



Proyecto Final de Grado

***Diseño, construcción y puesta en funcionamiento de un equipo
para la medición del espesor de recubrimientos delgados
mediante el método de abrasión esférica (“Calotester”)***

Neme, Ignacio Agustín

Ingeniería Mecánica

*- Directores: Dr. Ing. Colombo, Diego A.
Ing. Mandri, Alejo D.*

Mayo de 2019



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que me acompañaron en este camino y que me fueron de gran ayuda para llegar al final.

A mis padres y familiares que me han dado el apoyo emocional y económico necesario, a lo largo de toda la carrera.

A mis amigos que durante este tiempo estuvieron para colaborar y brindaron su tiempo y paciencia en apoyar este proyecto.

A mis directores, Ing. Alejo Mandri y Dr. Diego Colombo, que participaron activamente y me guiaron en el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

A Luciano Di Tonto y al Dr. Daniel Sosa que fueron de mucha ayuda y fuente de consulta permanente durante el proceso de fabricación.

A la Facultad de Ingeniería, a la Universidad Nacional de Mar del Plata en general, al Instituto Industrial Pablo Tavelli y todos los profesores que he tenido a lo largo de estos años, que me dieron la posibilidad de recibir una excelente formación académica.

Contenido

Resumen

1. Introducción.
2. Marco teórico.
 - 2.1. Procesos de recubrimientos.
 - 2.2. Técnicas de deposición de recubrimientos.
 - 2.2.1. Procesos de deposición en estado de solución.
 - 2.2.2. Procesos de deposición en estado fundido o semifundido.
 - 2.2.3. Procesos de deposición en estado gaseoso.
 - 2.3. Propiedades básicas de los recubrimientos.
 - 2.4. Caracterización del espesor de recubrimientos delgados.
 - 2.4.1. Consideraciones sobre el espesor de recubrimientos.
 - 2.4.2. Técnicas de medición del espesor de recubrimientos.
 - 2.4.2.1. Método de abrasión esférica.
 - 2.4.2.2. Equipos existentes en el mercado.
 - 2.4.2.3. Otros equipos analizados.
3. Objetivos.
4. Diseño del equipo.
 - 4.1. Diseño mecánico.
 - 4.1.1. Eje principal.
 - 4.1.2. Portamuestras.
 - 4.1.3. Motor.
 - 4.1.4. Soportes de eje.
 - 4.1.5. Soporte de motor.
 - 4.1.6. Acople.
 - 4.1.7. Base del equipo.
 - 4.1.8. Carcasa.
 - 4.2. Diseño del sistema de control y alimentación.
 - 4.2.1. Sistema de control.
 - 4.2.1.1. Características de Arduino.
 - 4.2.1.2. Programación de Arduino.

- 4.2.1.3. Control del tiempo de ensayo.
 - 4.2.1.4. Control de velocidad de giro.
 - 4.2.2. Sistema de comunicación.
 - 4.2.3. Fuente de alimentación.
 - 5. Selección de componentes comerciales.
 - 5.1. Rodamientos.
 - 5.2. Motor.
 - 5.3. Placa de Arduino.
 - 5.4. Controlador integrado.
 - 5.5. Display LCD.
 - 5.6. Teclado matricial.
 - 5.7. Fuente de alimentación.
 - 6. Proceso de fabricación y ensamblaje.
 - 6.1. Fabricación del sistema eléctrico.
 - 6.2. Fabricación de piezas mecánicas.
 - 6.2.1. Fresado.
 - 6.2.2. Torneado.
 - 6.2.3. Taladrado.
 - 6.2.4. Roscado.
 - 6.2.5. Escariado.
 - 6.3. Ensamble del equipo.
 - 6.4. Estimación de costos de fabricación del equipo.
 - 6.4.1. Costos de componentes comerciales.
 - 6.4.2. Estimación de tiempos de mecanizado.
 - 7. Puesta en funcionamiento y ensayos preliminares.
 - 7.1. Puesta en funcionamiento.
 - 7.2. Ensayos preliminares.
 - 8. Conclusiones.
 - 9. Trabajos futuros.
 - 10. Referencias.
- Anexos: A, B y C.

Resumen

En el presente proyecto final de la carrera de Ingeniería Mecánica se diseñó, construyó y puso en funcionamiento un equipo para la medición de espesores de recubrimientos delgados mediante el método de abrasión esférica, denominado habitualmente “Calotester”.

Dada la existencia de equipos comerciales, caracterizados por su elevado costo, el punto de partida del proyecto fue la búsqueda de información acerca de los mismos. Una vez conocidas las principales características operativas y técnicas de los equipos comerciales, se realizó el diseño básico de la unidad a construir teniendo en cuenta los componentes comerciales disponibles en el mercado.

En base al diseño inicial se generó un prototipo virtual del equipo a construir utilizando un software de diseño. El mismo fue realizado en escala uno a uno para verificar posibles interferencias entre los movimientos relativos de los distintos componentes del equipo.

Con el diseño definido, se confeccionaron los planos de fabricación de cada componente no comercial, los cuales fueron mecanizados en el taller de Máquinas-Herramientas de la Facultad de Ingeniería. Una vez adquiridos los componentes comerciales y fabricados los componentes no comerciales, se procedió al armado y puesta en marcha del equipo.

Se realizaron ensayos sobre muestras recubiertas de espesor conocido para verificar el funcionamiento del equipo. Se confeccionaron además, los planos de ensamblaje/despiece del equipo y los manuales de operación y mantenimiento.

1. Introducción.

Un recubrimiento es un material que es depositado sobre la superficie de una pieza, por lo general denominada sustrato. Actualmente, muchos componentes mecánicos tienen la necesidad tecnológica de ser protegidos con recubrimientos de distintos materiales. Estos brindan características superficiales deseables como disminución del coeficiente de fricción, y el aumento de las resistencias a la corrosión, al desgaste y al rayado, entre otras. En otras ocasiones, son parte esencial para la funcionalidad o estética del producto terminado.

Existe una gran variedad de técnicas para la aplicación de recubrimientos. Estas técnicas pueden dividirse en tres grupos genéricos según el estado de agregación en que se encuentre el material a depositar (en solución o spray, en estado fundido o semifundido y en estado gaseoso). Las distintas características de estos recubrimientos, entre ellas su espesor, definen su comportamiento en servicio. Existen numerosos métodos para la medición del espesor de recubrimientos. Entre ellos, pueden citarse métodos ópticos para el caso de films transparentes o reflectantes o bien basados en observación directa por medio de microscopía óptica o electrónica de barrido, métodos que utilizan fluorescencia de rayos x, efectos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos, métodos basados en perfilometría y métodos basados en la producción de una impronta por desgaste mediante una esfera abrasiva (calotest).

Entre ellos, el método de abrasión esférica es simple, rápido, versátil y permite obtener resultados reproducibles. El ensayo implica colocar la superficie recubierta sobre un soporte y hacer girar sobre ella una esfera de acero de diámetro conocido, la cual debe ser previamente impregnada con pasta de pulir de granulometría fina. El giro de la bolilla provoca un desgaste abrasivo sobre la superficie recubierta y origina una huella de desgaste. Mediante la medición de las dimensiones de la huella por medio de microscopía óptica y aplicando una expresión matemática, se puede obtener el valor del espesor del recubrimiento.

Actualmente, varios grupos dentro de la Facultad de Ingeniería y de INTEMA trabajan con recubrimientos delgados y ninguno de los laboratorios involucrados cuenta con un dispositivo para la medición del espesor de los mismos de manera simple y rápida. Por lo tanto, con la construcción del Calotester, se dará una herramienta extra para la formación de futuros egresados y para la realización de tareas de investigación.

2. Marco teórico.

2.1. Procesos de recubrimientos.

La utilización de los recubrimientos es una herramienta fundamental para mejorar la resistencia a la corrosión y/o al desgaste o para obtener determinada propiedad funcional (electrónica, magnética, térmica, etc.) o estética de un componente, sin afectar las propiedades mecánicas del volumen interno. Esto abre la posibilidad de diseñar piezas con propiedades específicas en aquellas zonas donde la sollicitación sea crítica. Por ejemplo, el material base (sustrato) puede ser especificado en función de la tenacidad, mientras que el recubrimiento puede serlo en función de la resistencia al desgaste, así como del comportamiento a corrosión o a cargas de contacto.

Las propiedades de un recubrimiento dependen en forma compleja de las variables que controlan el proceso de deposición y de las características de los propios materiales involucrados. Por ejemplo, la adherencia de un recubrimiento al sustrato depende simultáneamente de las condiciones de limpieza previa del sustrato, de su rugosidad superficial, de las propiedades mecánicas (dureza, resistencia a la fractura, tensiones internas) y de la compatibilidad fisicoquímicas de los materiales, de la velocidad de formación del recubrimiento, de la temperatura del proceso, etc.

Para cumplir con los requisitos funcionales, la superficie recubierta debe poseer una combinación adecuada de propiedades, por ejemplo, dureza, elasticidad, resistencia al corte, tenacidad a la fractura, expansión térmica y adhesión. En la Figura 1 se distinguen cuatro zonas principales con las propiedades de mayor relevancia.

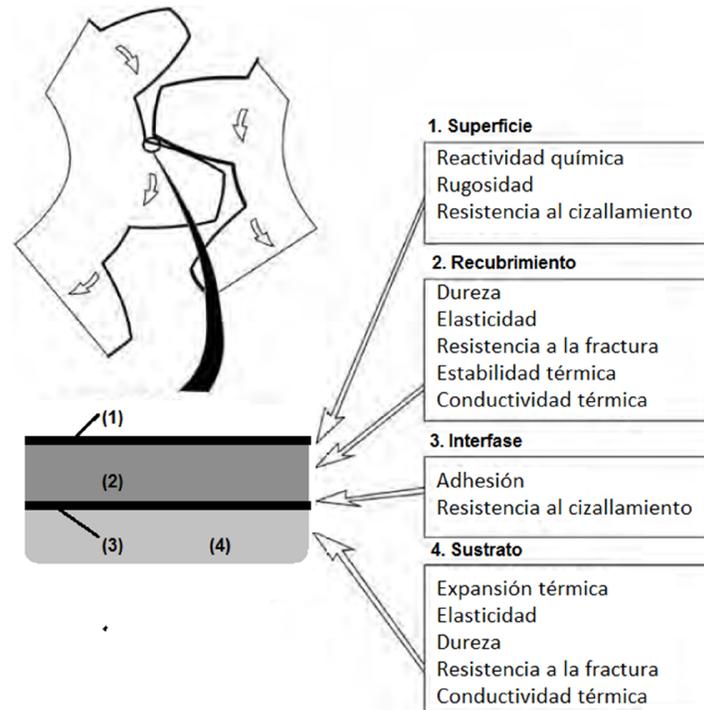


Figura 1. Propiedades importantes en diferentes zonas de una superficie recubierta [1].

Un problema principal en el diseño de la superficie es que muchas de las propiedades deseadas, como una buena adherencia en la interfaz recubrimiento/sustrato y sin interacciones de la superficie recubierta con la superficie opuesta, o una alta dureza y una alta tenacidad del recubrimiento, no pueden obtenerse fácilmente de manera simultánea. Por lo tanto, el diseño final del recubrimiento siempre es un compromiso entre las diferentes propiedades requeridas para el sistema recubrimiento/sustrato.

Existe una gran variedad de materiales para la conformación de estos recubrimientos, desde elementos puros como silicio, carbono, aluminio, cromo, zinc, etc., hasta compuestos multicomponentes tales como óxidos, carburos, y/o nitruros, entre otros. La estructura de los recubrimientos, según Donnet and Erdemir [2], puede ser monocapa (formada por una única capa de un dado material), multicapa (formada por dos o más capas de distintos materiales), tipo gradiente (donde la concentración de algún componente del recubrimiento varía desde la interfaz sustrato/recubrimiento hasta la superficie), nano estructurada (con dominios de tamaño nanométrico) o tipo *'superlattice'* (estructura periódica de capas de dos o más materiales).

Las ventajas de combinar varias estructuras y composiciones dentro de un recubrimiento incluyen el

logro de varias propiedades físicas individuales (por ejemplo, barrera de difusión combinado con una baja fricción), la reducción del desajuste en las propiedades químicas y mecánicas entre el sustrato y el recubrimiento (principalmente para mejorar la adhesión), el control de las tensiones residuales dentro de los recubrimientos, la capacidad de restringir la propagación de fisuras durante el funcionamiento en condiciones severas, la adaptabilidad al cambio de las condiciones de operación y la mejora de la dureza y/o la tenacidad.

2.2. Técnicas de deposición de recubrimientos.

El rápido desarrollo de los recubrimientos en los últimos años se debe en gran medida a la disponibilidad de nuevos métodos de deposición que pueden proporcionar mejoras en propiedades tales como morfología, composición, estructura, cohesión y adhesión, que anteriormente no se podían lograr. Las técnicas de deposición que han contribuido en mayor medida al creciente interés en este campo son aquellas asistidas por plasma debido a una serie de ventajas que presentan, entre las que se destacan la posibilidad de depositar una amplia variedad de materiales, la calidad obtenible, y la reducción del impacto ambiental.

Los procesos de formación de recubrimientos, de acuerdo a la clasificación propuesta por Holmberg and Matthews [1], pueden dividirse en tres grupos genéricos según el estado de agregación en que se encuentre el material a depositar. Estos grupos son los siguientes: en estado de solución, en estado fundido o semifundido y en estado gaseoso. La Figura 2 muestra, a modo de ejemplo, las principales técnicas dentro de cada grupo.

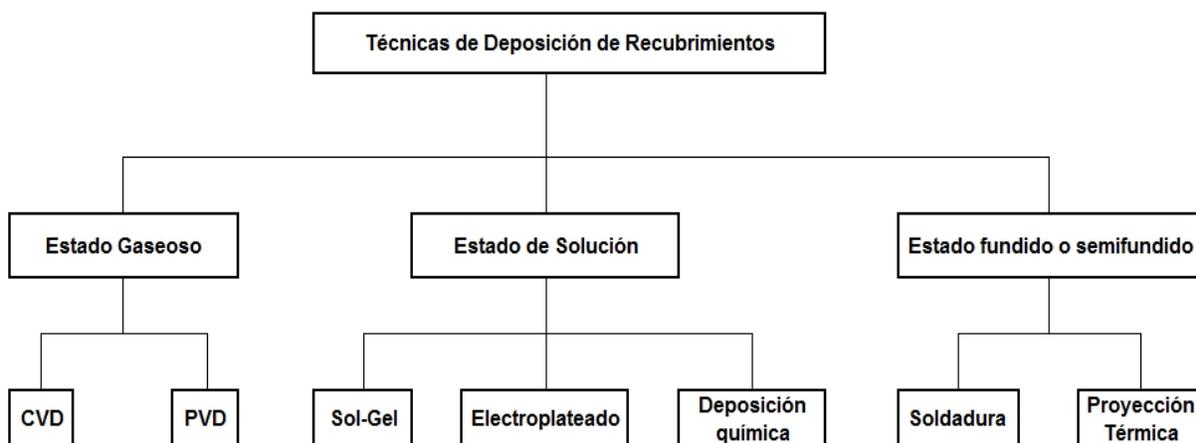


Figura 2. Clasificación general de técnicas según el estado de deposición [1]¹.

¹ Abreviaturas: CVD: Deposición química de vapor; PVD: Deposición física de vapor.

En las siguientes líneas se describen brevemente las técnicas de deposición más importantes dentro de cada grupo.

2.2.1. Procesos de deposición en estado de solución.

- ***Sol-Gel:***

Un “sol” es una dispersión coloidal de partículas. En física y química un coloide, sistema coloidal, suspensión coloidal o dispersión coloidal es un sistema conformado por dos o más fases, normalmente una fluida (líquido) y otra dispersa en forma de partículas generalmente sólidas muy finas, de diámetro muy pequeño. La fase dispersa es la que se halla en menor proporción. Normalmente la fase continua es líquida, pero pueden encontrarse coloides cuyos componentes se encuentran en otros estados de agregación de la materia.

El procesamiento de sol-gel se puede llevar a cabo mediante inmersión, centrifugado, pulverización o recubrimiento con barra tipo rodillo. Implica aplicar la dispersión de partículas (sol) a un sustrato, en donde sufre reacciones de hidrólisis y condensación para formar un “gel”. Una etapa de secado final conduce a una mayor condensación y la formación de una película superficial densa. Normalmente, la técnica se utiliza para la producción de películas de óxidos metálicos, en cuyo caso el gel se trata a temperaturas entre 150 y 900 °C para terminar de formar el recubrimiento.

- ***Electroplateado:***

El electroplateado, también denominado deposición electroquímica o galvanoplastia, es un proceso electrolítico en el cual se depositan iones metálicos en una solución electrolítica sobre una pieza de trabajo que funciona como cátodo. La disposición se muestra en la Figura 3. Por lo general, el ánodo está hecho del material del recubrimiento. Una fuente de alimentación externa produce el paso de corriente entre el ánodo y el cátodo. El electrólito es una solución acuosa de ácidos, bases o sales que conduce corriente eléctrica mediante el movimiento de iones metálicos.

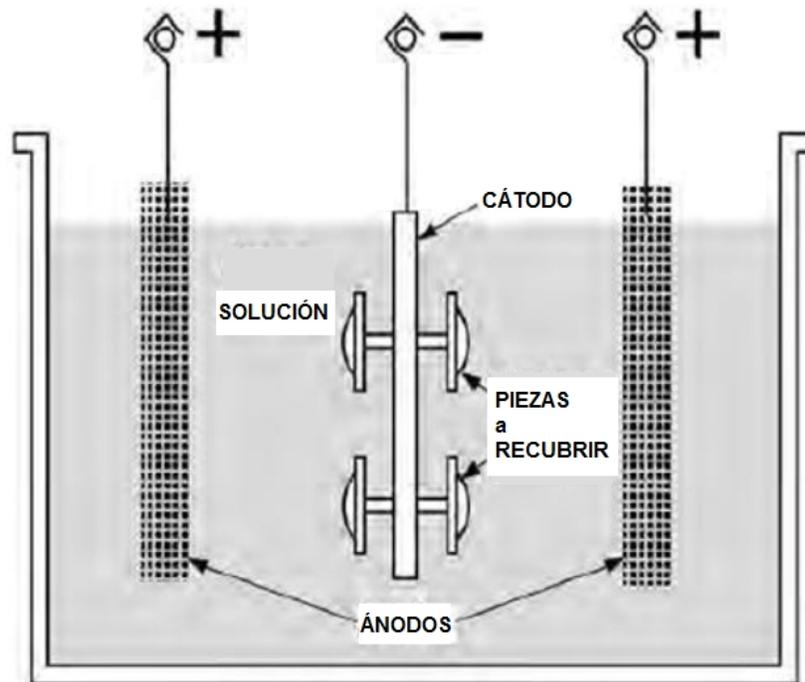


Figura 3. Disposición general de un equipo de electroplateado [1].

Los metales para recubrimiento más comunes en el electroplateado incluyen el zinc, el níquel, el estaño, el cobre y el cromo. En joyería, también se depositan metales preciosos (oro, plata y platino). El oro también se usa para contactos eléctricos.

- **Deposición Química:**

En este caso, se habla de métodos de deposición química en solución, dentro de los cuales encontramos:

- Reacciones químicas homogéneas, por ej.: reducción de un ión metálico en solución por un agente reductor.
- Plateado sin electricidad (“electroless plating”), que es similar a la anterior, excepto que la reacción tiene lugar en superficies que son catalíticas, en lugar de en toda la solución.
- Recubrimientos por conversión, donde un reactivo en solución reacciona con el sustrato, para formar un compuesto.

El proceso de reducción química se aplica, por ejemplo, pulverizando una solución de iones metálicos

y agentes reductores sobre una superficie, de manera que al producirse la reacción se forma el recubrimiento metálico. La técnica puede funcionar con metales y plásticos, pero los niveles de adhesión pueden ser bajos. Ejemplos de materiales de recubrimiento que pueden depositarse de esta manera son plata, oro y cobre.

En el plateado sin electricidad, la deposición sobre la superficie de una pieza ocurre en una solución acuosa que contiene los iones del material del recubrimiento que se vaya a utilizar. El proceso utiliza un agente reductor y la superficie de la pieza de trabajo actúa como catalizador para la reacción. Los metales que pueden emplearse para el plateado sin electricidad son pocos; y para los que pueden procesarse mediante esta técnica, el costo es generalmente mayor que en el plateado electroquímico. El metal más común es el níquel y algunas de sus aleaciones (Ni-Co, Ni-P y Ni-B).

El recubrimiento por conversión se refiere a una familia de procesos en los cuales se forma una película delgada de fosfato o cromato sobre una superficie metálica mediante reacción química. El uso principal del primero es mejorar las propiedades de barrera contra la corrosión de los aceros o el aluminio antes de pintar, es decir, es una forma de pasivar y proteger una superficie metálica. Por otro lado, los recubrimientos con cromato convierten el metal base en diversas formas de películas de cromatos, mediante soluciones acuosas de ácido crómico, sales de cromatos y otros productos químicos. Por lo general se aplican sumergiendo o rociando la pieza base. El proceso se aplica típicamente al acero, aluminio, magnesio, cadmio y zinc.

2.2.2. Procesos de deposición en estado fundido o semifundido.

- ***Soldadura:***

Es un proceso que, habitualmente, se usa como unión de dos o más componentes logrado a través de su coalescencia (fusión) aunque también se aplica para depositar recubrimientos. Los dos métodos más utilizados para aplicar recubrimientos son el soplete de oxiacetileno y la soldadura por arco. Estas técnicas se pueden aplicar a la mayoría de los metales, pero generalmente no se recomiendan para recubrir los no ferrosos que tienen puntos de fusión por debajo de 1100 °C. Se pueden depositar una amplia gama de metales y compuestos metal/cerámico. Los recubrimientos de este tipo se aplican generalmente para resistir el desgaste abrasivo, y típicamente contienen carburos de cromo, tungsteno o boro dispersados en una matriz de hierro, cobalto o níquel.

