa	2 mm	4 mm
Deflexión Máxima	0.482 mm	0.061 mm
Tensión Máxima de Von Mises en los nodos	187.49 MPa	48.83 MPa

**Cuadro 4.9** Comparación de resultados de los modelos de placas propuestos

## Conclusión

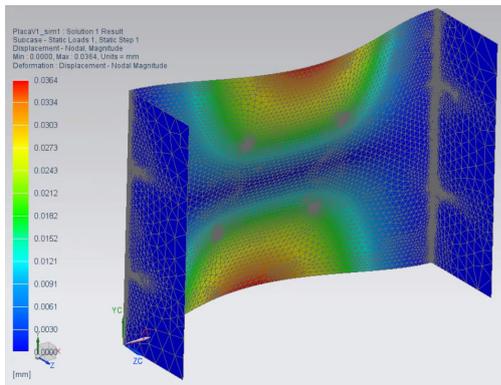
En conclusión, puede observarse una amplia diferencia en los resultados obtenidos. Las tensiones disminuyen en un orden de aproximadamente 4 al duplicar el espesor y las deflexiones disminuyen un orden de 10.

Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la rigidez de la placa se verá incrementada por la estructura que la contenga. Esto indica que las deflexiones de la misma serán de un menor orden que si se viese sometida a la carga total del ensayo, como se evalúa en este análisis. Además, estas deflexiones ocurren en los bordes de la placa, y no en los puntos de aplicación de las fuerzas, lo que indica que no tendrán gran influencia sobre la deformación de la pieza ensayada.

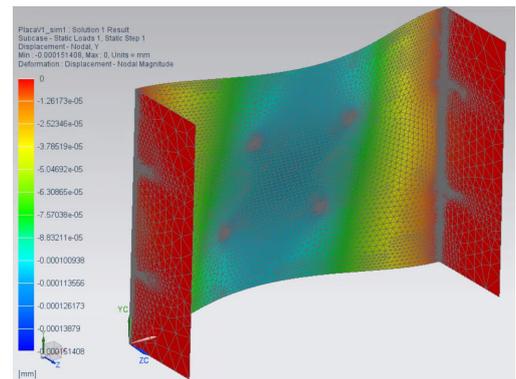
Finalmente, se concluye que es posible utilizar una placa de 2 *mm* de espesor, aunque es recomendable repetir el análisis ensamblando las piezas que componen la rigidez de la placa para obtener un resultado más preciso. En cuanto a la placa de 4mm, debe determinarse que el plegado sea posible y acorde al requerido, bajo estas condiciones y tomando en cuenta que la variación de precio respecto a la primera sea mínima, es una elección preferible.

## Resultados finales

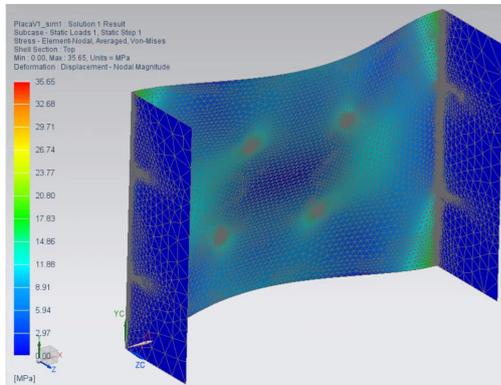
Finalmente, se utiliza una placa de 3/16 *in* de modo que se elabora el análisis para la misma con el objeto de conocer las deflexiones y tensiones con mayor precisión (Figura 4.54).



(a) Deflexiones en la placa de 3/16 in en milímetros.



(b) Deflexiones en el eje del ensayo en la placa de 3/16 in en milímetros.



(c) Tensiones equivalentes de Von Mises en los nodos de la placa de 3/16in.

**Figura 4.54** Tensiones equivalentes de Von Mises y deformaciones de la placa de 3/16 in de espesor.

Como puede observarse, y en concordancia con los análisis previamente realizados, se observa que las deflexiones son lo suficientemente bajas como para no afectar los resultados de un ensayo, siendo la máxima de 0,0364 mm. Además, las tensiones a las cuales se verá sometida la placa en el caso más crítico son de apenas 35,65 MPa, teniendo un factor de seguridad elevado contra la fluencia, y por ende, la falla de la máquina.

# Capítulo 5

## Ensamblaje y Construcción

Tras el análisis realizado en secciones previas se dispuso de todos los materiales y piezas necesarias para dar comienzo al armado de la máquina de ensayos.

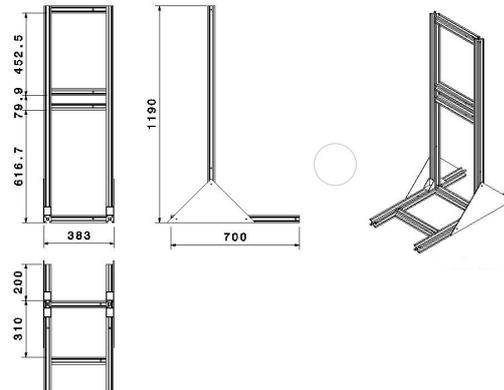
El objetivo de este capítulo es el de detallar el paso a paso realizado para lograr un ensamblado efectivo evitando inconvenientes. A su vez, asegura que los materiales involucrados actúen acorde a su respectiva funcionalidad de manera adecuada. En base a esto, también se destaca que el orden en que se encuentra escrito el capítulo equivale a la secuencia que debe mantenerse durante el armado para evitar inconvenientes

### 5.1. Ensamblaje del Frame

En primer lugar se buscó ensamblar el *frame* que sirvió de referencia y protección para el acople de los componentes siguientes. Para esto se tomaron los perfiles Bosch, tuercas 'slider' T y las escuadras correspondientes y se las colocó en base a la disposición definida en el diseño como detalla la Figura 5.1.



(a) Ensamblaje real del Frame.



(b) Medidas del Frame.

**Figura 5.1** Ensamblaje y medidas del Frame. Para mayor detalle ver apéndice D, plano N°13, Frame.

## 5.2. Eje del ensayo

Una vez finalizada la base se procedió a trabajar sobre la construcción que luego conformará el eje donde se realizaran los ensayos. El mismo se compone de diversos componentes: una brida, una placa de acero, un eje pulido, una cuba y una mordaza.

Se fijó la brida a la placa mediante 6 bulones como muestra la Figura 5.2. La brida es la encargada de sostener el eje pulido mediante un pasador. Por último, se introdujo la cuba deslizante en el eje. Además, se colocó en el extremo superior del eje, la mordaza correspondiente a través de una unión roscada. Ver Figura 5.3.

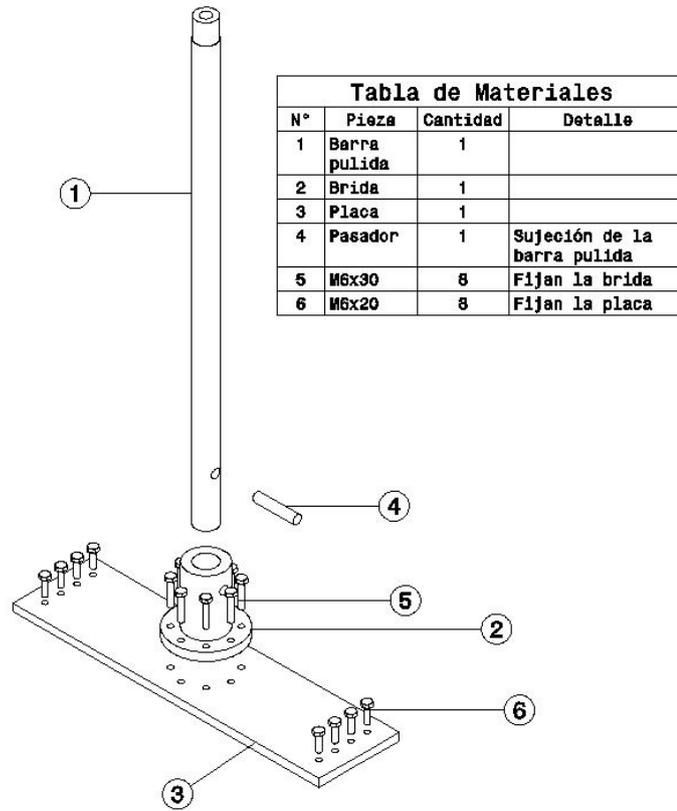


Figura 5.2 Instrucción y materiales de la sección inferior.



(a) Sección inferior.



(b) Sección adherida al frame.

**Figura 5.3** Ensamblaje de la sección inferior.

En cuanto a la parte superior, se ensambló el sistema motriz de la máquina. Este conjunto contiene múltiples piezas encargadas de conectar el movimiento del tornillo sin fin con la mordaza superior. Para esto se deben unir piezas como la placa plegada, los rodamientos de las guías lineales, el acople que conecta el eje del tornillo con el eje del ensayo (al cual también se le adhiere la rótula), y la tuerca del husillo de bolas como muestra la Figura 5.4. Esta última se fijó a la placa mencionada anteriormente a través de dos piezas y uniones roscadas.

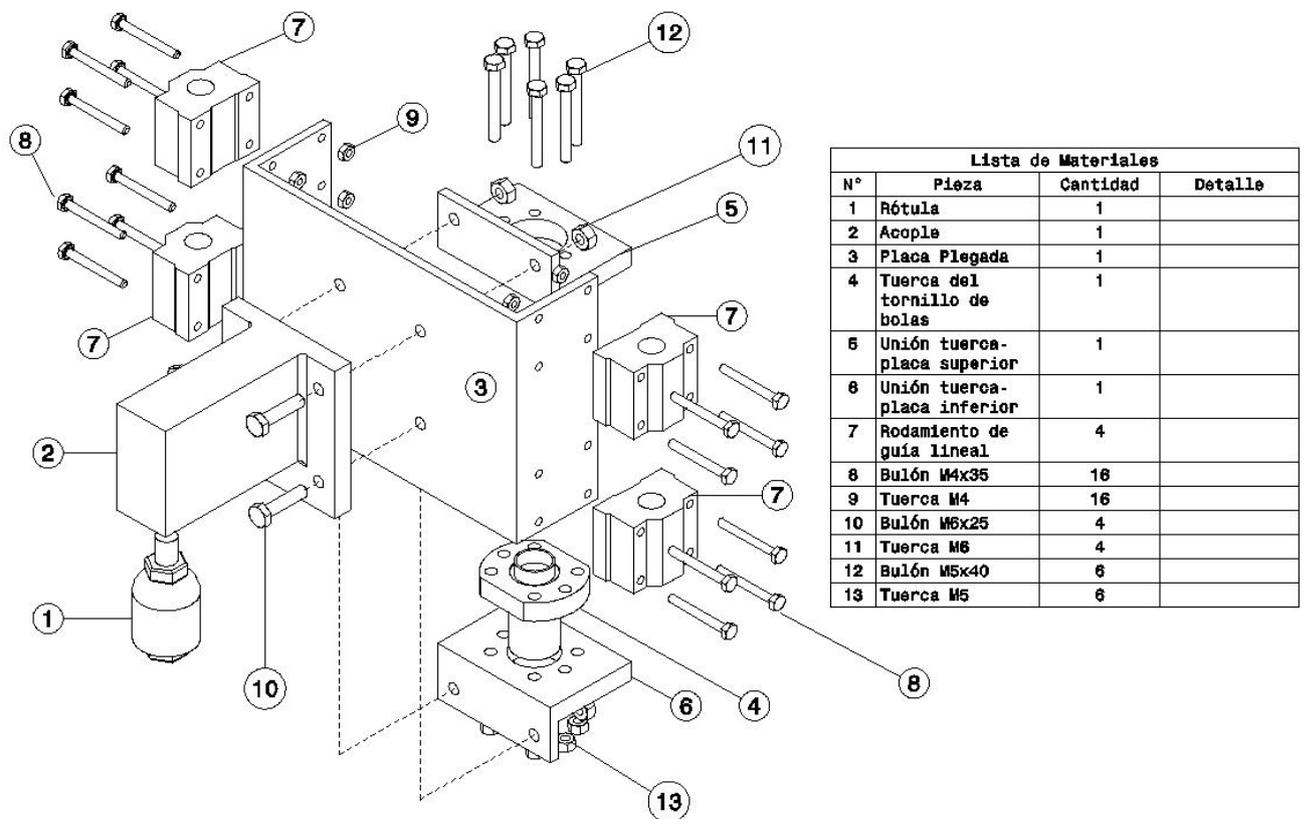


Figura 5.4 Instrucción y materiales de la sección superior.

Una vez conformada la sección superior se continuó ensamblando los apoyos de las guías y el tornillo de bolas recirculantes a los perfiles restantes del *frame*. Luego, se enhebró el husillo y las guías lineales en la tuerca del sin fin y los rodamientos, respectivamente, como muestra la Figura 5.5. Finalmente se colocó el acople del motor paso a paso en un perfil por debajo de los apoyos inferiores. Mediante estos pasos, concluye el armado de la totalidad del conjunto como muestran las Figuras 5.6 y 5.7.

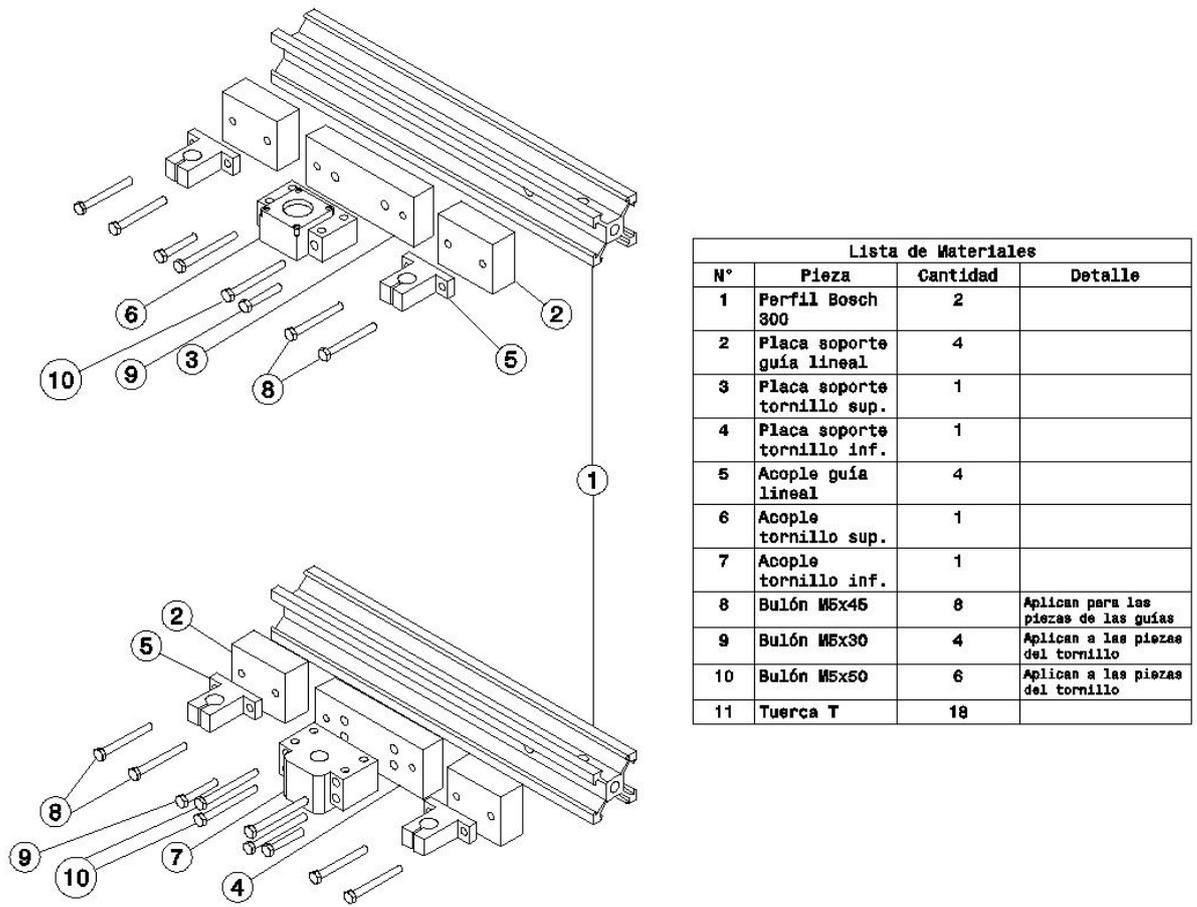
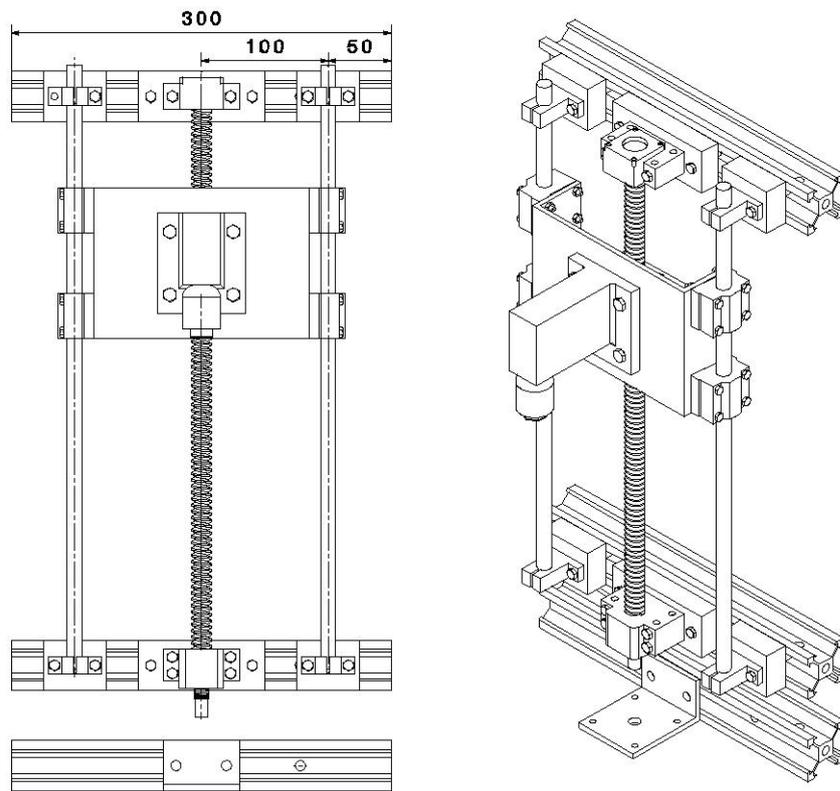


Figura 5.5 Instrucción y materiales de los apoyos de la sección superior.



**Figura 5.6** Conjunto y medidas de la sección superior. Para mayor detalle ver apéndice D, plano N°15, Sección Superior del Eje.



(a) Sección Superior



(b) Sección adherida al frame.

**Figura 5.7** Ensamblaje de la sección superior.

### **5.3. Cuba principal y sistema de calentamiento**

Para comenzar a ensamblar el sistema de calentamiento el primer paso fue terminar la sección inferior del eje del ensayo. Esto se refiere a incluir en el mismo la cuba principal (sus respectivos apoyos, sujeciones y selladores), la mordaza inferior y la serpentina como muestra la Figura 5.8.

Debido a que la cuba principal debe ser capaz de moverse verticalmente, se encuentra sostenida por un anillo que evita que esta descienda por debajo de un nivel deseado. Además, debido a la estanqueidad que requiere, también cuenta con dos o-rings en su base de aluminio que presionan contra el acrílico. Por último, la barra pulida tiene un agujero roscado que permite conectar una varilla y a la misma la mordaza inferior, así como una rosca externa a la cual se adhiere una tuerca cuyo rol es el de limitar el movimiento de la cuba al desplazarse hacia arriba. Ver Figura 5.9

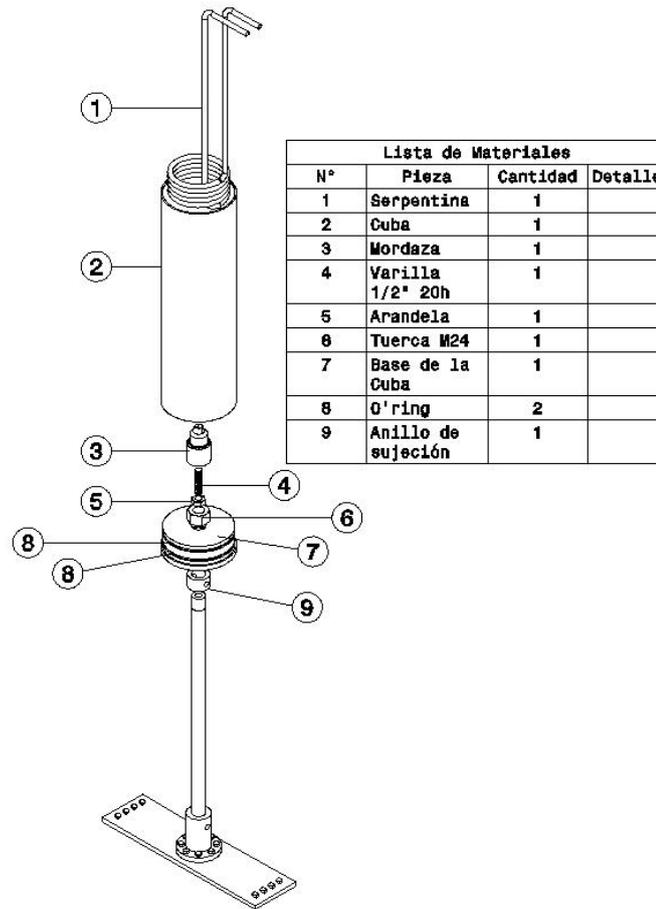


Figura 5.8 Instrucción y materiales de la cuba principal.

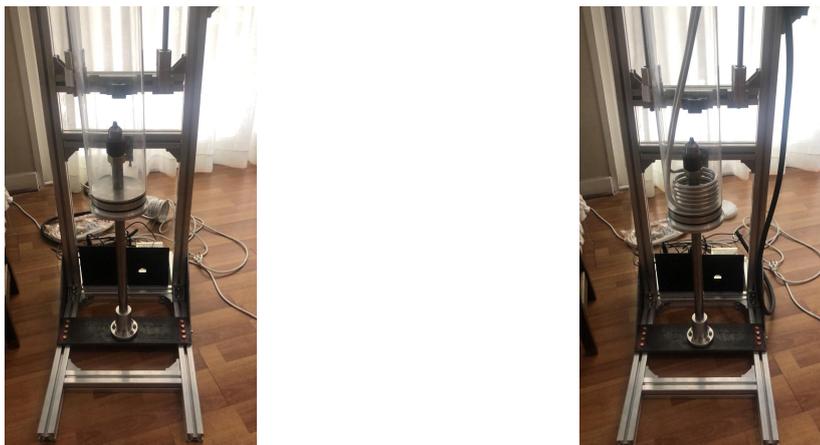


Figura 5.9 Ensamblaje de la cuba principal sin serpentina (panel izquierdo) y con la serpentina en su lugar (panel derecho).

## 5.4. Incorporación de sensores y actuadores

Por último, se agrega la electrónica del sistema. Esto implica agregar los sensores de temperatura y celda de carga, así como la bomba de recirculación de agua y el motor paso a paso. Además, la máquina será controlada mediante una botonera con su correspondiente display.

Esta última consta de 4 botones (ver Figura 5.10):

- Parada de emergencia: Detiene el movimiento de la máquina mediante un corte en la alimentación de la corriente.
- Botón de subida: desplaza la mordaza superior hacia arriba
- Botón de bajada: desplaza la mordaza superior hacia abajo.
- Botón de parada del motor: para el motor en el lugar deseado.



**Figura 5.10** Botonera adherida al frame indicando la función de cada una de sus partes.

Finalmente, la máquina de ensayos universal para tejidos biológicos y biomateriales se encontraría totalmente ensamblada como muestra la foto en la Figura 5.11.



**Figura 5.11** Máquina de ensayos totalmente ensamblada.

Y en la Figura 5.12 puede observarse totalmente terminada, con su caja eléctrica, con las cubas selladas y siliconadas, y la electrónica totalmente soldada y guardada con sus medidas de seguridad para evitar accidentes.