- **Proyección térmica:**

Este proceso cubre una amplia gama de técnicas en las que el material del recubrimiento se funde rápidamente en un medio gaseoso y se proyecta simultáneamente a alta velocidad sobre una superficie donde se adhiere y solidifica para producir un recubrimiento. Los procesos de pulverización térmica se pueden agrupar en dos categorías. Primero, hay procesos de menor energía que a menudo se denominan metalización, que incluyen la pulverización por arco y por llama. Estos se utilizan con frecuencia para pulverizar metales con resistencia a la corrosión, como el zinc y el aluminio. En segundo lugar, están los procesos de mayor energía, como la pulverización con plasma, la pistola de detonación y la proyección de alta velocidad (HVOF, de sus siglas en inglés High Velocity Oxy-Fuel). La técnica HVOF atrae un gran interés por sus ventajas respecto de las otras técnicas, como mejora de la eficiencia del proceso y de las propiedades de los recubrimientos. Con el proceso HVOF, la corriente de gas se produce mezclando y encendiendo oxígeno y combustible (gas o líquido) en una cámara de combustión y permitiendo que el gas a alta presión se acelere a través de una boquilla. Se introduce polvo en esta corriente, donde se calienta y se atomiza hacia la superficie del componente. La Figura 4 esquematiza este proceso.

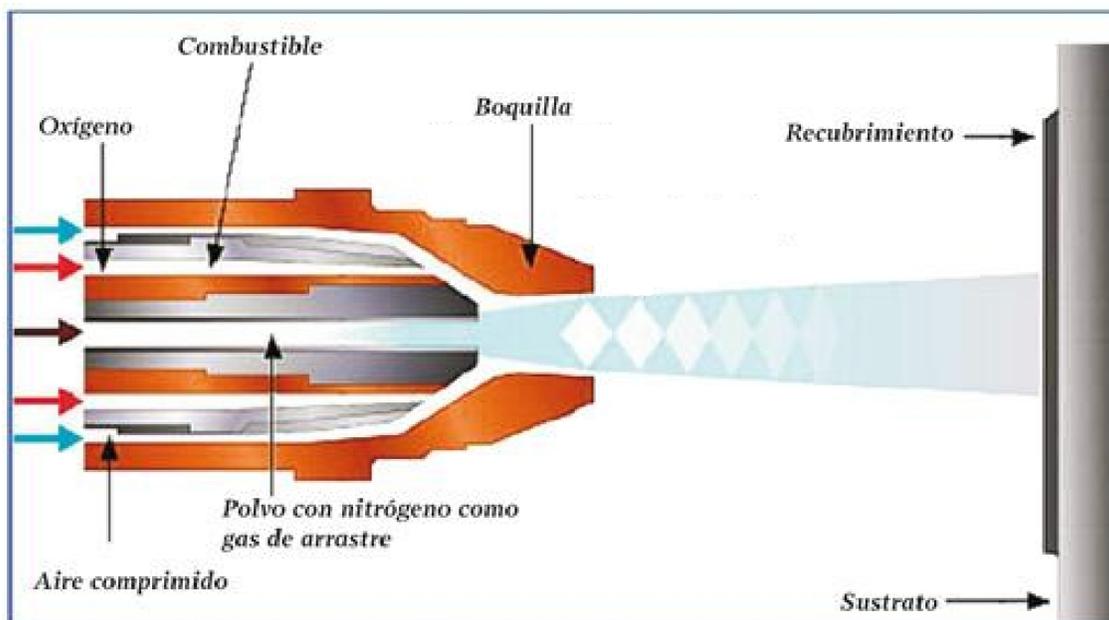


Figura 4. Técnica de proyección térmica de alta velocidad.

2.2.3. Procesos de deposición en estado gaseoso.

- ***Deposición física de vapor (PVD):***

La deposición física en fase vapor es un grupo de procesos en los cuales se convierte un material en su fase de vapor en una cámara de vacío y se condensa sobre la superficie de un sustrato como una película muy delgada. La técnica PVD se usa para aplicar una amplia variedad de materiales de recubrimiento: metales, aleaciones, cerámicas y otros compuestos inorgánicos e incluso ciertos polímeros. Los sustratos posibles incluyen metales, vidrio y plástico. Por lo tanto, representa una tecnología de recubrimiento muy versátil, aplicable a una combinación casi ilimitada de sustancias de recubrimiento y materiales de sustratos.

Todos los procesos de deposición física de vapor consisten en los siguientes pasos: 1) vaporización del material a depositar, 2) transporte del vapor al sustrato y 3) condensación de los vapores sobre la superficie del sustrato. Por lo general, estos pasos se realizan dentro de una cámara de vacío; por ello debe evacuarse la cámara antes del proceso real de deposición. La vaporización del material a depositar puede obtenerse mediante diversos métodos, como el calentamiento por resistencia eléctrica o el bombardeo con iones. Ésta y otras variaciones dan lugar a distintas técnicas PVD, las cuales se agrupan en tres tipos principales: 1) evaporación, 2) Sputtering y 3) plateado iónico. Las características de cada técnica se describen a continuación:

Evaporación:

La evaporación es un proceso en donde las especies en fase vapor se producen por aporte de energía térmica. La deposición se realiza en alto vacío, con presiones entre 10^{-5} y 10^{-9} Torr dependiendo del grado de contaminación gaseosa que puede ser tolerado en el recubrimiento. Para este rango de presiones, el camino libre de los átomos y moléculas es grande (5×10^2 a 5×10^7 cm) comparado con la distancia blanco-sustrato. De allí que el material vaporizado se proyecta en línea recta desde la superficie del blanco sin experimentar colisiones durante su trayectoria hacia el sustrato. En estas condiciones, el método se adapta idealmente al recubrimiento de sustratos planos pero tiene limitaciones para piezas de geometría compleja. El aporte de energía térmica puede estar dado por calentamiento resistivo, inducción, haz de electrones, arco eléctrico o láser. La Figura 5 esquematiza un proceso de evaporación no reactivo.

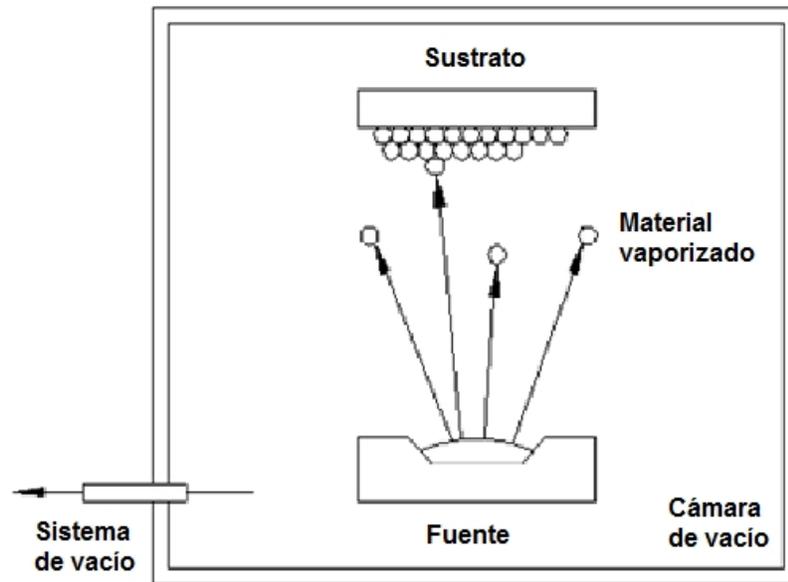


Figura 5. Esquema de un proceso de evaporación no reactivo [3].

La incorporación de un plasma a la técnica clásica de evaporación permite la deposición de materiales compuestos utilizando procesos reactivos. En los procesos reactivos el material evaporado del blanco es activado por el plasma. Como resultado de dicha activación se producen reacciones químicas con, por lo menos, uno de los gases del plasma sobre la superficie del sustrato, lo que da lugar a la formación de un recubrimiento compuesto. Los ejemplos clásicos son la deposición de óxidos (plasma compuesto por un metal puro y oxígeno), nitruros (plasmas que contienen nitrógeno) o carburos (plasmas que contienen metano o acetileno).

Sputtering:

El sputtering es un proceso de vaporización no térmico en donde las especies en fase vapor son creadas arrancando mecánicamente átomos o moléculas de la superficie del blanco mediante el bombardeo con iones energéticos y no reactivos. En la técnica clásica los iones energéticos se obtienen de un plasma. Las presiones de trabajo típicas varían entre 20 y 100 mTorr. En este rango de presiones, las partículas arrancadas del blanco colisionan aleatoriamente con las moléculas de gas en su trayecto al sustrato y llegan al mismo con velocidades de distinta magnitud y dirección. En estas condiciones el método tiene buena capacidad de cobertura para piezas de geometría compleja. Por otro lado, incorporando un gas reactivo al plasma pueden depositarse recubrimientos compuestos. La Figura 6 esquematiza un proceso de Sputtering reactivo. Las energías de los átomos arrancados por

sputtering, para una determinada velocidad de deposición, son aproximadamente un orden de magnitud mayor a aquellas obtenidas por evaporación a la misma velocidad. Sin embargo, debido a que la eficiencia del Sputtering es baja, las velocidades de deposición son invariablemente uno o dos órdenes de magnitud menores que las velocidades de evaporación.

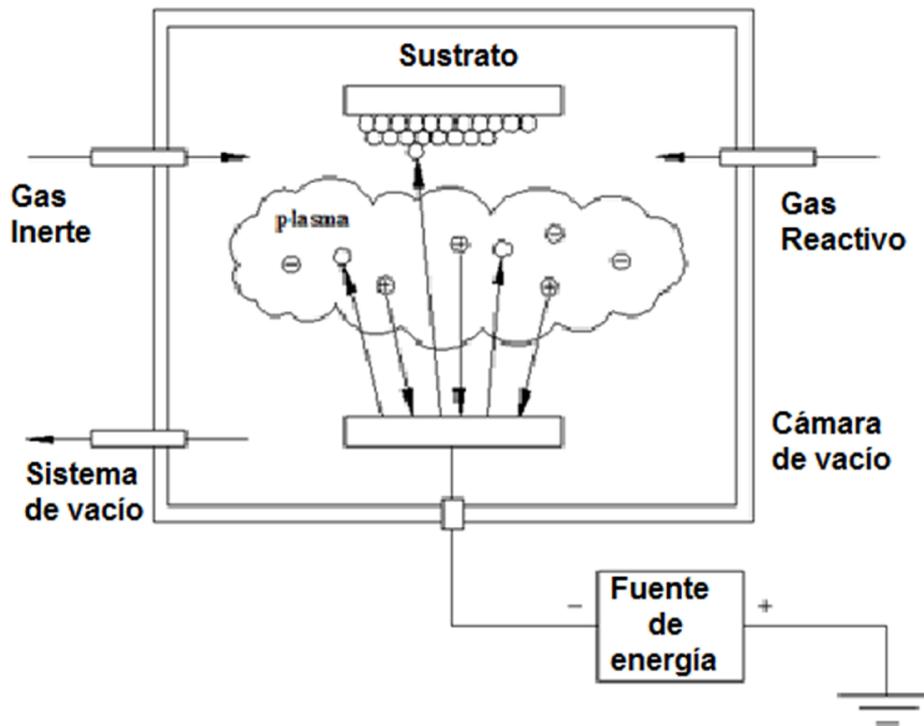


Figura 6. Esquema de un proceso de sputtering reactivo [3].

Plateado iónico:

La técnica de plateado iónico implica un proceso de deposición en estado gaseoso en el cual la superficie del sustrato y la película en crecimiento son sometidos a un bombardeo, continuo o periódico, con iones de energía suficiente para causar cambios en el proceso de formación de la película y en sus propiedades. Las especies en fase vapor pueden obtenerse ya sea por evaporación, Sputtering o vaporización mediante arco eléctrico.

Los iones energéticos son obtenidos en un plasma formado a partir de una descarga eléctrica en un gas inerte, usualmente argón. Agregando un gas reactivo al plasma, pueden depositarse materiales compuestos. Los iones energéticos son acelerados hacia la superficie del sustrato utilizando un campo eléctrico y colocando al mismo a un potencial negativo con respecto al potencial de plasma.

En líneas generales, la deposición bajo el efecto de un bombardeo iónico promueve el desarrollo de una película densa de alta calidad estructural con buenas propiedades de dureza y adherencia, y con tensiones internas relativamente altas. La Figura 7 esquematiza un proceso de plateado iónico reactivo.

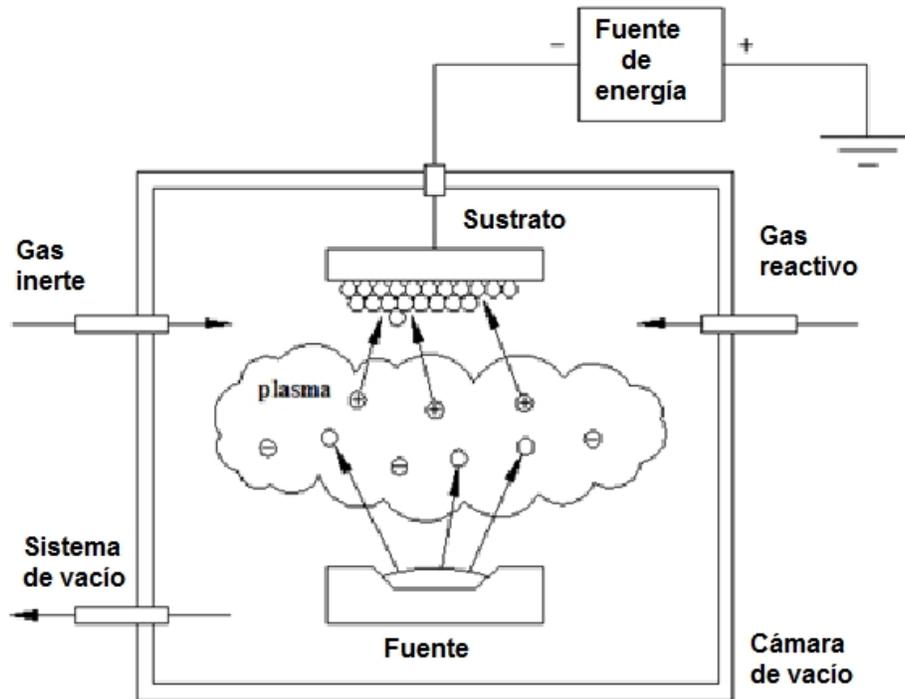


Figura 7. Esquema de un proceso de plateado iónico reactivo [3].

- **Deposición química en fase vapor(CVD):**

La deposición química en fase vapor implica la interacción entre una mezcla de gases y la superficie de un sustrato a elevada temperatura, lo que provoca la descomposición química de algunas de las partes del gas y la formación de una película sólida en el sustrato. Las reacciones ocurren en una cámara de reacción sellada. El producto de la reacción (ya sea un metal o un compuesto) nuclea y crece en la superficie del sustrato para formar el recubrimiento. La mayoría de las reacciones CVD requieren calor. Sin embargo, dependiendo de los productos químicos implicados, las reacciones pueden ser provocadas por otras fuentes de energía, tales como la luz ultravioleta o un plasma.

Las ventajas que se citan comúnmente para la CVD incluyen: 1) la capacidad de depositar materiales refractarios a temperaturas por debajo de sus puntos de fusión o sinterizado, 2) es posible controlar el tamaño del grano, 3) el proceso se realiza a la presión atmosférica (no requiere equipo de vacío) y

4) hay una buena unión del recubrimiento a la superficie del sustrato [4]. Las desventajas de este proceso son: 1) por lo general, la naturaleza corrosiva y/o tóxica de los productos químicos requiere una cámara cerrada así como equipo de bombeo y disposición especial, 2) ciertos ingredientes para la reacción son relativamente costosos y 3) el aprovechamiento de material es bajo.

Los metales convenientes para recubrimiento mediante CVD incluyen el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el vanadio y el tantalio. Esta técnica es especialmente adecuada para la deposición de compuestos, como el óxido de aluminio (Al_2O_3), el dióxido de silicio (SiO_2), el nitruro de silicio (Si_3N_4), el carburo de titanio (TiC) y el nitruro de titanio (TiN).

Los gases o vapores reactivos que se utilizan normalmente son hidruros metálicos (MH_x), cloruros (MCl_x), fluoruros (MF_x) y carbonilos ($\text{M}(\text{CO})_x$), donde M es el metal que se va a depositar y x se usa para balancear las valencias en el compuesto. En algunas de las reacciones se usan otros gases, como el hidrógeno (H_2), el nitrógeno (N_2), el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2) y el amoníaco (NH_3).

Los procesos CVD se realizan en un reactor, que consiste en: 1) sistema de suministro de reactivos, 2) cámara de deposición y 3) sistema de reciclado/disposición. En la Figura 8 se presenta el esquema de un reactor CVD.

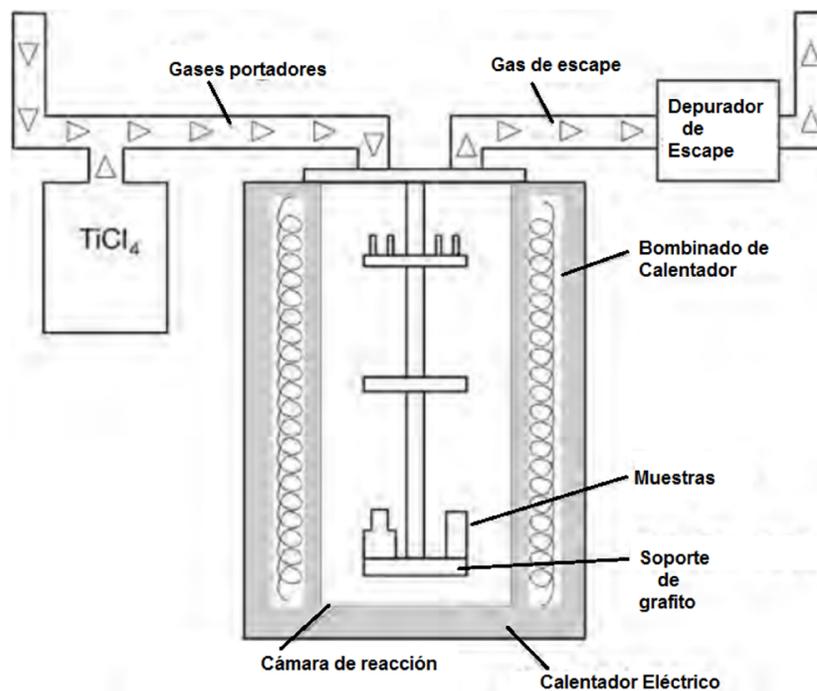


Figura 8. Esquema de un reactor CVD [1].

La cinética de crecimiento de los recubrimientos depositados químicamente depende de varios factores asociados con la interfaz gas-sustrato, que incluyen:

- Transporte de reactivos a través de la capa límite hacia el sustrato.
- Adsorción de reactivos en el sustrato.
- Difusión superficial atómica y molecular, reacciones químicas e incorporación a la red cristalina.
- Transporte de productos de reacción ('desechos') lejos del sustrato a través de la capa límite.

Un parámetro importante para todos los procesos de deposición es la temperatura de trabajo ya que es la encargada de controlar la termodinámica de las reacciones químicas y transformaciones metalúrgicas. En particular, una alta temperatura favorece la desorción de impurezas, promueve la difusión superficial de los átomos adsorbidos hacia posiciones de equilibrio (que aumenta tasa de crecimiento de la película) y favorece la coalescencia de los centros de nucleación. En esas condiciones, el recubrimiento se desarrolla con una mayor perfección estructural y con una mayor densidad. Por lo tanto, tiene mejores propiedades mecánicas que un recubrimiento similar producido a menor temperatura [3,4].

La Figura 9 muestra los rangos de temperatura característicos para las distintas técnicas de deposición mencionadas.

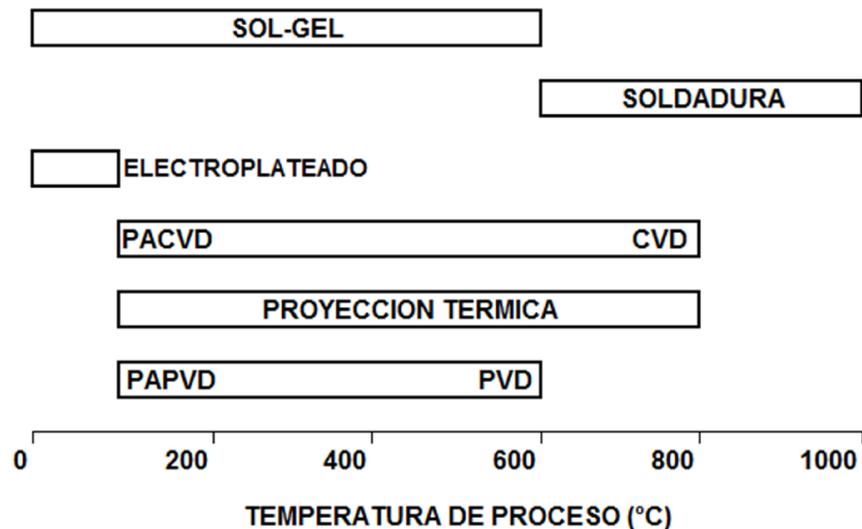


Figura 9. Rangos de temperaturas de proceso para distintas técnicas de deposición [1].