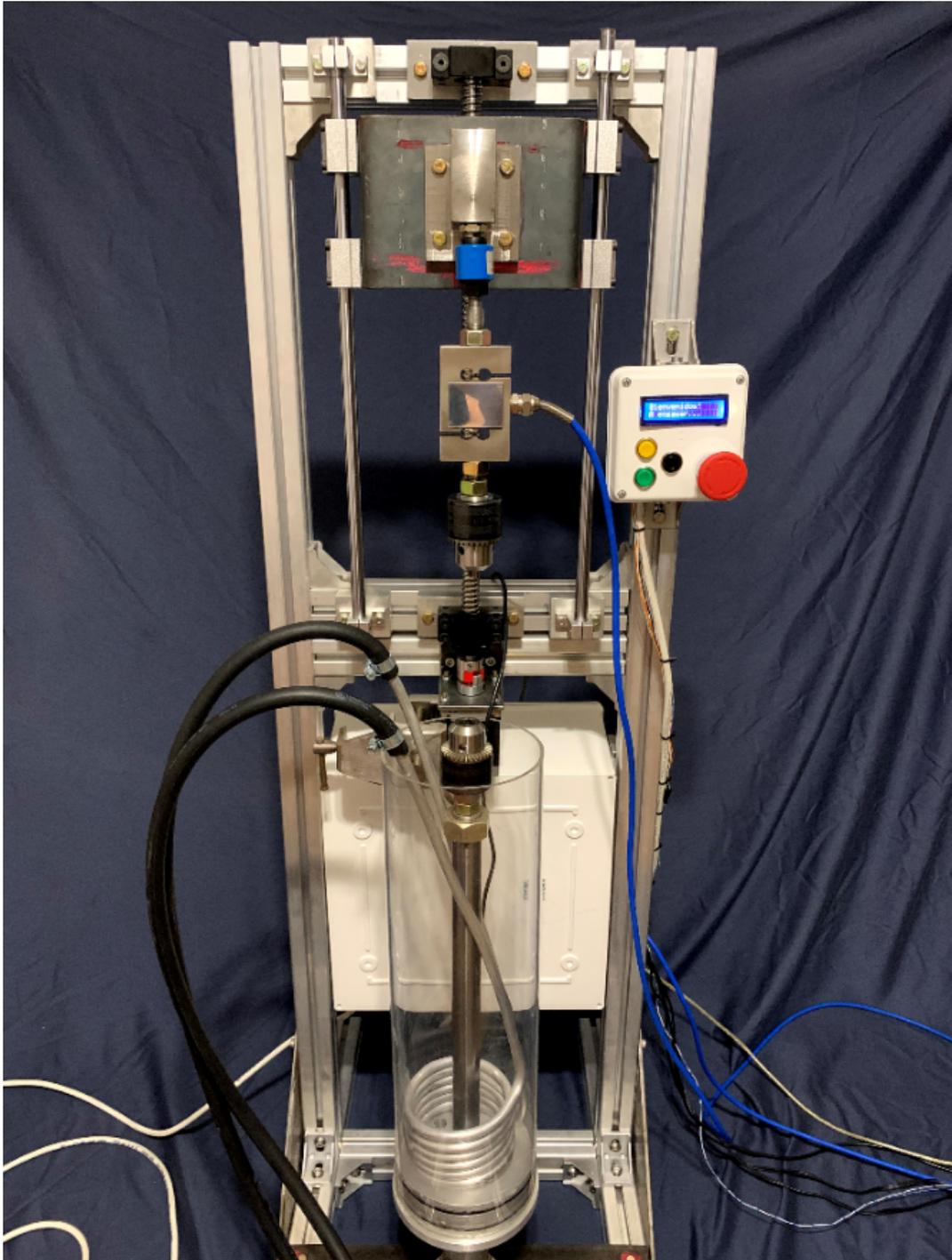
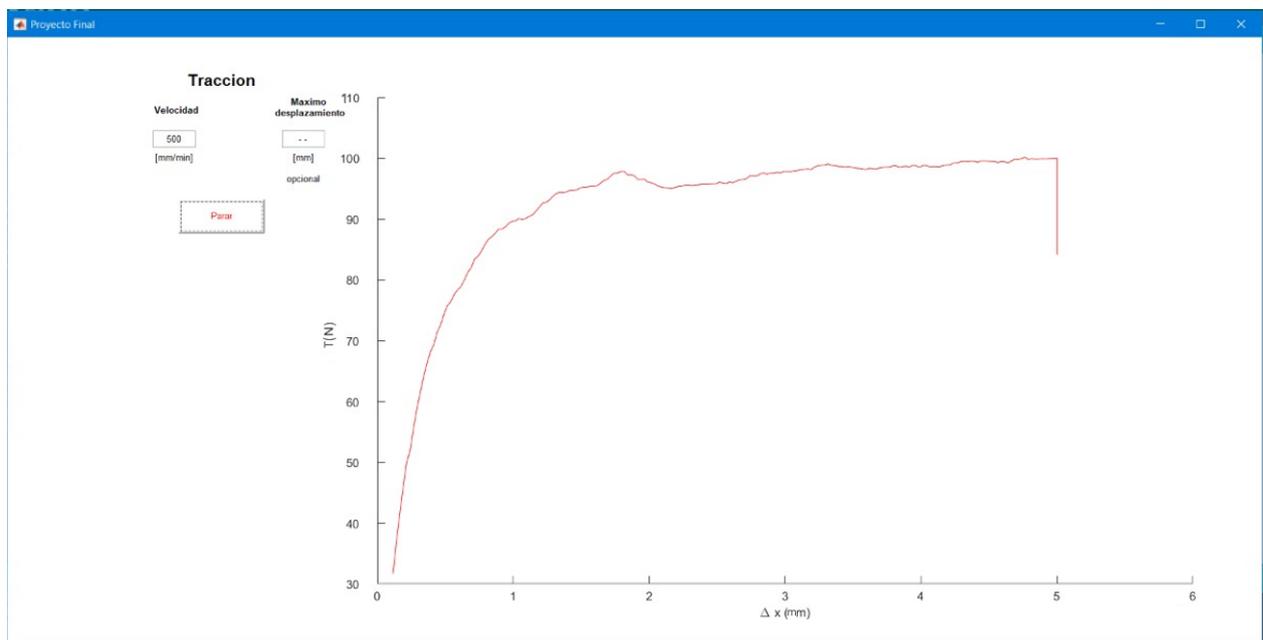


Figura 5.12 Máquina de ensayos terminada y lista para su uso.

# Capítulo 6

## Conclusiones

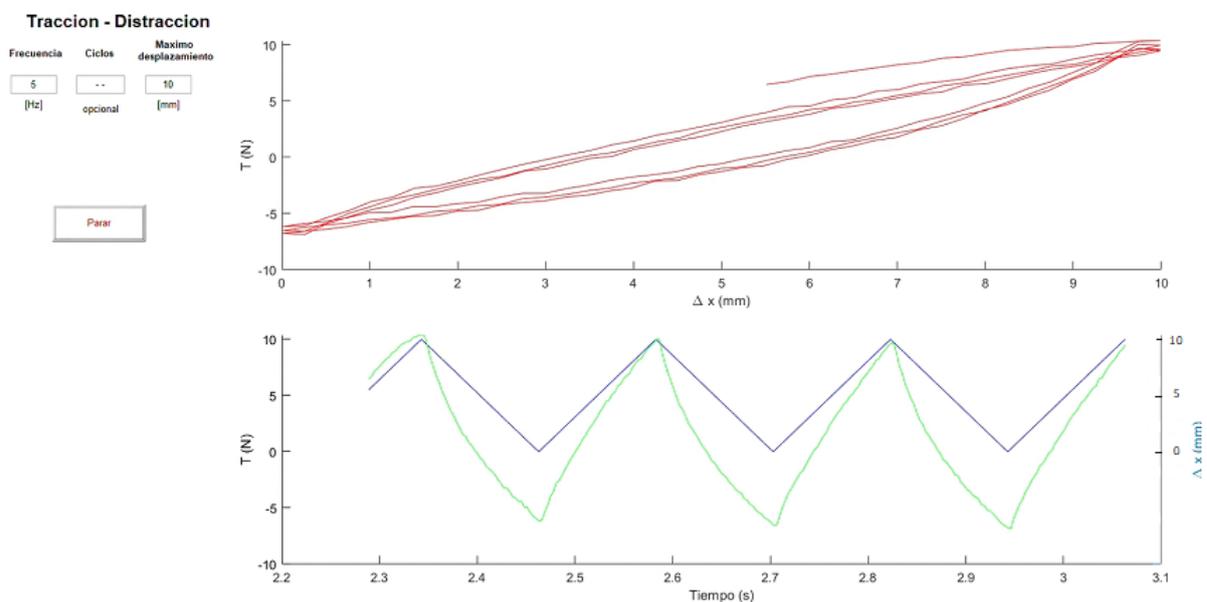
Al ensayar el equipo con una varilla de polietileno de alta densidad por tracción hasta ruptura a una velocidad de  $500 \frac{mm}{min}$  sin desplazamiento máximo se obtuvo la siguiente curva.



**Figura 6.1** Curva obtenida al realizar un Ensayo de Tracción con una varilla de Polietileno de Alta Densidad con una velocidad de  $500 \frac{mm}{min}$  hasta que disminuyó su diámetro considerablemente y las mordazas no podían sujetarlo más.

En la curva de la Figura 6.1 puede observarse una zona de deformación elástica, lineal, seguida de una zona de deformación inelástica con tensión creciente hasta la que la varilla se deformó tanto que las mordazas ya no eran capaces de sujetarla. Se demuestra entonces que el dispositivo diseñado cumple con los parámetros solicitados para tracción.

A continuación, se ensayó otra varilla de polietileno de alta densidad por tracción - distracción hasta frenar el ensayo con una frecuencia de  $5\text{ Hz}$  y desplazamiento máximo de  $50\text{ mm}$ .



**Figura 6.2** Curva obtenida al realizar un Ensayo de Tracción - Distracción con una varilla de Polietileno de Alta Densidad a una frecuencia de  $5\text{ Hz}$  y desplazamiento máximo de  $50\text{ mm}$  hasta que se frenó el ensayo. En la imagen superior puede observarse la curva de deformación - tensión con el fenómeno de histéresis mientras que en la imagen inferior se observa la deformación en función del tiempo, que conforma una función triangular y la carga en función del tiempo.

En la Figura 6.2 puede observarse en la mitad superior, la curva de deformación tensión resultando en una histéresis que resulta de la energía consumida para deformar la muestra. En la mitad inferior de la figura, se grafica el desplazamiento de la mordaza superior teórica, es decir, el movimiento que realiza el motor, que conforma una función triangular.

Se puede decir entonces con estos dos gráficos resultado de dos experiencias de ensayo, que a pesar de los desafíos mencionados a lo largo del informe, se pudo cumplir satisfactoriamente con el objetivo principal del trabajo. Se logró concebir, diseñar y construir una máquina capaz de realizar ensayos mecánicos de tracción uniaxiales sobre tejidos biológicos y biomateriales, registrando los parámetros obtenidos en condiciones de temperatura controlada.

Es posible realizar esta afirmación debido a que la máquina es capaz de realizar diversos ensayos sumergidos en una cuba con solución fisiológica a temperaturas fisiológicas con una tolerancia de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  sujetando tejidos o biomateriales de geometría cilíndrica. Respecto a la estructura, también se destaca que se logró la construcción de un frame capaz de soportar las sollicitaciones de los ensayos, así como aportar la rigidez necesaria haciendo uso eficiente de los componentes utilizados. Por último, se realizó una interfaz que permite ingresar parámetros, seleccionar la función a realizar, procesar de manera instantánea los datos, calibrar, graficar, establecer tensiones y cargas máximas, visualizar de los parámetros de ensayo simil sistema Bluehull de Instron, descargar los datos en formato .csv o .txt para el análisis posterior de los mismos y brindar una experiencia cómoda para el usuario, permitiendo controlar el equipo desde cualquier computadora con el software Matlab instalado.

El equipo además permite realizar el preacondicionamiento de las muestras, es decir, realizar un pre-ensayo de tracción - distracción para 'calentar' la muestra y prepararla para su posterior estudio sin importancia de los valores que arroje ese ensayo. Por otro lado, las mordazas utilizadas son versátiles para su uso sin sumergir como sumergido en solución fisiológica, siendo capaces de ser intercambiadas por mordazas con otra geometría que pudieran ser desarrolladas en el futuro.

No obstante, una limitación encontrada que imposibilita el cumplimiento de uno de los parámetros requeridos fue la frecuencia de muestreo. Ésta se pedía que fuera de  $250\text{ Hz}$  valor que no fue posible alcanzar por la complejidad del código fuente y la necesidad de

realizar interrupciones programadas en el mismo de alta frecuencia, que impedía aumentar la frecuencia de muestreo de 66 Hz.

Algunos trabajos a futuro se proponen en el Capítulo 7.

Lamentablemente por el contexto de Aislamiento Obligatorio Social y Preventivo no se pudo completar la etapa de validación con otras máquinas de ensayo y con probetas de propiedades conocidas. Esta etapa de validación originalmente estaba prevista como parte del proyecto pero por limitaciones al ingreso al Instituto Tecnológico de Buenos Aires no fue posible completarla dentro de los tiempos de la materia Proyecto Final de Carrera.

A razón de lo mencionado, se concluye que el proyecto ha cumplido con el alcance propuesto. Además, se han superado las limitaciones correspondientes al contexto de aislamiento preventivo, al presupuesto asignado y herramental disponible. Se destaca la satisfacción personal del equipo de alumnos y tutores involucrados debido a la gestión eficaz y al ambiente de trabajo generado, buena predisposición y capacidad de sobrellevar los desafíos encontrados a lo largo de esta experiencia.

A modo de cierre, los tutores queremos citar al poeta Alemán Johann Wolfgang Goethe: 'el talento se educa en la calma y el carácter en la tempestad'. No se podrían haber alcanzado los objetivos de no haber contado con talentosos futuros profesionales formados en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Han demostrado su gran capacidad para resolver problemas y, por sobre todo, al finalizar su proyecto, han obtenido nuevas competencias sabiendo que no siempre se cuentan con todos los recursos necesarios y que es siempre imprescindible pensar diferentes posibilidades para sortear los desafíos que nos presenta la vida profesional y personal.

# Capítulo 7

## Trabajo a futuro

A lo largo del desarrollo del diseño y de la construcción de la máquina de ensayos se fueron planteando algunos objetivos que iban mas allá de los objetivos iniciales y que quedaron como trabajo a futuro para mejoras del funcionamiento y de la versatilidad de la máquina.

Uno de los objetivos de la máquina fue tener la mayor versatilidad posible para ensayar cualquier tipo de muestras y en eso se basaron muchas decisiones tomadas en el diseño de la misma.

Entre los principales aspectos a desarrollar, se destacó el diseño y construcción de mordazas para tejidos planos. Lamentablemente, esto quedó por fuera de este trabajo por lo que sería importante poder avanzar sobre esto en trabajos posteriores.

Otro desarrollo a futuro es el ajuste de mordazas capaces de realizar compresión y junto a esto la programación correspondiente. Estas implementaciones podrían por ejemplo, ubicar a la máquina en el terreno de la odontología para el ensayo de implantes dentales.

Asimismo, se sugiere una mejora en el sistema motriz. Como se detalló a lo largo de este trabajo, la parte motora consta de un motor paso a paso. Este motor puede ser reemplazado fácilmente por un servomotor. Este reemplazo significaría un grado mayor de precisión y robustez en cualquiera de los ensayos a realizar. En oposición a esto, significaría una gran

inversión de dinero, factor que resultó determinante a la hora de tomar la decisión de diseño.

Por otro lado, para complementar la implementación de un servomotor se puede adoptar un sistema de medición directo. El sistema utilizado actualmente consiste en medir el desplazamiento del cabezal a través los pasos para la rotación del motor, sabiendo que este trae aparejados varios errores que se podrían eliminar utilizando un extensómetro. La implementación del mismo no fue posible en el proyecto por el presupuesto asignado y más aún teniendo en cuenta que el elemento de medición a utilizar debía ser sumergible lo que elevaba el costo considerablemente.

Además, para que el motor tenga una mejor performance y una vida útil más larga, se sugiere agregar 4 disipadores de calor en cada una de las caras del motor. Esto disminuiría considerablemente la temperatura alcanzada por el motor durante todo el ensayo, reduciendo los riesgos de exceso de temperatura.

Con respecto al procesador, sería ideal reemplazar el microcontrolador Arduino por un PLC, sistema más robusto para aplicaciones de automatización. Esto simplificaría la certificación del dispositivo tanto para un uso industrial como para la realización de papers y publicaciones en revistas científicas.

Dentro del sistema de calentamiento, se proponen mejoras como el reemplazo de las resistencias eléctricas por otro sistema de calefacción con mayor potencia y robustez. Si bien el diseño elegido cumple con los requisitos y brinda una excelente performance, el sustituir estos componentes por otro sistema mejora la vida útil e incrementa el profesionalismo del dispositivo. Por otro lado, durante el período de investigación donde se consultó a expertos de la materia que se investigaba, el Ingeniero Zujew recomendó utilizar un recipiente espejado o recubrir el interior de la cuba secundaria, transparente, con pintura plateada. De este modo, disminuiría considerablemente la pérdida de calor por radiación, factor que tiene un gran peso respecto a la pérdida de calor junto a la convección. La pintura plateada aumenta el índice de reflexión y mejora la conservación de la temperatura,

reduciendo el consumo de energía. Se recomienda entonces colocar una tapa a esta cuba y recubrir todo por dentro de esta pintura.

Otro factor importante para garantizar el mayor espectro de uso del equipo, consiste en la importancia de garantizar la esterilidad del equipo para poder desarrollar estudios como el crecimiento de apósitos de piel que crecen bajo tensiones constante dentro de un medio de cultivo. Esta aplicación se estaría necesitando en laboratorios del país para mejorar la calidad y disponibilidad de injertos de piel para aquellos pacientes que sufrieron de quemaduras u otras complicaciones. Normalmente este factor se resuelve colocando las muestras dentro de una campana de esterilidad pero estas no son lo suficientemente grandes, suelen medir 1 *m* de ancho y 3 *m* de largo. Por lo tanto, la altura no alcanza para poder realizar estos ensayos allí adentro.

Por último, y no menos importante, un aspecto a tener en cuenta en el futuro es la verificación y optimización de componentes y estructura del equipo. Dado que el objetivo del proyecto fue lograr construir por completo lo propuesto, hubo diversos aspectos que son factibles de ser estudiados con mayor profundidad para lograr mejores resultados. Sin embargo, estos análisis se vieron empañando por las restricciones naturales del proyecto tales como el orden de prioridades y el tiempo. Por estas razones, proyectos futuros podrían encargarse de crear nuevas versiones de la máquina que rectifiquen el diseño actual, amplíen su uso y propongan mejoras, a través de la implementación de conceptos de diseño de máquinas, mecanismos, elementos finitos, entre otros.

# Capítulo 8

## Instructivo de Operación del Equipo

Para utilizar la máquina debe instalarse el software MatLab R2018a ya que la interfaz fue desarrollada con esta versión.

- Encender el equipo por la llave termomagnética que se encuentra en la caja eléctrica a la derecha, la parte trasera como puede verse en la Figura 8.1. El motor emitirá un leve sonido al conectarse, esto es normal y el usuario no debería preocuparse.



Figura 8.1 Llave termomagnética en posición 'OFF' para el encendido del equipo.

- Correr el archivo de la interfaz gráfica de MatLab llamado 'proyectoFinal'. Figura 8.2

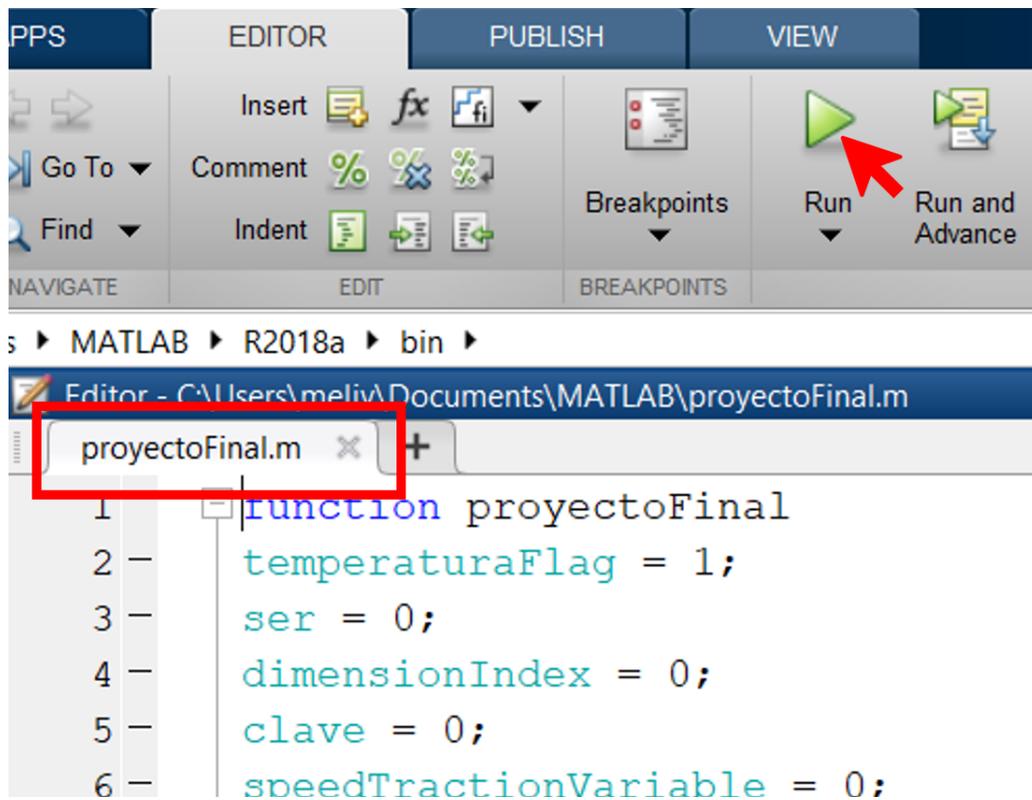
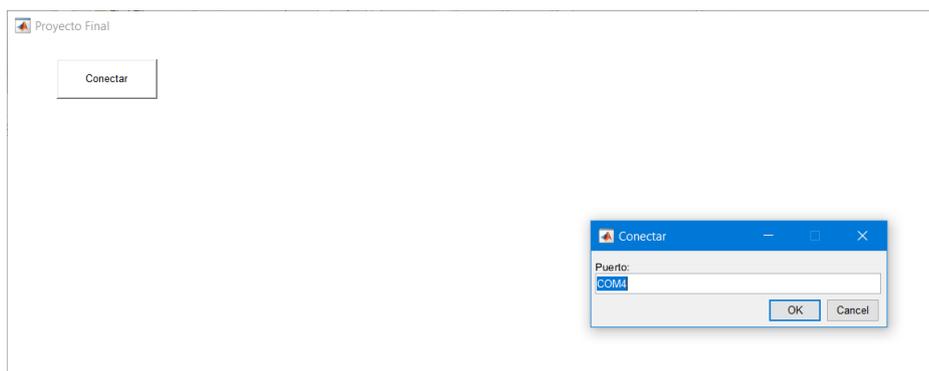


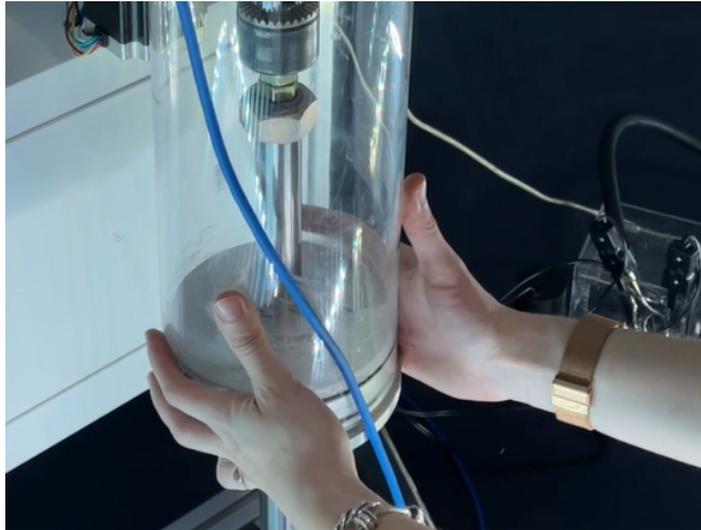
Figura 8.2 Archivo para ejectuar la interfaz gráfica de usuario en MatLab versión R2018a.

- Conectar la interfaz a Arduino mediante el botón de 'Conectar' ingresando el puerto al que se encuentra conectado el Arduino. Figura 8.3

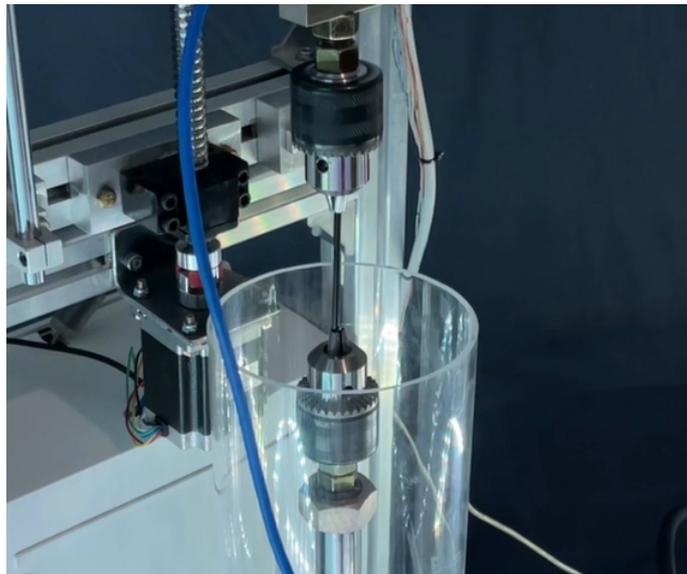


**Figura 8.3** Cuadro emergente para introducir el puerto y así conectar el equipo a la Interfaz Gráfica.

- En caso de no saber en que puerto se encuentra conectado, ir a 'Windows', 'Configuración', 'Dispositivos', 'USB'. Allí se verá como 'COM#' dónde esta conectado. En caso de ser una computadora MAC, buscar el registro para la computadora usada parecido al siguiente '/dev/cu.usbmodem1411' donde se encuentre conectado el puerto.
- Una vez conectado, decidir si se utilizará el sistema de calentamiento o no. En caso de utilizarlo, levantar la cuba principal agarrándola desde su base como se muestra en la Figura 8.4 hasta que el borde llegue a la altura de la mordaza inferior como se muestra en la Figura 8.5.



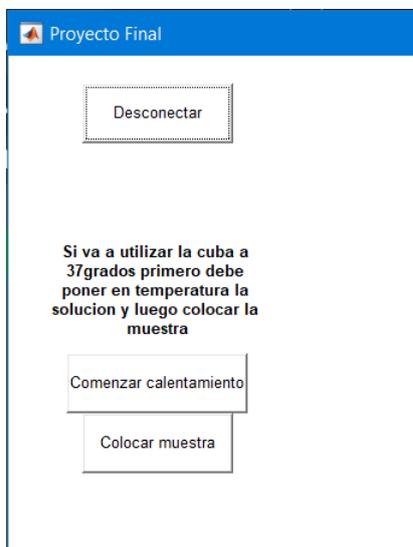
**Figura 8.4** Movimiento que se debe realizar para mover la Cuba principal hacia arriba, agarrándolo desde su base.



**Figura 8.5** Imagen ilustrativa donde se muestra hasta dónde colocar la cuba principal para llenarla con la solución deseada.

- Llenarla de la cantidad necesaria de solución fisiológica o la solución que vaya a utilizarse. Llenar con agua destilada la cuba secundaria.

- Encender el sistema de calentamiento. Figura 8.6. Notar que en seguida cambia el botón seleccionado a 'Calentando' como muestra la Figura 8.7



**Figura 8.6** Pantalla de opciones para comenzar encender el Sistema de Calentamiento.



T°



**Figura 8.7** Vista de la pantalla mientras el sistema aguarda a calentar la solución de la cuba principal.

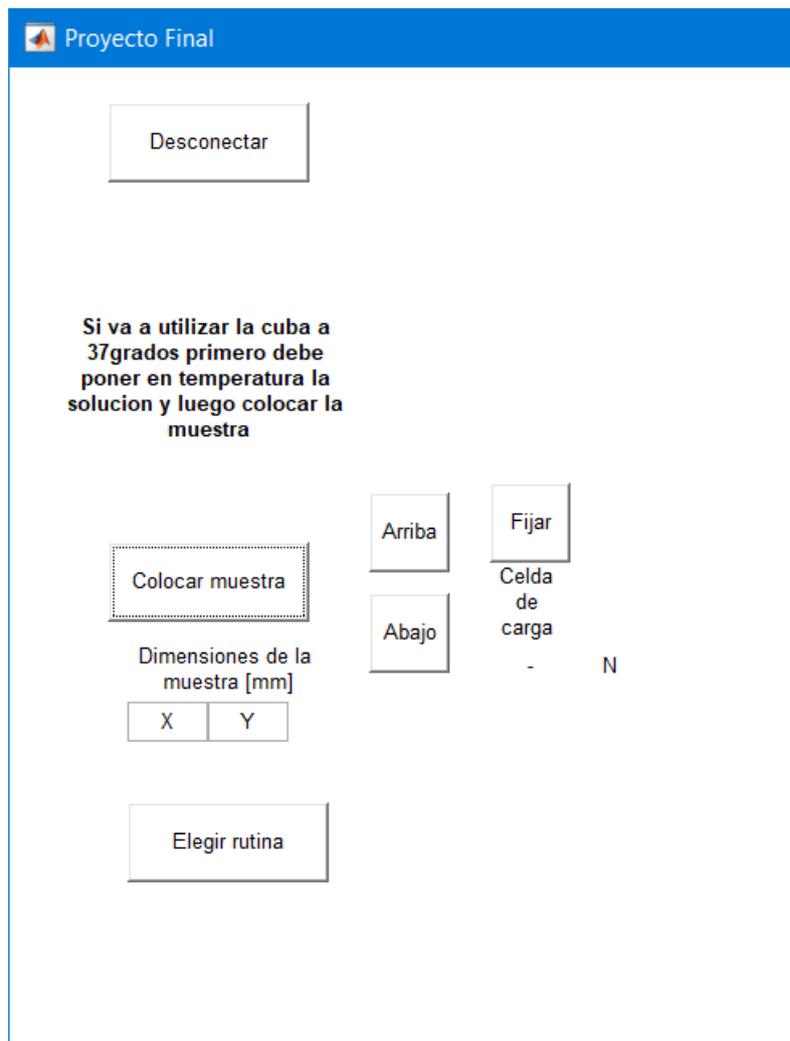
- El nivel del agua destilada baja abruptamente una vez que se enciende el sistema de calentamiento. Esto sucede porque se llenan las mangueras y la serpentina de líquido. Por lo tanto, una vez encendido, agregar más agua destilada para que llegue a tapar las resistencias.
- Esperar hasta que la interfaz avise que la solución ya está a temperatura. Cuando alcance la temperatura se verá la interfaz con el cartel de 'Listo'. Figura 8.8.

Listo!

Colocar muestra

**Figura 8.8** Pantalla de opciones para comenzar con la experiencia de la Interfaz Gráfica.

- Una vez que el sistema de calentamiento esté listo o en caso de no utilizarlo, proceder a hacer click en 'Colocar la muestra'. Figura 8.9.



**Figura 8.9** Vista de la interfaz gráfica donde se colocan las dimensiones de la muestra a ensayar, se mueven las mordazas hacia arriba y abajo para colocar la muestra y se pone en cero la celda de carga

- Colocar la muestra en la mordaza superior, ajustando al máximo con la llave especial de mandril, de manera que quede bien sujeta. Desplazar la mordaza superior mediante los botones verde y amarillo hasta que llegue al nivel de mordaza inferior.
  - A continuación, ajustar la mordaza inferior con la muestra, asegurándose que haya una gran superficie de contacto. Ajustar las mordazas con la llave nuevamente.
- Figura 8.10.



**Figura 8.10** Ajuste manual de la mordaza para una correcta sujeción de la muestra a ensayar.

- Una vez sujeta la muestra de ambos extremos, mover la mordaza superior hasta que quede levemente tirante. Esto puede realizarse desde la botonera física como puede verse en la Figura 8.11 o desde los botones de la Interfaz Gráfica.



**Figura 8.11** Botonera física para mover la mordaza superior hacia arriba de modo que quede tirante la muestra a ensayar.

- Dar en 'Fijar' (Figura 8.12) para poner en 0 (cero) la precarga de la máquina. Es decir, al colocar la muestra tendrá una cierta carga por estar tirante. Se visualizará en pantalla la precarga.



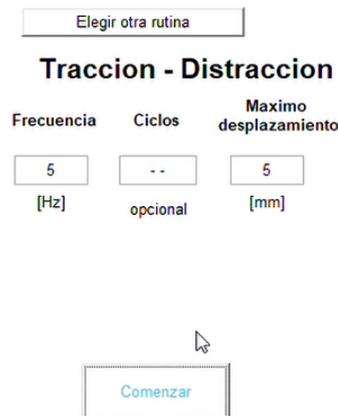
**Figura 8.12** Botón para fijar la celda de carga en cero. El valor mostrado en pantalla será aquel que corresponde al inicio del ensayo para determinar el cero de carga.

- Elegir el ensayo a realizar (Figura 8.13) y completar los parámetros deseados como se

muestra en la Figura 8.14. Aquellos marcados como '(opcional)' no son obligatorios, de modo que se deberán dejar con un guión ('-') en caso de no querer ingresar valor. En caso de no completar un valor necesario, aparecerá un cartel emergente indicando que quedó un campo sin completar.



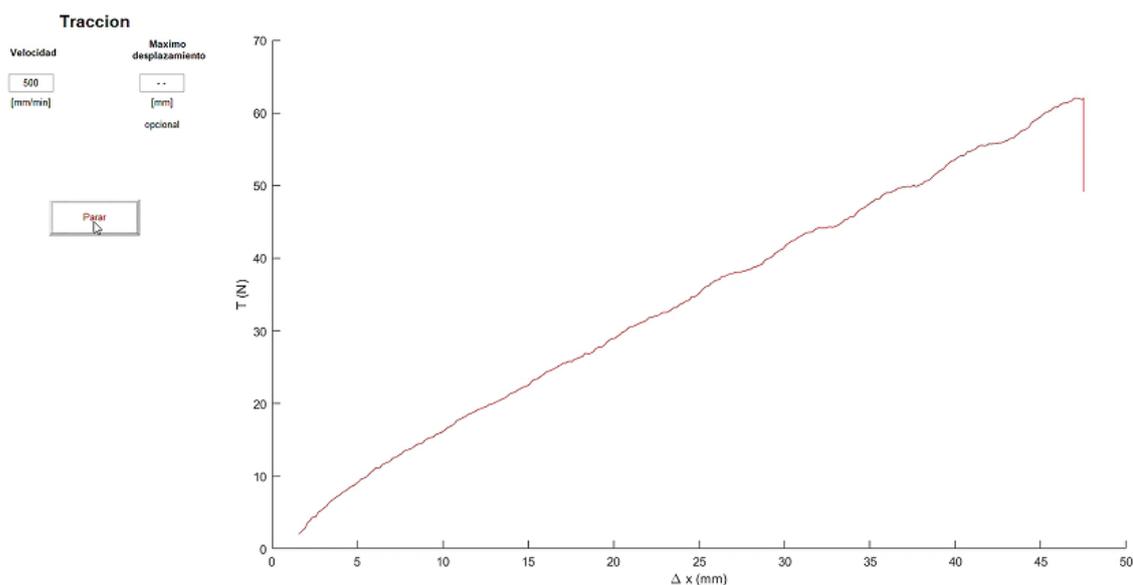
**Figura 8.13** Vista de la interfaz gráfica donde se elige la rutina a ensayar.



**Figura 8.14** Ejemplo de los parámetros ingresados para el ensayo de Tracción.

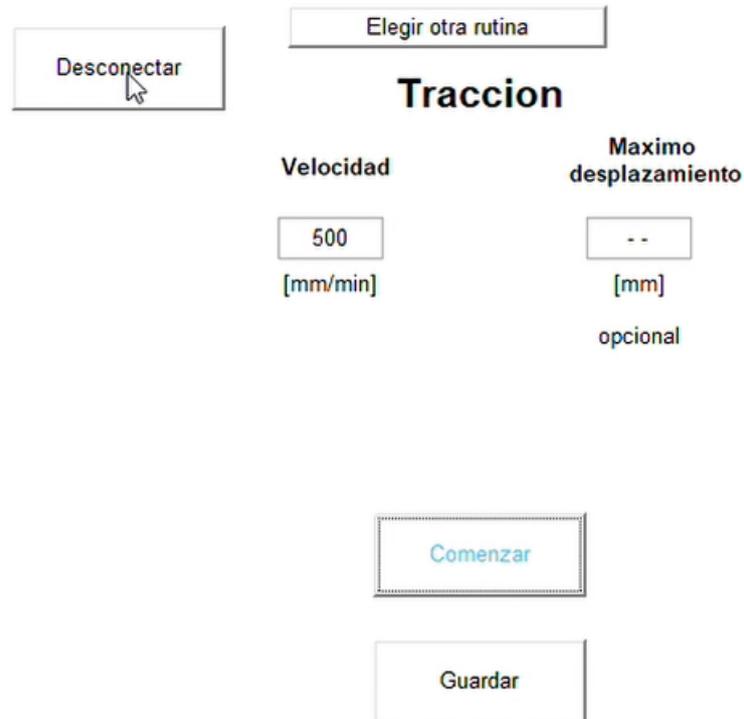
- Una vez ingresados todos los valores obligatorios, dar en 'Comenzar' para iniciar el ensayo y ver graficados las curvas de resultados. Figura 8.14.

- Al finalizar el ensayo, dar en 'Parar' (Figura 8.15) y luego en 'Guardar' (Figura 8.16) para guardar los valores de la curva en un archivo '.csv' en la computadora. En el archivo se guardan la información en columnas en el siguiente orden: Tiempo, Deformación y Carga. Soltar la muestra de la mordaza superior.



**Figura 8.15** Vista de la interfaz gráfica donde se frena el ensayo.

- Al finalizar, dar en 'Desconectar' figura 8.16. Esperar hasta que el equipo vuelva a su posición inicial, en su posición máxima superior, y luego apagar el equipo con la llave termomagnética.



**Figura 8.16** Vista de la interfaz gráfica donde se guardan los valores de la curva graficada y se desconecta la Interfaz del equipo.

- En caso de que por error, se apague antes de que el equipo haya alcanzado su punto más alto, girar el tornillo (con el motor apagado) y llevarlo a su punto por default de manera manual.



**Figura 8.17** Imagen ilustrativa donde se muestra como se debe girar el tornillo sin fin para regresar la mordaza superior a su punto más alto.

- Vaciar la cuba principal en caso de haberla utilizado a través del tapón que se encuentra en su base. Una vez vacía, quitar la tuerca que la sostiene para lavarla y secarla bien. Luego volver a colocarla y ajustar la tuerca. Lo mismo con la serpentina, mangueras y mordazas. No dejar nada sucio ni mojado.
- Quitar el agua destilada de la cuba secundaria y secarla bien. Lo mismo con las resistencias, sensores de temperatura y la bomba.

En casos de emergencia, pulsar el botón rojo que se muestra en la Figura 4.24 que le cortará el suministro de electricidad al equipo.

Una vez resuelto el problema, llevar la mordaza superior hasta su punto más alto girando el tornillo de manera manual.



- 
- [10] P. Arduino. (2021). «Arduino Mega 2560,» dirección: <https://proyectoarduino.com/arduino-mega-2560/>.
- [11] NeoAttack. (2021). «Interfaz Gráfica De Usuario,» dirección: <https://neoattack.com/neowiki/interfaz-grafica-de-usuario/>.
- [12] D. Knudson, *Fundamentals of Biomechanics, Second Edition*. Springer, 2007.
- [13] Y. Fung, *Biomechanics, Mechanical Properties of Living Tissues, Second Edition*. Springer, 1993.
- [14] MechaniCalc. (2021). «Mechanical Properties of Materials,» dirección: <https://mechanicalc.com/reference/mechanical-properties-of-materials#stress-strain-approx>.
- [15] C. T. D. L. M. 2. año Ingeniería Civil, *Ensayo de Tracción estática*. Repositorio, 2021. dirección: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/2\\_anio/tecnologia\\_materiales/files/TP%5C%20N%5C%C2%5C%B08%5C%20-%5C%20Tracci%5C%C3%5C%B3n%5C%20est%5C%C3%5C%A1tica.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/2_anio/tecnologia_materiales/files/TP%5C%20N%5C%C2%5C%B08%5C%20-%5C%20Tracci%5C%C3%5C%B3n%5C%20est%5C%C3%5C%A1tica.pdf).
- [16] A. G. Arias y C. G. Arias, *Laboratorio de ensayos industriales, 14ava edición*. Ediciones Litenia, 1999.
- [17] A. TECNOLOGIA. (2021). «TIPOS DE MOTORES ELECTRICOS,» dirección: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/tipos-de-motores-electricos.html>.
- [18] I. Mecafenix. (2017). «MOTOR PASO A PASO ¿QUÉ ES Y CÓMO FUNCIONA?» Dirección: <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>.
- [19] M. Grueso. (2018). «Hierro dulce,» dirección: <http://blogrecuperacionesmanuelgrueso.es/hierro-dulce/>.
- [20] E. J. Carletti. (2020). «Motores paso a paso - Características básicas,» dirección: [http://robots-argentina.com.ar/MotorPP\\_basico.htm](http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm).
- [21] H. I. Isaac. (2021). «DRV8825: el driver para motores paso a paso,» dirección: <https://www.hwlibre.com/drv8825/>.
- [22] A. Valverde. (2018). «¿Cómo seleccionar el acople ideal para su aplicación?» Dirección: <https://www1.elvatron.com/transmision-potencia/c%5C%C3%5C%B3mo-seleccionar-el-acople-ideal-para-su-aplicaci%5C%C3%5C%B3n#:~:text=Un%5C%20acople%5C%20es%5C%20el%5C%20mecanismo,de%5C%20un%5C%20eje%5C%20a%5C%20otro..>
- [23] Soluciones.Lineales. (2021). «TORNILLO DE BOLAS RECIRCULANTES,» dirección: [http://www.solucioneslineales.com/tornillo-de-bolas-recirculantes/#:~:text=Un%5C%20tornillo%5C%20de%5C%20bolas%5C%20recirculantes%5C%20\(o%5C%20](http://www.solucioneslineales.com/tornillo-de-bolas-recirculantes/#:~:text=Un%5C%20tornillo%5C%20de%5C%20bolas%5C%20recirculantes%5C%20(o%5C%20)

- 5C%20%5C%22husillo%5C%20de%5C%20bolas%5C%20recirculantes, en%5C%20movimientos%5C%20axiales%5C%20o%5C%20lineales..
- [24] THK. (2020). «Husillos de bolas, Catalogo general,» dirección: [https://tech.thk.com/es/products/pdf\\_download.php?file=511LS\\_15\\_BallScrew.pdf](https://tech.thk.com/es/products/pdf_download.php?file=511LS_15_BallScrew.pdf).
- [25] J. M. Gere y S. P. Timoshenko, *Mecánica de Materiales, 4ta edición*. International Thomson Editores, 1999.
- [26] HBM. (2020). «Cómo medir cargas con confianza: artículos técnicos, know-how, consejos y trucos,» dirección: <https://www.hbm.com/es/3230/medicion-de-cargas/p>.
- [27] Flexar. (2021). «CZPRODUCTOS,» dirección: <http://www.flexar.com.ar/productos/cz/>.
- [28] L. JIANGSU WANTAI MOTOR CO. (2020). «Testing Report:57BYGH633 Speed-Torque characteristics,» dirección: <https://www.roboter-bausatz.de/media/pdf/9c/11/8e/RBS11235-Speed-Torque-characteristics-of-57BYGH633.pdf>.
- [29] Rexroth. (2020). «Elementos básicos de mecánica,» dirección: <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1rNzuHpq9oOa1CFwgh3TIY1GGiz528mek>.
- [30] ARDUINO.cl. (2020). «Arduino Mega 2560,» dirección: <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/>.
- [31] MathWorks. (2020). «Matemáticas. Gráficos. Programación.,» dirección: [https://la.mathworks.com/products/matlab.html?s\\_tid=hp\\_ff\\_p\\_matlab](https://la.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_ff_p_matlab).
- [32] L. A. MathWorks. (2020). «Gui de MATLAB,» dirección: <https://la.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>.
- [33] F. Kreith, R. M. Manglik y M. S. Bohn, *Principios de transferencia de calor, 7ta edición*. Cengage Learning, 2012.
- [34] M. Pretel y C. Zujew, *Sistemas de Control 23.03, Trabajo Práctico N°2 - Controlador PID - Instituto Tecnológico de Buenos Aires*. 2019.
- [35] Picuino. (2021). «Método de Ziegler-Nichols,» dirección: <https://sites.google.com/site/picuino/ziegler-nichols>.
- [36] R. P. Sottile. (2021). «Encoders Incrementales,» dirección: <https://dscs.webcindario.com/posicion/Encoder%5C%20Incremental/encoders%5C%20incrementales.htm>.
- [37] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 8ava edición*. McGraw-Hill, 2008.

## APÉNDICES

# Apéndice A

## Propuesta de Proyecto

### Propuesta de Proyecto Final de Carrera Diseño y construcción de un dispositivo de ensayos mecánicos para tejidos biológicos y biomateriales.

#### Objetivo

Diseñar y construir un dispositivo de ensayos mecánicos de tracción uniaxiales cuyas características permitan realizar y registrar los parámetros obtenidos durante ensayos dinámicos y cuasiestáticos en biomateriales y/o tejidos biológicos.

#### Perfil de los Estudiantes

El proyecto está dirigido a un equipo interdisciplinario formado por estudiantes de Ing. Mecánica y Bioingeniería que estén cursando sus materias de proyecto final de carrera.

#### Aplicaciones del Equipo a Construir

##### Didáctica

El dispositivo a construir tiene fines principalmente educativos. Permitirá mostrar ensayos dinámicos, cuasiestáticos, de creep y de relajación de tensiones en tejidos biológicos y materiales viscoelásticos.

El dispositivo puede utilizarse para realizar demostraciones o trabajos prácticos en las siguientes materias de las carreras de Bioingeniería:

- 16.03 - Fisiología
- 16.12 - Biomateriales
- 16.13 - Biomecánica
- 16.23 - Órganos Artificiales
- 16.27 - Ingeniería de Tejidos
- 16.30 - Proyecto Final de Carrera

##### Investigación

En el plano de la investigación, el dispositivo podría utilizarse para caracterizar biomateriales o tejidos, encontrar su ecuación constitutiva, obtener los parámetros mecánicos de interés y predecir su comportamiento mecánico en situaciones de uso normal. El desarrollo de implantes efectivos mediante ingeniería de tejidos debe involucrar el conocimiento de las características de tejido nativo [1]

##### Industria

Un posible uso eventual es la atención a industrias en etapa de I&D que requieran el ensayo de materiales viscoelásticos, la determinación de sus parámetros mecánicos, curvas características y condiciones de falla.

#### Propone y cotutorea

Dra. Sandra Wray

Especificaciones del Equipo a Diseñar y Construir

- Tipos de **ensayo** a realizar
  - Ensayo de tracción dinámico: carga y descarga cíclica para evaluar el comportamiento de muestras de materiales viscoelásticos.
  - Ensayo de tracción cuasiestático: carga y descarga a baja velocidad de deformación para evaluar las propiedades elásticas de un material viscoelástico.
  - Ensayos de creep: tensión constante, evaluar deformaciones
  - Ensayo de relajación de tensiones: deformación constante, evaluar tensiones [2]
- Tipos de **materiales** a ensayar
  - Tejidos duros y blandos
  - Biomateriales elásticos y viscoelásticos
  - Otros materiales viscoelásticos
- Tipos de **probetas** a ensayar
  - Planas
  - Cilíndricas
  - Tejidos de geometría irregular

Dimensiones de las muestras	
Largo	6-100 mm
Ancho	2-30 mm
Espesor	0,5-10 mm

- **Condiciones** de los ensayos:
  - Posibilidad de sumergir probetas en cubeta con solución fisiológica mantenida a T controlada y constante de  $37 \pm 1$  °C [3, 4]

Condiciones de los ensayos		
Rango de carga	0,1 - 500,0 N	[5, 6, 7]
Rango de deformaciones (hasta ruptura)	0,5 - 50 mm	[2, 6]
Velocidad de deformación	0,05 - 1000 mm/min	[2, 6, 8, 9]
Velocidad máxima de ensayos cuasiestáticos	1 mm/mm/s	[9, 10]
Frecuencia de carga y descarga ensayos dinámicos	0,1 - 5,0 Hz	[6]
Ensayo de Creep	Tensiones máximas	20 MPa [11]
	Tiempo máximo del ensayo	15 min [12, 13]
Ensayo de Relajación de Tensiones	Deformaciones máximas	40 mm [11, 14]
	Tiempo máximo del ensayo	15 min [12, 13]

- Características del **Software**:
  - Frecuencia de muestreo mínima de 250 Hz
  - Procesamiento instantáneo de datos (calibración, ploteo, tensiones y cargas máximas, histéresis, etc.)
  - Visualización de parámetros de los ensayos simil sistema Bluehill de Instron
    - Gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$
    - Gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$  cíclicos (histéresis)
    - Gráficas simultáneas de  $\sigma(t)$  y  $\epsilon(t)$  en ensayos de Creep y Relajación de Tensiones
  - Descarga de datos en formato .txt o .csv

- **Características del Hardware:**
  - Transductor de carga precisión mínima 0.25%
  - Output para descarga de datos (USB)
- **Otras características**
  - Posibilidad de realizar acondicionamiento de muestras [10, 11, 15]
  - Mordazas sumergibles: neumática (por ejemplo [16]) o mecánica con papel de lija para aumentar el agarre en los puntos de contacto [9].
  - Posibilidad de incorporar extensómetro (hardware y software)
  - Tensiones máximas esperadas en ensayos de tracción hasta la rotura:

Tensiones Máximas Esperadas en Tejidos		
Cartílago	40 MPa	[8]
Piel	7 MPa	[6, 17]
Tendones	17 MPa	[7]
Ligamentos	50 MPa	[18]
Hueso cortical	140 MPa	[11]

- Referencias a investigaciones o a equipos existentes:
  - Low-Force Testing of Tissues and Biomaterials In Vitro [19]
  - BioPuls Temperature Controlled Bath [3]
  - Ensayos de tracción cuasiestáticos y dinámicos realizados en músculos [9]
  - Ensayos uniaxiales en miocardio y músculo papilar en humanos [10]
  - Ensayos de creep y relajación de tensiones en tejido de tráquea [14, 20]
  - Estudios biomecánicos en tejido cardíaco [21]

## Referencias

- [1] D. Butler, S. Goldstein y F. Guilak, «Functional tissue engineering: the role of biomechanics,» *Journal of biomechanical engineering*, vol. 122, nº 6, pp. 570-575, 2000.
- [2] D. SELIKTAR, R. A. BLACK, R. P. VITO y R. M. NEREM, «Dynamic Mechanical Conditioning of Collagen-Gel Blood Vessel Constructs Induces Remodeling In Vitro,» *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 28, p. 351–362, 2000.
- [3] «BioPuls Temperature Controlled Bath,» Instron, [En línea]. Available: <https://www.instron.us/en-us/products/testing-accessories/biomedical-pharmaceutical/3130-100>.
- [4] R. C. Haut y R. W. Little, «A constitutive equation for collagen fibers,» *Journal of biomechanics*, vol. 5, nº 5, pp. 423-430, 1972.
- [5] ASTM F3225 - 17, «Standard Guide for Characterization and Assessment of Vascular Graft Tissue Engineered Medical Products (TEMPS),» 2017.
- [6] E. A. Sander, K. A. Lynch y S. T. Boyce, «Development of the Mechanical Properties of Engineered Skin Substitutes After Grafting to Full-Thickness Wounds,» *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 136, nº 5, p. 051008, 2014.
- [7] E. Itoi, L. J. Berglund, J. J. Grabowski, F. M. Schultz, E. S. Growney, B. F. Morrey y K. An, «Tensile properties of the supraspinatus tendon,» *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 13, nº 4, pp. 578-584, 1995.
- [8] J. M. Peloquin, M. H. Santare y D. M. Elliott, «Advances in Quantification of Meniscus Tensile Mechanics Including Nonlinearity, Yield, and Failure,» *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 138, nº 2, p. 021002, 2016.
- [9] X. Zhai, E. A. Nauman, Y. Nie, R. J. Lycke y W. W. Chen, «Mechanical Response of Human Muscle at Intermediate Strain Rates,» *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 141, nº 4, p. 044506, 2019.
- [10] F. Fatemifar, M. Feldman, M. Oglesby y H.-C. Han, «Comparison of Biomechanical Properties and Microstructure of Trabeculae Carneae, Papillary muscles, and Myocardium in Human Heart,» *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 141, nº 2, p. 021007, 2019.
- [11] A. A. Abdel-Wahab, K. Alam y V. V. Silberschmidt, «Analysis of anisotropic viscoelastoplastic properties of cortical bone tissues,» *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 4, nº 5, pp. 807-820, 2011.
- [12] S. Bowman, L. Gibson, W. Hayes y T. McMahon, «Results from demineralized bone creep tests suggest that collagen is responsible for the creep behavior of bone,» *Journal of biomechanical engineering*, vol. 121, nº 2, pp. 253-258, 1999.
- [13] E. Tönük y M. B. Silver-Thorn, «Nonlinear viscoelastic material property estimation of lower extremity residual limb tissues,» *Journal of biomechanical engineering*, vol. 126, nº 2, pp. 289-300, 2004.
- [14] F. Safshekan, M. Tafazzoli-Shadpour, M. Abdouss y M. B. Shadmehr, «Viscoelastic Properties of Human Tracheal Tissues,» *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 139, nº 1, p. 011007, 2016.
- [15] Y.-C. Fung, «Biomechanics: mechanical properties of living tissues,» Springer Science & Business Media, 2013, pp. 293-294.
- [16] «BioPuls Submersible Pneumatic Side Action Grips,» Instron, [En línea]. Available: <https://www.instron.us/en-us/products/testing-accessories/grips/2752-005>.
- [17] F. H. Silver, J. W. Freeman y D. DeVore, «Viscoelastic properties of human skin and processed dermis,» *Skin research and technology*, vol. 7, nº 1, pp. 18-23, 2001.
- [18] P. Vena, D. Gastaldi y R. Contro, «A constituent-based model for the nonlinear viscoelastic behavior of ligaments,» *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 128, nº 3, pp. 449-457, 2006.
- [19] Instron, «<https://www.instron.us/en-us/testing-solutions/by-material/biomaterials/tension/tissues--biomaterials>,» [En línea].
- [20] O. Trabelsi, A. Del Palomar, J. López-Villalobos, A. Ginel y M. Dobaré, «Experimental characterization and constitutive modeling of the mechanical behavior of the human trachea,» *Medical engineering & physics*, vol. 32, nº 1, pp. 76-82, 2010.
- [21] S. Ma y G. Vunjak-Novakovic, «Tissue-engineering for the study of cardiac biomechanics,» *Journal of biomechanical engineering*, vol. 138, nº 2, p. 021010, 2016.