2.3. Propiedades básicas de los recubrimientos.

La adherencia, dureza y espesor del recubrimiento son las propiedades de mayor relevancia práctica. Si bien parecen tener a primera vista una interpretación directa y ser fácilmente caracterizables, al profundizar en el estudio para conocer su magnitud se encuentran las dificultades. Resulta que, como el sustrato y el recubrimiento forman parte de un mismo sistema mecánico y sus partes están íntimamente vinculadas, es complejo separar el comportamiento individual de cada uno, lo que dificulta la medición de las propiedades en discusión.

El resultado general de la situación señalada es que coexisten en la práctica diferentes técnicas de caracterización para las propiedades mencionadas. Algunas de ellas son de carácter cuantitativo, en tanto que otras son de carácter cualitativo y, en ciertos casos, aun tratándose de la misma técnica los resultados obtenidos con diferentes equipos no son directamente comparables entre sí. Esto indica la falta de técnicas de caracterización de validez universal, tanto a nivel de investigación y desarrollo como a nivel industrial y la necesidad de establecer patrones adecuados a tal efecto.

2.4. Caracterización del espesor de recubrimientos.

2.4.1. Consideraciones sobre el espesor de recubrimientos.

El espesor de un recubrimiento parece un parámetro característico de relativa importancia y simple interpretación. Desde un punto de vista funcional esto no es así. El espesor de un recubrimiento es de crítica importancia en aplicaciones ópticas y, en particular, en el desarrollo de filtros ópticos, donde el espesor de las distintas capas depositadas deben guardar relación precisa con las longitudes de onda que estos deben reflejar o transmitir. También es importante en aplicaciones de microelectrónica en donde los espesores de las películas depositadas deben cumplir con estrictas tolerancias y tener una alta reproducibilidad. En el caso particular de recubrimientos para aplicaciones tribológicas, el espesor está vinculado directamente a propiedades del recubrimiento como coeficiente de fricción, tensiones residuales, dureza y adherencia [5].

El espesor de un recubrimiento puede definirse desde el punto de vista geométrico como la longitud característica de la película medida en forma perpendicular a la superficie del sustrato. Esta definición no tiene en cuenta la densidad de masa del mismo y entonces resulta independiente del grado de porosidad del recubrimiento. En casos donde es relevante la porosidad y densidad, se habla de 'espesor de masa' depositado [1,5]. La Figura 10 muestra los espesores típicos para las distintas técnicas de deposición.

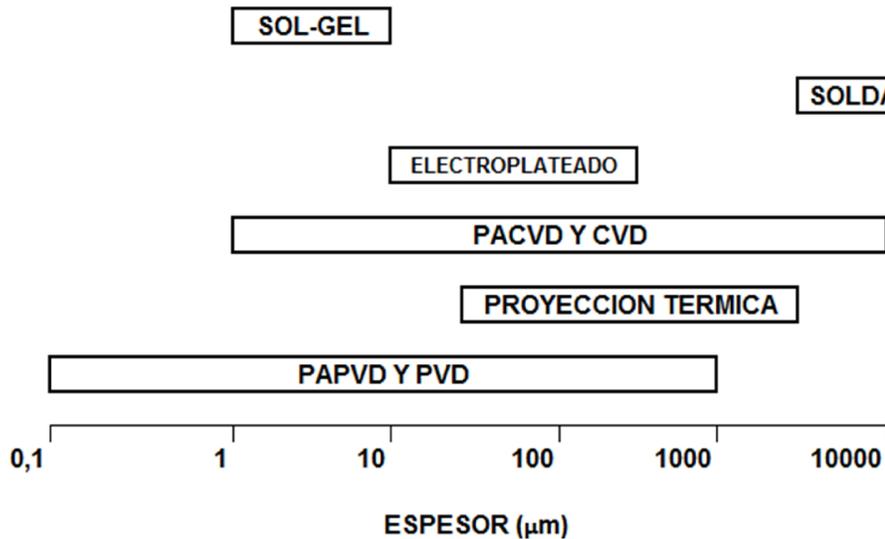


Figura 10. Rangos espesores típicos de recubrimientos producidos por distintas técnicas [1].

Considerando particularmente los recubrimientos producidos mediante PVD y CVD, los espesores típicos son del orden 1-10 μm . Como se mencionó anteriormente, la adherencia depende en forma compleja del espesor. Un resultado de la existencia de tensiones internas en el recubrimiento es que la tensión de corte en la interfaz aumenta con el espesor de película y reduce la adherencia. En particular, para espesores más allá de un cierto valor crítico, esas tensiones pueden llegar a producir el desprendimiento espontáneo de la película. Por otra parte, un mayor espesor de recubrimiento le da mayor rigidez y aumenta su capacidad portante, lo que produce una menor deformación del conjunto recubrimiento/sustrato para una dada carga en condiciones de servicio, como se muestra en la Figura 11. Esto resulta en un aumento de la adherencia con el espesor del recubrimiento, siendo un efecto opuesto a lo descrito anteriormente.

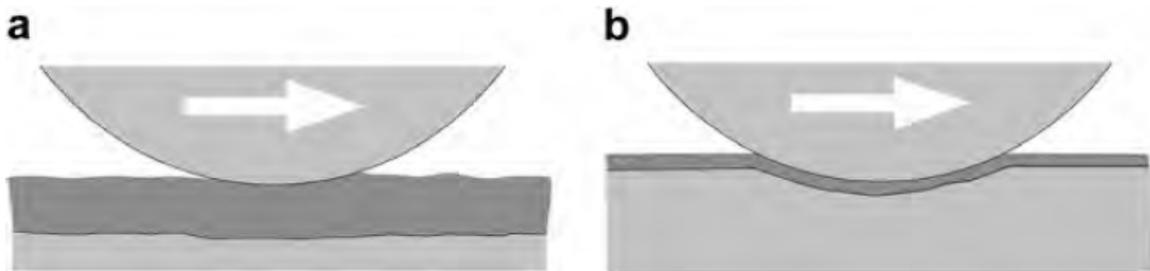


Figura 11. Efecto del espesor del recubrimiento sobre la deformación de la interfase [1,5].

Existe, en adición, una relación entre la tensión de fractura del recubrimiento y su espesor, lo que es relevante para fallas cohesivas y fija valores límites al espesor del recubrimiento.

Por lo general existe un valor óptimo para el espesor de los recubrimientos, que depende de los materiales del sustrato y del recubrimiento y de la aplicación específica considerada. En la Figura 12 se grafica la vida útil de una herramienta de corte recubierta para distintos espesores de película. Se observa que el espesor óptimo del recubrimiento es del orden de los 2-3 μm y que toda desviación por encima o por debajo de este valor da como resultado una vida útil significativamente inferior.

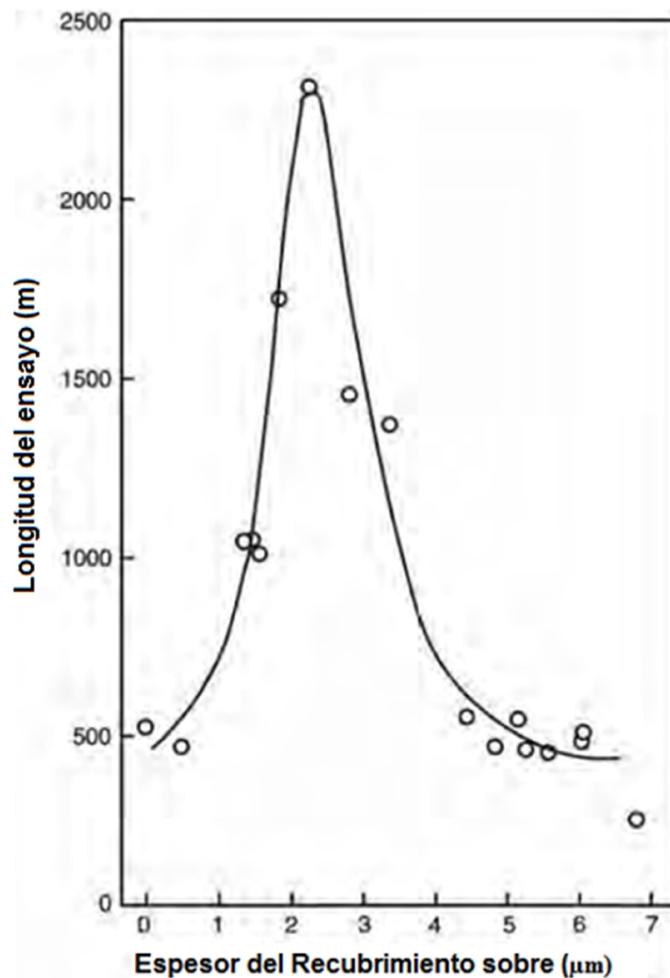


Figura 12. Vida útil de una herramienta de corte de acero ASP30 recubierto con TiN en función del espesor de recubrimiento [1,5].

2.4.2. Técnicas de medición del espesor de recubrimientos.

Existe gran variedad de técnicas de medición del espesor de recubrimientos. Entre ellas, pueden

citarse métodos ópticos (interferométricos) para el caso de recubrimientos transparentes o reflectantes, o bien basados en observación directa por medio de microscopía óptica o electrónica de barrido, métodos que utilizan fluorescencia de rayos x, efectos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos, métodos que utilizan cristales osciladores cuya frecuencia de resonancia depende de la masa del recubrimiento depositado, métodos basados en perfilometría o basados en la producción de una impronta por desgaste mediante una esfera abrasiva que permiten el cálculo del espesor mediante consideraciones puramente geométricas. Existe también la posibilidad de determinar espesores mediante diferencia de peso del sustrato antes y después del recubrimiento. Si bien, algunas de las técnicas de medición del espesor pueden lograr grandes precisiones, todas tienen ventajas y restricciones en cuanto a la aplicación.

Las técnicas ópticas son aplicables tanto a recubrimientos reflectantes como transparentes y producen valores de espesor de alta precisión en general. Además, las mediciones se realizan rápidamente, con frecuencia son técnicas no destructivas y utilizan equipos relativamente económicos. El principio en el que se basan la mayoría de las técnicas ópticas es la interferencia de dos o más haces de luz, cuya diferencia de trayectoria óptica está relacionada con el espesor. Los detalles de la instrumentación difieren, dependiendo de si se trata de materiales reflectantes o transparentes.

La técnica de observación directa sobre secciones transversales requiere el uso de un microscopio óptico o electrónico de barrido para efectuar la medición. Es una técnica destructiva, ya que el componente debe cortarse para producir la sección. Además, la precisión depende de la topografía del sustrato, de la capacidad de distinguir la interfaz recubrimiento/sustrato y de la calidad de la deposición.

La técnica de fluorescencia de rayos x es un método rápido, fiable, independiente de la geometría del componente y no destructivo. Esta tecnología permite medir recubrimientos metálicos e inorgánicos, estructuras multicapas de manera simultánea tanto en el rango micrométrico como en el nanométrico y, en caso de aleaciones, su composición. Sin embargo, el equipamiento necesario requiere de una calibración cuidadosa para obtener resultados precisos.

Existen varios otros métodos de evaluación de espesor disponibles comercialmente, basados en principios eléctricos, magnéticos o electromagnéticos. Sin embargo, estos son generalmente adecuados para recubrimientos de mayor espesor a los aquí considerados.

El método de medición de cristales oscilantes se basa en que placas elásticas homogéneas en vibración mecánica tienen frecuencias resonantes que dependen de sus dimensiones, módulos elásticos y, lo que es más importante, de su densidad. Una masa adicional en forma de recubrimiento depositado

altera (baja) la frecuencia de resonancia al cambiar efectivamente las propiedades del conjunto vibrante. Esta técnica es muy precisa pero requiere de equipos sofisticados.

La técnica de perfilometría es rápida, versátil y una de las más precisas. Puede aplicarse sobre cualquier tipo de recubrimiento. Sin embargo, requiere de un escalón entre sustrato y recubrimiento para poder efectuar la medición. Este escalón puede generarse al enmascarar una zona del componente a recubrir o mediante un decapado químico o mecánico posterior a la aplicación del recubrimiento.

El método de medición de peso parece, a primera vista, ser una manera fácil y directa de determinar el espesor. Conociendo superficie (A), masa (m , obtenida por diferencia entre el peso antes y después de la deposición) y densidad de recubrimiento (d), se puede calcular el espesor. Este método es comúnmente utilizado en laboratorios ya que requiere de balanzas de gran precisión. Por lo general el valor del espesor obtenido es impreciso ya que es muy difícil saber con exactitud el área y la densidad del recubrimiento. Esto se debe a la presencia de poros e imperfecciones en la película. Para espesores ultra-delgados este método está totalmente descartado.

2.4.2.1. Método de abrasión esférica.

El método de abrasión esférica es simple, rápido, versátil y de fácil interpretación. Además el equipamiento requerido no es muy sofisticado. El ensayo implica colocar la superficie recubierta sobre un soporte y hacer girar sobre ella una esfera de acero de diámetro conocido, la cual debe ser previamente impregnada con pasta de pulir de granulometría fina. El giro de la esfera provoca un desgaste abrasivo tanto en el recubrimiento como en el sustrato y origina una huella de desgaste, por lo tanto es un método destructivo. Este método puede usarse en muestras planas, esféricas o cilíndricas. El diámetro de la esfera es usualmente de entre 15 y 30 mm, y su tamaño determina la precisión de medición de las dimensiones de la impronta. La posición de la esfera relativa a la superficie recubierta y la presión ejercida (el peso propio de la esfera) son constantes. La Figura 13 muestra el principio de operación de un equipo de abrasión esférica para el caso de una muestra plana:

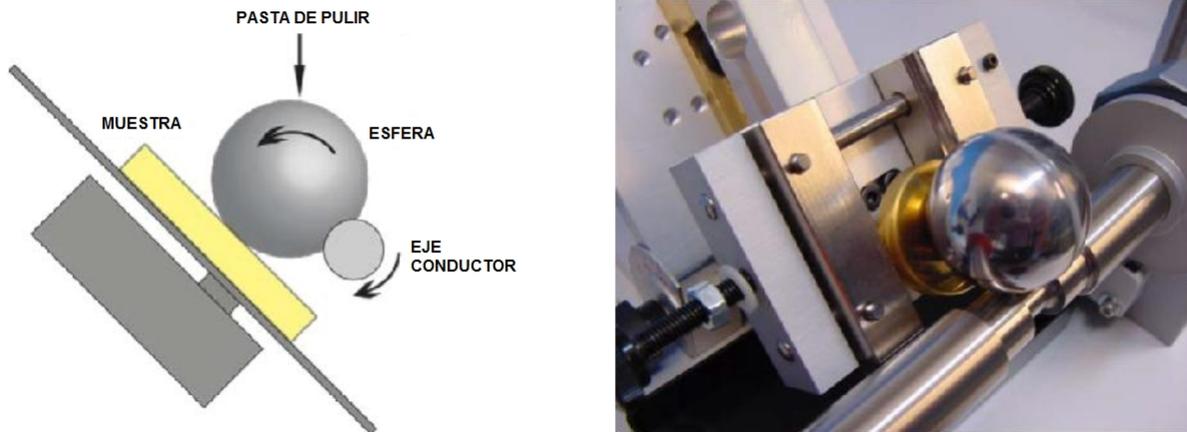


Figura 13. Posicionamiento de muestra, bolilla y eje durante el ensayo.

Para determinar el espesor del recubrimiento se deben medir las dimensiones de la impronta (o huella) formada durante el ensayo. Para ello se requiere de un microscopio óptico o algún otro método de magnificación. Para el caso de una muestra plana, se deben determinar las cotas x e y o $D1$ y $D2$, tal como se muestra en la Figura 14.

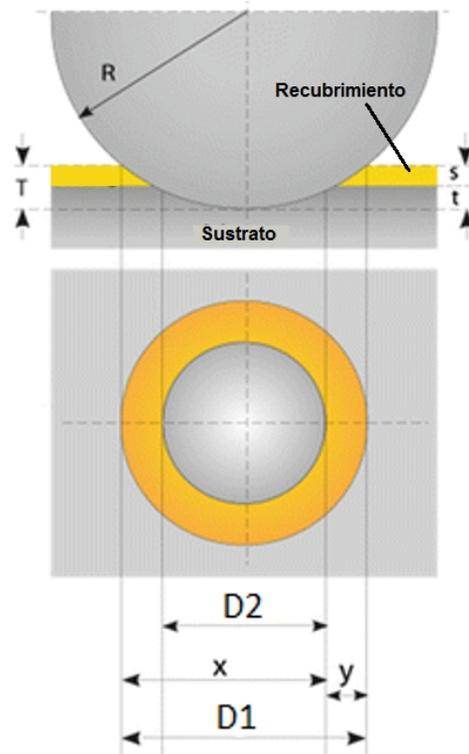


Figura 14. Impronta generada por el método de abrasión esférica y sus dimensiones características.

Finalmente, teniendo en cuenta el diámetro de bolilla utilizada (d), se puede hallar el espesor del recubrimiento a través de alguna de las siguientes expresiones:

$$E = \frac{D1^2 - D2^2}{4.d}$$

Ecuación 1.

$$E = \frac{x.y}{d}$$

Ecuación 2.

Las ecuaciones anteriores, obtenidas a partir de simples relaciones geométricas, son válidas en cuanto se cumpla que los diámetros de impronta exterior e interior ($D1$ y $D2$, respectivamente) son mucho menores que el diámetro de bolilla. El error debido a la aproximación es menor al 0,5 %. La precisión en la medición dependerá de la condición de la impronta generada, contraste entre superficies y características del microscopio. El error total es del orden del 5% y puede llegar hasta un 10% para recubrimientos de espesor menor a 1 μm . Este método, es utilizado habitualmente para determinar espesores en el rango de 0,1 a 50 μm .

Además esta técnica de simple utilización da resultados reproducibles y coincidentes entre sí cuando se trata de comparar resultados obtenidos en distintos laboratorios con diferentes equipos. Aunque, el inconveniente que presenta el método es la necesidad de un equipo auxiliar, como un microscopio, para poder ver la impronta y medir sus dimensiones de interés. Pero, respecto de otros métodos, es más simple, rápido y económico. En la Figura 15 se puede observar, a modo de ejemplo, la impronta que se genera sobre una superficie recubierta. En este caso, los contornos se encuentran muy bien definidos, pero dependiendo de la rugosidad de la muestra utilizada y la precisión del instrumento para generar la huella, puede no ocurrir así, constituyendo una fuente de error dada la dificultad para identificar los bordes de la figura formada.

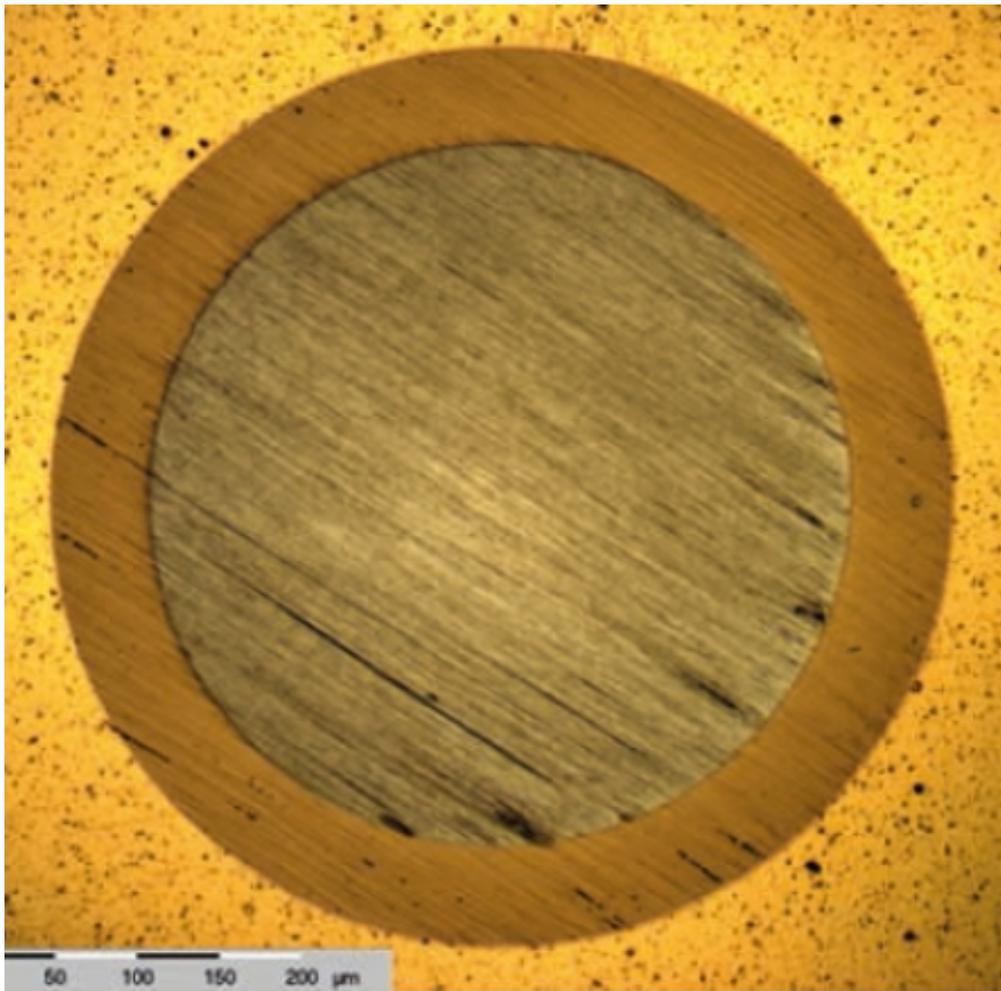


Figura 15. Imagen obtenida con microscopio óptico de una impronta producida sobre una superficie recubierta.