# Apéndice B

# Liquidación de gastos

Gastos materiales comprados		
Componente	Proveedor	Precio AR\$
Fuente Switching 12V-2A	ML	858,47
Fuente Alimentación 48V-3A	ML	2.096,19
Fuente Switching 24V-5A Transformador	ML	1.368,99
Fuente Switching 24V-10A(regulada)	ML	1.999,00
Módulo para celda de carga	ML	229,00
Mini Protoboard	ML	199,00
Sensor temperatura DS18B20	ML	816,00
Motor Stepper 57BYGH633	Gizmojo Store	3.077,00
Stepper motor driver DQ542MA	Gizmojo Store	3.683,00
Cuba acrílica cilíndrica	Mundo acrílico	4.275,00
Arduino Mega 2560	ML	1.641,99
Escuadra aluminio 4040	Ingia	854,76
Tuerca slider M4	Ingia	872,00
Tornillos cabeza botón M3/M4/M5	Ingia	373,76
Tornillo sin fin + soportes y accesorios	Ingia	19.060,69
Bomba de agua 12V	Central Bier	2.345,00
Celda de carga tipo S	Flexar SRL	11.404,25
Resistencias calentadoras	ML	810,00
Rotula	Shuk Tornado	2.082,82
Perfiles aluminio tipo Bosch	Ingia	7.407,62
Cuba secundaria	Mundoplast	1.468,00
Acople motor	Ingia	1.683,59
Barra Pulida	AcerosCas	1.512,00
Pulsadores	ML	1.193,99
Extras electrónica	SyC	600,72
Artículos de bulonería	Bulonería ANSA	2.341,22
Mordazas	ML	1.800,00
<b>Subtotal detalle</b>		<b>76.072,87</b>

**Cuadro B.1** Gastos en compras de componentes.

<b>Detalle tornillo sin fin + soporte y accesorios</b>		
<b>Cantidad</b>	<b>Componente</b>	<b>Precio total AR\$</b>
2	Barra templada	1.406,02
2	Corte biselado barra templada	140,60
4	SK12	911,37
4	SCS12uu	1.853,04
1	Soportes BK-BF12	3.581,96
1	Tuerca SFU 1605 p/ husillo	3.212,67
6	Perfil 4040 tipo Bosch x100mm	1.077,38
2	Corte perfiles	127,05
1	Tornillo a bolas 1605x450mm + mecanizado	6.750,59
<b>Subtotal detalle</b>		<b>19.060,69</b>

**Cuadro B.2** Detalle de costos del tornillo sin fin y accesorios para su instalación.

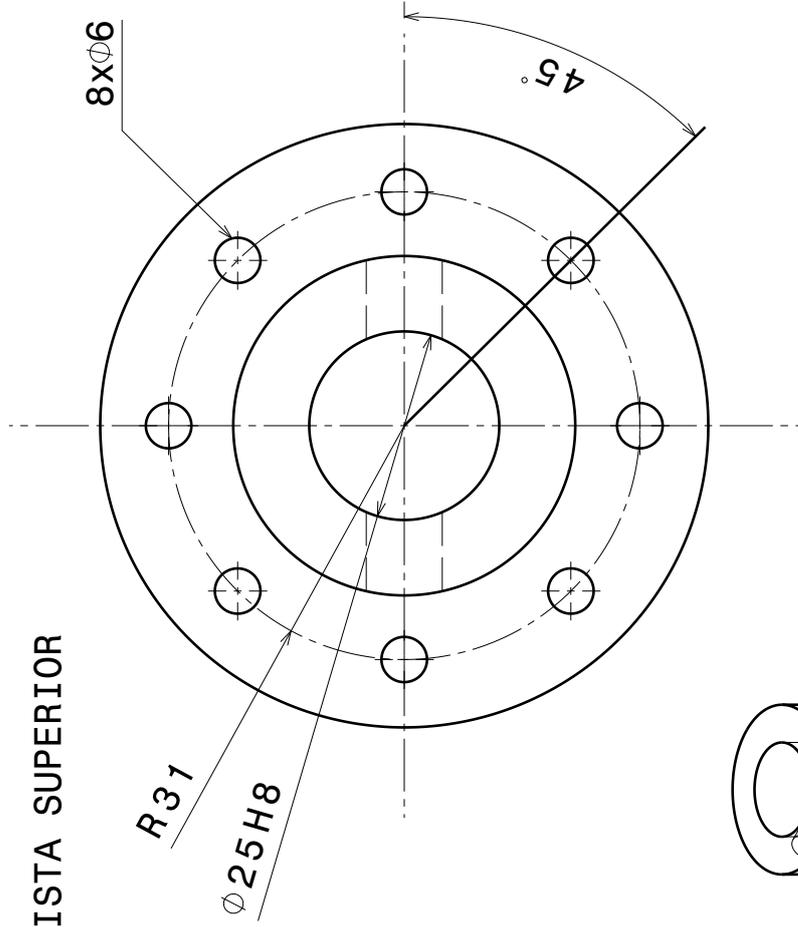
<b>Gastos en materiales mecanizados</b>	
<b>Componente</b>	<b>Precio AR\$</b>
Brida soporte	5.445,00
Tapa inferior cuba	5.082,00
Unión soportes guías	3.872,00
Unión soporte tornillo inf	4.235,00
Unión soporte tornillo sup	3.630,00
Unión tuerca-placa	8.470,00
Placa móvil	350,00
Placa base	410,00
Soporte motor pap	450,00
Unión celda-placa	10.285,00
Anillo sostén	1.452,00
Placas rigidizadoras	620,00
Mecanizado eje pulido	345,00
Adaptador roscas	490,00
Proveedor	Taller mecanizado particular Uffinger Guillermo
<b>Subtotal mecanizado + materiales</b>	<b>45.136,00</b>

Cuadro B.3 Gastos en materiales + mecanizado.

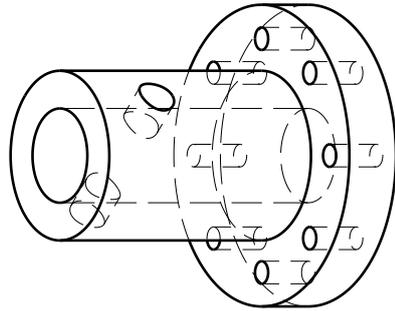
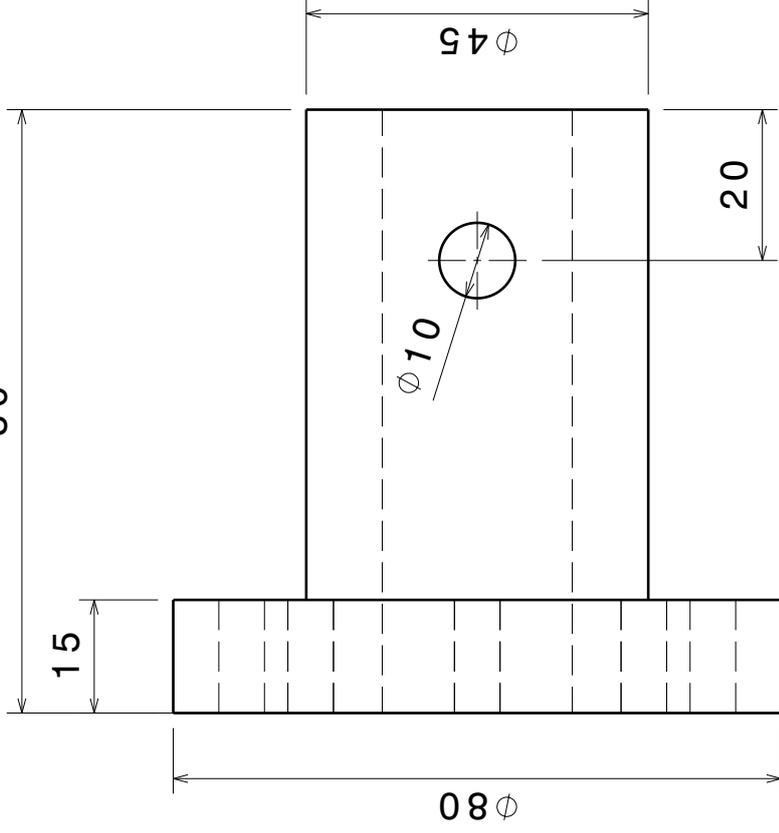
# **Apéndice C**

## **Planos Mecanizado**

VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL



VISTA ISOMÉTRICA

Rev.	Descripción	Fecha	VºBº
SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO	mm [pulg]	Mecanizado	ITBA
Eliminar rebabas y cantos vivos Rugosidad superficial: 3.2[.125] Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		Denominación	
Aprobaciones		Brida Soporte	
Dibujó: asoldan		Material	Peso [kgf]
Aprobó: XXX		A4	Aluminio
Proyecto: Proyecto Final 115		Esc.	Plano N°
±1%		±0°30'	1:1
±0,1		±0,2	±0,3
±0,2		±0,3	±0,5
±0,5		±0,8	±1,2
±1,2		±2	
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares		Fecha	
hasta 10		12/8/2020	
±1°		xx/xx/xxxx	

D

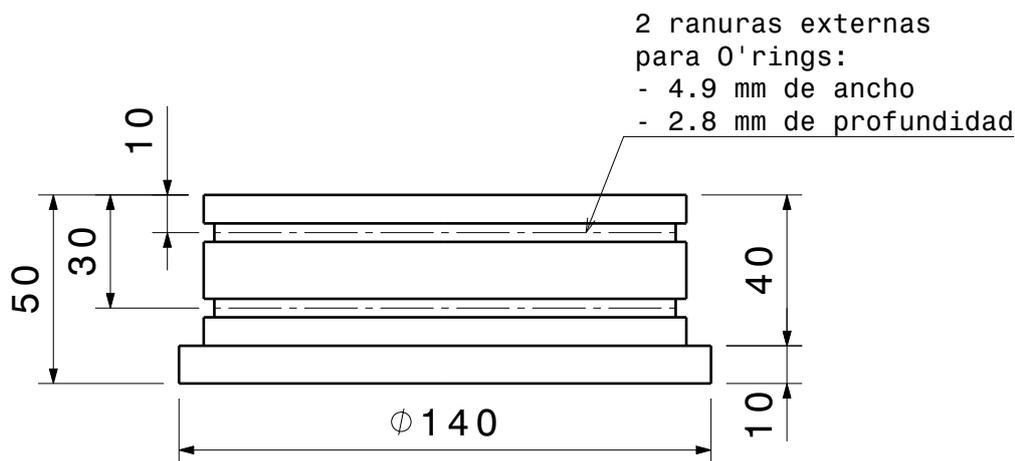
C

B

A

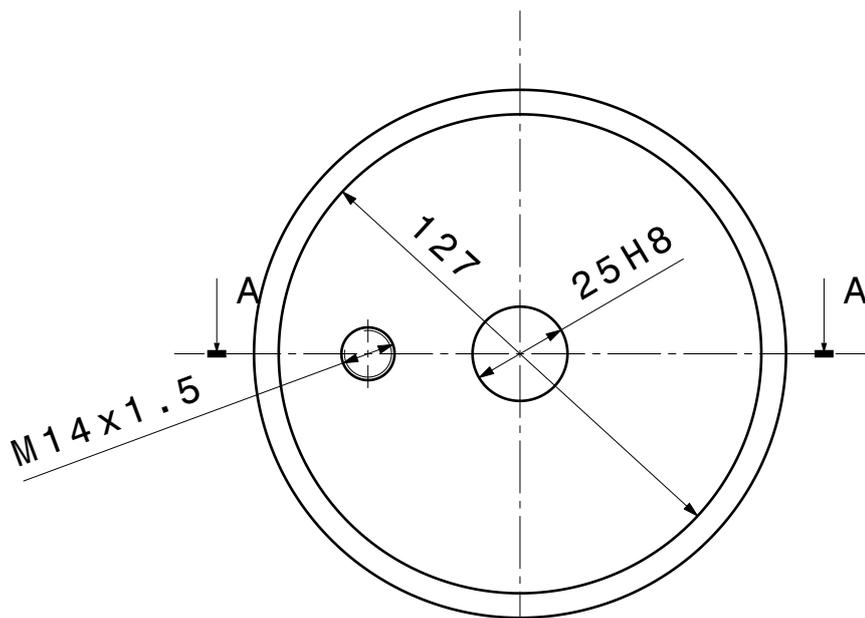
4

4



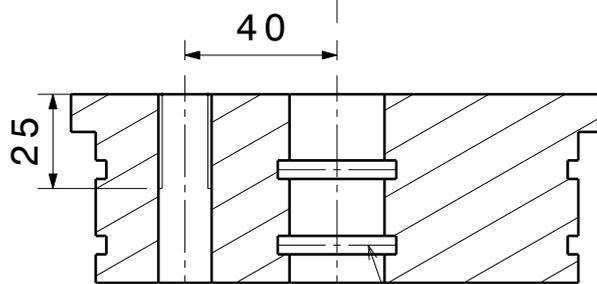
3

3



2

2



Corte A-A

2 ranuras internas para O'rings:  
 - 4.9mm de ancho  
 - 2.8mm de profundidad

1

1

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha VºBº

Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

Cliente

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos  
 Rugosidad superficial 3.2[.125]  
 Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)



Mecanizado

ITBA

Denominación

Tapa inferior cuba

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones Fecha

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó: dfiandrino 29/3/2021

A4 Material Aluminio Peso [kgf]

Aprobó: XXX xx/xx/xxxx

Proyecto: Proyecto Final 115

Esc. 1:2 Plano Nº 02

D

A

A

m

C

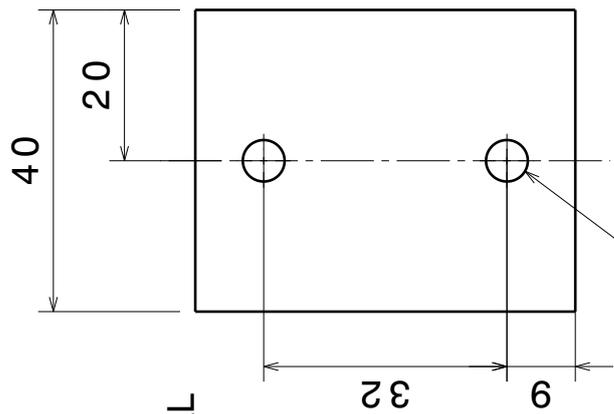
D

4

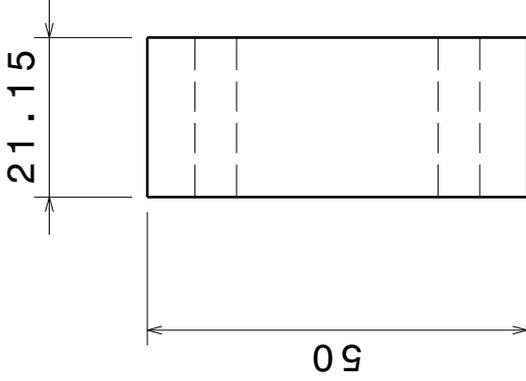
3

2

1



VISTA FRONTAL



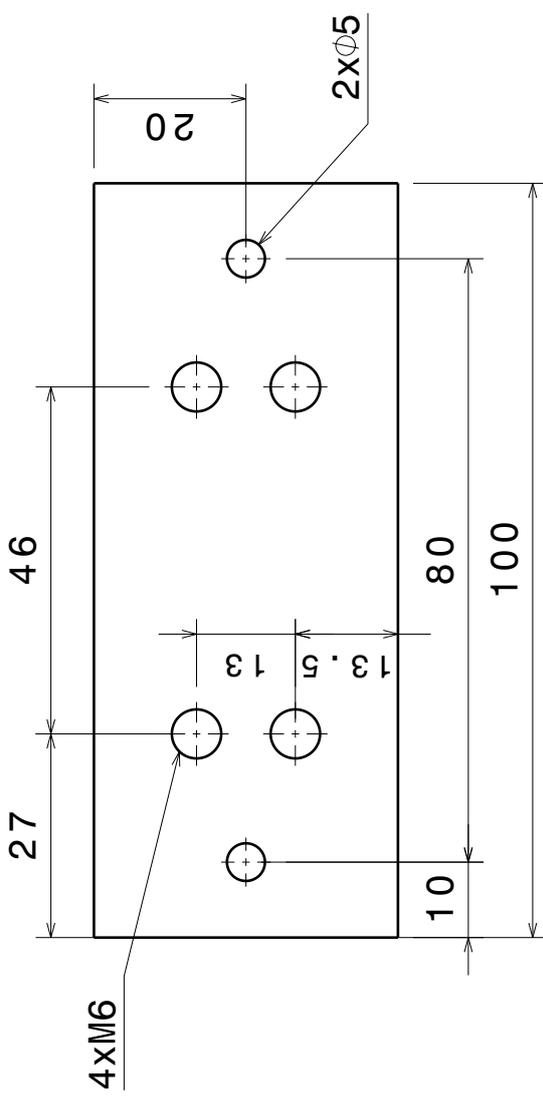
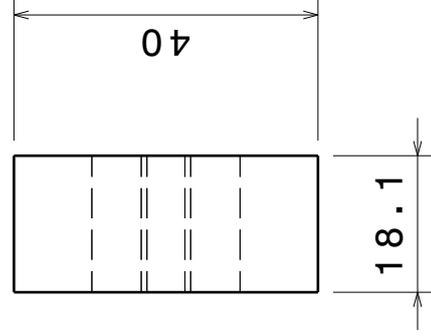
VISTA IZQUIERDA

2 x Ø5.5

Rev.		Descripción		Fecha		VºBº	
SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO		mm [pulg]		Mecanizado		ITBA	
Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media		Eliminar rebabas y cantos vivos		Denominación		Unión soporte guías	
Desviaciones permisibles para dimensiones Lineales		Rugosidad superficial 3.2[.125]		Material		Aluminio	
desde más de 30 hasta 6		Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		A4		Peso [kgf]	
más de 30 hasta 120		Fecha		Esc.		1:1	
más de 120 hasta 400		13/8/2020		Proyecto: Proyecto Final 115		Plano N° 03	
más de 400 hasta 1000		Dibujó: asoidan		Aprobó: XXX		1:1	
más de 1000 hasta 2000		Aprobaciones		13/8/2020		xx/xx/xxxx	
más de 2000 hasta 4000		Dibujó: asoidan		13/8/2020		xx/xx/xxxx	
más de 4000 hasta 6000		Aprobó: XXX		13/8/2020		xx/xx/xxxx	
más de 6000 hasta 10000		Proyecto: Proyecto Final 115		13/8/2020		xx/xx/xxxx	
más de 10000 hasta 20000		±1%		±0°20'		±0°10'	
más de 20000 hasta 40000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000 hasta 60000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000 hasta 100000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000 hasta 200000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000 hasta 400000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000 hasta 600000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000 hasta 1000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000 hasta 2000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000 hasta 4000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000 hasta 6000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000 hasta 10000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000 hasta 20000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000 hasta 40000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000 hasta 60000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000000 hasta 100000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000000 hasta 200000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000000 hasta 400000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000000 hasta 600000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000000 hasta 1000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000000 hasta 2000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000000 hasta 4000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000000 hasta 6000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000000 hasta 10000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000000 hasta 20000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000000 hasta 40000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000000 hasta 60000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000000000 hasta 100000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000000000 hasta 200000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000000000 hasta 400000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000000000 hasta 600000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000000000 hasta 1000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000000000 hasta 2000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000000000 hasta 4000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000000000 hasta 6000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000000000 hasta 10000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000000000 hasta 20000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000000000 hasta 40000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000000000 hasta 60000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000000000000 hasta 100000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000000000000 hasta 200000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000000000000 hasta 400000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000000000000 hasta 600000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000000000000 hasta 1000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000000000000 hasta 2000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000000000000 hasta 4000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000000000000 hasta 6000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000000000000 hasta 10000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000000000000 hasta 20000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000000000000 hasta 40000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000000000000 hasta 60000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000000000000000 hasta 100000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000000000000000 hasta 200000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000000000000000 hasta 400000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000000000000000 hasta 600000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000000000000000 hasta 1000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000000000000000 hasta 2000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000000000000000 hasta 4000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000000000000000 hasta 6000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000000000000000 hasta 10000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000000000000000 hasta 20000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000000000000000 hasta 40000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000000000000000 hasta 60000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000000000000000000 hasta 100000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000000000000000000 hasta 200000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000000000000000000 hasta 400000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000000000000000000 hasta 600000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000000000000000000 hasta 1000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000000000000000000 hasta 2000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000000000000000000 hasta 4000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000000000000000000 hasta 6000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000000000000000000 hasta 10000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000000000000000000 hasta 20000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000000000000000000 hasta 40000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000000000000000000 hasta 60000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000000000000000000000 hasta 100000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000000000000000000000 hasta 200000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000000000000000000000 hasta 400000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000000000000000000000 hasta 600000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000000000000000000000 hasta 1000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000000000000000000000 hasta 2000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000000000000000000000 hasta 4000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000000000000000000000 hasta 6000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000000000000000000000 hasta 10000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000000000000000000000 hasta 20000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000000000000000000000 hasta 40000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000000000000000000000 hasta 60000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000000000000000000000000 hasta 100000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000000000000000000000000 hasta 200000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000000000000000000000000 hasta 400000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000000000000000000000000 hasta 600000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000000000000000000000000 hasta 1000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000000000000000000000000 hasta 2000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000000000000000000000000 hasta 4000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000000000000000000000000 hasta 6000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000000000000000000000000 hasta 10000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000000000000000000000000 hasta 20000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000000000000000000000000 hasta 40000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000000000000000000000000 hasta 60000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 60000000000000000000000000000 hasta 100000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 100000000000000000000000000000 hasta 200000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 200000000000000000000000000000 hasta 400000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 400000000000000000000000000000 hasta 600000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 600000000000000000000000000000 hasta 1000000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 1000000000000000000000000000000 hasta 2000000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 2000000000000000000000000000000 hasta 4000000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 4000000000000000000000000000000 hasta 6000000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 6000000000000000000000000000000 hasta 10000000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 10000000000000000000000000000000 hasta 20000000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 20000000000000000000000000000000 hasta 40000000000000000000000000000000		±1.2		±0°20'		±0°10'	
más de 40000000000000000000000000000000 hasta 60000000000000000000000000000000		±1					

A B C D

VISTA IZQUIERDA



VISTA FRONTAL

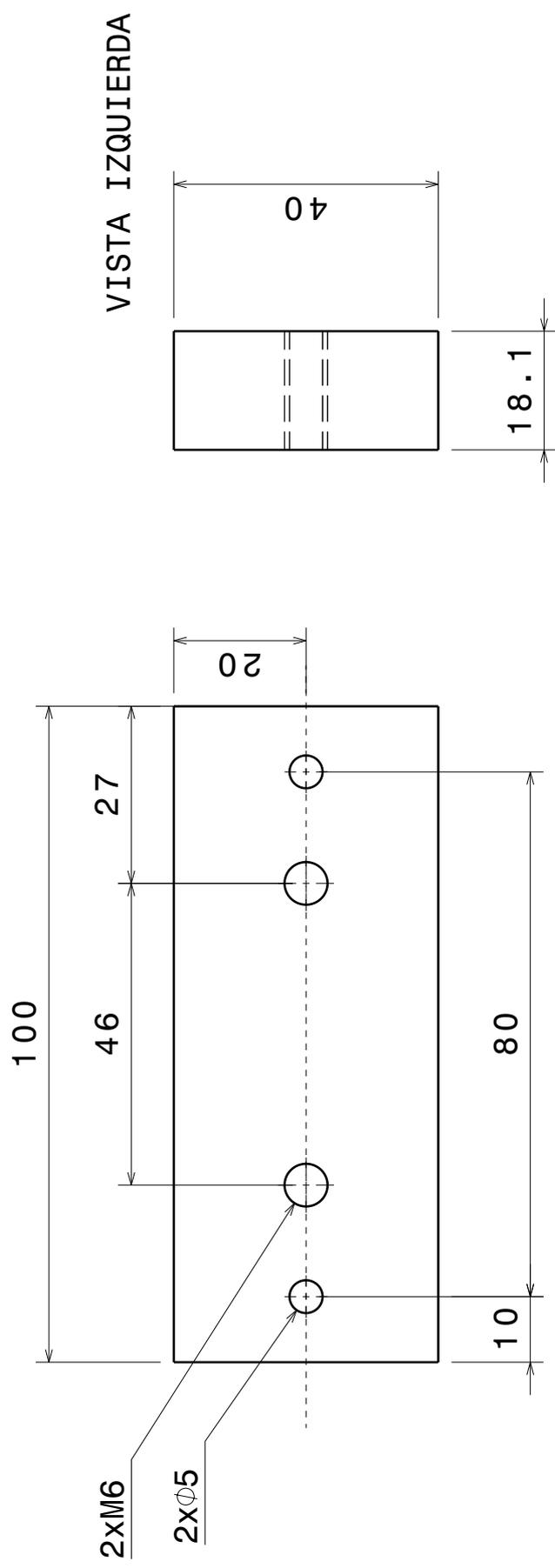
Rev.	Descripción	Fecha	VºBº
SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO	mm [pulg]		
Eliminar rebabas y cantos vivos Rugosidad superficial: 3.2[.125] Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		<b>Mecanizado</b> <b>ITBA</b>	
Aprobaciones		Denominación: Unión soporte tornillo inferior	
Dibujó:	asoidan	Material	Aluminio
Aprobó:	XXX		Peso [Kgf]
Fecha	13/8/2020	Esc. 1:1	
Proyecto: Proyecto Final 115		Plano N° 04	

4 3 2 1

D A

A B C D

4 3 2 1



VISTA FRONTAL

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media		Rev.	Descripción		Fecha	VºBº
Desviaciones permisibles para dimensiones Lineales		SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		Cliente		ITBA
desde	más de	más de	más de	Denominación		
0,5	6	120	1000	Unión soporte		
hasta	hasta	hasta	hasta	Material		
6	30	400	2000	Aluminio		
				Peso [Kgf]		
				A4		
				Esc.		
				1:1		
				Plano N°		
				05		
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares		Aprobaciones		Proyecto: Proyecto Final 115		
hasta	más de	Fecha		Esc.		
10	10	13/8/2020		1:1		
±1°	±0°30'	Dibujó: asoildan		Proyecto: Proyecto Final 115		
		Aprobó: XXX		Esc.		
		xxx/xx/xxxx		1:1		

D A

D

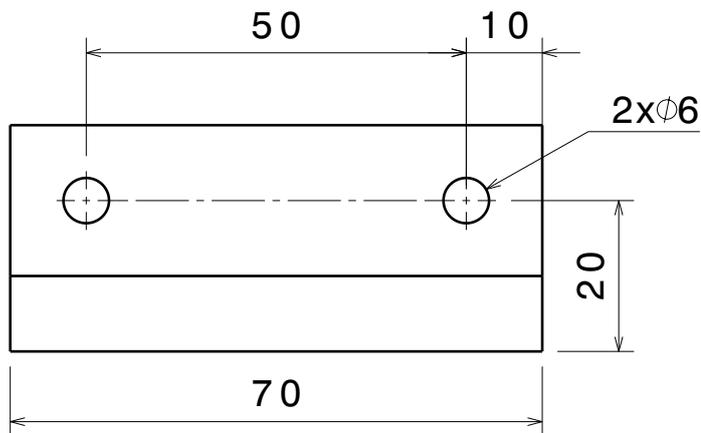
C

B

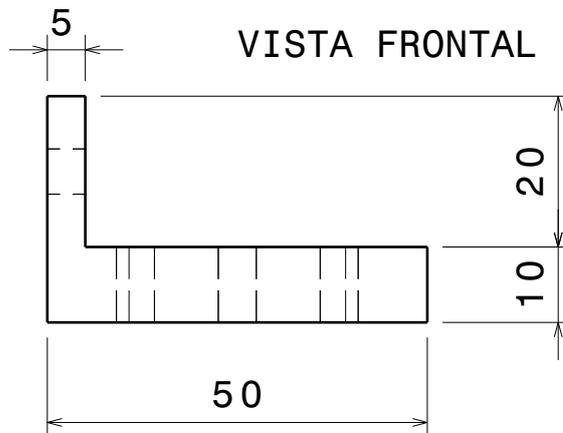
A

4

4



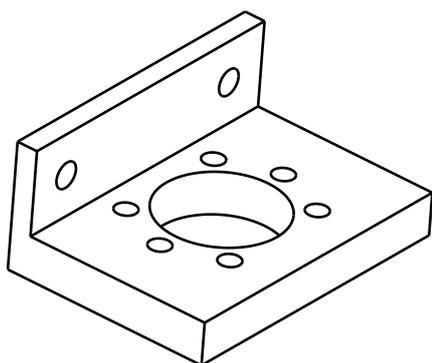
VISTA DERECHA



VISTA FRONTAL

3

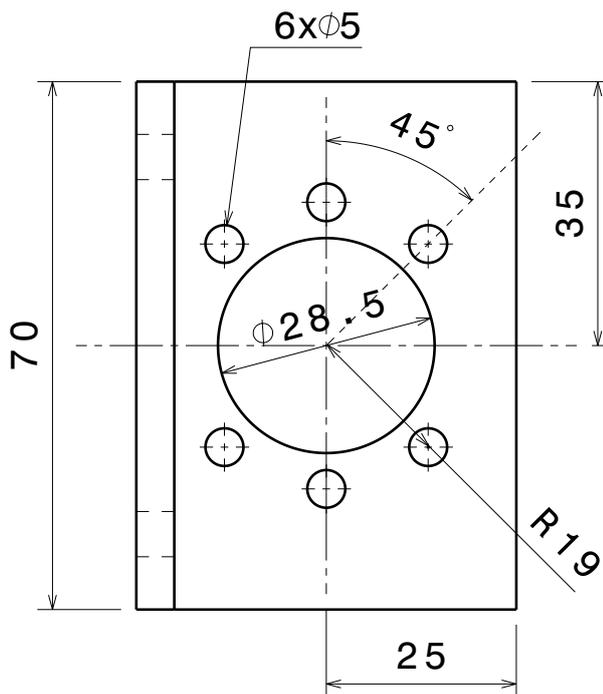
3



ISOMÉTRICA

2

2



VISTA SUPERIOR

1

1

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha

VºBº

Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

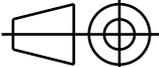
Mecanizado

Cliente

**ITBA**

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos  
Rugosidad superficial 3.2[.125]  
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)



Denominación

Union placa tuerca

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones

Fecha

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó:

asoldan

15/8/2020

Aprobó:

XXX

xx/xx/xxxx

**A4**

Material

Acero

Peso [kgf]

Proyecto:

Proyecto Final 115

Esc.

1:1

Plano N°

06

D

A





4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

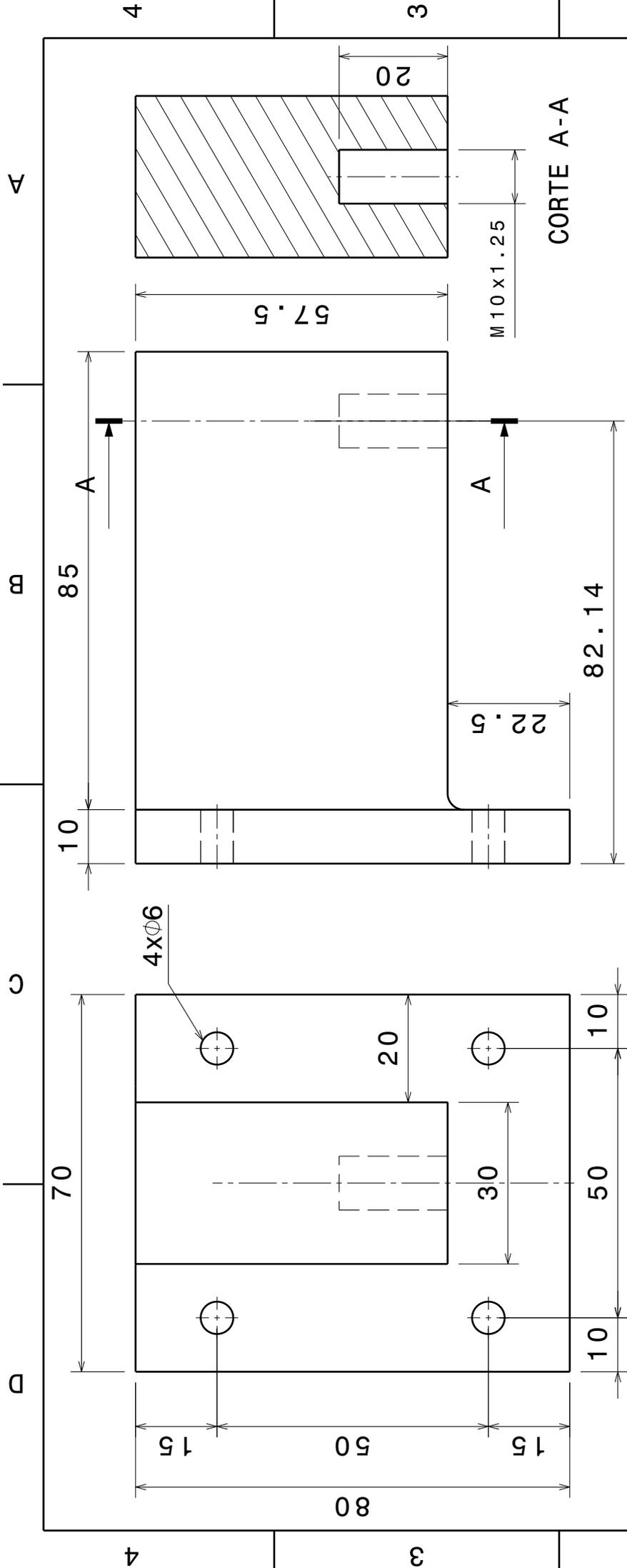
1

4

3

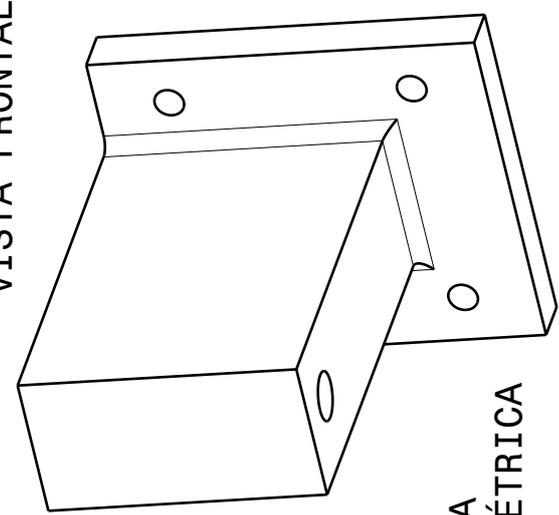
2

1



VISTA FRONTAL

VISTA LATERAL



VISTA ISOMÉTRICA

Rev.	Descripción	Fecha	Versión
SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO	mm [pulg]	Cliente	ITBA
Eliminar rebabas y cantos vivos Rugosidad superficial: 3.2[.125] Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		Denominación	Union celda-placa
Aprobaciones		Material	Peso [kgf]
Dibujó:	asoldan	A4	Acero
Aprobó:	XXX	Esc.	Plano N°
Fecha	12/10/2020	1:1	10
Proyecto: Proyecto Final 115			

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media	
Desviaciones permisibles para dimensiones Lineales	
desde más de 30 hasta 6	±0,2
más de 6 hasta 30	±0,3
más de 30 hasta 120	±0,5
más de 120 hasta 400	±0,8
más de 400 hasta 1000	±1,2
más de 1000 hasta 2000	±1,2
más de 2000 hasta 4000	±2
Desviaciones permisibles para dimensiones angulares	
hasta 10	±1°
más de 10 hasta 50	±0°30'
más de 50 hasta 120	±0°20'
más de 120 hasta 400	±0°10'
más de 400	±0°5'

D

C

B

A

4

4

3

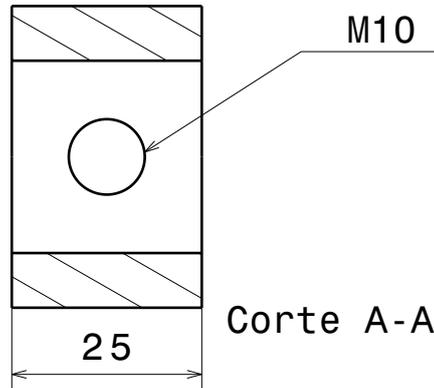
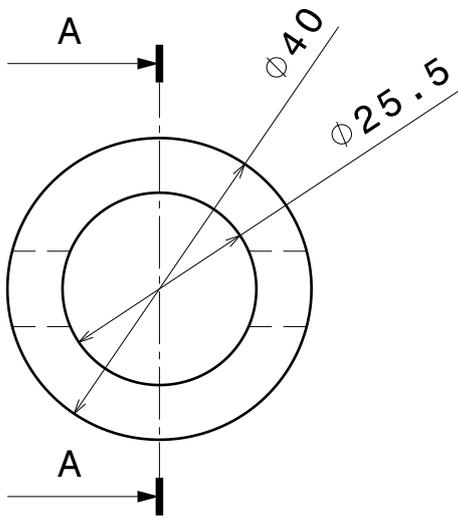
3

2

2

1

1



Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha VºBº

Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

Mecanizado

Cliente

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos  
Rugosidad superficial 3.2[.125]  
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)



Denominación

Anillo sostén

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones Fecha

Material

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó: asoldan 19/8/2020  
Aprobó: XXX xx/xx/xxxx

A4 Acero

Proyecto: Proyecto Final 115

Esc. 1:1

Plano N° 11

D

A



## **Apéndice D**

### **Planos de conjuntos**

A

a

C

D

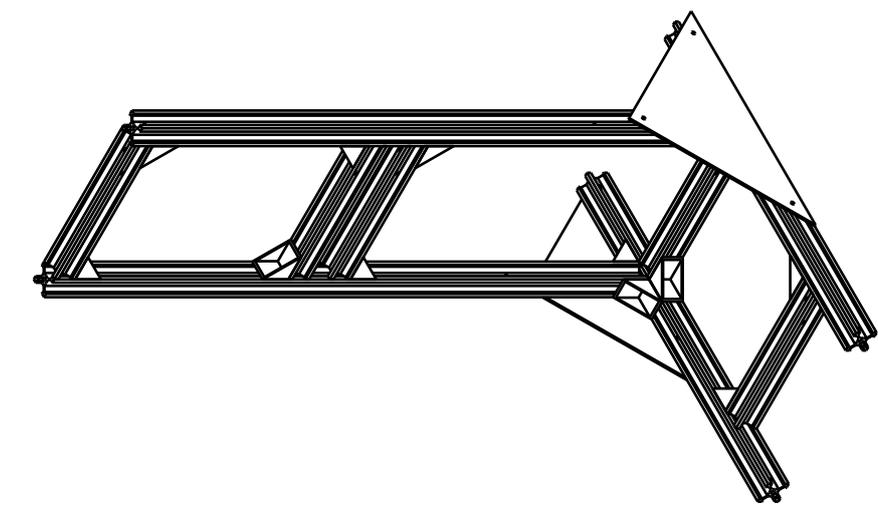
4

3

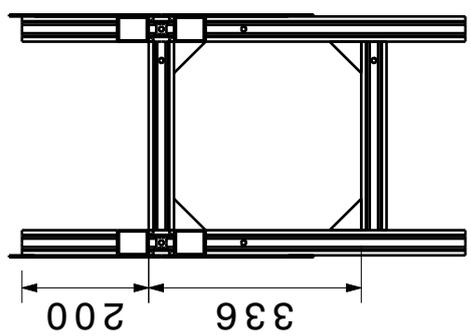
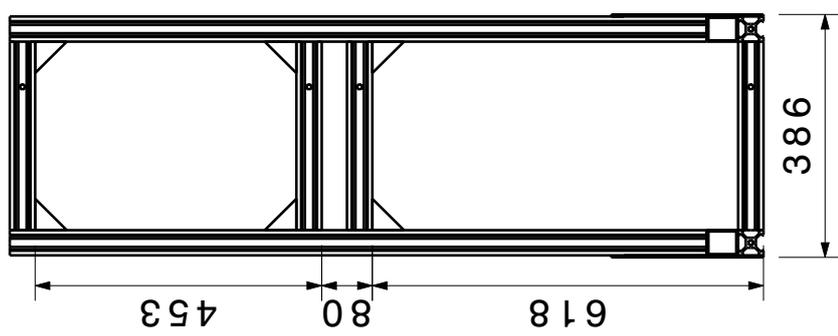
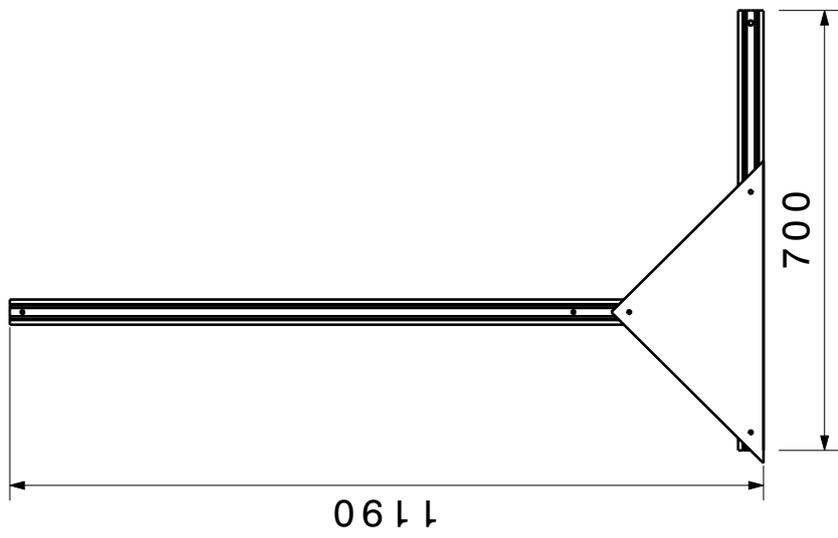
2

1

Lista de Materiales			
N°	Pieza	Cantidad	Detalle
1	Perfil Bosch 1150	2	
2	Perfil Bosch 700	2	
3	Perfil Bosch 300	5	
4	Escuadra	14	
5	Tuercas T	34	
6	Bulón M6	34	



Vista Isométrica



Rev.	Descripción	Fecha	Versión
SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO	mm [pulg]	Cliente	ITBA
Eliminar rebabas y cantos vivos		Denominación	
Rugosidad superficial 3.2[.125]		Frame	
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		Material	
Aprobaciones		Peso [kgf]	
Dibujó:	dfiandrino	N.A.	
Aprobó:	XXX	10,23	
Fecha		Plano N°	
31/1/2021		13	
xx/xx/xxxx		Esc.	
Proyecto: Proyecto Final 115		1:12	

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media			
Desviaciones permitibles para dimensiones Lineales			
desde	más de	más de	más de
0,5	120	400	1000
hasta	hasta	hasta	hasta
6	400	1000	2000
hasta	hasta	hasta	hasta
6	400	1000	2000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5
			±1,2
			±2
Desviaciones permitibles para dimensiones angulares			
hasta	más de	más de	más de
10	50	120	400
	hasta	hasta	hasta
	120	400	
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'

A

D

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

4

3

2

1

D

C

B

A

4

4

3

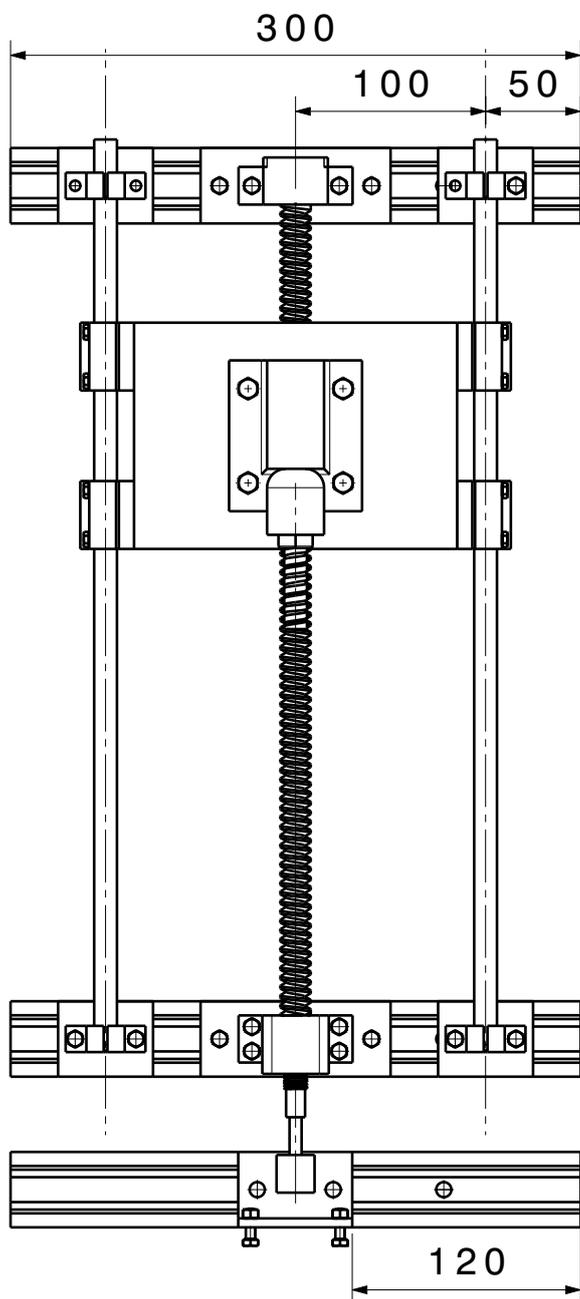
3

2

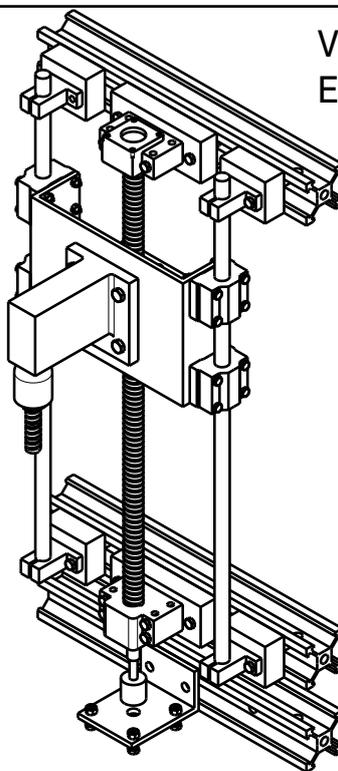
2

1

1



Vista isométrica  
Escala 1:6



Lista de Materiales

N°	Pieza	Cantidad	Detalle
1	Placa soporte guía lineal	4	
2	Placa soporte tornillo sup	1	
3	Placa soporte tornillo inf	1	
4	Acople guía lineal	4	
5	Acople tornillo sup.	1	
6	Acople tornillo inf.	1	
7	Bulón M6x45	8	
8	Bulón M6x30	4	
9	Bulón M6x50	6	
10	Tuerca T	18	
11	Rótula	1	
12	Acople	1	
13	Placa plegada	1	
14	Tuerca del tornillo de bolas	1	
15	Unión tuerca-placa sup	1	
16	Unión tuerca-placa inf	1	
17	Rodamiento de guía lineal	4	
18	Bulón M4x35	16	
19	Tuerca M4	16	
20	Bulón M6x25	4	
21	Tuerca M6	4	
22	Bulón M5x40	6	
23	Tuerca M6	4	

Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media

Rev. Descripción

Fecha

VºBº

Desviaciones permisibles para dimensiones lineales

SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]

Cliente

desde 0,5 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400 hasta 1000	más de 1000 hasta 2000	más de 2000 hasta 4000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

Eliminar rebabas y cantos vivos  
Rugosidad superficial 3.2[.125]  
Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)



Conjunto

ITBA

Denominación

Sección Superior del Eje

Desviaciones permisibles para dimensiones angulares

Aprobaciones

Fecha

hasta 10	más de 10 hasta 50	más de 50 hasta 120	más de 120 hasta 400	más de 400
±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'

Dibujó:

dfiandrino

8/3/2021

Aprobó:

XXX

xx/xx/xxxx

A4

Material

N.A.

Peso [kgf]

Proyecto: Proyecto Final 115

Esc.