La figura anterior proviene del ensayo a un recubrimiento formado por una única capa. Puede darse también el caso de recubrimientos multicapa, es decir, distintos materiales depositados unos sobre otros. Para resolver la medición de este tipo de recubrimientos, se puede realizar una única impronta y hacer tantas mediciones como sea necesario para determinar el espesor de cada capa. La Figura 16 muestra una impronta en un recubrimiento formado por 6 capas alternadas de TiN y TiCN.

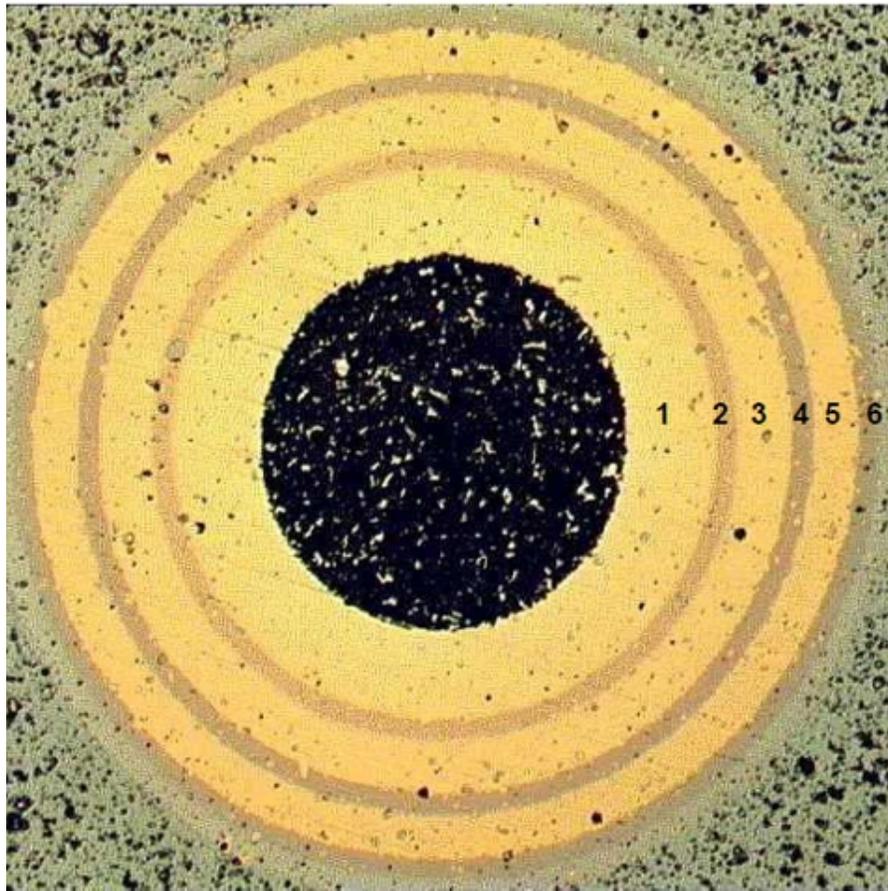


Figura 16. Imprinta producida sobre un recubrimiento TiN – TiCN multicapa.

2.4.2.2. Equipos existentes en el mercado.

En esta sección se describen brevemente las principales características constructivas de los equipos que existen comercialmente, sobre los cuales se basó el diseño del equipo desarrollado en este proyecto final. Si bien el principio operativo es el mismo, los equipos comerciales se diferencian entre sí en estructuras, diseños, componentes, flexibilidad y rango de parámetros operativos, entre otras cosas. A continuación se detallan las principales características de los equipos existentes en el mercado:

- **Calotester CSM (Standard Calotest y Calowear)**

CSM es una compañía que desarrolla, fabrica y vende instrumentos para caracterizar las propiedades mecánicas de las superficies. Entre sus equipos a la venta se muestra el Calotester, en sus dos versiones. La más simple es el Standard Calotest, mientras que la más sofisticada es el Calowear. Ambos presentan las siguiente especificaciones: velocidad del eje conductor entre 60 y 1200 rpm;

diámetro de bolillas de 20, 25 y 30 mm; tiempo elegible en los rangos de 10-90 segundos a 1-9 minutos; espacio de sujeción de muestras de 50x50 mm; inclinación regulable de la muestra y eje principal en voladizo, escalonado para diferentes diámetros de esfera y adaptable en posición axial. Por último, el Calowear presenta adicionalmente un sistema óptico para medición de impronta in situ, una bomba de alimentación continua de abrasivo y una celda de carga para controlar la fuerza aplicada sobre la muestra durante el ensayo. Las Figuras 17 y 18 muestran los equipos fabricados por CSM:



Figura 17. Standard Calotest de CSM.



Figura 18. Calowear de CSM.

- **Calotesters BAQ (KaloMAX II, KaloMAX NT II y KaloMAX NT II S3)**

La compañía BAQ desarrolla y produce dispositivos de prueba de dureza móviles y estacionarios para diversos métodos de medición, así como equipos de laboratorio para caracterizar los recubrimientos. Por un lado, tiene dos equipos específicos para la medición de espesor de recubrimientos (KaloMAX II y KaloMAX NT II S3). Por otro lado, el KaloMAX NT II, además de utilizarse para medir espesor, se puede usar para determinar la tasa de desgaste.

Las especificaciones comunes a los tres son: velocidad del eje conductor entre 100 y 1200 rpm; diámetro de bolillas entre 15 y 30 mm; tiempo elegible hasta 180 segundos; botones y pantallas LED para comunicación; sujeción de muestras planas de hasta 50 mm; sujeción de muestras redondas de entre 3 y 30 mm e inclinación fija de la muestra de 60°. Además, la muestra sujeta es desplazable, en todas las direcciones, por tornillos milimétricos.

En las Figuras 19, 20 y 21 se pueden observar los distintos modelos de equipos fabricados por BAQ:



Figura 19. KaloMAX II de BAQ.



Figura 20. KaloMAX NT II S3 de BAQ.



Figura 21. KaloMAX NT II de BAQ.

Como se puede observar, estos equipos poseen elastómeros colocados en el eje conductor para poder transmitir el movimiento, sin que haya contacto metálico ni resbalamiento de la esfera sobre el eje al momento de la abrasión. Esto asegura una mejor conducción. Además, tiene dos rodamientos, que brindan un mejor alineamiento, y del lado izquierdo, oculta, una polea que conecta el motor al eje. Particularmente, el modelo de la Figura 20, permite generar hasta tres improntas en simultáneo, mientras que el de la Figura 21 cuenta con sistema de suministro automático de abrasivo. Estos dos equipos poseen paneles de comandos más desarrollados que el primero.

- **Calotesters Anton-Paar (Calotest Compact y Calotest Industrial)**

Anton-Paar desarrolla, fabrica y distribuye instrumentos de precisión para laboratorio y sistemas de medición para proceso, utilizados en investigación, desarrollo y control de calidad. Entre sus equipos a la venta se encuentra el Calotester, en sus dos versiones, Calotest Compact y Calotest Industrial. Ambos presentan las siguiente especificaciones: velocidad del eje conductor entre 10 y 3000 rpm; diámetro de bolillas de 10 a 30 mm; tiempo elegible entre 1 y 10000 segundos; inclinación regulable de la muestra y eje principal en voladizo, escalonado para diferentes diámetros de esfera y adaptable

en posición axial. En las Figuras 22 y 23 se muestran los dos modelos mencionados.



Figura 22. Calotest Compact de Anton-Paar.



Figura 23. Calotest Industrial de Anton-Paar.

En la versión Industrial, el motor esta fijo en un brazo regulable en posición, que le permite al usuario

trabajar con muestras de tamaño ilimitado.

El fabricante ofrece como opcional un sistema de medición óptico con cálculo automático de espesor.

- **Calotester TriboTechnic**

Esta compañía de origen francés fabrica varios modelos de equipos que varían en cuanto a complejidad y sistemas auxiliares que poseen (Software diseñado específicamente para análisis, obtención de informe de cálculo, salida USB para adquirir datos, entre otros). Sin embargo, todos funcionan bajo las siguientes especificaciones de funcionamiento: eje principal en voladizo, escalonado para diferentes diámetros de esfera y regulable en posición axial; sistema de microscopio incorporado y con cálculo automático de espesor; portamuestras extensible para muestras de gran tamaño; regulación de ángulo de inclinación; comunicación con el usuario a través de display LED y botoneras.



Figura 24. Calotester de TriboTechnic.

2.4.2.3. Otros equipos analizados.

El Instituto de Física del Plasma (INFIP) dependiente del CONICET y la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (Universidad de Buenos Aires) cuenta con un Calotester cuyo diseño se basa en un eje con un doble cono en forma de V donde se apoya la bolilla. En cuanto al portamuestras, puede desplazarse gracias a un mecanismo con tornillo milimétrico. Con esto se pueden lograr improntas en distintas posiciones de la muestra, sólo desplazándola adherida al plano inclinado.

El giro del eje es logrado por la acción de un motor de corriente continua y un sistema de poleas. Además, está soportado por rodamientos que minimizan vibraciones y desalineamientos.

La velocidad rotación del motor y el tiempo son controladas a través de un variador de tensión (potenciómetro) y un temporizador, respectivamente. Este equipo permite utilizar una gama de diámetros de esferas desde 10 a 30 mm.

En la Figura 25 se muestra un esquema del sistema, mientras que en la Figura 26 se observa el equipo construido por INFIP.

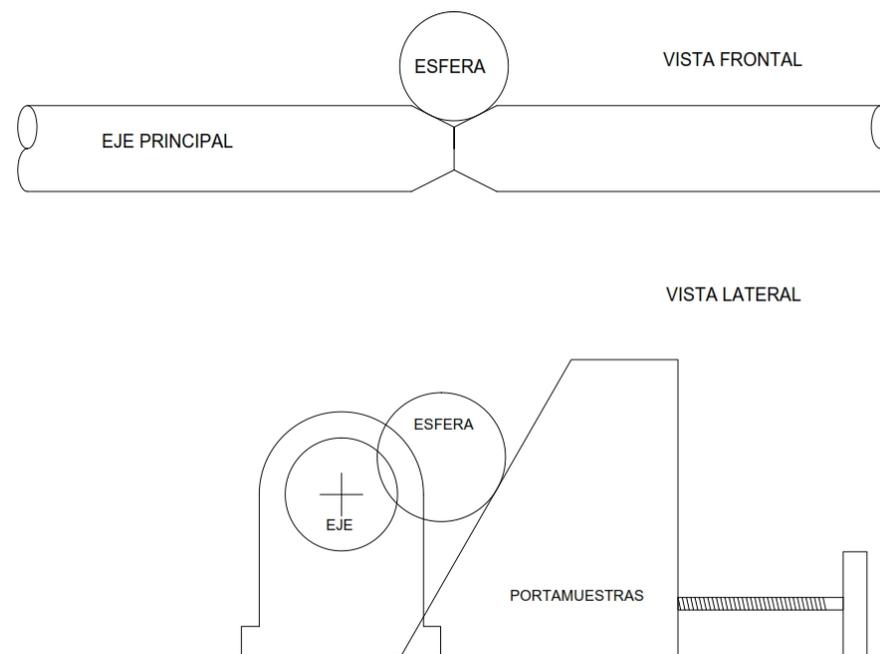


Figura 25. Esquema del Calotester construido por INFIP.

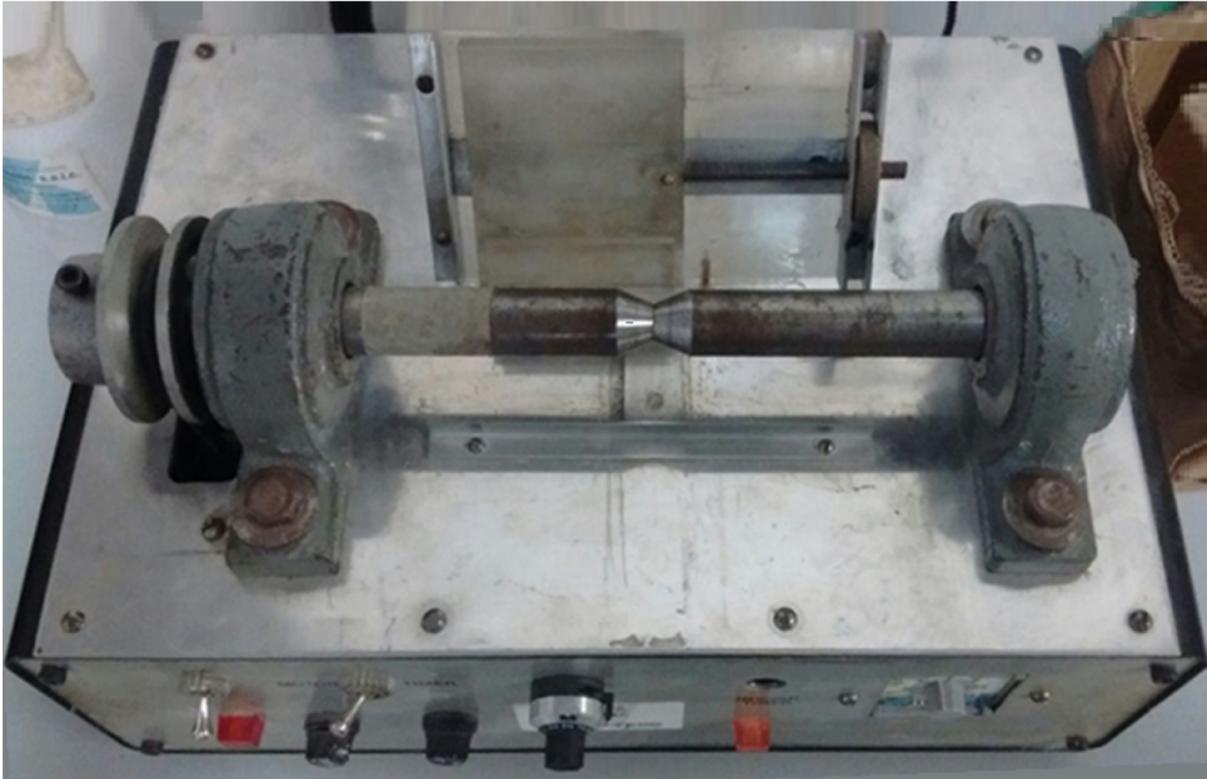


Figura 26. Calotester construido por INFIP.

3. Objetivos.

En base a la necesidad de contar con un dispositivo simple, rápido, versátil y de bajo costo para la medición de espesor de recubrimientos dentro del ámbito de la Facultad de Ingeniería y de INTEMA, el objetivo general de este proyecto es el diseño, construcción y puesta en funcionamiento de un equipo basado en el método de abrasión esférica, más comúnmente conocido como Calotester. El mismo, deberá permitir variar las condiciones de funcionamiento, tales como velocidad de rotación de la esfera de acero, posición del soporte portamuestras y tiempo de ensayo. Además, se deberá poder montar esferas de diferentes diámetros y probetas de distintas geometrías y/o tamaños.

Los objetivos particulares implican:

- Realizar el diseño básico del equipo teniendo en cuenta las principales características operativas y técnicas de los Calotesters comerciales y los componentes disponibles en el mercado.
- Generar un prototipo virtual del equipo en base al diseño inicial para verificar posibles interferencias entre los distintos componentes del mismo.
- Adquirir los componentes comerciales y fabricar los componentes no comerciales del equipo.
- Armar y poner en funcionamiento el equipo.
- Realizar ensayos sobre muestras recubiertas de espesor conocido para verificar el funcionamiento del equipo.
- Confeccionar los planos de ensamblaje/despiece del equipo y los manuales de operación y mantenimiento.

4. Diseño del equipo.

En esta etapa se aplican diversas técnicas y criterios ingenieriles con el objetivo de definir el dispositivo en cuestión con suficiente detalle como para permitir su fabricación. El presente diseño se compone de una parte mecánica, en la cual resulta necesario dimensionar cada elemento del equipo, seleccionar materiales, procesos de fabricación y elementos comerciales, y otra parte relativa al sistema de control y alimentación, que incluye los circuitos, la selección de componentes electrónicos, la programación, y el diseño de la interfaz con el usuario.

Este trabajo está enfocado a obtener un equipo que funcione eficazmente, de manera segura y cómoda para el usuario, haciendo además, un uso racional del recurso económico. El análisis de equipos comerciales (ya mencionados en este texto), sumada a la experiencia de otros usuarios resulta de utilidad para alcanzar los objetivos del diseño. A partir de lo observado se identifican diversas configuraciones para: soportar el eje conductor (apoyo doble o voladizo); transmitir el movimiento a la bolilla (eje principal escalonado, con doble cono en forma de V o con elastómeros); disponer de la muestra en el sector de trabajo (portamuestras regulable o fijo en un ángulo); acoplar motor conductor con eje principal (sistema de poleas, acople elástico o acople rígido) y establecer tiempos y velocidades de abrasión (con reguladores analógicos o procesamiento electrónico).

4.1. Diseño mecánico.

Esta sección se enfoca en los criterios adoptados en el diseño de los componentes mecánicos necesarios para generar el movimiento de la esfera y para el posicionado y sujeción de las muestras. Se decidió construir un equipo con el eje principal soportado por dos apoyos mediante rodamientos rígidos de bolas, mecanizado con un doble cono en forma de V para la transmisión del movimiento a la bolilla, y conducido por un motor eléctrico a través de un acople rígido. Con respecto al portamuestras, se optó por un conjunto de ángulo fijo de 60°, que deslice por un par de guías sujetas a la base y que en la parte superior tenga un par de mordazas de movimiento individual que permiten ajustar la muestra prácticamente en cualquier posición deseada.

La Figura 27 muestra una vista del prototipo virtual generado para analizar posibles interferencias y/o problemáticas constructivas, junto con un listado de los principales componentes mecánicos.

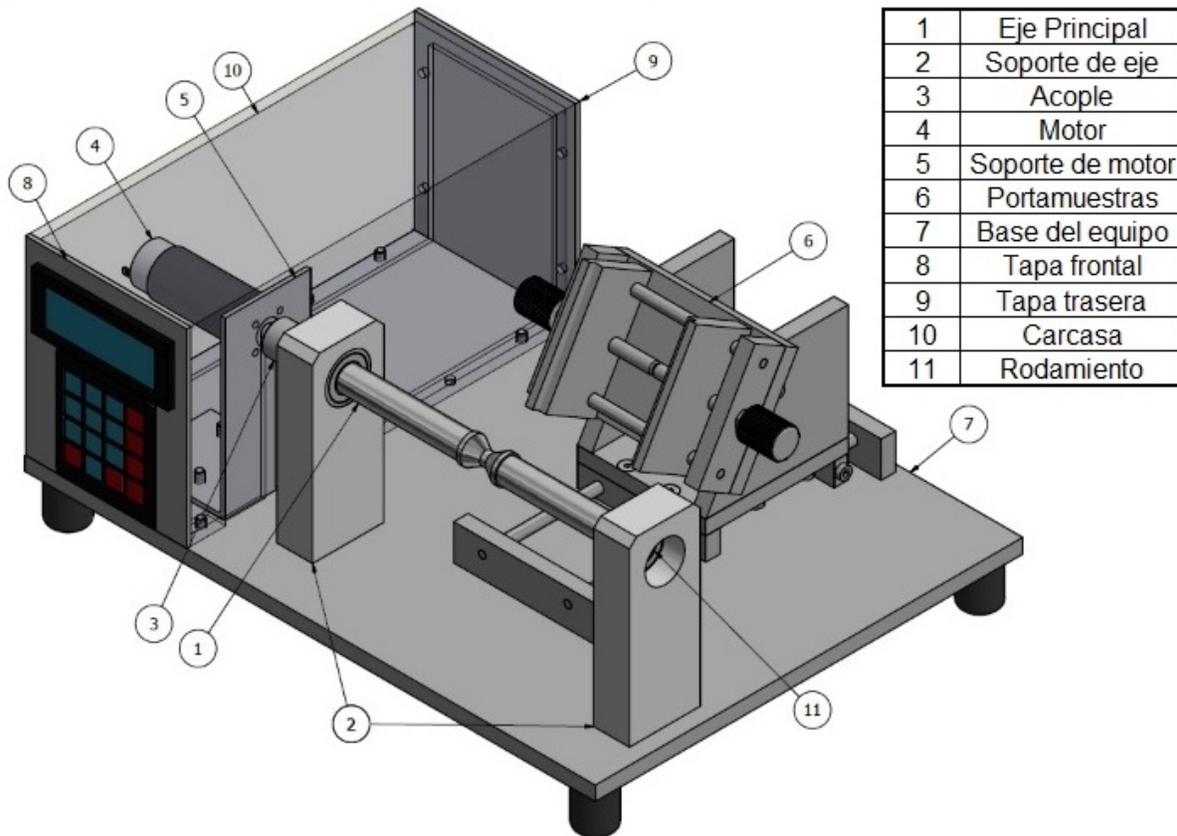


Figura 27. Prototipo virtual del equipo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se distinguen los siguientes componentes y/o subconjuntos mecánicos a desarrollar: el eje principal de transmisión con sus soportes, el conjunto portamuestras, el acople, el soporte del motor, la base del equipo y la carcasa.

El diseño de las piezas tiene en cuenta el material de partida y la simplicidad de fabricación. Para comenzar, se trataron de realizar operaciones simples y con el menor desperdicio de material en el proceso de fabricación, de manera de reducir tiempo y dificultades durante el trabajo. Estratégicamente, el diseño permitió que la base del equipo y las piezas pequeñas que componen el conjunto portamuestras, fueran mecanizadas a partir de una misma placa de aluminio. Luego, las piezas de revolución, seguirían el mismo concepto.

4.1.1. Eje principal.

El eje es el encargado de transmitirle el movimiento de rotación a la esfera, para que ésta genere la impronta sobre la muestra a evaluar. Por lo tanto, su geometría debe ser adecuada para que el contacto

se produzca sin deslizamiento y con un posicionado estable de la esfera sobre la muestra.

Del análisis de los equipos ya desarrollados, se observa que estos presentan tres tipos de diseños distintivos: mecanizado escalonado, elastómeros sobre el eje o mecanizado con doble cono en forma de V. Todas las opciones fueron probadas de manera preliminar, llegando al mejor resultado con un eje mecanizado en forma de V (doble cono).

Por un lado, el eje escalonado con distintas medidas según el diámetro de esfera a emplear, implica diseñar un sistema auxiliar de desplazamiento para el motor que agrega fuentes de vibraciones y/o desalineaciones. Además, esta posibilidad reduce la superficie de contacto entre eje y esfera, respecto a las otras opciones.

Por otro lado, usar elastómeros (orings) sobre el eje mejora la transmisión ya que este material tiene mayor coeficiente de fricción en contacto con la bolilla en comparación al propio material del eje, y al deformarse aumenta la superficie de contacto. Sin embargo, los ensayos preliminares mostraron que su utilización genera un salto radial indeseable durante el giro del eje, ya que es prácticamente imposible conseguir dos orings con las mismas dimensiones debido a sus bastas tolerancias de fabricación. Este salto radial produce improntas distorsionadas u ovaladas y para la posterior medición, esto implica una fuente de error.

Luego, con el tipo de diseño ya seleccionado, se realizó un esquema (ver Figura 28) para definir las dimensiones del eje en la zona de trabajo, teniendo en cuenta los diámetros de esferas usuales en este método. Este recurso gráfico permitió ajustar las dimensiones para que el contacto entre eje y bolilla fuera correcto, en la zona de trabajo y sin interferencias.

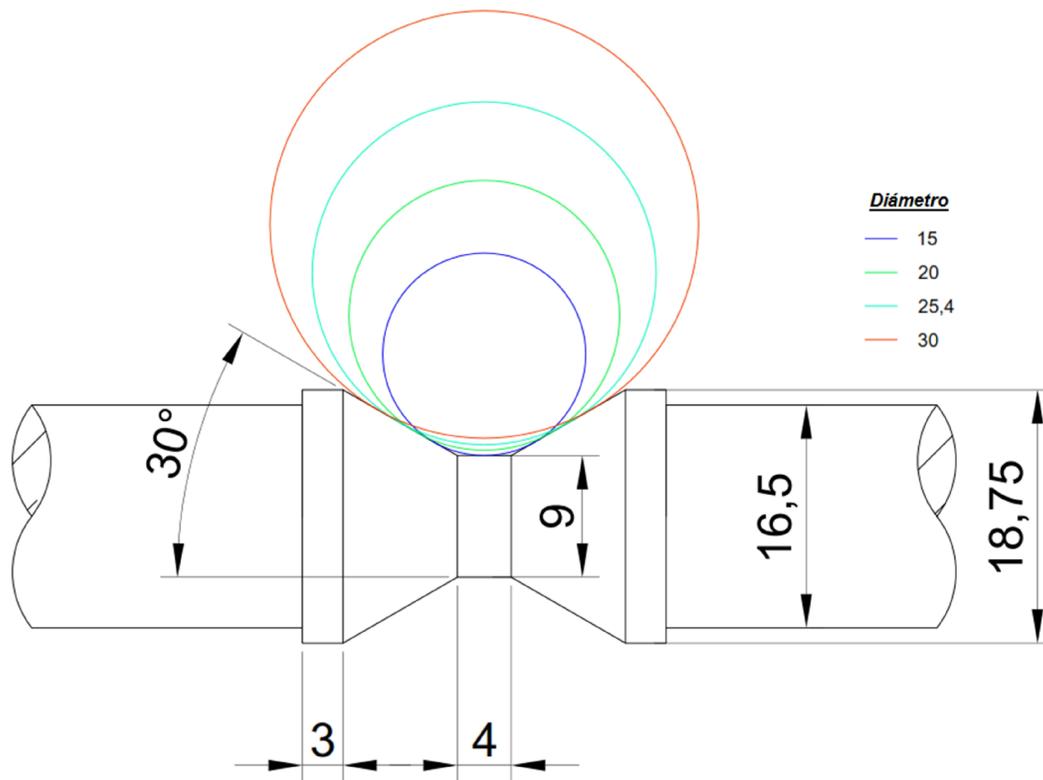


Figura 28. Esquema del contacto de bolillas con eje principal en forma de V.

En la Figura 29 se muestra una ampliación de la zona de contacto para la bolilla de diámetro igual a 15 mm. Se puede observar el espacio resultante entre la sección de menor diámetro del eje (9 mm) y la esfera de menor diámetro admisible.

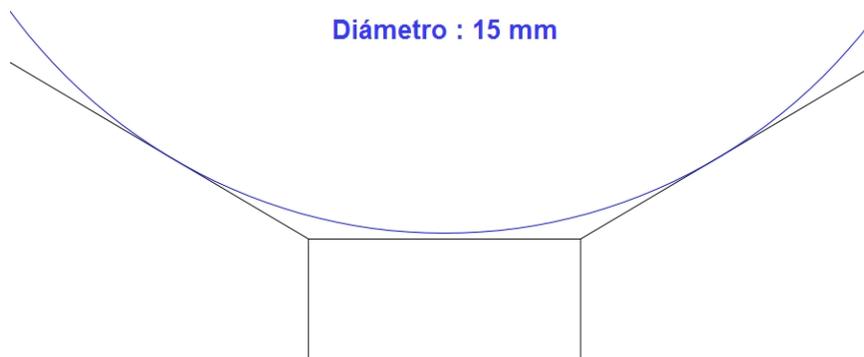


Figura 29. Ampliación puntos de contacto para bolilla de diámetro 15 mm.

El contacto de las esferas con el par de conos se produce en los siguientes puntos, medidos desde el centro del eje principal de rotación (ver Figura 30).

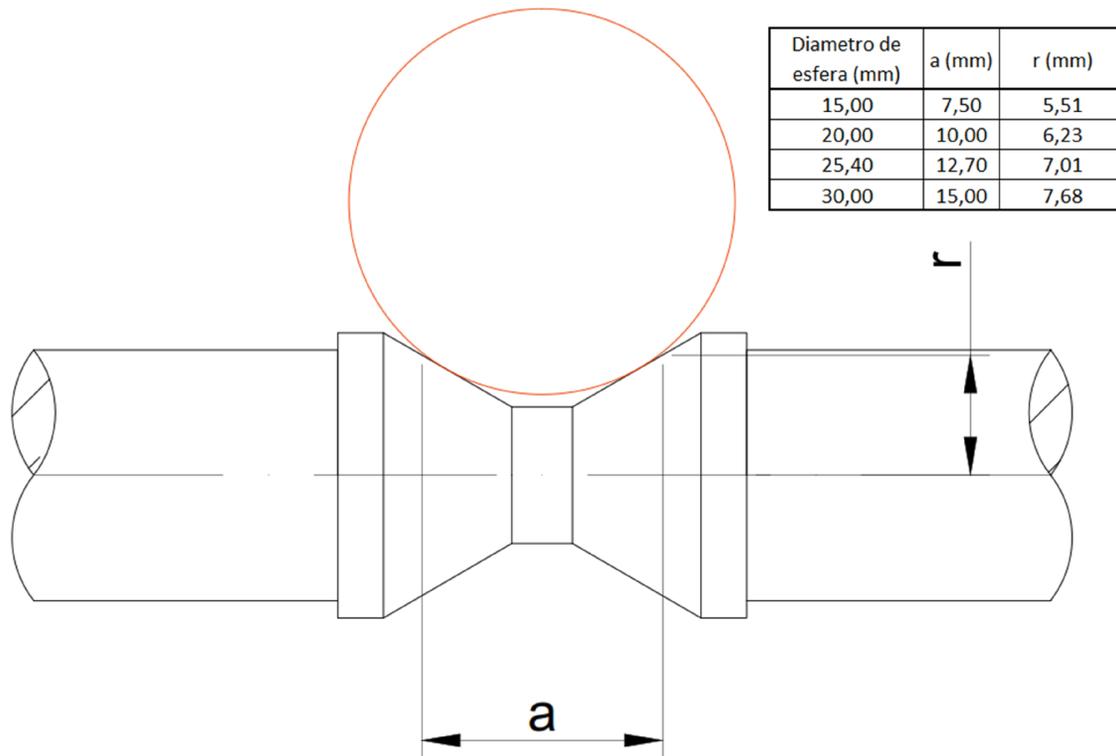


Figura 30. Medidas del contacto para cada diámetro de esfera posible.

Luego, el eje es soportado sobre dos apoyos y vinculado a través de rodamientos. Para el montaje apropiado, necesita un mecanizado en forma de escalón y una tolerancia determinada en las zonas de asiento de rodamientos, de acuerdo al tipo de ajuste a emplear. Por la magnitud de cargas involucradas en el sistema, se puede aplicar un ajuste con interferencia leve entre rodamientos y eje.

Por último, se analizaron posibles formas de transmitir la potencia del motor hacia el eje, tales como engranajes, poleas, entre otras. Finalmente, se escogió una transmisión directa mediante un acople rígido por su facilidad de fabricación. Detalles del diseño de este componente se muestran más adelante.

En la Figura 31 se observa el diseño final adoptado para el eje al momento de la fabricación. Se incluyen dimensiones y tolerancias para los asientos de rodamientos.

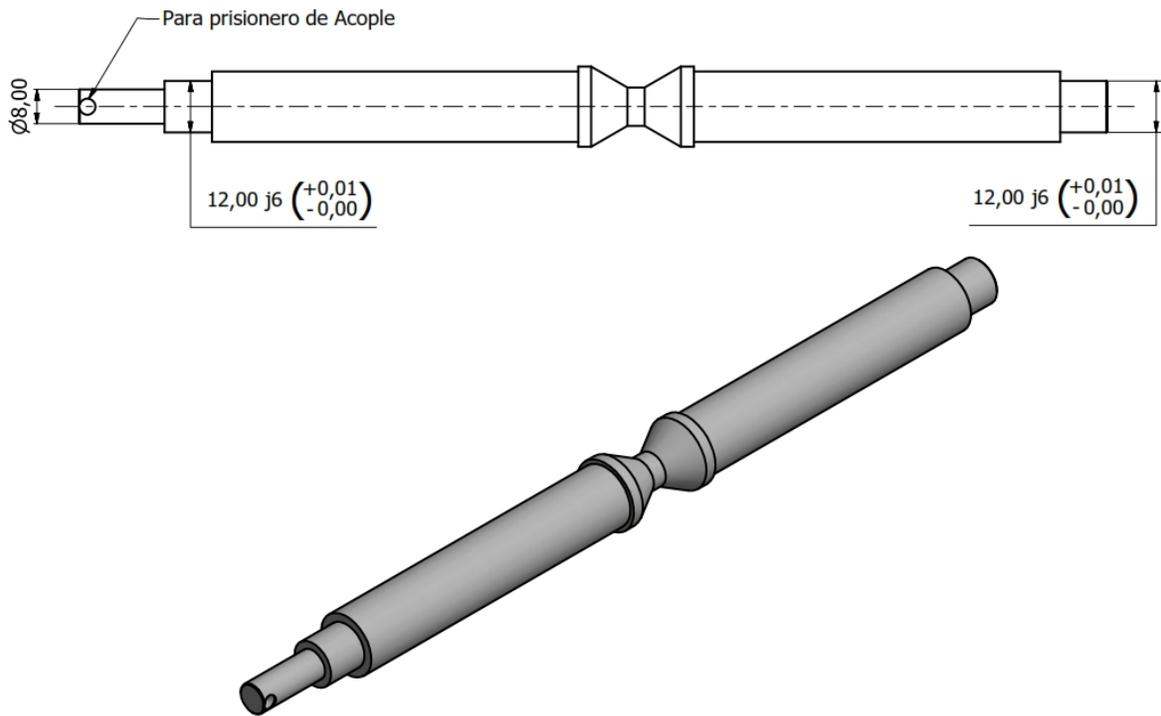


Figura 31. Diseño final del eje principal.

Las dimensiones del eje donde asientan los rodamientos se diseñaron en conjunto con la selección de los mismos, por lo tanto, ese desarrollo se encuentra en la sección 5.1.

4.1.2. Portamuestras.

El Calotester requiere que la muestra se encuentre inclinada un cierto ángulo respecto de la horizontal de manera de tener fuerza normal aplicada sobre la misma. En este caso, el portamuestras fue diseñado con un ángulo fijo de 60° respecto de la horizontal, pues es una de las situaciones más utilizadas en la práctica y mostró buenos resultados en los ensayos preliminares.

De la evaluación de varias posibilidades vistas en equipos comerciales se optó por un conjunto que deslice por un sistema de guías fijas a la base del equipo. Este carro deslizante consiste en una base, sobre la cual se montan un par de piezas con el ángulo deseado. Luego, sobre estas piezas se fija un sistema de dos mordazas independientes entre sí que permitirán la sujeción a través de un tornillo de desplazamiento. En las siguientes figuras se muestran los diseños del sistema de guiado, carro portamuestras y sistema de sujeción:

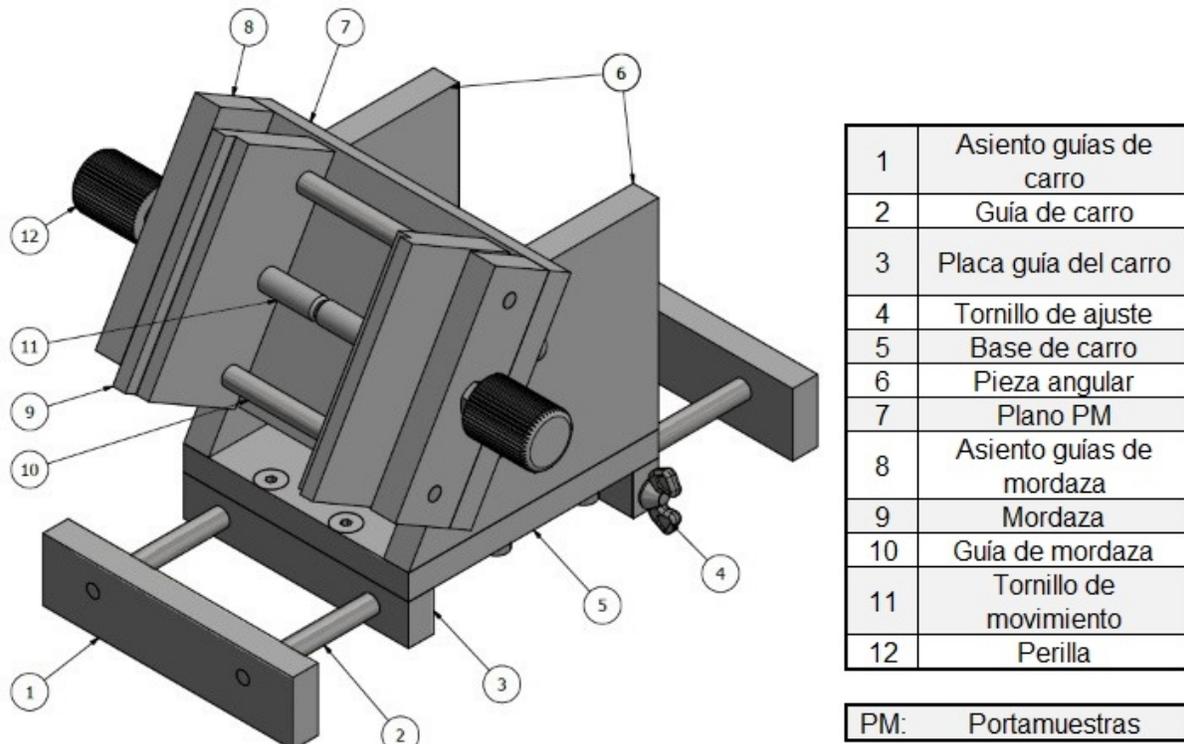


Figura 32. Diseño del portamuestras.

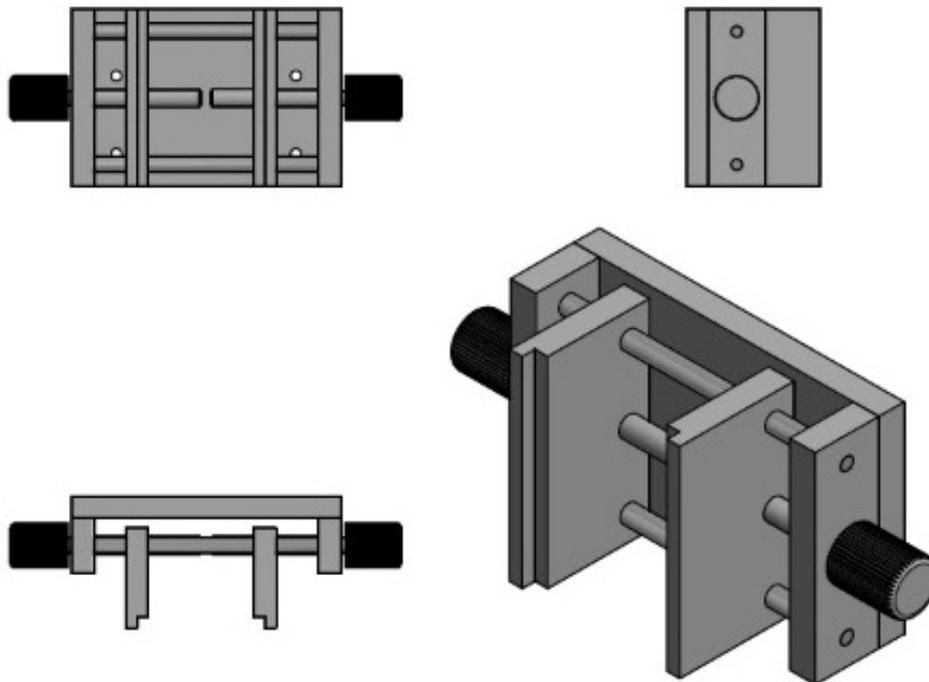


Figura 33. Diseño del sistema de sujeción.

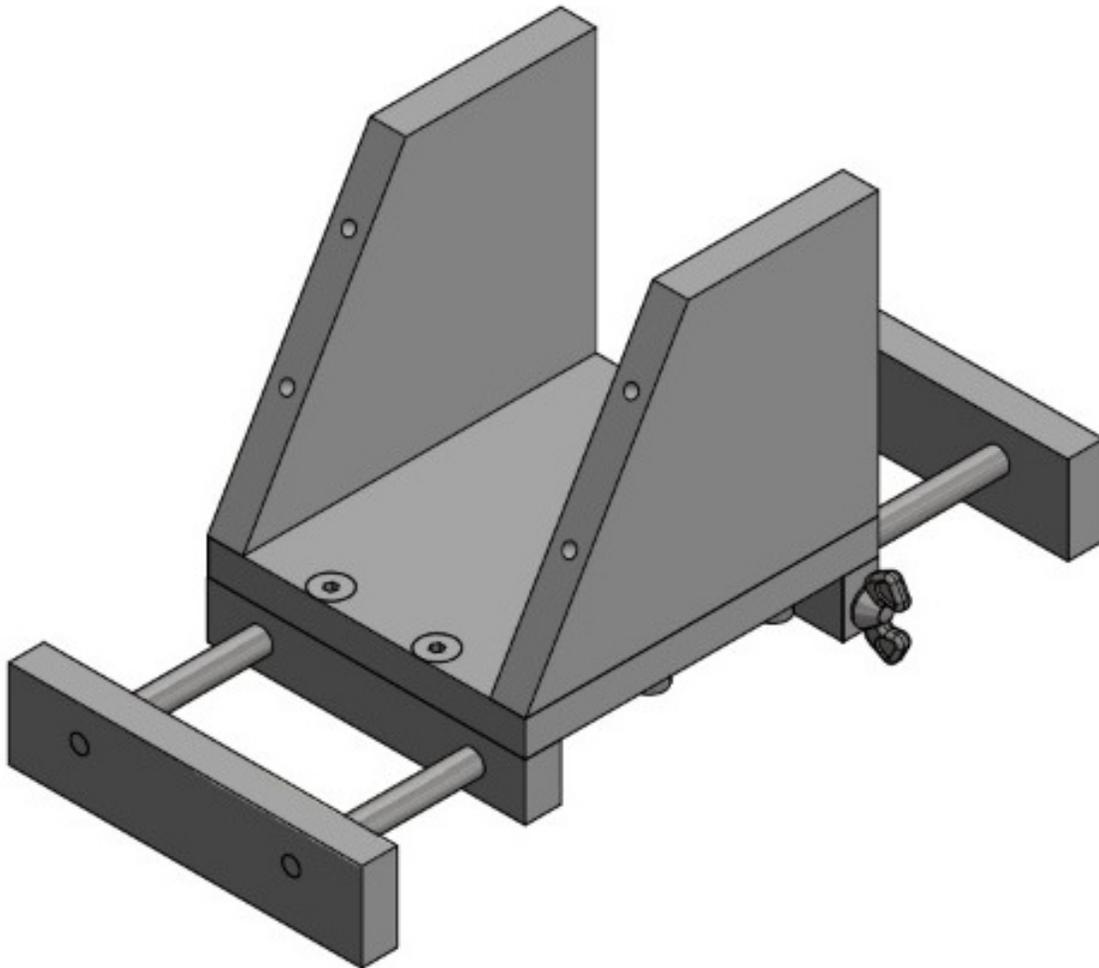


Figura 34. Diseño del sistema de guiado de la base del carro portamuestras.