1:4

Plano N°

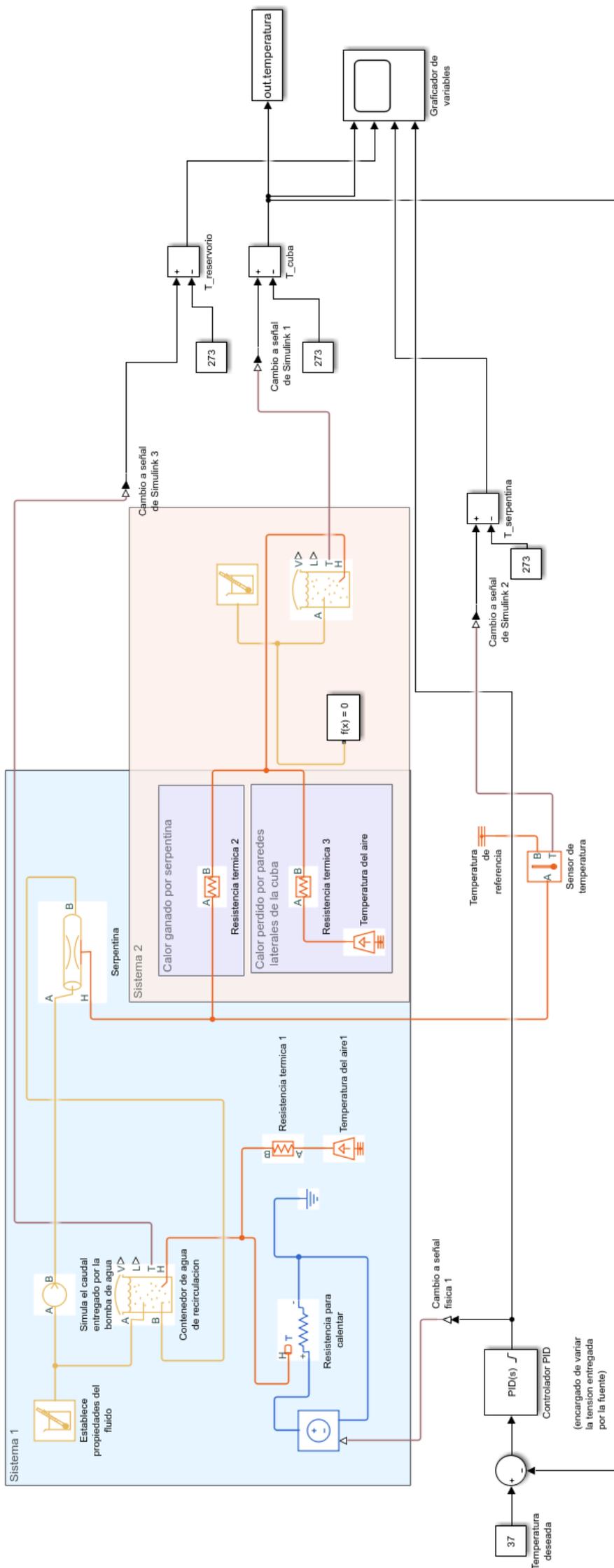
15

D

A

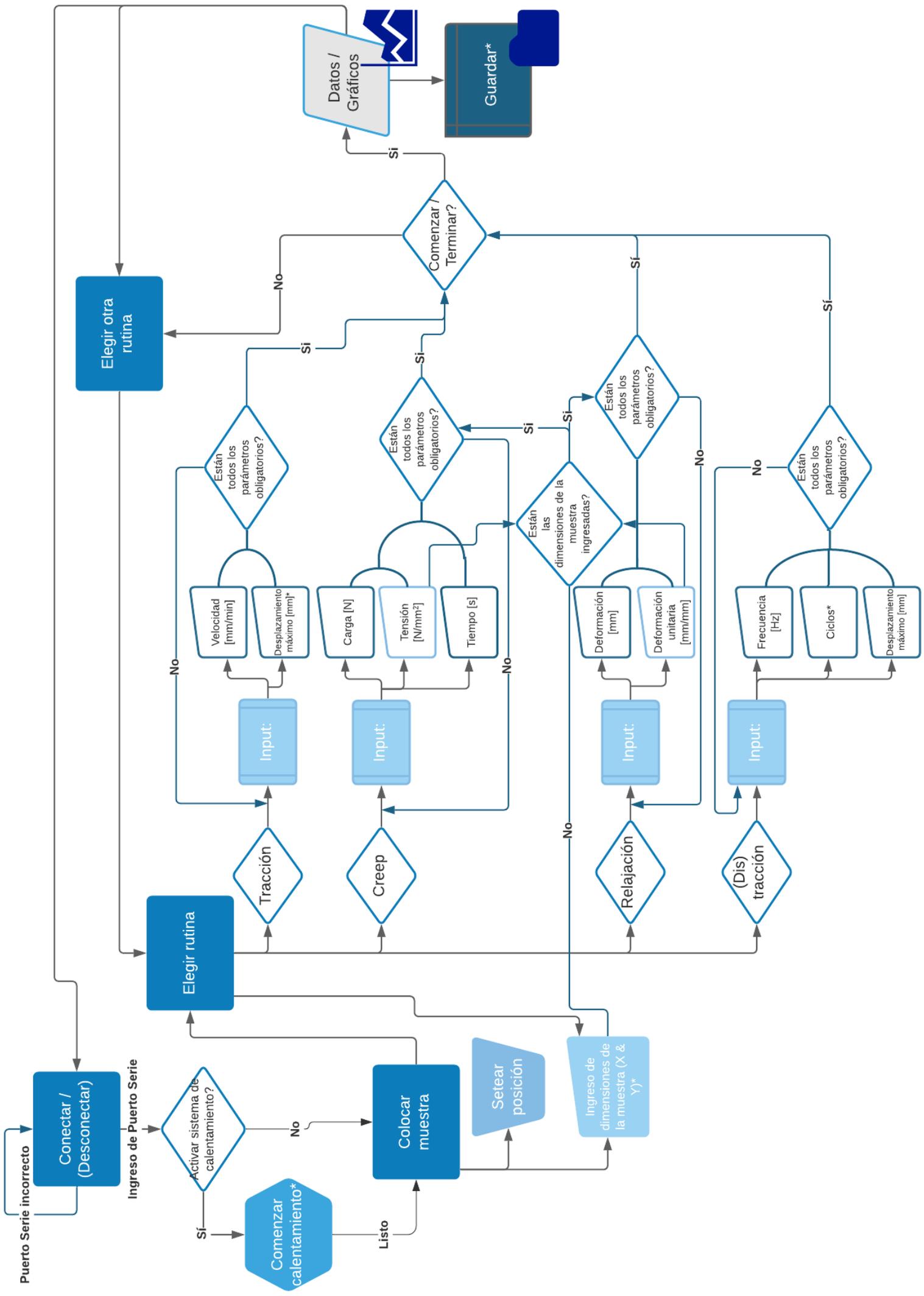
## **Apéndice E**

### **Diagrama del sistema de control PID**



## **Apéndice F**

### **Diagrama de flujo de la Interfaz Gráfica**



# Apéndice G

## Código MatLab

```
1 function proyectoFinal
2 temperaturaFlag = 1;
3 ser = 0;
4 dimensionIndex = 0;
5 clave = 0;
6 speedTractionVariable = 0;
7 maxDisplacementTractionVariable = 0;
8 Ndatos = 4;
9 startFlag = 0;
10 xDimension = 0;
11 yDimension = 0;
12 loadVariable = 0;
13 stressVariable = 0;
14 displacementVariable = 0;
15 strainVariable = 0;
16 frequencyVariable = 0;
17 maxDisplacementDistractionVariable = 0;
18 cyclesVariable = 0;
19 active = 0;
20 tiempo = 0;
21 precarga = 0;
22 deformacion = 0;
23 tension = 0;
24 ud = get(0, 'userdata');
```

```
25 ud.carga = [];  
26 ud.time = [];  
27 ud. $\Delta$  = [];  
28 carga = 0;  
29  $\Delta$  = 0;  
30 time = 0;  
31 maxtime = 5*60; %5 min de ensayo  
32 xwindow = maxtime/10; % seconds  
33 set(0, 'userdata', ud);  
34 global axes_one;  
35 global axesup;  
36 global axesone  
37 global axes_two;  
38 global axesdown;  
39 global Fs;  
40 global Ts;  
41 Ts = 0.015; %esta en segundos  
42 Fs = 1/Ts;  
43 f = figure('Name', 'Proyecto Final',...  
44     'NumberTitle', 'off',...  
45     'Visible', 'off',...  
46     'MenuBar', 'none',...  
47     'Position', [50 50 1453 707],...  
48     'Color', [1 1 1]);  
49 buttonConnectArduino = uicontrol('style', 'pushbutton',...  
50     'position', [50 650 100 40],...  
51     'string', 'Conectar',...  
52     'BackgroundColor', [1 1 1],...  
53     'Callback', @connectArduino);  
54 warningText = uicontrol('style', 'text',...  
55     'position', [25 510 200 100],...
```

```
56         'string', 'Si quiere realizar un ensayo bajo ...
           condiciones controladas primero debe poner en ...
           temperatura la solución con la cuba baja, ...
           colocar la muestra y luego, una vez este el ...
           sistema, subi la cuba',...
57         'BackgroundColor', [1 1 1],...
58         'FontWeight', 'bold',...
59         'Visible', 'off');
60 temperature = uicontrol('style', 'text',...
61         'position', [75 585 50 50],...
62         'string', 'T',...
63         'BackgroundColor', [1 1 1],...
64         'FontWeight', 'bold',...
65         'Visible', 'off');
66 buttonHeat = uicontrol('style', 'pushbutton',...
67         'position', [40 470 120 40],...
68         'string', 'Comenzar calentamiento',...
69         'BackgroundColor', [1 1 1],...
70         'Visible', 'off',...
71         'Callback',@startHeating);
72 buttonPlaceSample = uicontrol('style', 'pushbutton',...
73         'position', [50 430 100 40],...
74         'string', 'Colocar muestra',...
75         'BackgroundColor', [1 1 1],...
76         'Visible', 'off',...
77         'Callback',@placeSample);
78 buttonUp = uicontrol('style', 'pushbutton',...
79         'position', [180 455 40 40],...
80         'string', 'Arriba',...
81         'BackgroundColor', [1 1 1],...
82         'Visible', 'off',...
83         'Callback',@upAndDown);
```

```
84 buttonDown = uicontrol('style', 'pushbutton',...
85     'position', [180 405 40 40],...
86     'string', 'Abajo',...
87     'BackgroundColor', [1 1 1],...
88     'Visible', 'off',...
89     'Callback', @upAndDown);
90 buttonSet = uicontrol('style', 'pushbutton',...
91     'position', [240 460 40 40],...
92     'string', 'Fijar',...
93     'BackgroundColor', [1 1 1],...
94     'Visible', 'off',...
95     'Callback', @upAndDown);
96 loadcellText = uicontrol('style', 'text',...
97     'position', [240 420 40 40],...
98     'string', 'Celda de carga [N]',...
99     'BackgroundColor', [1 1 1],...
100    'Visible', 'off');
101 loadcellValue = uicontrol('style', 'text',...
102    'position', [240 375 40 40],...
103    'string', ' - ',...
104    'BackgroundColor', [1 1 1],...
105    'Visible', 'off');
106 loadcellValueUnit = uicontrol('style', 'text',...
107    'position', [280 375 40 40],...
108    'string', ' N ',...
109    'BackgroundColor', [1 1 1],...
110    'Visible', 'off');
111 readyText = uicontrol('style', 'text',...
112    'position', [40 470 120 40],...
113    'string', 'Listo!',...
114    'BackgroundColor', [1 1 1],...
115    'Visible', 'off');
```

```
116 dimensionsText = uicontrol('style', 'text',...
117     'position', [50 390 120 30],...
118     'string', 'Dimensiones de la muestra [mm]',...
119     'BackgroundColor', [1 1 1],...
120     'Visible', 'off');
121 editXDimension = uicontrol('style', 'edit',...
122     'position', [60 370 40 20],...
123     'string', 'X',...
124     'BackgroundColor', [1 1 1],...
125     'Visible', 'off',...
126     'Callback', @placeSample);
127 editYDimension = uicontrol('style', 'edit',...
128     'position', [100 370 40 20],...
129     'string', 'Y',...
130     'BackgroundColor', [1 1 1],...
131     'Visible', 'off',...
132     'Callback', @placeSample);
133 buttonChooseRoutine = uicontrol('style', 'pushbutton',...
134     'position', [60 300 100 40],...
135     'string', 'Elegir rutina',...
136     'BackgroundColor', [1 1 1],...
137     'Visible', 'off',...
138     'Callback', @chooseRoutine);
139 traction = uicontrol('style', 'pushbutton',...
140     'position', [160 345 100 20],...
141     'string', 'Traccion',...
142     'BackgroundColor', [1 1 1],...
143     'Visible', 'off',...
144     'Callback', @tractionTest);
145 creep = uicontrol('style', 'pushbutton',...
146     'position', [160 320 100 20],...
147     'string', 'Creep',...
```

```
148         'BackgroundColor', [1 1 1],...
149         'Visible', 'off',...
150         'Callback',@creepTest);
151 relaxation = uicontrol('style', 'pushbutton',...
152         'position', [160 295 100 20],...
153         'string', 'Relajacion',...
154         'BackgroundColor', [1 1 1],...
155         'Visible', 'off',...
156         'Callback',@relaxationTest);
157 distraction = uicontrol('style', 'pushbutton',...
158         'position', [160 270 100 20],...
159         'string', '(Dis) traccion',...
160         'BackgroundColor', [1 1 1],...
161         'Visible', 'off',...
162         'Callback',@distractionTest);
163 speed = uicontrol('style', 'text',...
164         'position', [175 600 55 30],...
165         'string', 'Velocidad',...
166         'BackgroundColor', [1 1 1],...
167         'FontWeight', 'bold',...
168         'Visible', 'off');
169 frequency = uicontrol('style', 'text',...
170         'position', [172 600 60 30],...
171         'string', 'Frecuencia',...
172         'BackgroundColor', [1 1 1],...
173         'FontWeight', 'bold',...
174         'Visible', 'off');
175 setCycles = uicontrol('style', 'edit',...
176         'position', [245 580 52 20],...
177         'string', '- -',...
178         'BackgroundColor', [1 1 1],...
179         'Visible', 'off',...
```

```
180         'Callback',@distractionTest);
181 cycles = uicontrol('style', 'text',...
182         'position', [230 610 80 20],...
183         'string', 'Ciclos',...
184         'BackgroundColor', [1 1 1],...
185         'FontWeight', 'bold',...
186         'Visible', 'off');
187 optionalText2 = uicontrol('style', 'text',...
188         'position', [247 550 50 20],...
189         'string', 'opcional',...
190         'BackgroundColor', [1 1 1],...
191         'Visible', 'off');
192 setFrequency = uicontrol('style', 'edit',...
193         'position', [175 580 50 20],...
194         'string', '- -',...
195         'BackgroundColor', [1 1 1],...
196         'Visible', 'off',...
197         'Callback',@distractionTest);
198 speedUnit = uicontrol('style', 'text',...
199         'position', [175 555 50 20],...
200         'string', '[mm/min]',...
201         'BackgroundColor', [1 1 1],...
202         'Visible', 'off');
203 frequencyUnit = uicontrol('style', 'text',...
204         'position', [175 555 50 20],...
205         'string', '[Hz]',...
206         'BackgroundColor', [1 1 1],...
207         'Visible', 'off');
208 setSpeedTraction = uicontrol('style', 'edit',...
209         'position', [175 580 50 20],...
210         'string', '- -',...
211         'BackgroundColor', [1 1 1],...
```

```
212         'Visible', 'off',...
213         'Callback',@tractionTest);
214 maxDisplacementText = uicontrol('style', 'text',...
215         'position', [310 610 85 30],...
216         'string', 'Maximo desplazamiento',...
217         'FontWeight', 'bold',...
218         'BackgroundColor', [1 1 1],...
219         'Visible', 'off');
220 maxDisplacementDistraction = uicontrol('style', 'edit',...
221         'position', [320 580 50 20],...
222         'string', '- -',...
223         'BackgroundColor', [1 1 1],...
224         'Visible', 'off',...
225         'Callback',@distractionTest);
226 maxDisplacementUnit = uicontrol('style', 'text',...
227         'position', [320 555 50 20],...
228         'string', '[mm]',...
229         'BackgroundColor', [1 1 1],...
230         'Visible', 'off');
231 maxDisplacementTraction = uicontrol('style', 'edit',...
232         'position', [320 580 50 20],...
233         'string', '- -',...
234         'BackgroundColor', [1 1 1],...
235         'Visible', 'off',...
236         'Callback',@tractionTest);
237 optionalText = uicontrol('style', 'text',...
238         'position', [320 530 50 20],...
239         'string', 'opcional',...
240         'BackgroundColor', [1 1 1],...
241         'Visible', 'off');
242 load = uicontrol('style', 'checkbox',...
243         'position', [185 620 50 20],...
```

```
244         'string', 'Carga',...
245         'BackgroundColor', [1 1 1],...
246         'FontWeight', 'bold',...
247         'Visible', 'off',...
248         'Callback',@loadCheckbox);
249 setLoad = uicontrol('style', 'edit',...
250         'position', [185 590 52 20],...
251         'string', '- ',...
252         'BackgroundColor', [1 1 1],...
253         'Visible', 'off',...
254         'Callback',@creepTest);
255 loadUnit = uicontrol('style', 'text',...
256         'position', [185 565 52 20],...
257         'string', '[N]',...
258         'BackgroundColor', [1 1 1],...
259         'Visible', 'off');
260 stress = uicontrol('style', 'checkbox',...
261         'position', [280 620 60 20],...
262         'FontWeight', 'bold',...
263         'string', 'Tension',...
264         'BackgroundColor', [1 1 1],...
265         'Visible', 'off',...
266         'Callback',@stressCheckbox);
267 setStress = uicontrol('style', 'edit',...
268         'position', [280 590 52 20],...
269         'string', '- ',...
270         'BackgroundColor', [1 1 1],...
271         'Visible', 'off',...
272         'Callback',@creepTest);
273 stressUnit = uicontrol('style', 'text',...
274         'position', [280 565 52 20],...
275         'string', '[MPa]',...
```

```
276         'BackgroundColor', [1 1 1],...
277         'Visible', 'off');
278 tractionTitle = uicontrol('style', 'text',...
279         'position', [220 650 100 20],...
280         'string', 'Traccion',...
281         'FontWeight', 'bold',...
282         'FontSize', 14.0,...
283         'BackgroundColor', [1 1 1],...
284         'Visible', 'off');
285 displacement = uicontrol('style', 'checkbox',...
286         'position', [170 620 110 20],...
287         'string', 'Desplazamiento',...
288         'BackgroundColor', [1 1 1],...
289         'FontWeight', 'bold',...
290         'Visible', 'off',...
291         'Callback', @displacementCheckbox);
292 setDisplacement = uicontrol('style', 'edit',...
293         'position', [180 590 52 20],...
294         'string', '- -',...
295         'BackgroundColor', [1 1 1],...
296         'Visible', 'off',...
297         'Callback', @relaxationTest);
298 displacementUnit = uicontrol('style', 'text',...
299         'position', [180 565 52 20],...
300         'string', '[mm]',...
301         'BackgroundColor', [1 1 1],...
302         'Visible', 'off');
303 strain = uicontrol('style', 'checkbox',...
304         'position', [290 620 130 20],...
305         'string', 'Deformacion unitaria',...
306         'BackgroundColor', [1 1 1],...
307         'FontWeight', 'bold',...
```

```
308         'Visible', 'off',...
309         'Callback',@strainCheckbox);
310 setStrain = uicontrol('style', 'edit',...
311         'position', [290 590 52 20],...
312         'string', '- -',...
313         'BackgroundColor', [1 1 1],...
314         'Visible', 'off',...
315         'Callback',@relaxationTest);
316 strainUnit = uicontrol('style', 'text',...
317         'position', [290 565 52 20],...
318         'string', '[mm/mm]',...
319         'BackgroundColor', [1 1 1],...
320         'Visible', 'off');
321 relaxationTitle = uicontrol('style', 'text',...
322         'position', [200 650 100 20],...
323         'string', 'Relajacion',...
324         'FontWeight', 'bold',...
325         'FontSize',14.0,...
326         'BackgroundColor', [1 1 1],...
327         'Visible', 'off');
328 creepTitle = uicontrol('style', 'text',...
329         'position', [200 650 100 20],...
330         'string', 'Creep',...
331         'FontWeight', 'bold',...
332         'FontSize',14.0,...
333         'BackgroundColor', [1 1 1],...
334         'Visible', 'off');
335 distractionTitle = uicontrol('style', 'text',...
336         'position', [190 650 200 20],...
337         'string', 'Traccion - Distraccion',...
338         'FontWeight', 'bold',...
339         'FontSize',14.0,...
```

```
340         'BackgroundColor', [1 1 1],...
341         'Visible', 'off');
342 buttonStart = uicontrol('style', 'pushbutton',...
343         'position', [220 420 100 40],...
344         'string', 'Comenzar',...
345         'BackgroundColor', [1 1 1],...
346         'ForegroundColor', [0.3 0.75 0.93],...
347         'Visible', 'off',...
348         'Callback', @start);
349 buttonSave = uicontrol('style', 'pushbutton',...
350         'position', [220 360 100 40],...
351         'string', 'Guardar',...
352         'BackgroundColor', [1 1 1],...
353         'Visible', 'off',...
354         'Callback', @save);
355 buttonChooseAnotherRoutine = uicontrol('style', 'pushbutton',...
356         'position', [180 680 150 20],...
357         'string', 'Elegir otra rutina',...
358         'BackgroundColor', [1 1 1],...
359         'Visible', 'off',...
360         'Callback', @chooseAnotherRoutine);
361 buttonAdjustSamplePlacement = uicontrol('style', 'pushbutton',...
362         'position', [60 215 150 40],...
363         'string', 'Ajustar posicion de la muestra',...
364         'BackgroundColor', [1 1 1],...
365         'Visible', 'off',...
366         'Callback', @adjustSamplePlacement);
367
368 handles = guihandles(f);
369 % Move the window to the center of the screen.
370 movegui(f, 'center');
371 % Make the window visible.
```

```
372 f.Visible = 'on';
373 %axesdown = animatedline('Color','b');
374 %Functions
375     function bytes = convert2bytes(valor)
376         byte3 = bitshift(valor,-16);
377         if(valor<256)
378             byte2 = 0;
379         else
380             if(valor<65536)
381                 byte2 = floor(valor/256);
382             else
383                 byte2 = floor(rem((valor/256),256));
384             end
385         end
386         byte1 = rem(valor,256);
387         bytes = [byte3,byte2,byte1];
388     end
389
390     function connectArduino(source, eventdata)
391         switch source.String
392             case 'Conectar'
393                 if ispc
394                     definput = {'COM4'};
395                 elseif ismac
396                     definput = {'/dev/cu.usbmodem1411'};
397                 else
398                     disp('Plataform not supported');
399                 end
400                 prompt = {'Puerto:'};
401                 title = 'Conectar';
402                 dims = [1 50];
403                 answer = inputdlg(prompt,title,dims,definput);
```

```
404         if ~isempty(answer)
405             ser = serial(answer{1}, 'baudrate',115200, ...
406                 'timeout',10);
407             fopen(ser);
408             pause(1);
409             source.String = 'Desconectar';
410             warningText.Visible = 'on';
411             buttonHeat.Visible = 'on';
412             buttonPlaceSample.Visible = 'on';
413         end
414         if isempty(instrfind)
415             warndlg('Arduino no conectado', 'Ups');
416             return
417         end
418     case 'Desconectar'
419         clave = 6;
420         fwrite(ser,1);
421         fwrite(ser,1);
422         fwrite(ser,1);
423         fwrite(ser,1);
424         fwrite(ser,1);
425         fwrite(ser,255);
426         fwrite(ser,clave);
427         fwrite(ser,0);
428         fwrite(ser,0);
429         fwrite(ser,0);
430         fwrite(ser,0);
431         fwrite(ser,0);
432         fwrite(ser,0);
433         fwrite(ser,0);
434         fwrite(ser,0);
```

```
435     fwrite (ser,0);
436     temperaturaFlag = false;
437     source.String = 'Conectar';
438     buttonPlaceSample.Visible = 'off';
439     buttonHeat.Visible = 'off';
440     readyText.Visible = 'off';
441     warningText.Visible = 'off';
442     buttonDown.Visible = 'off';
443     buttonUp.Visible = 'off';
444     buttonChooseRoutine.Visible = 'off';
445     editXDimension.Visible = 'off';
446     editYDimension.Visible = 'off';
447     dimensionsText.Visible = 'off';
448     traction.Visible = 'off';
449     creep.Visible = 'off';
450     relaxation.Visible = 'off';
451     distraction.Visible = 'off';
452     tractionTitle.Visible = 'off';
453     setSpeedTraction.Visible = 'off';
454     speed.Visible = 'off';
455     buttonStart.Visible = 'off';
456     setLoad.Visible = 'off';
457     load.Visible = 'off';
458     optionalText.Visible = 'off';
459     relaxationTitle.Visible = 'off';
460     creepTitle.Visible = 'off';
461     displacement.Visible = 'off';
462     setDisplacement.Visible = 'off';
463     setLoad.Visible = 'off';
464     buttonAdjustSamplePlacement.Visible = 'off';
465     buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'off';
466     buttonUp.Visible = 'off';
```

```
467         buttonDown.Visible = 'off';
468         buttonSet.Visible = 'off';
469         loadcellValue.Visible = 'off';
470         loadcellText.Visible = 'off';
471         maxDisplacementText.Visible = 'off';
472         maxDisplacementTraction.Visible = 'off';
473         maxDisplacementDistraction.Visible = 'off';
474         distractionTitle.Visible = 'off';
475         strain.Visible = 'off';
476         setStrain.Visible = 'off';
477         stress.Visible = 'off';
478         setStress.Visible = 'off';
479         buttonHeat.String = 'Comenzar calentamiento';
480         temperature.Visible = 'off';
481         buttonSave.Visible = 'off';
482         displacementUnit.Visible = 'off';
483         stressUnit.Visible = 'off';
484         strainUnit.Visible = 'off';
485         speedUnit.Visible = 'off';
486         loadUnit.Visible = 'off';
487         maxDisplacementUnit.Visible = 'off';
488         loadcellValue.String = " - ";
489         loadcellValueUnit.Visible = 'off';
490         setSpeedTraction.String = "- -";
491         maxDisplacementTraction.String = '- -';
492         maxDisplacementDistraction.String = '- -';
493         setCycles.Visible = 'off';
494         cycles.Visible = 'off';
495         optionalText2.Visible = 'off';
496         frequency.Visible = 'off';
497         setFrequency.String = '- -';
498         frequencyUnit.Visible = 'off';
```

```
499         setFrequency.Visible = 'off';
500         setCycles.String = '- -';
501         strain.Value = 0;
502         displacement.Value = 0;
503         setDisplacement.String = '- -';
504         setLoad.String = '- -';
505         load.Value = 0;
506         xDimension = 0;
507         yDimension = 0;
508         dimensionIndex = 0;
509         delete(instrfind)
510     end
511     %         if isempty(instrfind)
512     %             warndlg('Arduino no conectado', 'Ups');
513     %             return
514     %         end
515 end
516
517
518 function startHeating(source, eventdata)
519 warningText.Visible = 'off';
520 buttonPlaceSample.Visible = 'off';
521 temperature.Visible = 'on';
522 buttonHeat.String = 'Calentando...';
523 clave = 4;
524 fwrite(ser,1);
525 fwrite(ser,1);
526 fwrite(ser,1);
527 fwrite(ser,1);
528 fwrite(ser,1);
529 fwrite(ser,255);
530 fwrite(ser,clave);
```

```
531     fwrite(ser,0);
532     fwrite(ser,0);
533     fwrite(ser,0);
534     fwrite(ser,0);
535     fwrite(ser,0);
536     fwrite(ser,0);
537     fwrite(ser,0);
538     fwrite(ser,0);
539     fwrite(ser,0);
540     fwrite(ser,0);
541     while(temperaturaFlag)
542         datos = fread(ser,1);
543         if(datos == 4)
544             temperaturaFlag = false;
545         end
546     end
547     readyText.Visible = 'on';
548     buttonPlaceSample.Visible = 'on';
549     buttonHeat.Visible = 'off';
550     end
551
552
553     function placeSample(source, eventdata)
554         buttonHeat.Visible = 'off';
555         buttonUp.Visible = 'on';
556         buttonDown.Visible = 'on';
557         buttonSet.Visible = 'on';
558         loadcellValue.Visible = 'on';
559         loadcellValueUnit.Visible = 'on';
560         loadcellText.Visible = 'on';
561         dimensionsText.Visible = 'on';
562         editXDimension.Visible = 'on';
```

```
563     editYDimension.Visible = 'on';
564     buttonChooseRoutine.Visible = 'on';
565     readyText.Visible = 'off';
566
567     xDimension = str2double(editXDimension.String);
568     yDimension = str2double(editYDimension.String);
569     if (xDimension > 0 && yDimension > 0 && ~isnan(xDimension) && ~...
570         isnan(yDimension))
571         dimensionIndex = 1;
572     end
573
574     function chooseRoutine(source, eventdata)
575         buttonPlaceSample.Visible = 'off';
576         buttonUp.Visible = 'off';
577         buttonDown.Visible = 'off';
578         buttonSet.Visible = 'off';
579         loadcellValue.Visible = 'off';
580         loadcellValueUnit.Visible = 'off';
581         loadcellText.Visible = 'off';
582         traction.Visible = 'on';
583         creep.Visible = 'on';
584         relaxation.Visible = 'on';
585         distraction.Visible = 'on';
586         dimensionsText.Visible = 'off';
587         editXDimension.Visible = 'off';
588         editYDimension.Visible = 'off';
589         warningText.Visible = 'off';
590     end
591
592     function tractionTest(source, eventdata)
593         setSpeedTraction.Visible = 'on';
```

```
594     speed.Visible = 'on';
595     speedUnit.Visible = 'on';
596     maxDisplacementUnit.Visible = 'on';
597     buttonStart.Visible = 'on';
598     tractionTitle.Visible = 'on';
599     buttonChooseRoutine.Visible = 'off';
600     traction.Visible = 'off';
601     creep.Visible = 'off';
602     relaxation.Visible = 'off';
603     distraction.Visible = 'off';
604     buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
605     buttonAdjustSamplePlacement.Visible = 'off';
606     buttonPlaceSample.Visible = 'off';
607     buttonUp.Visible = 'off';
608     buttonDown.Visible = 'off';
609     buttonSet.Visible = 'off';
610     loadcellValue.Visible = 'off';
611     loadcellValueUnit.Visible = 'off';
612     loadcellText.Visible = 'off';
613     optionalText.Visible = 'on';
614     maxDisplacementText.Visible = 'on';
615     maxDisplacementTraction.Visible = 'on';
616     dimensionsText.Visible = 'off';
617     editXDimension.Visible = 'off';
618     editYDimension.Visible = 'off';
619
620     clave = 10;
621     startFlag = 0;
622     speedTractionVariable = str2double(setSpeedTraction.String);
623     maxDisplacementTractionVariable = ...
        str2double(maxDisplacementTraction.String);
624 end
```

```
625
626     function loadCheckbox(source, eventdata)
627         value = load.Value;
628         if value
629             setLoad.Visible = 'on';
630             loadUnit.Visible = 'on';
631             setStress.Visible = 'off';
632             stressUnit.Visible = 'off';
633             stress.Value = 0;
634         else
635             setLoad.Visible = 'off';
636             loadUnit.Visible = 'off';
637             setStress.Visible = 'on';
638             stressUnit.Visible = 'on';
639             stress.Value = 1;
640         end
641     end
642
643     function strainCheckbox(source, eventdata)
644         value = strain.Value;
645         if value
646             setStrain.Visible = 'on';
647             strainUnit.Visible = 'on';
648             setDisplacement.Visible = 'off';
649             displacementUnit.Visible = 'off';
650             displacement.Value = 0;
651         else
652             setStrain.Visible = 'off';
653             strainUnit.Visible = 'off';
654             setDisplacement.Visible = 'on';
655             displacementUnit.Visible = 'on';
656             displacement.Value = 1;
```

```
657         end
658     end
659
660     function stressCheckbox(source, eventdata)
661         value = stress.Value;
662         if value
663             setStress.Visible = 'on';
664             stressUnit.Visible = 'on';
665             setLoad.Visible = 'off';
666             loadUnit.Visible = 'off';
667             load.Value = 0;
668         else
669             setStress.Visible = 'off';
670             stressUnit.Visible = 'off';
671             setLoad.Visible = 'on';
672             loadUnit.Visible = 'on';
673             load.Value = 1;
674         end
675     end
676
677     function displacementCheckbox(source, eventdata)
678     value = displacement.Value;
679         if value
680             setDisplacement.Visible = 'on';
681             displacementUnit.Visible = 'on';
682             setStrain.Visible = 'off';
683             strainUnit.Visible = 'off';
684             strain.Value = 0;
685         else
686             setDisplacement.Visible = 'off';
687             displacementUnit.Visible = 'off';
688             setStrain.Visible = 'on';
```

```
689         strainUnit.Visible = 'on';
690         strain.Value = 1;
691     end
692 end
693
694 function creepTest(source, eventdata)
695     stress.Visible = 'on';
696     load.Visible = 'on';
697     buttonStart.Visible = 'on';
698     creepTitle.Visible = 'on';
699     buttonChooseRoutine.Visible = 'off';
700     traction.Visible = 'off';
701     creep.Visible = 'off';
702     relaxation.Visible = 'off';
703     distraction.Visible = 'off';
704     buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
705     buttonAdjustSamplePlacement.Visible = 'off';
706     buttonPlaceSample.Visible = 'off';
707     buttonUp.Visible = 'off';
708     buttonDown.Visible = 'off';
709     buttonSet.Visible = 'off';
710     loadcellValue.Visible = 'off';
711     loadcellValueUnit.Visible = 'off';
712     loadcellText.Visible = 'off';
713     dimensionsText.Visible = 'off';
714     editXDimension.Visible = 'off';
715     editYDimension.Visible = 'off';
716
717     clave = 20;
718     startFlag = 0;
719     loadVariable = str2double(setLoad.String);
720     stressVariable = str2double(setStress.String);
```

```
721     end
722
723     function relaxationTest(hObject, eventdata)
724         displacement.Visible = 'on';
725         strain.Visible = 'on';
726         relaxationTitle.Visible = 'on';
727         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
728         buttonStart.Visible = 'on';
729         buttonChooseRoutine.Visible = 'off';
730         traction.Visible = 'off';
731         creep.Visible = 'off';
732         relaxation.Visible = 'off';
733         distraction.Visible = 'off';
734         buttonAdjustSamplePlacement.Visible = 'off';
735         buttonPlaceSample.Visible = 'off';
736         buttonUp.Visible = 'off';
737         buttonDown.Visible = 'off';
738         buttonSet.Visible = 'off';
739         loadcellValue.Visible = 'off';
740         loadcellValueUnit.Visible = 'off';
741         loadcellText.Visible = 'off';
742         dimensionsText.Visible = 'off';
743         editXDimension.Visible = 'off';
744         editYDimension.Visible = 'off';
745
746         clave = 30;
747         startFlag = 0;
748         displacementVariable = str2double(setDisplacement.String);