De lo anterior, se desprende que el par de mordazas independientes permite trabajar en el centro de la muestra o bien, desplazado en el ancho de la misma. El desplazamiento en el alto de la muestra se puede lograr colocándola más arriba o abajo en las mordazas, o bien acercando o alejando el carro respecto al eje. Este sistema de sujeción también cuenta con guías por las que se deslizan las mordazas para evitar que se crucen al apretar la muestra. Por lo tanto, con este diseño se pueden realizar improntas en prácticamente cualquier posición de la muestra.

Luego, para fijar el carro portamuestras a las guías principales y evitar su desplazamiento durante el ensayo es utilizado un tornillo con cabeza mariposa. Es decir, se aproxima la muestra a la posición deseada y allí se ajusta el tornillo.

Las dimensiones del portamuestras se obtuvieron del análisis de los tamaños y formas de las muestras

que habitualmente se ensayan. Estas suelen ser prismáticas o circulares con medidas máximas de 70 mm. Los tamaños máximos y mínimos de muestras que se pueden ensayar en el equipo del presente proyecto son de 10 y 80 mm, respectivamente, en la amplitud de las mordazas. En la dirección transversal se podrían colocar muestras tan grandes como se quieran.

4.1.3. Motor.

Se decidió utilizar un motor de corriente continua (CC)² ya que este tipo de motores permite regular continuamente la velocidad de manera sencilla, característica decisiva para nuestro equipo. Fue el primer componente en seleccionarse, debiendo satisfacer las necesidades de potencia y velocidad.

Un motor CC está compuesto principalmente de dos partes, estator y rotor. El estator da soporte mecánico al aparato y contiene los polos de la máquina, que pueden ser o bien devanados de hilo de cobre sobre un núcleo de hierro, o imanes permanentes. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, alimentado con corriente directa a través de delgas, que están en contacto alternante con escobillas fijas (también llamadas carbones). Abundante información y ejemplos de aplicación de este tipo de motores pueden encontrarse en la bibliografía. En la Figura 35 se muestran los componentes principales de los motores:

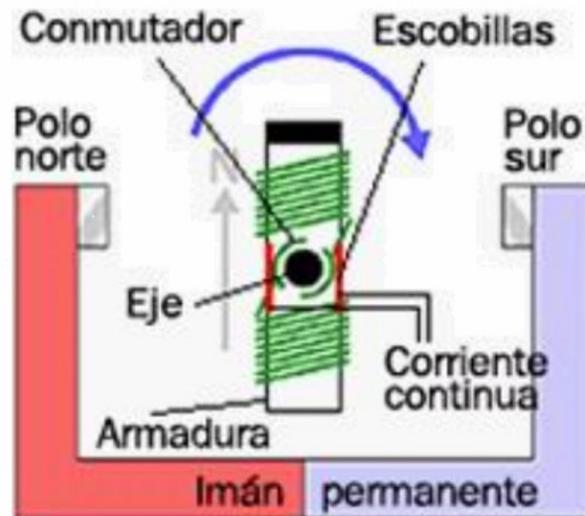


Figura 35. Esquema de un motor de corriente continua.

Habitualmente este tipo de máquinas eléctricas funciona a elevadas velocidades de rotación. Esta

2 CC: Corriente continua.

característica hace que sea necesario un conjunto de engranajes que reduzca las revoluciones de salida en el eje, manteniendo la cupla que puede realizar el equipo. Los dispositivos que combinan el funcionamiento regulable del motor con las velocidades y cupla necesarios son los denominados motorreductores.

En la sección 5.2, contemplando estados de carga y condiciones durante el ensayo, se seleccionará el tamaño y velocidad nominal del motorreductor necesario.

4.1.4. Soportes del eje.

Los soportes del eje son los encargados de dar firme posicionamiento al eje principal y soportar las cargas durante el ensayo. Como se mencionó anteriormente, se acoplan al eje a través de rodamientos. En algunos equipos comerciales se observa que el eje es soportado en voladizo (un extremo libre) requiriéndose una rigidez suficiente para que este no flexione y el ensayo sea correcto. Para evitar este tipo de complicaciones se decidió que el eje fuese soportado por dos vínculos prácticamente idénticos, ubicados simétricamente respecto de la zona de rodadura de la bolilla. En la Figura 36, se puede observar el diseño final de ambos soportes. Los mismos poseen un alojamiento cuyas dimensiones se definen por el diámetro exterior de los rodamientos seleccionados.

Luego, tomando como referencia las dimensiones del portamuestras, resueltas en el prototipo virtual, se analizó la altura necesaria que debía tener el eje. De esta forma, la altura requerida al centro de los alojamientos, coincidente con el centro del eje principal, resultó de 100 mm medidos desde la base del equipo. Finalmente, el resto del diseño fue, por simplicidad, un prisma de medidas convenientes para la fabricación.

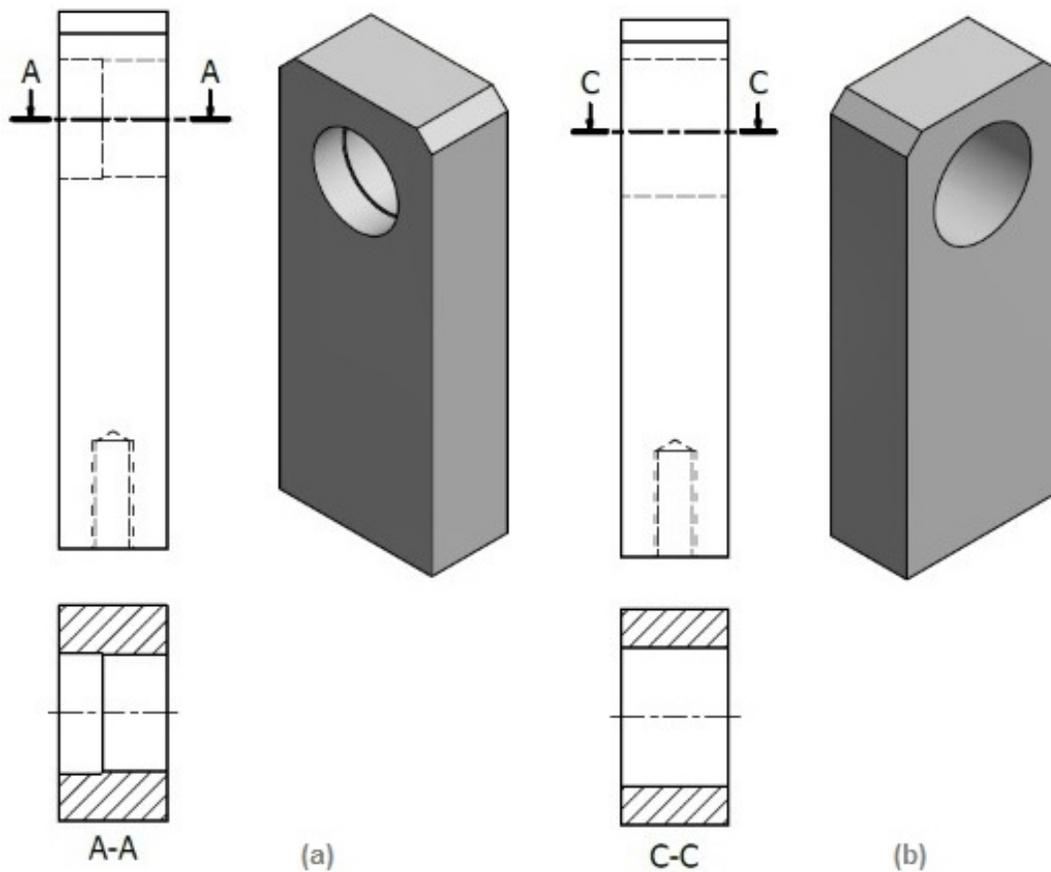


Figura 36. Diseño de los soportes del eje. (a) soporte izquierdo, lado del acople. (b) soporte derecho.

4.1.5. Soporte de motor.

Para el diseño del soporte del motor se evaluaron distintas posibilidades y se resolvió emplear una configuración en forma de 'L' en chapa plegada, que permitiera absorber cualquier cabeceo que pueda sufrir el motor por el hecho de usar un acople rígido al eje principal. El diseño final es el mostrado en la Figura 37.

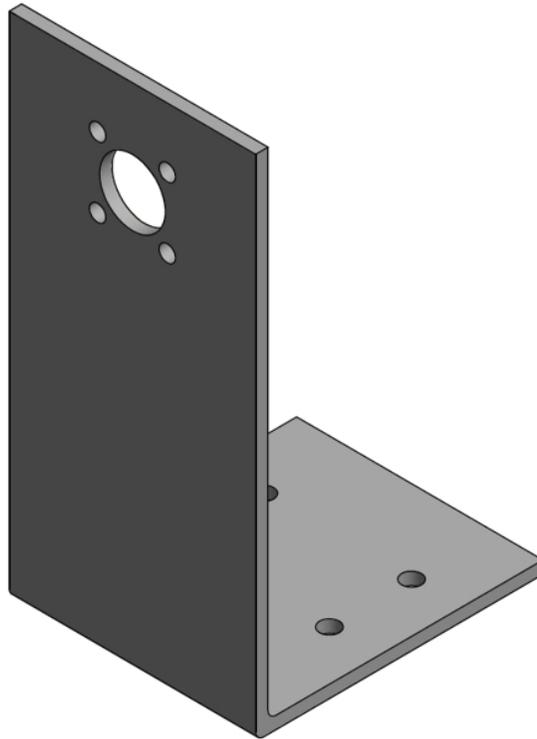


Figura 37. Diseño del soporte del motor.

4.1.6. Acople.

La función de este componente es transmitir la potencia desarrollada por el motor hacia el eje principal de rotación. Esto se logra con prisioneros que se ajustan en las ranuras que tienen ambos ejes a acoplar. Comercialmente existen modelos a partir de los cuales se pudo diseñar el componente propio que mejor ajuste a las dimensiones. Algunos poseen una ranura helicoidal que funciona como un “resorte” actuando elásticamente para absorber la excentricidad. En nuestro caso, el diseño se ha simplificado eliminando la mencionada ranura, dadas las bajas cargas de trabajo y la ventaja del uso de un soporte en “L”. En la figura 38, se muestra el diseño final del acople rígido utilizado. El mismo posee un único agujero central pasante, cuya medida está dada por el diámetro del eje del motor, que a su vez coincide con el diámetro del eje principal del equipo.

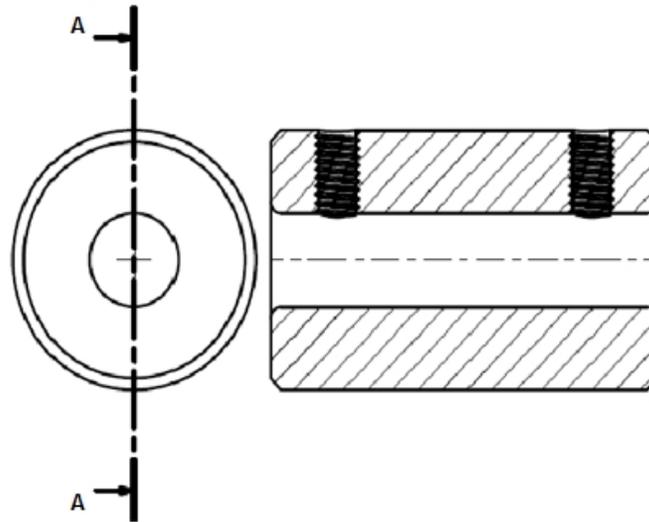


Figura 38. Diseño del acople rígido.

4.1.7. Base del equipo.

En algunos equipos comerciales, el área de trabajo se sitúa sobre un gabinete que cubre al motor. Esto resulta en que su eje y el eje principal no sean coaxiales, siendo requerido algún sistema de transmisión adicional, tal como el uso de correa y poleas. En otros equipos, el eje del motor y el eje de trabajo son coaxiales. Por cuestiones de simplicidad de fabricación, montaje y desmontaje de componentes, se seleccionó esta última configuración. El portamuestras, soportes de eje y motor, carcasa y componentes eléctricos deben ir montados sobre una superficie rígida, plana y lo suficientemente grande como para albergar todo el conjunto. La base del equipo fue diseñada con un espesor de 10 mm, y una superficie de aproximadamente 300 x 400 mm². Ese espesor se comercializa habitualmente. Adicionalmente, se decidió colocar cuatro patas de goma en las esquinas de la base para poder separar el equipo del sitio donde se apoye durante el ensayo y, de esta manera proteger ambas superficies (base y mesa de apoyo).

4.1.8. Carcasa.

Finalmente, la carcasa es la encargada de proteger y ocultar el motor y los componentes electrónicos y de dar un sentido estético al equipo. Además, sobre ella se montarán los sistemas de comunicación entre máquina y usuario (teclado, display, etc.) y el interruptor de la alimentación general. Para su diseño se tuvieron en cuenta gabinetes plásticos que se podrían adquirir en comercios de electrónica, pero ninguno satisfacía la necesidad dimensional para contener todo lo necesario. Por lo tanto, se

decidió tercerizar su fabricación con la forma y las dimensiones deseadas. Está compuesta por tres partes para simplificar el armado y desarmado: tapa frontal, tapa trasera y cuerpo de carcasa.

En la Figura 39 se muestra el diseño realizado, que consta de un cuerpo de chapa plegada sobre el cual se fijan dos tapas postizas. En la tapa frontal se alberga el teclado y el display LCD, utilizados para manejar el equipo, y en la posterior se monta el interruptor general y se deja un agujero para la carga de programas en la placa de control.

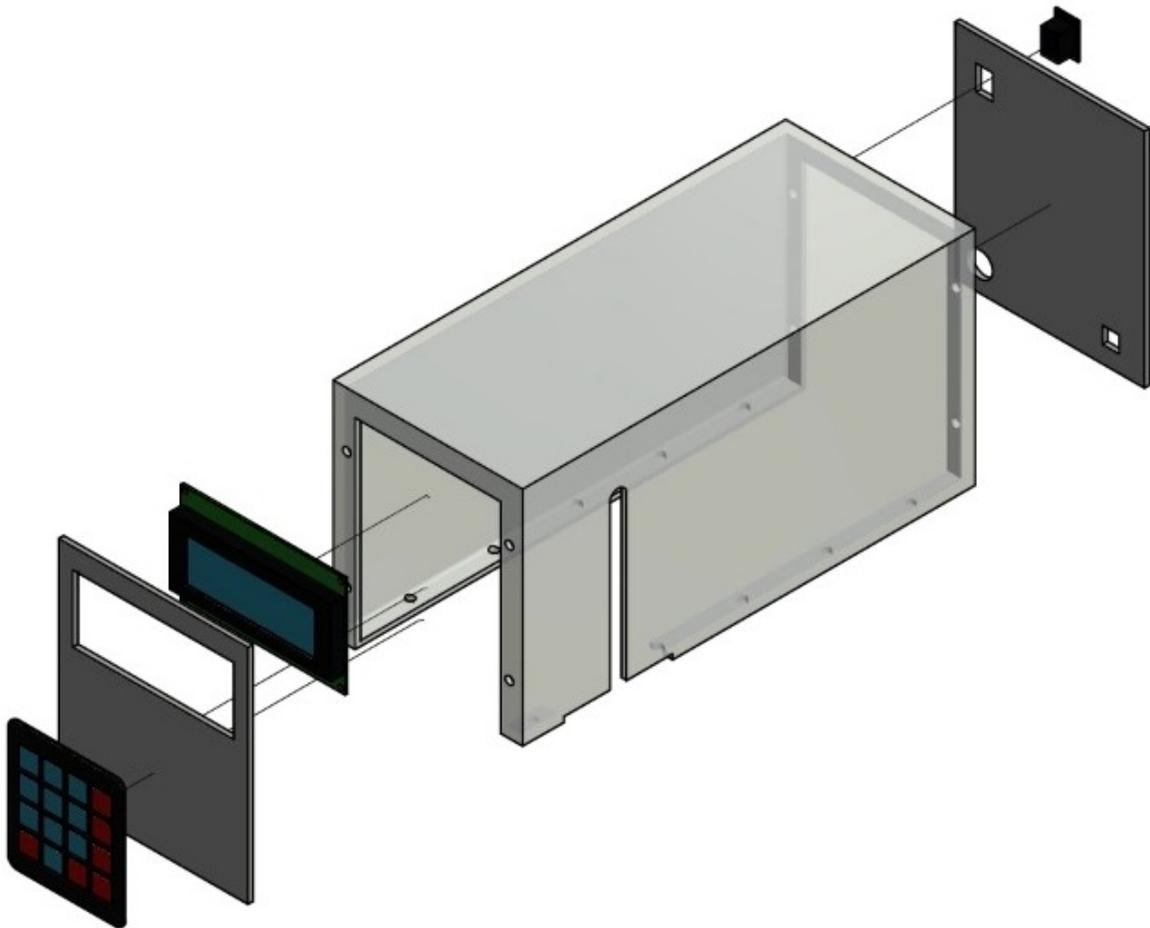


Figura 39. Diseño de la carcasa del equipo, con display y teclado.

4.2. Diseño del sistema de control y alimentación.

En esta sección se desarrolla el diseño relacionado a los componentes eléctricos y electrónicos del equipo, necesarios para garantizar la funcionalidad de la máquina. Para poder tener un amplio espectro de funcionamiento y simplicidad de realización se optó por regular la velocidad y el tiempo de ensayo a través de una placa de desarrollo de Arduino en conjunto con placas auxiliares y

controladores. Para el proceso de selección de parámetros y comunicación con el usuario, el equipo se diseñó con un display LCD y una botonera en forma de matriz.

Esta división comprende tres sistemas fundamentales: control, comunicación y alimentación.

4.2.1. Sistema de control.

Este sistema refiere a los componentes necesarios para operar el equipo de la manera deseada. Es decir, arrancar, parar, tomar valores de sensores y realizar cálculos, entre otras operaciones básicas. Se analizaron dos posibilidades, habituales en control de motores: controlador PLC³ o placa de desarrollo y programación. El primero, es una computadora utilizada en la automatización de equipos y maquinarias industriales, que está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura amplios, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. La segunda opción, son las placas de desarrollo, que tienen el mismo sentido de recepción y envío de señales que el PLC, pero a menor nivel de potencias.

Los PLC son más caros y robustos, pero menos versátiles para aplicaciones personalizadas que las placas de desarrollo. Estas son una solución costo/versatilidad óptima para una máquina de este estilo y de fácil implementación para una producción no seriada. Además, sus códigos y ejemplos de programación son totalmente accesibles.

Por las razones antes expuestas, para controlar el funcionamiento del equipo se optó por el uso de Arduino, que es una compañía “open source” y “open hardware”. Para trabajar, se utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en el cableado) y el software Arduino (IDE), basado en el procesamiento. En este aspecto, tanto el software como la programación de Arduino son de código abierto, permitiendo un crecimiento a través de las contribuciones de los usuarios en todo el mundo. La placa de Arduino será la encargada de recibir señales, realizar cálculos, enviar órdenes y controlar tiempos y velocidades de funcionamiento. Como es lógico, no podrá hacerlo de manera individual y operará en conjunto con sistemas auxiliares de regulación y plaquetas de alimentación para los distintos componentes.

4.2.1.1. Características de Arduino.

Existen numerosos modelos de placas de Arduino, que se diferencian entre sí por el micro-controlador, la cantidad de entradas y salidas que poseen y cantidad de memoria que puede almacenar, entre otros aspectos. El Arduino “Uno” es la placa electrónica, estándar y posiblemente la más conocida y

3 PLC: ‘Programmable Logic Controller’ (Controlador Lógico Programable).

documentada, basada en el micro-controlador ATmega328. Cuenta con 6 entradas analógicas y 14 entradas/salidas digitales, de las cuales 6 se pueden utilizar como salidas analógicas. La intensidad máxima de todos estos pines es de 40 mA. La Figura 40 muestra un esquema general de sus componentes.

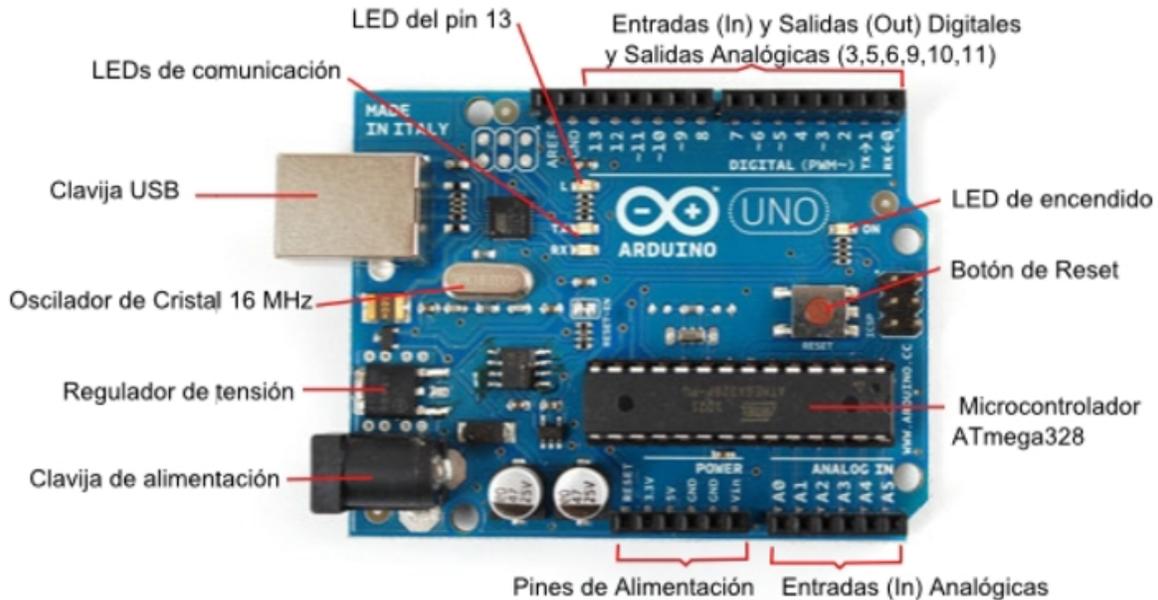


Figura 40. Componentes de Arduino “UNO”.

Arduino puede estar alimentado por dos vías: conexión USB (que proporciona 5 V), o bien, la clavija de alimentación, que puede ser una pila de 9 V o una fuente de alimentación, la cual se recomienda que esté entre 7 y 12 V. Considerando estos valores de tensión, será necesaria una conexión auxiliar dependiente de la fuente de alimentación para suministrar la energía a la placa sin sobrepasar sus límites.

La comunicación lógica y eléctrica entre las entradas y salidas con el controlador estará gobernada por los valores de las mismas, que en función de cómo este siendo utilizado el pin, tendremos:

- Salida y entrada digital: los valores de salida pueden ser 0 V (LOW) o 5 V (HIGH), y se interpretará una entrada de entre 0 y 2 V como LOW y de entre 3 y 5 V como HIGH.
- Salida analógica: los valores de salida van desde 0 a 5 V en un rango de 0 a 255 valores intermedios (precisión de 8 bits).

- Entrada analógica: los valores de entrada van desde 0 a 5 V en un rango de 0 a 1023 valores intermedios (precisión de 10 bits). Por ejemplo, potenciómetro, foto-resistencias, termoresistencias, entre otros sensores analógicos.

Realmente, la señal analógica de salida no es una función continua, sino que es del tipo PWM⁴. Esto significa que la salida es una señal modulada por pulsos, formada por una serie de pulsos (de valor 5 V) repartidos durante un tiempo determinado de tal forma que el valor promedio de la señal de salida se hace coincidir con el de la señal analógica que se quiere lograr. Distintos casos de señales de salida moduladas se esquematizan en la Figura 41.

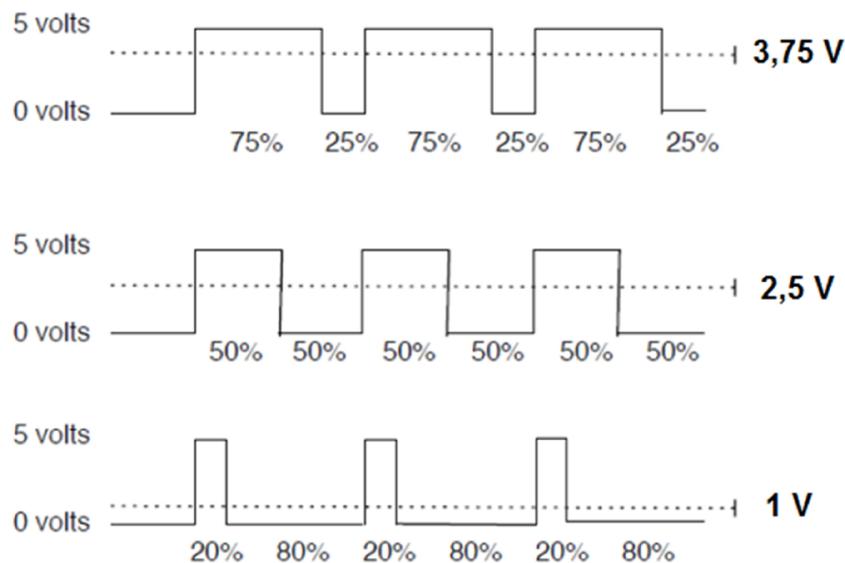


Figura 41. Casos de salidas analógicas (PWM).

4.2.1.2. Programación de Arduino.

Todo programa de Arduino presenta una estructura básica, de la siguiente forma:

- 1ra. Parte Declaración de variables.
- 2da. Parte Configuración de Arduino [**void setup () {}**]
- 3ra. Parte Comandos que regirán el comportamiento de Arduino [**void loop () {}**]

En donde setup () es la parte encargada de recoger la configuración y loop () es la que contiene el

4 PWM: pulse-width modulation (Modulación por ancho de pulsos).

programa que se ejecutará cíclicamente (de ahí el término 'loop' –bucle–). Ambas funciones son necesarias para que el programa trabaje. La función loop es el núcleo de todos los programas de Arduino y la que realiza la mayor parte del trabajo. En la Figura 42 se muestra un diagrama de la lógica que utiliza el programa diseñado.

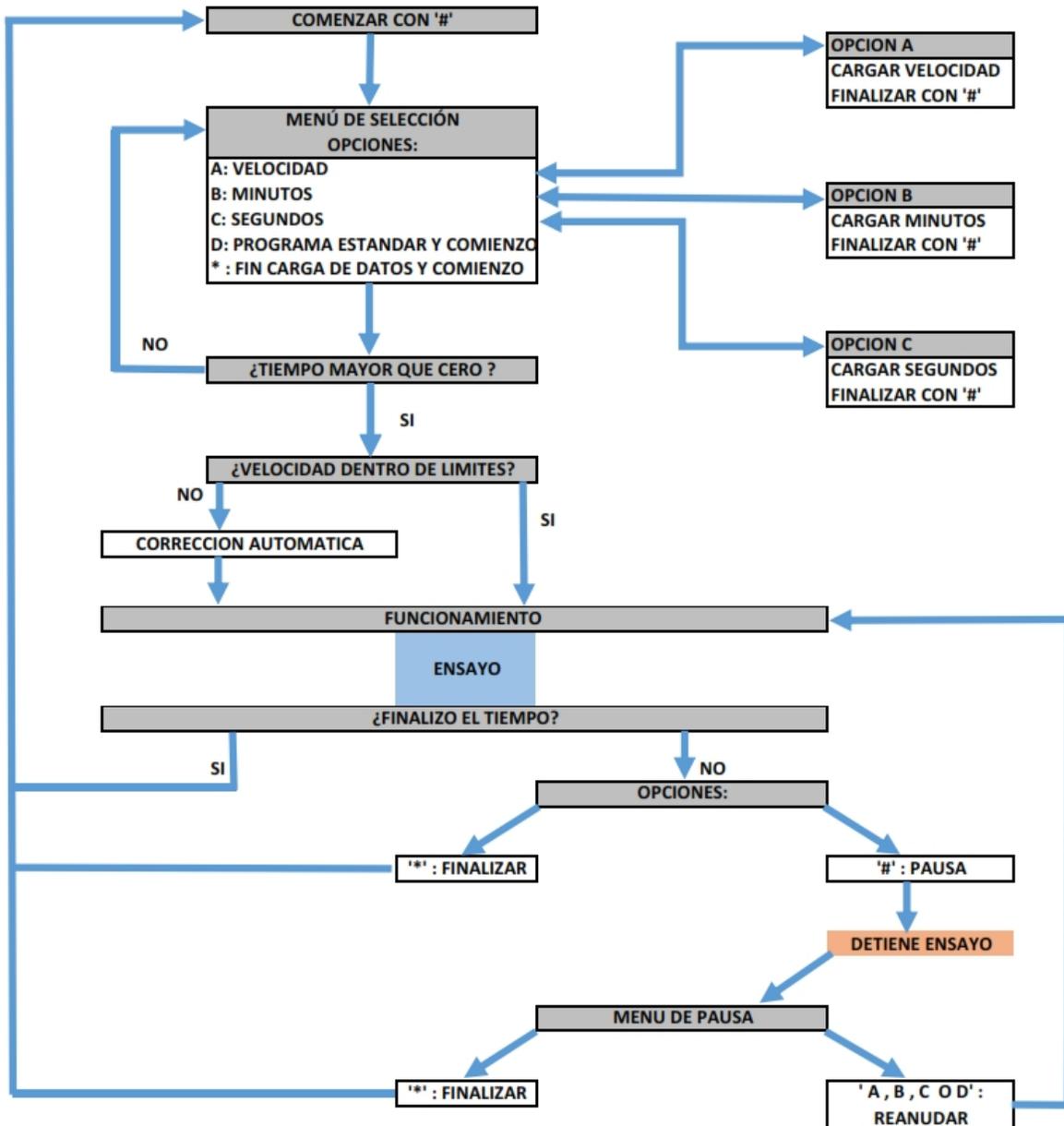


Figura 42. Esquema de lógica empleada por el programa diseñado.

El programa completo del equipo se encuentra en el Anexo A, disponible para cualquier modificación con el uso complementario de una computadora como sistema de carga del mismo.

4.2.1.3. Control del tiempo de ensayo.

Arduino cuenta con un conjunto básico de funciones internas para el manejo de tiempo. Haciendo uso de alguna de estas posibilidades, se puede controlar la duración de los ensayos. El programa desarrollado permite introducir el tiempo de duración deseado para el ensayo (en minutos y segundos), pausar los ensayos por tiempo indeterminado y/o suspender los ensayos.

Al comenzar el funcionamiento del eje, se toma ese tiempo como inicio. Luego, el tiempo objetivo será la suma del tiempo de inicio y el tiempo de ensayo (valor adquirido en la toma de datos). Al alcanzar ese objetivo, se detiene automáticamente el funcionamiento del eje. Por lo tanto, se puede obtener un rango de tiempos de funcionamiento tan amplio como se requiera.

Para introducir pausas y poder contemplar ese aspecto, se realiza un conteo del tiempo en que el ensayo se encuentra detenido y así poder sumar ese valor al tiempo objetivo. Por lo tanto, el tiempo objetivo no es invariante, sino que depende de qué magnitud de pausa se utilice.

4.2.1.4. Control de la velocidad de giro.

Con respecto al control de velocidad de rotación del eje, durante el análisis de la información bibliográfica se encontró el siguiente inconveniente: un motor de corriente continua, por lo general, consume una intensidad de corriente mayor a la que la placa de control actuando sola puede suministrar por un pin de salida. Por lo tanto, para utilizar una placa de desarrollo se requieren dispositivos adicionales. Así fue como se evaluaron las siguientes posibilidades de regulación:

- Transistor y potenciómetro.
- Controladores integrados (conocidos comúnmente como drivers).

Un transistor es un dispositivo electrónico semiconductor utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada. Cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. Con este montaje se podría controlar, tanto el encendido y apagado del motor como su velocidad (utilizando un pin PWM como salida), aunque se requiere un potenciómetro para indicar el parámetro de tiempo del PWM a utilizar. En la Figura 43 se muestra el esquema de conexiones requeridas para regular la velocidad del motor con esta configuración.

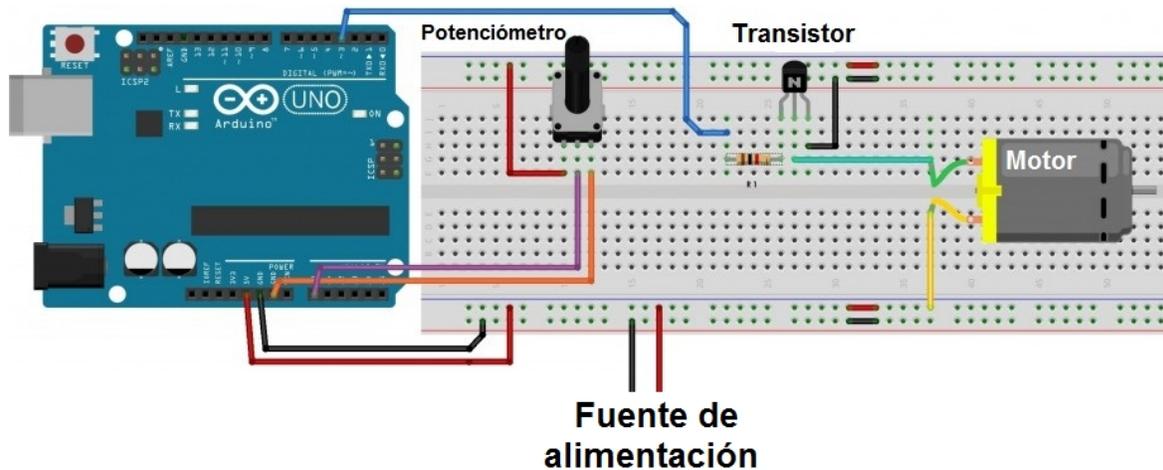


Figura 43. Esquema de conexiones para regulación de velocidad de motor.

Los controladores integrados son dispositivos que conjugan distintos componentes complejos y así logran el funcionamiento deseado (en este caso, la modulación de ancho de pulso). Suelen proveerse en plaquetas, con resistencias, capacitores, conectores, reguladores de tensión y potenciómetros montados sobre ellas. Existe gran variedad de controladores donde cada uno tiene aplicaciones específicas según sus componentes. Los controladores toman energía de otra fuente (una pila, batería o equivalente) y siguiendo las instrucciones de Arduino hacen funcionar al motor.

Luego de analizar ambas opciones de regulación, se resolvió por elegir los controladores integrados por la simplicidad de tener un sistema totalmente armado y por su bajo costo. Su selección y formas de conexión serán desarrolladas en las secciones posteriores.

4.2.2. Sistema de comunicación.

Para el manejo del equipo es necesario darle instrucciones. Por este motivo se requiere algún método para establecer la conexión entre máquina y usuario. En este sentido, existen las siguientes posibilidades: display táctil, display LCD⁵ con botonera adicional, visor de LEDs⁶ individuales con botones adicionales, o ningún tipo de visualización y manejo manual a través de botones individuales. Las opciones han sido descriptas en orden decreciente de complejidad y costos.

Se descartó la posibilidad del display táctil por la delicadeza que implican estos dispositivos y requerir complejos procedimientos de programación. Luego, la posibilidad de no contar una visualización de

⁵ LCD: Liquid crystal display

⁶ LED: Light-emitting diode

datos durante el ensayo parecía una opción rudimentaria e incómoda para el usuario. Por último, entre las opciones restantes se escogió la del display LCD con la botonera adicional porque representa un mayor valor estético que los visores LEDs individuales, sin mayores dificultades de programación o costos elevados. Además, el display es lo suficientemente resistente como para una máquina destinada al uso de laboratorio, pudiendo incluso soportar salpicaduras.

El display LCD permitirá mostrar mensajes a través de caracteres como letras, números o símbolos, y así poder dar indicaciones al usuario y mostrar parámetros de funcionamiento. Además, el usuario podrá dar indicaciones a la máquina a través de la botonera. Existen varios tamaños de display según cantidad de líneas y extensión de cada una, pero los más comunes son las de 16x2 y 20x4 que representan 16 caracteres por línea en 2 renglones y 20 caracteres por línea en 4 renglones, respectivamente.

Finalmente, para enviar instrucciones a la placa de desarrollo se eligió un teclado matricial (u organización de 'X' filas e 'Y' columnas de pulsadores) que tiene una conexión interna particular y permite usar un menor número de conectores al ponerlo en funcionamiento.

4.2.3. Fuente de alimentación.

Por último, para garantizar el funcionamiento del equipo es necesaria una fuente de energía que alimente todo el circuito eléctrico. Por las características de los equipos involucrados se trabajará con corriente continua de baja tensión. Como la red eléctrica en Argentina es de 220 V CA (corriente alterna) es necesario transformar, regular y rectificar la onda eléctrica a nuestra necesidad para hacer funcionar todo bajo los niveles de tensión admisibles. La solución más simple es una fuente de alimentación que reciba energía de la red y entregue tensión en CC con una capacidad de corriente que sea suficiente para todo el conjunto.

Las fuentes de alimentación para dispositivos electrónicos, pueden clasificarse básicamente como fuentes de alimentación lineales o conmutadas. Las lineales tienen un diseño relativamente simple, sin embargo, su regulación de tensión es poco eficiente. Una fuente conmutada, de la misma potencia que una lineal, será más pequeña y normalmente más eficiente pero más compleja y por tanto más susceptible a averías. La selección se analizará en la sección 5, pero se basa en la tensión y corriente requeridos por el sistema que debe ser capaz de entregar la fuente.

Luego, como el motor eléctrico funcionará a una tensión mayor que la admisible por la placa de desarrollo de Arduino y el display LCD, se requiere una placa adicional para regular la tensión que recibe cada uno. Por lo tanto, se diseñó una plaqueta con resistencias y diodos Zener, de forma que

cada rama de la misma alimenta un único componente. En la sección 6, se pueden observar los esquemas de conexión de la fuente y la plaqueta de distribución diseñada.

Por último, para protección del sistema eléctrico, pero principalmente de la fuente, se debe adicionar y dimensionar un fusible. Su valor será menor al máximo admisible por la fuente. De esta manera, si se alcanza el valor de corte del fusible, la fuente aun tendrá capacidad de trabajar en forma segura.

5. Selección de componentes comerciales.

Una vez definido el diseño y las características funcionales del Calotester a construir, se pasó a la etapa de selección de componentes comerciales donde se tuvieron en cuenta las ventajas y desventajas de cada opción, y como factor adicional, el aspecto económico.

5.1. Rodamientos.

La selección de rodamientos se hizo en función de sus dimensiones porque, por las bajas cargas del sistema, se estima que no se superan las condiciones admisibles. De cualquier manera, se propone una verificación para corroborar esto luego de calculada la magnitud de fuerzas involucradas.

Los rodamientos tienen una designación estandarizada con un código alfanumérico donde a cada carácter le corresponde un significado. Es una forma simple de poder identificar un rodamiento independientemente de la marca o fabricante.

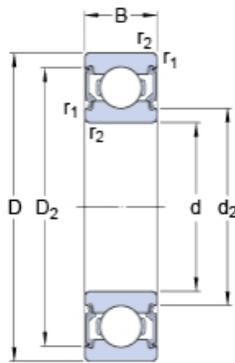
Los rodamientos rígidos de bolas son los más adecuados para motores eléctricos de media y baja potencia por lo tanto serán el tipo elegido. Estos, se designan con el número '6' de inicio en el código. Salvo algunas excepciones, los siguientes dos dígitos identifican la serie de dimensiones ISO. El primero indica la serie de ancho o altura (dimensiones B, T o H). El segundo identifica la serie de diámetro (dimensión D). Los últimos dos dígitos de la designación básica identifican el código de tamaño del agujero del rodamiento. El código de tamaño multiplicado por 5 da como resultado el diámetro del asiento (d) en mm.

Como parámetro inicial, se seleccionó un diámetro interno de 12 mm para los rodamientos. Luego, de las opciones disponibles en catálogos para ese diámetro interno, en los comercios locales se consiguieron rodamientos con un diámetro externo de 32 mm y un ancho de 10 mm. La designación estandarizada correspondiente es 6201.

Para evitar que se produzca contaminación por partículas propias del ensayo o suciedad externa, lo que llevaría a complicaciones en la rodadura, se pensó en rodamientos sellados en ambos lados. Este sellado puede ser metálico (blindaje), que en realidad no es totalmente hermético, o con anillos de caucho. En nuestro caso, se prefirió el sellado con caucho a ambos lados, cuyo sufijo es el 2RSL (2 para el sello en ambos lados). Por lo tanto, el rodamiento con su código completo es el 6201-2RSL. La ficha técnica se presenta en la Figura 44. Puede verse que el resalte del eje no debe superar los 16,5 mm. El resalte es utilizado para ubicar axialmente al rodamiento, haciendo tope contra la pared de material.

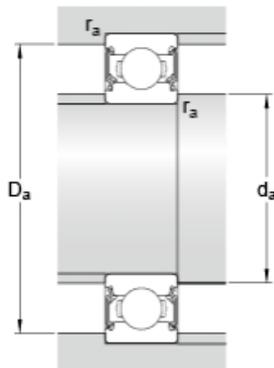
6201-2RSL

Dimensiones



| | | |
|------------------|----------|----|
| d | 12 | mm |
| D | 32 | mm |
| B | 10 | mm |
| d ₂ | ≈ 16.2 | mm |
| D ₂ | ≈ 27.34 | mm |
| r _{1,2} | min. 0.6 | mm |

Dimensiones de los resaltes



| | | |
|----------------|-----------|----|
| d _a | min. 16.2 | mm |
| d _a | max. 16.5 | mm |
| D _a | max. 27.8 | mm |
| r _a | max. 0.6 | mm |

Datos del cálculo

| | | | |
|------------------------------------|----------------|-------|-------|
| Capacidad de carga dinámica básica | C | 7.28 | kN |
| Capacidad de carga estática básica | C ₀ | 3.1 | kN |
| Carga límite de fatiga | P _u | 0.132 | kN |
| Velocidad de referencia | | 50000 | r/min |
| Velocidad límite | | 26000 | r/min |
| Factor de cálculo | k _r | 0.025 | |

Figura 44. Ficha técnica del rodamiento 6201-2RSL.

Luego, para la verificación de la carga sobre los rodamientos es necesario calcular las reacciones de los apoyos. Las fuerzas aplicadas sobre el sistema son el peso propio del eje y el peso de la esfera sobre el eje. Si bien la esfera apoya tanto sobre el eje como sobre la muestra, se la considerará

únicamente soportada por el eje para analizar el caso más desfavorable. Luego, para describir la situación más conservativa, se decide utilizar el peso de esfera de mayor diámetro.

Se comienza el cálculo con el diseño propuesto del eje y las fuerzas aplicadas como se indican en la Figura 45. Luego, se plantea la sumatoria de fuerzas y momentos del sistema.