749         strainVariable = str2double(setStrain.String);
750     end
751
752     function distractionTest(source, eventdata)
```

```
753     frequencyUnit.Visible = 'on';
754     frequency.Visible = 'on';
755     setFrequency.Visible = 'on';
756     cycles.Visible = 'on';
757     optionalText2.Visible = 'on';
758     setCycles.Visible = 'on';
759     maxDisplacementUnit.Visible = 'on';
760     maxDisplacementDistraction.Visible = 'on';
761     maxDisplacementText.Visible = 'on';
762     buttonStart.Visible = 'on';
763     distractionTitle.Visible = 'on';
764     buttonChooseRoutine.Visible = 'off';
765     traction.Visible = 'off';
766     creep.Visible = 'off';
767     relaxation.Visible = 'off';
768     distraction.Visible = 'off';
769     buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
770     buttonAdjustSamplePlacement.Visible = 'off';
771     buttonPlaceSample.Visible = 'off';
772     buttonUp.Visible = 'off';
773     buttonDown.Visible = 'off';
774     buttonSet.Visible = 'off';
775     loadcellValue.Visible = 'off';
776     loadcellValueUnit.Visible = 'off';
777     loadcellText.Visible = 'off';
778     dimensionsText.Visible = 'off';
779     editXDimension.Visible = 'off';
780     editYDimension.Visible = 'off';
781
782     clave = 40;
783     startFlag = 0;
784     frequencyVariable = str2double(setFrequency.String);
```

```
785     maxDisplacementDistractionVariable = ...
        str2double(maxDisplacementDistraction.String);
786     cyclesVariable = str2double(setCycles.String);
787     end
788
789     function start(source, eventdata)
790     active = 0;
791     startFlag = 1;
792
793     %la clave determina que ensayo va a realizarse
794     switch source.String
795         case 'Comenzar'
796             source.String = 'Parar';
797             buttonStart.ForegroundColor = [1 0 0];
798             buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'off';
799             buttonConnectArduino.Visible = 'off';
800             buttonSave.Visible = 'off';
801             active = 1;
802         case 'Parar'
803             active = 0;
804             fwrite(ser,1);
805             fwrite(ser,1);
806             fwrite(ser,1);
807             fwrite(ser,1);
808             fwrite(ser,1);
809             fwrite(ser,255);
810             fwrite(ser,9);
811             fwrite(ser,0);
812             fwrite(ser,0);
813             fwrite(ser,0);
814             fwrite(ser,0);
815             fwrite(ser,0);
```

```
816         fwrite(ser,0);
817         fwrite(ser,0);
818         fwrite(ser,0);
819         fwrite(ser,0);
820         fwrite(ser,0);
821         source.String = 'Comenzar';
822         set(axes_one, 'Visible','off')
823         set(axesone, 'Visible','off')
824         if(clave == 40 || clave == 30 || clave == 20)
825             set(axes_two, 'Visible','off')
826             set(axesup, 'Visible','off')
827             if(clave == 40)
828                 set(axesdown, 'Visible','off')
829             end
830         end
831         buttonStart.ForegroundColor =[0.3 0.75 0.93];
832         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
833         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
834         buttonSave.Visible = 'on';
835         startFlag = 0;
836         ud = get(0,'userdata');
837         ud.time = time';
838         ud.carga = carga';
839         ud.Δ = Δ';
840         set(0,'userdata',ud);
841         legend('hide')
842         tiempo = zeros(1,(Ndatos-2)/2);
843     end
844     if startFlag
845         switch clave
846             case 10 %traccion
```

```
847         if (isnan(speedTractionVariable) || ...
            speedTractionVariable == 0)
848             warndlg('Ingrese la velocidad', 'Faltan valores');
849             startFlag = 0;
850             buttonStart.String = 'Comenzar';
851             buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
852             buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
853             buttonConnectArduino.Visible = 'on';
854             return
855         end
856         if (~isnan(maxDisplacementTractionVariable) && ...
            maxDisplacementTractionVariable < 0)
857             warndlg('Reingrese el desplazamiento maximo', ...
                    'Valor inacceptable');
858             startFlag = 0;
859             buttonStart.String = 'Comenzar';
860             buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
861             buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
862             buttonConnectArduino.Visible = 'on';
863             return
864         end
865         if (speedTractionVariable < 0.05 || ...
            speedTractionVariable > 1000)
866             warndlg('Velocidad fuera de rango', 'Valor ...
                    inacceptable');
867             startFlag = 0;
868             buttonStart.String = 'Comenzar';
869             buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
870             buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
871             buttonConnectArduino.Visible = 'on';
872             set(axes_one, 'Visible', 'off')
873             axis off;
```

```
874         return
875     end
876     if (maxDisplacementTractionVariable < 0.5 || ...
maxDisplacementTractionVariable > 50)
877         warndlg('Desplazamiento fuera de rango', 'Valor ...
            inaceptable');
878         startFlag = 0;
879         buttonStart.String = 'Comenzar';
880         buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
881         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
882         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
883         set(axes_one, 'Visible','off')
884         axis off;
885         return
886     end
887     axes_one = axes('Position',[0.32 0.1 0.65 0.8]);
888     axesone = animatedline('Color','r');
889     if(dimensionIndex)
890         xlabel('\epsilon (mm/mm)')
891         ylabel('\sigma (MPa)')
892     else
893         xlabel('\Delta x (mm)')
894         ylabel('T (N)')
895     end
896     pulseSpeed = (speedTractionVariable * 360 * 10)/(0.0144 ...
            * 60 * 5);
897     pulseSpeed = round(pulseSpeed);
898     conversion = convert2bytes(pulseSpeed);
899     fwrite(ser,1);
900     fwrite(ser,1);
901     fwrite(ser,1);
902     fwrite(ser,1);
```

```
903         fwrite(ser,1);
904         fwrite(ser,255);
905         fwrite(ser, clave);
906         fwrite(ser, conversion(3));
907         fwrite(ser, conversion(2));
908         fwrite(ser, conversion(1));
909         if(~isnan(maxDisplacementTractionVariable) || ...
          maxDisplacementTractionVariable == 0)
910             fwrite(ser, 11); %voy a poner 10 cuando no se manda mas
911             %info y 11 cuando se manda despl maximo
912             maxDispl = ...
                  round(maxDisplacementTractionVariable*10000);
913             %paso a um
914             maxDispl = maxDispl/2; %esto me da la cantidad de pasos
915             %maximos que puede hacer %2 es el paso en um
916             array = convert2bytes(maxDispl);
917             fwrite(ser, array(3));
918             fwrite(ser, array(2));
919             fwrite(ser, array(1));
920             fwrite(ser,0);
921             fwrite(ser,0);
922             fwrite(ser,0);
923         else
924             fwrite(ser,12);
925             fwrite(ser,0);
926             fwrite(ser,0);
927             fwrite(ser,0);
928             fwrite(ser,0);
929             fwrite(ser,0);
930             fwrite(ser,0);
931             %voy a poner 10 cuando no se manda mas info y 11 cuando
932             %se manda despl maximo
```

```
933         end
934     while active
935         input = fread(ser,Ndatos,'int32');% Datos entrantes
936         if isempty(input)
937             continue;
938         end
939         checker1 = input(1);
940         checker2 = input(4);
941         if( checker1  $\neq$  255 && checker2  $\neq$  255)
942             continue;
943         end
944         if(dimensionIndex)
945             deformacion = (input(2)*0.0002)/yDimension;
946             tension = ...
947                 (input(3)-precarga)/(100*yDimension*xDimension);
948         else
949             deformacion = input(2)*0.0002;
950             tension = (input(3)-precarga)/100;
951         end
952         tiempo = tiempo + Ts;
953         addpoints(axesone,deformacion,tension);
954         drawnow;
955          $\Delta$  = [ $\Delta$  deformacion];
956         carga= [carga tension];
957         time = [time tiempo];
958     end
959 case 20 %creep
960     if (1)
961         warndlg('Este ensayo no se encuentra disponible', ...
962             'Realice otro ensayo');
963         startFlag = 0;
964         buttonStart.String = 'Comenzar';
```

```
963         buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
964         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
965         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
966         return
967     end
968     %     if (~isnan(loadVariable) && loadVariable < 0)
969     %         warndlg('Reingrese la carga', 'Valor inaceptable');
970     %         startFlag = 0;
971     %         buttonStart.String = 'Comenzar';
972     %         buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
973     %         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
974     %         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
975     %         return
976     %     end
977     %     if (loadVariable < 0.1 || loadVariable > 500)
978     %         warndlg('Carga fuera de rango', 'Valor inaceptable');
979     %         startFlag = 0;
980     %         buttonStart.String = 'Comenzar';
981     %         buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
982     %         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
983     %         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
984     %         set(axes_one, 'Visible','off')
985     %         axis off;
986     %         return
987     %     end
988     %     axes_one = axes('Position',[0.32 0.55 0.65 0.35]);
989     %     axesone = animatedline('Color','r');
990     %     xlabel('Tiempo (s)')
991     %     if(dimensionIndex)
992     %         ylabel('\sigma (MPa)')
993     %     else
994     %         ylabel('T (N)')
```

```
995 %           end
996 %
997 %           axes_two = axes('Position',[0.32 0.1 0.65 0.35]);
998 %           axesup = animatedline('Color','b');
999 %           xlabel('Tiempo (s)')
1000 %           if(dimensionIndex)
1001 %               ylabel('\epsilon (mm/mm)')
1002 %           else
1003 %               ylabel('\Delta x (mm)')
1004 %           end
1005 %           variables = loadVariable;
1006 %           if(dimensionIndex)
1007 %               variableCarga = ...
1008 %               round(stressVariable*1000*yDimension*xDimension); %aca deberia haber
1009 %               %un *10 por mandar con 1 decimal y un /10 por mandar
1010 %               %masa y no peso y *1000 para mandar en gramos
1011 %               %aca stress lo multiplico por el area y lo trato como
1012 %               %tension normal en N
1013 %           else
1014 %               variableCarga = round(loadVariable*1000); %aca ...
1015 %               deberia haber
1016 %               %un *10 por mandar con 1 decimal y un /10 por mandar
1017 %               %masa y no peso y *1000 para mandar en gramos
1018 %           end
1019 %           loadArray = convert2bytes(variableCarga);
1020 %           fwrite(ser,1);
1021 %           fwrite(ser,1);
1022 %           fwrite(ser,1);
1023 %           fwrite(ser,1);
1024 %           fwrite(ser,1);
1025 %           fwrite(ser,255);
1026 %           fwrite(ser, clave);
```

```
1025 %           fwrite(ser, loadArray(3));
1026 %           fwrite(ser, loadArray(2));
1027 %           fwrite(ser, loadArray(1));
1028 %           fwrite(ser,0);
1029 %           fwrite(ser,0);
1030 %           fwrite(ser,0);
1031 %           fwrite(ser,0);
1032 %           fwrite(ser,0);
1033 %           fwrite(ser,0);
1034 %           fwrite(ser,0);
1035 %           while active
1036 %               input = fread(ser,Ndatos,'int32');% Datos entrantes
1037 %               if isempty(input)
1038 %                   continue;
1039 %               end
1040 %               checker1 = input(1);
1041 %               checker2 = input(4);
1042 %               if( checker1  $\neq$  255 && checker2  $\neq$  255)
1043 %                   continue;
1044 %               end
1045 %               if(dimensionIndex)
1046 %                   deformacion = (input(2)*0.0002)/yDimension;
1047 %                   tension = ...
1048 %                   (input(3)-precarga)/(100*yDimension*xDimension);
1049 %               else
1050 %                   deformacion = input(2)*0.0002;
1051 %                   tension = (input(3)-precarga)/100;
1052 %               end
1053 %               tiempo = tiempo + Ts;
1054 %               addpoints(axesone,tiempo,deformacion);
1055 %               drawnow;
1056 %               addpoints(axesup,tiempo,tension);
```

```
1056 %           drawnow;
1057 %           Δ = [Δ deformacion];
1058 %           carga = [carga tension];
1059 %           time = [time tiempo];
1060 %           end
1061 case 30 %%relajacion
1062     if(dimensionIndex)
1063         if (~isnan(strainVariable) && strainVariable < 0)
1064             warndlg('Reingrese el desplazamiento maximo', ...
1065                 'Valor inaceptable');
1066             startFlag = 0;
1067             buttonStart.String = 'Comenzar';
1068             buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
1069             buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
1070             buttonConnectArduino.Visible = 'on';
1071             return
1072         end
1073     else
1074         if (~isnan(displacementVariable) && ...
1075             displacementVariable < 0)
1076             warndlg('Reingrese el desplazamiento maximo', ...
1077                 'Valor inaceptable');
1078             startFlag = 0;
1079             buttonStart.String = 'Comenzar';
1080             buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
1081             buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
1082             buttonConnectArduino.Visible = 'on';
1083             return
1084         end
1085         if (displacementVariable < 0.5 || ...
1086             displacementVariable > 40)
```

```
1083         warndlg('Desplazamiento fuera de rango', 'Valor ...
           inacceptable');
1084         startFlag = 0;
1085         buttonStart.String = 'Comenzar';
1086         buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
1087         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
1088         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
1089         set(axes_one, 'Visible','off')
1090         axis off;
1091         return
1092     end
1093 end
1094 if(dimensionIndex)
1095     variableMaxDispl = ...
           round(strainVariable*yDimension*10000);
1096 else
1097     variableMaxDispl = round(displacementVariable*10000);
1098 end
1099 %pasado a um
1100 variableMaxDispl = variableMaxDispl/2; %esto me da la canti
1101 %dad de pasos maximos que puede hacer %2 es el paso en um
1102 array = convert2bytes(variableMaxDispl);
1103 fwrite(ser,1);
1104 fwrite(ser,1);
1105 fwrite(ser,1);
1106 fwrite(ser,1);
1107 fwrite(ser,1);
1108 fwrite(ser,255);
1109 fwrite(ser, clave);
1110 fwrite(ser, array(3));
1111 fwrite(ser, array(2));
1112 fwrite(ser, array(1));
```

```
1113         fwrite(ser,0);
1114         fwrite(ser,0);
1115         fwrite(ser,0);
1116         fwrite(ser,0);
1117         fwrite(ser,0);
1118         fwrite(ser,0);
1119         fwrite(ser,0);
1120         axes_one = axes('Position',[0.32 0.55 0.65 ...
            0.35], 'XLim',[0 maxtime], 'YLim',[0 ...
            displacementVariable]);
1121         axesone = animatedline('Color','r');
1122         xlabel('Tiempo (s)')
1123         if(dimensionIndex)
1124             ylabel('\epsilon (mm/mm)')
1125         else
1126             ylabel('\Delta x (mm)')
1127         end
1128         axes_two = axes('Position',[0.32 0.1 0.65 ...
            0.35], 'XLim',[0 maxtime]);
1129         axesup = animatedline('Color','b');
1130         if(dimensionIndex)
1131             xlabel('Tiempo (s)')
1132             ylabel('\sigma (MPa)')
1133         else
1134             xlabel('Tiempo (s)')
1135             ylabel('T (N)')
1136         end
1137         while active
1138             input = fread(ser,Ndatos,'int32'); % Datos entrantes
1139             if isempty(input)
1140                 continue;
1141             end
```

```
1142         checker1 = input(1);
1143         checker2 = input(4);
1144         if( checker1 ≠ 255 && checker2 ≠ 255)
1145             continue;
1146         end
1147         if(dimensionIndex)
1148             deformacion = (input(2)*0.0002)/yDimension;
1149             tension = ...
1150                 (input(3)-precarga)/(100*yDimension*xDimension);
1151         else
1152             deformacion = input(2)*0.0002;
1153             tension = (input(3)-precarga)/100;
1154         end
1155         tiempo = tiempo + Ts;
1156         addpoints(axesone,tiempo,deformacion);
1157         drawnow;
1158         addpoints(axesup,tiempo,tension);
1159         drawnow
1160         Δ = [Δ deformacion];
1161         carga = [carga tension];
1162         time = [time tiempo];
1163     end
1164     case 40 %traccion - distraccion
1165         if (~isnan(maxDisplacementDistractionVariable) && ...
1166             maxDisplacementDistractionVariable < 0)
1167             warndlg('Reingrese el desplazamiento maximo', ...
1168                 'Valor inaceptable');
1169             startFlag = 0;
1170             buttonStart.String = 'Comenzar';
1171             buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
1172             buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
1173             buttonConnectArduino.Visible = 'on';
```

```
1171         return
1172     end
1173     if (~isnan(frequencyVariable) && frequencyVariable < 0)
1174         warndlg('Reingrese el desplazamiento maximo', ...
1175             'Valor inaceptable');
1176         startFlag = 0;
1177         buttonStart.String = 'Comenzar';
1178         buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
1179         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
1180         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
1181         return
1182     end
1183     if (maxDisplacementDistractionVariable < 0.5 || ...
1184         maxDisplacementDistractionVariable > 50)
1185         warndlg('Desplazamiento fuera de rango', 'Valor ...
1186             inaceptable');
1187         startFlag = 0;
1188         buttonStart.String = 'Comenzar';
1189         buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
1190         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
1191         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
1192         set(axes_one, 'Visible', 'off')
1193         axis off;
1194         return
1195     end
1196     if (frequencyVariable < 0.1 || frequencyVariable > 5)
1197         warndlg('Frecuencia fuera de rango', 'Valor ...
1198             inaceptable');
1199         startFlag = 0;
1200         buttonStart.String = 'Comenzar';
1201         buttonStart.ForegroundColor = [0.3 0.75 0.93];
1202         buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'on';
```

```
1199         buttonConnectArduino.Visible = 'on';
1200         set(axes_one, 'Visible','off')
1201         axis off;
1202         return
1203     end
1204
1205     periodo = 1/frequencyVariable; %esto esta en segundos
1206     periodo = periodo/(2*60); %esta en minutos
1207     velocidad = maxDisplacementDistractionVariable/periodo;
1208     %esta en mm/min
1209     frecuenciaVelocidad = (velocidad * 360 * 10)/(0.0144 * ...
1210         60 * 5);
1211     frecuenciaVelocidad = round(frecuenciaVelocidad);
1212     frecuenciaVelocidadArray = ...
1213         convert2bytes(frecuenciaVelocidad);
1214     variableMaxDispl = ...
1215         round(maxDisplacementDistractionVariable*10000);
1216     %pasado a um
1217     variableMaxDispl = variableMaxDispl/2; %esto me da la
1218     %cantidad de pasos maximos que puede hacer %2 es el ...
1219     paso en
1220     %um
1221     array = convert2bytes(variableMaxDispl);
1222     fwrite(ser,1);
1223     fwrite(ser,1);
1224     fwrite(ser,1);
1225     fwrite(ser,1);
1226     fwrite(ser,1);
1227     fwrite(ser,255);
1228     fwrite(ser, clave);
1229     fwrite(ser, frecuenciaVelocidadArray(3));
1230     fwrite(ser, frecuenciaVelocidadArray(2));
```

```
1227     fwrite(ser, frecuenciaVelocidadArray(1));
1228     fwrite(ser, array(3));
1229     fwrite(ser, array(2));
1230     fwrite(ser, array(1));
1231     if(~isnan(cyclesVariable) || cyclesVariable == 0)
1232         fwrite(ser, 41); %voy a poner 41 cuando se manda despl
1233         %maximo
1234         ciclos = round(cyclesVariable);
1235         aregloCiclos = convert2bytes(ciclos);
1236         fwrite(ser, aregloCiclos(3));
1237         fwrite(ser, aregloCiclos(2));
1238         fwrite(ser, aregloCiclos(1));
1239     else
1240         fwrite(ser,42); %voy a poner 42 cuando no se manda mas
1241         %info
1242         fwrite(ser,0);
1243         fwrite(ser,0);
1244         fwrite(ser,0);
1245     end
1246
1247     axes_one = axes('Position',[0.32 0.55 0.65 ...
1248         0.35], 'XLim',[0 maxDisplacementDistractionVariable]);
1249     axesone = animatedline('Color','r'); ...
1250         %,'MaximumNumPoints',maxpoints);
1251     if(dimensionIndex)
1252         xlabel('\epsilon (mm/mm)')
1253         ylabel('\sigma (MPa)')
1254     else
1255         xlabel('\Delta x (mm)')
1256         ylabel('T (N)')
1257     end
```

```
1256     axes_two = axes('Position',[0.32 0.1 0.64 ...
1257         0.35], 'XLim',[0 maxtime]);
1258     axesup = animatedline('Color','b'); ...
1259         %,'MaximumNumPoints',maxpoints);
1260     axesdown = ...
1261         animatedline('Color','g'); %,'MaximumNumPoints',maxpoints);
1262     if(dimensionIndex)
1263         yyaxis right
1264         ylabel('\epsilon (mm/mm)')
1265         xlabel('Tiempo (s)')
1266         yyaxis left
1267         ylabel('sigma (MPa)')
1268         legend({'sigma (MPa)', '\epsilon ...
1269             (mm/mm)'}, 'Location','southwest')
1270     else
1271         yyaxis right
1272         ylabel('\Delta x (mm)')
1273         xlabel('Tiempo (s)')
1274         yyaxis left
1275         ylabel('T (N)')
1276         legend({'T(N)', '\Delta x (mm)'}, 'Location','southwest')
1277     end
1278     while active
1279         input = fread(ser, Ndatos, 'int32'); % Datos entrantes
1280
1281         if isempty(input)
1282             continue;
1283         end
1284         if( input(1)  $\neq$  255 && input(4)  $\neq$  255)
1285             continue;
1286         end
1287         if(dimensionIndex)
```

```
1284         deformacion = (input(2)*0.0002)/yDimension;
1285         tension = ...
            (input(3)-precarga)/(100*yDimension*xDimension);
1286     else
1287         deformacion = input(2)*0.0002;
1288         tension = (input(3)-precarga)/100;
1289     end
1290     tiempo = tiempo + Ts;
1291     addpoints(axesone,deformacion,tension);
1292     drawnow;
1293     addpoints(axesup,tiempo,deformacion);
1294     hold on;
1295     addpoints(axesdown,tiempo,tension);
1296     drawnow;
1297     Δ = [Δ deformacion];
1298     carga = [carga tension];
1299     time = [time tiempo];
1300     end
1301     end
1302 end
1303 end
1304
1305 function upAndDown(source, eventdata)
1306     fijar = 0;
1307     switch source.String
1308         case 'Arriba'
1309             fwrite(ser,1);
1310             fwrite(ser,1);
1311             fwrite(ser,1);
1312             fwrite(ser,1);
1313             fwrite(ser,1);
1314             fwrite(ser,255);
```

```
1315         fwrite(ser,7);
1316         fwrite(ser,0);
1317         fwrite(ser,0);
1318         fwrite(ser,0);
1319         fwrite(ser,0);
1320         fwrite(ser,0);
1321         fwrite(ser,0);
1322         fwrite(ser,0);
1323         fwrite(ser,0);
1324         fwrite(ser,0);
1325         fwrite(ser,0);
1326         % cuando a que empiece a mover el motor
1327     case 'Abajo'
1328         fwrite(ser,1);
1329         fwrite(ser,1);
1330         fwrite(ser,1);
1331         fwrite(ser,1);
1332         fwrite(ser,1);
1333         fwrite(ser,255);
1334         fwrite(ser,8);
1335         fwrite(ser,0);
1336         fwrite(ser,0);
1337         fwrite(ser,0);
1338         fwrite(ser,0);
1339         fwrite(ser,0);
1340         fwrite(ser,0);
1341         fwrite(ser,0);
1342         fwrite(ser,0);
1343         fwrite(ser,0);
1344         fwrite(ser,0);
1345     case 'Fijar'
1346         fwrite(ser,1);
```

```
1347         fwrite(ser,1);
1348         fwrite(ser,1);
1349         fwrite(ser,1);
1350         fwrite(ser,1);
1351         fwrite(ser,255);
1352         fwrite(ser,5);
1353         fwrite(ser,0);
1354         fwrite(ser,0);
1355         fwrite(ser,0);
1356         fwrite(ser,0);
1357         fwrite(ser,0);
1358         fwrite(ser,0);
1359         fwrite(ser,0);
1360         fwrite(ser,0);
1361         fwrite(ser,0);
1362         fwrite(ser,0);
1363         fijar = 1;
1364     end
1365     if (fijar)
1366         precarga = fread(ser,1,'int32');
1367         peso = precarga/100;
1368         loadcellValue.String = string(peso);
1369     end
1370 end
1371
1372 function chooseAnotherRoutine(source, eventdata)
1373 buttonChooseRoutine.Visible = 'on';
1374 buttonAdjustSamplePlacement.Visible = 'on';
1375 traction.Visible = 'on';
1376 creep.Visible = 'on';
1377 relaxation.Visible = 'on';
1378 distraction.Visible = 'on';
```

```
1379 tractionTitle.Visible = 'off';
1380 creepTitle.Visible = 'off';
1381 setFrequency.Visible = 'off';
1382 frequency.Visible = 'off';
1383 frequencyUnit.Visible = 'off';
1384 setSpeedTraction.Visible = 'off';
1385 speed.Visible = 'off';
1386 load.Visible = 'off';
1387 setLoad.Visible = 'off';
1388 buttonChooseAnotherRoutine.Visible = 'off';
1389 buttonStart.Visible = 'off';
1390 displacement.Visible = 'off';
1391 setDisplacement.Visible = 'off';
1392 relaxationTitle.Visible = 'off';
1393 maxDisplacementText.Visible = 'off';
1394 maxDisplacementTraction.Visible = 'off';
1395 maxDisplacementDistraction.Visible = 'off';
1396 optionalText.Visible = 'off';
1397 stress.Visible = 'off';
1398 setStress.Visible = 'off';
1399 distractionTitle.Visible = 'off';
1400 strain.Visible = 'off';
1401 setStrain.Visible = 'off';
1402 buttonSave.Visible = 'off';
1403 strainUnit.Visible = 'off';
1404 stressUnit.Visible = 'off';
1405 maxDisplacementUnit.Visible = 'off';
1406 speedUnit.Visible = 'off';
1407 loadUnit.Visible = 'off';
1408 displacementUnit.Visible = 'off';
1409 stress.Value = 0;
1410 load.Value = 0;
```

```
1411 displacement.Value = 0;
1412 strain.Value = 0;
1413 optionalText2.Visible = 'off';
1414 cycles.Visible = 'off';
1415 setCycles.Visible = 'off';
1416 end
1417
1418 function adjustSamplePlacement(source, eventdata)
1419 buttonPlaceSample.Visible = 'on';
1420 buttonUp.Visible = 'on';
1421 buttonDown.Visible = 'on';
1422 buttonSet.Visible = 'on';
1423 loadcellValue.Visible = 'on';
1424 loadcellValueUnit.Visible = 'on';
1425 loadcellText.Visible = 'on';
1426 end
1427
1428 function save(source, eventdata)
1429     [filename, pathname] = uiputfile({'*.csv;', 'CSV Files ...
1430         (*.csv)'}, 'Save File', 'EnsayoBiomecanica');
1431     if isequal(filename, 0) || isequal(pathname, 0)
1432         return
1433     else
1434         if strcmp(filename(end-3:end), '.csv')
1435             filename = [pathname filename];
1436         else
1437             filename = [pathname filename '.csv'];
1438         end
1439         file = array2table([ud.time ud.Δ ud.carga]);
1440         file.Properties.VariableNames(1:3) = ...
1441             {'Tiempo', 'Deformacion', 'Carga'};
1442         writetable(file, filename);
```

```
1441         end
1442     end
1443 end
```

# Apéndice H

## Código Arduino

```
1 #include <TimerThree.h>
2 #include <OneWire.h>
3 #include <DallasTemperature.h>
4 #include <PID_v1.h>
5 #include <OneWire.h>
6 #include "HX711.h"
7 #include <Wire.h>
8 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
9 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
10
11 uint8_t N = 4; //Cantidad de datos que mando a MatLab
12 long buffer1[2] = {0}; //Cantidad de datos que tomo
13 long sendBuffer[4] = {0};
14 byte dataIn[20] = {0};
15
16 bool sendFlag = false;
17 bool matlabFlag = false;
18 bool tempFlag = false;
19 bool motorFlag = false;
20 bool defaultFlag = false;
21 bool datosFlag = false;
22 bool bufferFlag = false;
23 bool creepFlag = false;
```

```
24 bool distraccionFlag = false;
25 bool traccionFlag = false;
26 bool relajacionFlag = false;
27 bool avisoTempFlag = true;
28 bool timeFlag = false;
29 bool setupFlag = false;
30 bool driverPULsign = LOW;
31 bool temp = true;
32 bool cambioDireccion = false;
33
34 // Pin donde se conecta el bus 1-Wire
35 //Sensor de temperatura
36 const int pinDatosDQ = 9;
37 const int relePin = 41;
38 //pulsadores
39 const int stopButtonPin = 5; //negro 3
40 const int upButtonPin = 3; //amarillo 4
41 const int downButtonPin = 4; //verde 5
42 // Para el PID
43 #define PIN_INPUT 9 //la temperatura //chequear esto, lo estoy ...
    definiendo 2 veces
44 #define PIN_OUTPUT 11 //el mosfet que controla las resistencias
45 //Define Variables we'll be connecting to
46 double Setpoint, Input, Output;
47 // Para la celda de carga
48 const int DOUT = A1;
49 const int CLK = A0;
50 long peso;
51 //Para el motor PAP
52 // Define pins
53 int driverPUL = 7; // PUL+ pin
54 int driverDIR = 6; // DIR+ pin
```

```
55 // Variables
56 bool setdir = LOW; // Direccion del motor en una primera instancia, ...
    podria sacarse esto
57 long frequencySpeed;
58 long freqByte;
59 long freqLSB;
60 long freqMSB;
61 long frequency;
62 long loadMSB;
63 long loadByte;
64 long loadLSB;
65 long load;
66 long cycles;
67 long cyclesLSB;
68 long cyclesMSB;
69 long cyclesByte;
70 long indicadorVueltas;
71 long variableOpcional;
72 long maxDisplacement;
73 long maxDisplLSB;
74 long maxDisplMSB;
75 long maxDisplByte;
76 long deformacion;
77 uint16_t contadorDeVueltas = 0;
78 uint16_t contadorDeVueltasDistraccion = 0;
79 uint16_t contadorDeVueltasTraccion = 0;
80 long pasos = 0;
81 long precarga;
82 int stopButtonState = 1;
83 int upButtonState = 1;
84 int downButtonState = 1;
85 long pasosInicial = 0;
```

```
86 long pasosPosicion = 0;
87 int vuelta = 0;
88 int movimiento = 12500;
89 byte idx = 0;
90 byte clave = 0;
91 byte beginner = 0;
92 int index = 0;
93 long contadorBotonUp = 0;
94 long contadorBotonDown = 0;
95
96 OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
97 DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);
98
99 //Specify the links and initial tuning parameters for PID
100 double Kp=20, Ki=0, Kd=0;
101 PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
102
103 HX711 balanza;
104
105 void rts(); //funcion de interrupcion
106 void sendData(); //funcion que envia datos a MatLab
107 void distraccion();
108 void rupturaDeMuestra();
109 void defaultState();
110 void creep();
111 void relajacion();
112 void traccion();
113
114 void setup() {
115     Serial.begin(115200); //Baud rate
116     pinMode (driverPUL, OUTPUT);
117     pinMode (driverDIR, OUTPUT);
```

```
118 // initialize the lcd
119 lcd.init();
120 lcd.init();
121 // Print a message to the LCD.
122 lcd.backlight();
123 lcd.setCursor(0, 0);
124 lcd.print(" Bienvenidos!");
125 lcd.setCursor(0, 1);
126 lcd.print(" A ensayar...");
127 // Iniciamos el bus 1-Wire
128 sensorDS18B20.begin();
129
130 pinMode(upButtonPin, INPUT_PULLUP);
131 pinMode(downButtonPin, INPUT_PULLUP);
132 pinMode(stopButtonPin, INPUT_PULLUP);
133 //initialize the variables we're linked to
134 sensorDS18B20.requestTemperatures();
135 Input = sensorDS18B20.getTempCByIndex(1);
136 Setpoint = 37;
137 //turn the PID on
138 pinMode(relePin, OUTPUT);
139 digitalWrite(relePin, HIGH);
140 myPID.SetMode(MANUAL);
141 balanza.begin(DOUT, CLK);
142 balanza.read();
143 balanza.set_scale(53.679); // Establecemos la escala de la celda
144 balanza.tare(20); //El peso actual es considerado Tara: peso en vacio
145 Timer3.initialize(6); // every 6us
146 Timer3.start();
147 Timer3.attachInterrupt(rts);
148 }
149
```

```
150 void rts() {
151     upButtonState = digitalRead(upButtonPin);
152     downButtonState = digitalRead(downButtonPin);
153     stopButtonState = digitalRead(stopButtonPin);
154
155     if(upButtonState == LOW) {
156         contadorBotonUp++;
157         if(!setupFlag && contadorBotonUp == 100) {
158             setupFlag = true;
159             timeFlag = true;
160             setdir = HIGH;
161             contadorBotonUp = 0;
162         }
163     }else{
164         contadorBotonUp = 0;
165     }
166     if(downButtonState == LOW) {
167         contadorBotonDown++;
168         if(!setupFlag && contadorBotonDown == 100) {
169             setupFlag = true;
170             timeFlag = true;
171             setdir = LOW;
172             contadorBotonDown = 0;
173         }
174     }else{
175         contadorBotonDown = 0;
176     }
177     if(stopButtonState == LOW) {
178         digitalWrite(driverPUL, LOW);
179         motorFlag = false;
180         vuelta = 12500;
181     }
```

```
182     if(setupFlag){ // esto es para setear la muestra en su lugar
183         if(timeFlag){
184             timeFlag = false;
185             if(vuelta < movimiento){
186                 if(driverPULsign){
187                     vuelta++;
188                     digitalWrite(driverDIR, setdir);
189                     driverPULsign = LOW;
190                     digitalWrite(driverPUL, LOW);
191                     if(setdir){
192                         pasosInicial--;
193                         pasosPosicion--;
194                     }else{
195                         pasosInicial++;
196                         pasosPosicion++;
197                     }
198                 }else{
199                     driverPULsign = HIGH;
200                     digitalWrite(driverPUL, HIGH);
201                 }
202             }else{
203                 setupFlag = false;
204                 vuelta = 0;
205             }
206         }else{
207             timeFlag = true;
208         }
209     }
210     if(motorFlag){
211         if(contadorDeVueltasTraccion == indicadorVueltas){
212             if (pasos ≤ pasosInicial && pasos ≤ 1250000){
213                 if(driverPULsign){
```

```
214         digitalWrite(driverDIR, setdir);
215         digitalWrite(driverPUL, LOW);
216         driverPULsign = LOW;
217         if(setdir){
218             pasosPosicion--;
219             pasos++;
220         }else{
221             pasosPosicion++; //pasos respecto del 0 de la maquina
222             pasos--; //pasos del ensayo
223         }
224     }else{
225         digitalWrite(driverDIR, setdir);
226         digitalWrite(driverPUL, HIGH);
227         driverPULsign = HIGH;
228     }
229 }
230 contadorDeVueltasTraccion = 0;
231 }else{
232     contadorDeVueltasTraccion++;
233 }
234 if(distraccionFlag){
235     if(cambioDireccion){
236         if(pasos == maxDisplacement){
237             contadorDeVueltasDistraccion++;
238             if(setdir){
239                 setdir = LOW;
240             }else{
241                 setdir = HIGH;
242             }
243             cambioDireccion = false;
244         }else{
245             if(pasos == 0 && contadorDeVueltasDistraccion > 0){
```

```
246         if(setdir){
247             setdir = LOW;
248         }else{
249             setdir = HIGH;
250         }
251         cambioDireccion = false;
252     }
253 }
254 }
255 if(pasos == maxDisplacement/2){
256     cambioDireccion = true;
257 }
258 }
259 if(creepFlag){
260     peso = -balanza.get_units(),4;
261     if(load > peso){
262         setdir = HIGH;
263     }else{
264         setdir = LOW;
265     }
266 }
267 }
268 rupturaDeMuestra();
269 if(creepFlag){
270     creep();
271 }
272 if(traccionFlag){
273     traccion();
274 }
275 if(distraccionFlag){
276     distraccion();
277 }
```

```
278     if(relajacionFlag){
279         relajacion();
280     }
281     contadorDeVueltas++;
282     if(datosFlag && contadorDeVueltas == 2500){
283         buffer1[0] = pasos; //esto representa la deformacion
284         buffer1[1] = -balanza.get_units(),4; //y esto la carga
285         contadorDeVueltas = 0;
286         bufferFlag = true;
287     }
288     if(defaultFlag){
289         if(pasosPosicion > 0){
290             if(driverPULsign){
291                 digitalWrite(driverDIR,HIGH);
292                 driverPULsign = LOW;
293                 digitalWrite(driverPUL,LOW);
294                 pasosPosicion--;
295             }else{
296                 driverPULsign = HIGH;
297                 digitalWrite(driverDIR,HIGH);
298                 digitalWrite(driverPUL,HIGH);
299             }
300         }else{
301             defaultFlag = false;
302             pasosInicial = 0;
303             pasosPosicion = 0;
304             pasos = 0;
305             matlabFlag = false;
306         }
307     }
308 }
309
```

```
310 void loop(){
311   if (Serial.available() > 0){
312     matlabFlag = true;
313   }//else{
314     //matlabFlag = false;
315   //}
316   idx = 0;
317   if (matlabFlag){
318     if(Serial.read() == 255){
319       temp = true;
320       while(temp){
321         if(Serial.available() == 11){
322           for(idx = 0; idx <11; idx++){
323             dataIn[idx] = Serial.read();
324           }
325           temp = false;
326         }
327       }
328       clave = dataIn[0];
329     }
330     switch(clave){
331       case 4: // encender el sist de calentamiento
332         tempFlag = true;
333         digitalWrite(relePin, LOW);
334         break;
335       case 5: // poner en cero la celda de carga
336         precarga = -balanza.get_units(),4;
337         Serial.write(precarga & 0x000000FF);
338         Serial.write(precarga >> 8 & 0x000000FF);
339         Serial.write(precarga >> 16 & 0x000000FF);
340         Serial.write(precarga >> 24 & 0x000000FF);
341         break;
```

```
342     case 6: // default state
343         defaultFlag = true;
344         digitalWrite(relePin, HIGH);
345         break;
346     case 7: // para arriba con gui
347         setupFlag = true;
348         timeFlag = true;
349         setdir = HIGH;
350         vuelta = 0;
351         break;
352     case 8: // para abajo con gui
353         setupFlag = true;
354         timeFlag = true;
355         setdir = LOW;
356         vuelta = 0;
357         break;
358     case 9: // apago el esayo, solo quiero apagar el motor
359         motorFlag = false;
360         traccionFlag = false;
361         creepFlag = false;
362         relajacionFlag = false;
363         distraccionFlag = false;
364         datosFlag = false;
365         matlabFlag = false;
366         bufferFlag = false;
367         digitalWrite(driverPUL, LOW);
368         break;
369     case 10: //traccion
370         freqLSB = byte(dataIn[1]);
371         freqByte = byte(dataIn[2]);
372         freqMSB = byte(dataIn[3]);
373         freqByte = freqByte << 8;
```

```
374     freqMSB = freqMSB << 16;
375     variableOpcional = byte(dataIn[4]);
376     frequencySpeed = freqMSB + freqByte + freqLSB;
377     indicadorVueltas = 1666666/(2*frequencySpeed); //1666666 es ...
           1/6us multiplicado por 10 para abarcar un decimal mas
378     if (variableOpcional == 11){
379         maxDisplLSB = byte(dataIn[5]);
380         maxDisplByte = byte(dataIn[6]);
381         maxDisplMSB = byte(dataIn[7]);
382         maxDisplByte = maxDisplByte << 8;
383         maxDisplMSB = maxDisplMSB << 16;
384         maxDisplacement = maxDisplMSB + maxDisplByte + maxDisplLSB;
385     }
386     motorFlag = true;
387     datosFlag = true;
388     traccionFlag = true;
389     distraccionFlag = false;
390     creepFlag = false;
391     relajacionFlag = false;
392     setdir = HIGH;
393     pasos = 0;
394     contadorDeVueltasTraccion = 0;
395     break;
396 case 20: //creep
397     loadLSB = byte(dataIn[1]);
398     loadByte = byte(dataIn[2]);
399     loadMSB = byte(dataIn[3]);
400     loadByte = loadByte << 8;
401     loadMSB = loadMSB << 16;
402     load = loadMSB + loadByte + loadLSB;
403     indicadorVueltas = 0;
404     motorFlag = true;
```

```
405     datosFlag = true;
406     creepFlag = true;
407     traccionFlag = false;
408     distraccionFlag = false;
409     relajacionFlag = false;
410     pasos = 0;
411     contadorDeVueltasTraccion = 0;
412     setdir = HIGH;
413     break;
414 case 30: //relajacion
415     maxDisplLSB = byte(dataIn[1]);
416     maxDisplByte = byte(dataIn[2]);
417     maxDisplMSB = byte(dataIn[3]);
418     maxDisplByte = maxDisplByte << 8;
419     maxDisplMSB = maxDisplMSB << 16;
420     maxDisplacement = maxDisplMSB + maxDisplByte + maxDisplLSB;
421     indicadorVueltas = 0;
422     //la idea aca es dejar la distancia entre mordazas siempre iguales
423     // que cambie muy poquito e ir sensando la tension
424     //asi que se supone que el motor no tiene que moverse
425     //solo senso con la celda de carga
426     //si debo guardar la distancia entre mordazas
427     motorFlag = true;
428     datosFlag = true;
429     traccionFlag = false;
430     creepFlag = false;
431     distraccionFlag = false;
432     relajacionFlag = true;
433     contadorDeVueltasTraccion = 0;
434     setdir = HIGH;
435     pasos = 0;
436     break;
```

```
437     case 40: //distraccion
438         freqLSB = byte(dataIn[1]);
439         freqByte = byte(dataIn[2]);
440         freqMSB = byte(dataIn[3]);
441         freqByte = freqByte << 8;
442         freqMSB = freqMSB << 16;
443         frequency = freqMSB + freqByte + freqLSB;
444         indicadorVueltas = 1666666/(2*frequency); //1666666 es 1/6us ...
           multiplicado por 10 para abarcar un decimal mas
445         maxDisplLSB = byte(dataIn[4]);
446         maxDisplByte = byte(dataIn[5]);
447         maxDisplMSB = byte(dataIn[6]);
448         maxDisplByte = maxDisplByte << 8;
449         maxDisplMSB = maxDisplMSB << 16;
450         maxDisplacement = maxDisplMSB + maxDisplByte + maxDisplLSB;
451         variableOpcional = byte(dataIn[7]);
452         if (variableOpcional == 41){
453             cyclesLSB = byte(dataIn[8]);
454             cyclesByte = byte(dataIn[9]);
455             cyclesMSB = byte(dataIn[10]);
456             cyclesByte = cyclesByte << 8;
457             cyclesMSB = cyclesMSB << 16;
458             cycles = cyclesMSB + cyclesByte + cyclesLSB;
459         }
460         motorFlag = true;
461         datosFlag = true;
462         distraccionFlag = true;
463         traccionFlag = false;
464         creepFlag = false;
465         relajacionFlag = false;
466         setdir = HIGH;
467         pasos = 0;
```

```
468     contadorDeVueltasDistraccion = 0;
469     contadorDeVueltasTraccion = 0;
470     cambioDireccion = true;
471     break;
472 }
473 clave = 0;
474
475 if(tempFlag){
476     sensorDS18B20.requestTemperatures();
477     Input = sensorDS18B20.getTempCByIndex(1);
478     if(Input != -127.00){
479         myPID.Compute();
480         analogWrite(PIN_OUTPUT, Output);
481         //long intermediate = Input*100;
482         //long temperatura = round(intermediate);
483         Serial.write(byte(Input*100));
484     }
485 }
486 if( Input > 36 && Input < 38){
487     if (avisoTempFlag){
488         Serial.write(4); // 4 avisa que la temp llego a 37
489         avisoTempFlag = false;
490     }
491 }
492 if (bufferFlag){ // mando high desp mando low
493     bufferFlag = false;
494     sendBuffer[0] = 255;
495     sendBuffer[1] = buffer1[0];
496     sendBuffer[2] = buffer1[1];
497     sendBuffer[3] = 255;
498     sendData();
499 }
```

```
500     }
501 }
502 void sendData(){ // en 1 sola interrupcion no llego a mandar la ...
    informacion. Tardo por lo menos 0.1 ms en mandar info. Asi que
503 //como quiero que 1 Fs sea de aprox 31.25 muestras por segundo, tengo ...
    que tomar 1 dato cada 32 ms -> tengo que contar 5000 vueltas de ...
    interrupcion
504 for(int i = 0; i < N; i++){
505     long var = sendBuffer[i];
506     Serial.write(byte(var & 0x000000FF));
507     Serial.write(byte((var >> 8) & 0x000000FF));
508     Serial.write(byte((var >> 16) & 0x000000FF));
509     Serial.write(byte((var >> 24) & 0x000000FF));
510 }
511 }
512
513 void distraccion(){
514     if(variableOpcional == 41){
515         if (cycles == contadorDeVueltasDistraccion && pasos == 0){
516             motorFlag = false;
517             digitalWrite(driverPUL, LOW);
518             contadorDeVueltasDistraccion = 0;
519             distraccionFlag = false;
520         }
521     }
522 }
523
524 void traccion(){
525     if( variableOpcional == 11){
526         if(pasos ≥ maxDisplacement){
527             motorFlag = false;
528             digitalWrite(driverPUL, LOW);
```

```
529     contadorDeVueltasTraccion = 0;
530   }
531 }else{
532   if(pasos ≥ 250000){
533     motorFlag = false;
534     digitalWrite(driverPUL,LOW);
535     contadorDeVueltasTraccion = 0;
536   }
537 }
538 }
539
540 void creep(){
541
542 }
543
544 void relajacion(){
545   if(pasos == maxDisplacement){
546     motorFlag = false;
547     digitalWrite(driverPUL,LOW);
548     contadorDeVueltasTraccion = 0;
549   }
550 }
551
552 void rupturaDeMuestra(){
553   //if(peso < 0.7*precarga ){
554     // motorFlag = false;
555     //datosFlag = false;
556     //digitalWrite(driverPUL,LOW);
557   //}
558 }
559
560 void defaultState(){
```

```
561 defaultFlag = true;
562 //apagar todo y desconectar
563 //analogWrite(PIN_OUTPUT, 0); //->PID
564 contadorDeVueltas = 0;
565 contadorDeVueltasDistraccion = 0;
566 contadorDeVueltasTraccion = 0;
567 }
```