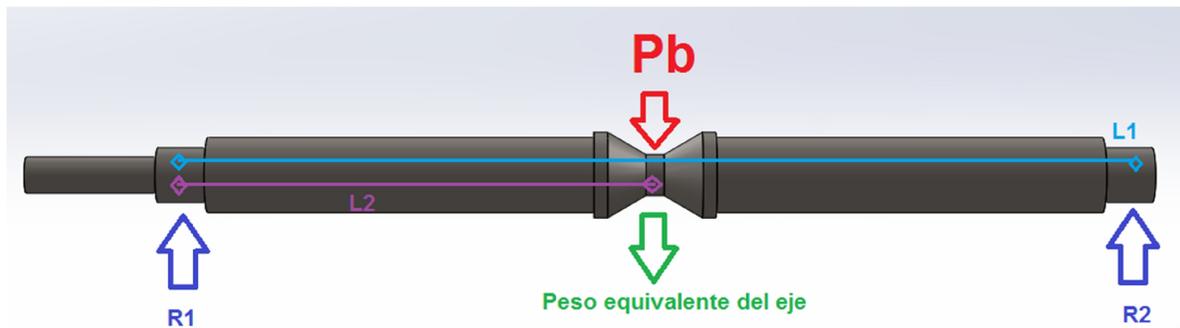


Figura 45. Esquema de fuerzas actuantes sobre el eje principal.

$$\sum \text{Fuerzas} = R2 + R1 - Pb - Pe = 0 \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$\sum \text{Momentos} = R2 \cdot L1 - (Pb + Pe) \cdot L2 = 0 \quad \text{Ecuación 4.}$$

En primer lugar, el cálculo del peso del eje entregó un valor de 0,36 kgf. Por otro lado, el peso de la esfera de acero (densidad =7850 kg/m³) de diámetro 30 mm es de 0,11 kgf. Luego, del modelo diseñado se obtuvo que L1 = 2.L2 = 198 mm. Por lo tanto, si se evalúan los soportes bajo los estados de máxima sollicitación, descriptos anteriormente, resulta que R1 = R2 = 0,24 kgf (equivalente a 2,35 N).

Esta magnitud de carga radial pura aplicada resulta mucho menor que C (capacidad de carga dinámica) y Co (capacidad de carga estática). Además los límites de revoluciones permitidos son muy superiores a la velocidad de trabajo, por lo tanto, se puede afirmar que estos rodamientos verifican bajo las sollicitaciones y condiciones de trabajo.

5.2. Motor.

Para su dimensionamiento, se comenzó con un análisis de la cupla requerida para hacer girar el eje y luego se obtuvo la potencia necesaria a la velocidad de rotación máxima estimada. La primera, es la resistencia que deberá vencer el eje para poder girar. Luego, la potencia es la energía necesaria para hacer funcionar el motor por un cierto tiempo a un régimen de velocidad determinado. La Figura 46

muestra las fuerzas actuantes en dirección y sentido. Además, en la Figura 47 se aclara que la fuerza $N2$ realmente es una composición de dos fuerzas normales a cada cono en contacto con la esfera.

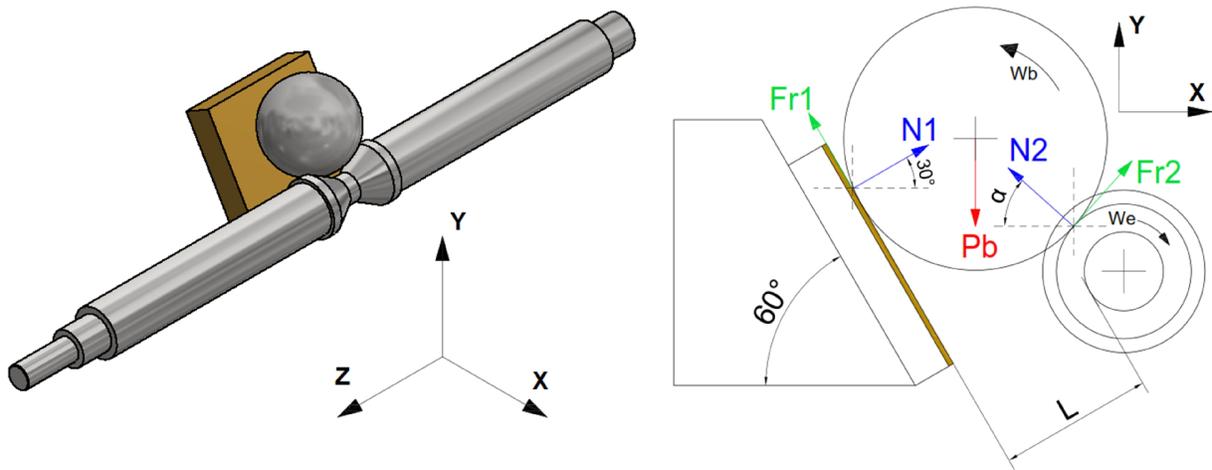


Figura 46. Esquema de fuerzas actuantes sobre bolilla y eje.

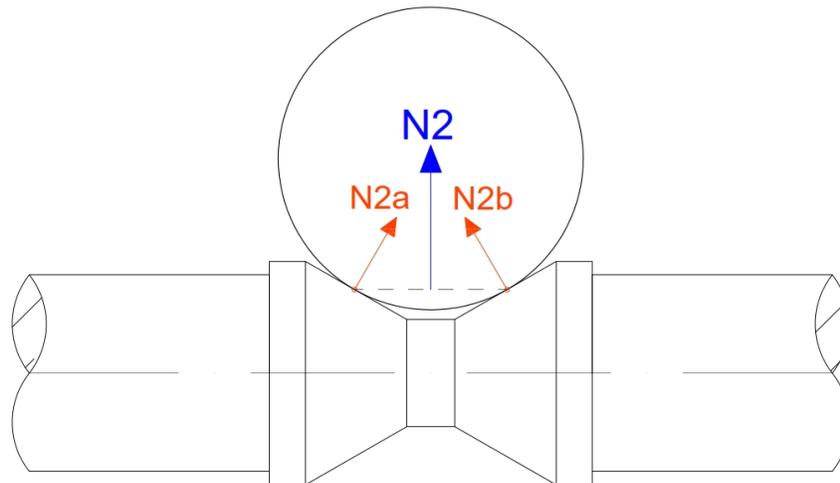


Figura 47. Composición de fuerzas normales a ambos conos en contacto.

El peso propio de la bolilla genera dos reacciones: una sobre la muestra y otra en el eje. Ambas son normales a las superficies correspondientes. Para que la bolilla deslice en la muestra y ruede en el eje, el momento producido por la fuerza de fricción estática bolilla/eje ($Fr2$) debe ser mayor al producido por la fuerza de fricción bolilla/muestra ($Fr1$). Planteando sumatoria de fuerzas en los ejes 'x' e 'y', y utilizando la condición anterior se puede calcular el ángulo mínimo al cual se debe producir el

contacto bolilla/eje para garantizar la rodadura.

$$\sum F_x = N1.\cos(30^\circ) - N2.\cos(\gamma) = 0 \quad \text{Ecuación 5.}$$

$$\sum F_y = N1.\sen(30^\circ) + N2.\sen(\gamma) - Pb = 0 \quad \text{Ecuación 6.}$$

$$Fr2..Rb \geq Fr1.Rb \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$Fr1. = N1.\sim 1 \quad \text{Ecuación 8.}$$

$$Fr2. = N2.\sim 2 \quad \text{Ecuación 9.}$$

Para el cálculo se utilizó la esfera de acero de diámetro 30 mm pues sería la situación de mayor sollicitación del sistema. Luego, el ángulo mínimo requerido para garantizar la condición de la ecuación Nro. 7 fue evaluado para el caso de $\mu_1 = 1$ y $\mu_2 = 0,74$. El primer coeficiente es consecuencia de la incertidumbre que se tiene respecto al contacto entre esfera y muestra, por lo tanto, se asume una condición desfavorable (rozamiento elevado). Por otro lado, el coeficiente entre eje de rotación y esfera refiere a un contacto estático entre superficies de acero.

La Figura 48 muestra el resultado del análisis de fuerzas de roce actuantes en función del ángulo . Se obtiene un valor de ángulo mínimo de 50° , resultando en una distancia perpendicular máxima 'L' de 14,83 mm.

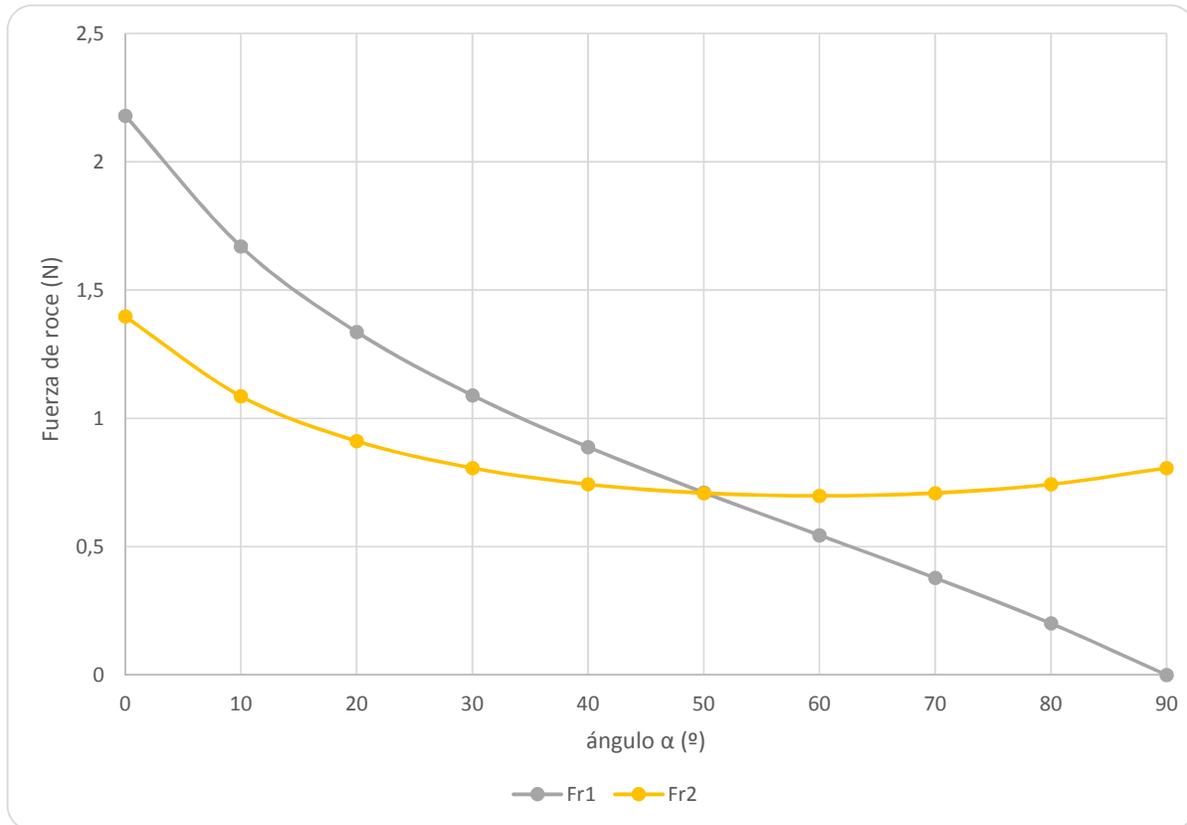


Figura 48. Fuerzas de roce en función del ángulo α , para diámetro de esfera de 30 mm, $\mu_1=1$ y $\mu_2=0,74$.

En esta etapa de dimensionamiento del motor eléctrico, se deben contemplar todos los efectos que podrían incidir en el funcionamiento y bajo la peor condición posible. Para que se produzca la rotación, el par del motor vinculado al eje debe ser mayor a la sumatoria de los siguientes efectos:

1. momento resistente producido en el contacto bolilla/eje (M_{r1})
2. momento resistente de los rodamientos que soportan el eje (M_{r2})
3. inercia de la masa vinculada al eje del motor (M_{r3})

Para calcular el primer término, se deben conocer el valor de la fuerza de fricción entre esfera y eje y su distancia de aplicación respecto al punto de rotación del eje principal (valor de 'r' en la Figura 30). La fuerza de fricción entre esfera y eje adopta un valor máximo de 1,40 N (equivalente a 0,143 kgf aproximadamente). Por otro lado, el brazo de palanca para este caso es de 7,68 mm. Luego, el

momento resistente producido por el contacto entre esfera y eje resulta:

$$Mr_1 = Fr_2 \cdot r = 0,143 \text{ kgf} \times 0,768 \text{ cm} = 0,110 \text{ kgf.cm}$$

El segundo término corresponde a la oposición que los rodamientos ofrecen a la rotación. Esta es caracterizada por un momento resistente que depende de la carga normal aplicada en los rodamientos (reacción de los apoyos) y de fenómenos tribológicos que tienen lugar en la película de lubricante presente entre los elementos rodantes, los caminos de rodadura y las jaulas. Para dimensionar esta magnitud, uno de los fabricantes más importantes de rodamientos a nivel mundial (SKF) ofrece un modelo de cálculo, donde el momento resistente total se obtiene de cuatro fuentes:

$$Mr = M_{rr} + M_{sl} + M_{\text{sello}} + M_{\text{pérdida de energía}} \quad \text{Ecuación 10.}$$

El primer término, M_{rr} , corresponde al momento de fricción de rodadura e incluye los efectos de la falta de lubricante y el calentamiento por cizallamiento en la entrada de los contactos. Luego, el M_{sl} es el momento de fricción deslizante e incluye los efectos de la calidad de las condiciones de lubricación. El tercer componente, M_{sello} , es el momento de fricción de los sellos y se aplica si los rodamientos están equipados con sellos rozantes, donde las pérdidas por fricción ocasionadas por estos pueden superar a las generadas en el rodamiento. Finalmente, el último término corresponde al momento de fricción ocasionado por las pérdidas de energía por agitación del aceite, salpicaduras, etc. en un baño de aceite. Por la complejidad que involucra el cálculo, el fabricante ofrece una herramienta que permite obtener el valor individual de cada componente indicando tipo de rodamiento, velocidad de trabajo y carga aplicada.

Teniendo en cuenta los rodamientos seleccionados, con una carga radial de 0,24 Kgf (0,00235 KN), una temperatura de operación de 20 °C y considerando una velocidad de rotación de 400 rpm, de acuerdo a recomendaciones de los operadores del Calotester de INFIP, resulta $Mr = 0,099 \text{ Kgf.cm}$ (9,73 Nmm). Dado que el eje es soportado por dos rodamientos, el momento resistente de los rodamientos que soportan el eje resulta:

$$Mr_2 = 2 \cdot Mr = 2 \times 0,099 \text{ kgf.cm} = 0,20 \text{ kgf.cm} \text{ (19,46 Nmm).}$$

Por último, la masa vinculada al eje genera un momento resistente en oposición al movimiento que

le impone el motor eléctrico. Este depende del momento de inercia de la masa rotativa y de la aceleración angular del eje de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Mr3 = I \cdot \frac{dw}{dt} = I \cdot \alpha \quad \text{Ecuación 11.}$$

Puede verse que el momento resistente de la masa vinculada al eje no puede determinarse hasta no haber seleccionado el motor. Por lo tanto, para este cálculo se puede tomar como punto de partida el tiempo de arranque (tiempo requerido para llegar a la velocidad de giro nominal), el cual en motores CC de baja potencia por lo general es del orden de las milésimas de segundo.

Según el diseño, la masa rotante es el conjunto constituido por el eje principal y el acople. Por lo tanto, el momento de inercia resultante es de 14,41 kg.mm². Considerando una velocidad nominal de 400 rpm y un tiempo de arranque de 5 ms., se obtiene una aceleración angular de 8380 rad/s². Luego, el momento resistente debido a la masa rotante vinculada al eje de motor eléctrico resulta:

$$Mr3 = I \cdot \alpha = 14,41 \text{ kg.mm}^2 \times 8380 \text{ rad/s}^2 = 0,12 \text{ N.m} = 1,23 \text{ kgf.cm}$$

Finalmente, el momento resistente total es:

$$Mt = Mr1 + Mr2 + Mr3 = 1,54 \text{ kgf.cm}$$

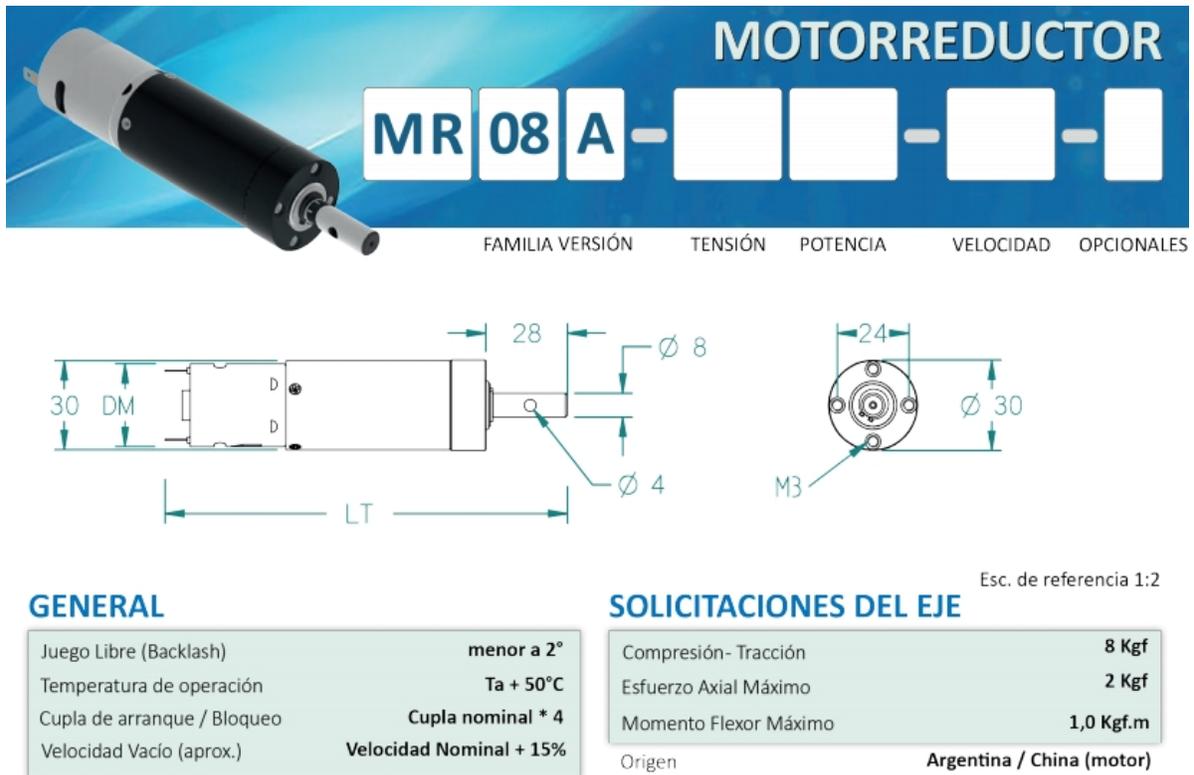
Por lo tanto, el par de arranque que debe entregar el motor debe ser, en principio, mayor al momento resistente total. Respecto al par requerido cuando el motor entra en régimen nominal (velocidad constante), es la sumatoria de los dos primeros términos pues la componente de inercia desaparece al entrar en movimiento. Este valor es de 0,3083 kgf.cm, por lo tanto el motor debe ser capaz de entregar una cupla nominal superior. Por otro lado, el dato que falta para terminar de dimensionar el motor necesario es la potencia del mismo. Para ello, se utiliza la siguiente expresión:

$$Potencia[Hp] = \frac{Momento[kgf.cm] * Velocidad[RPM]}{71600} \quad \text{Ecuación 12.}$$

Para cupla nominal mínima y velocidad de 400 rpm, la potencia requerida resulta 0,00172 Hp

(equivalente a 1,28 W).

Una vez conocidas la velocidad de rotación nominal, la cupla de arranque, la cupla nominal y la potencia a régimen nominal requeridos, se buscaron variantes en catálogos y sitios de fabricantes de este tipo de equipos. A partir del análisis de varias posibilidades, se determinó el equipo que satisface todos los requerimientos, caracterizado por la siguiente ficha técnica:



| Modelo | | MR08A-012003 | MR08A-012004 | MR08A-024002 | MR08A-024007 | | |
|--|----------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Opcional | | -- | -- | -- | -- | | |
| Servicio | | Normal | | | | | |
| Potencia [Hp] | | 0,0042 | 0,0067 | 0,0036 | 0,0107 | | |
| Tensión nominal [V] | | 12 Vcc | | 24 Vcc | | | |
| I _o . I _{nom} . I _s [A] | | 0,12 . 0,45 . 1,7 | 0,20 . 0,99 . 7,92 | 0,07 . 0,22 . 0,7 | 0,10 . 0,48 . 3,05 | | |
| Ruido máx. [DB] (Adicional única etapa 15%) | | 90 | 95 | 90 | 95 | | |
| RPM Nom . RPM Vacío (motor) | | 6800 . 8600 | 6140 . 7600 | 6150 . 8100 | 7430 . 8600 | | |
| Peso . Adicional por etapa [Kg] | | 0,175 . 0,005 | 0,190 . 0,005 | 0,175 . 0,005 | 0,190 . 0,005 | | |
| Largo[LT] . Adicional por etapa . Diámetro Motor [DM] | | 83,7 . 5 . 27,5 | 88,7 . 5 . 27,9 | 83,7 . 5 . 27,5 | 88,7 . 5 . 27,9 | | |
| Etapas | Relación | Engranajes | Velocidad [RPM] | Cupla [Kgf.cm] | Cupla [Kgf.cm] | Cupla [Kgf.cm] | Cupla [Kgf.cm] |
| 0 | 1:1 | 0 | 6400 | 0,044 | 0,077 | 0,042 | 0,103 |
| 1 | 4:1 | 4 | 1400 | 0,19 | 0,33 | 0,18 | 0,44 |
| 2 | 18:1 | 44 | 330 | 0,80 | 1,40 | 0,76 | 1,88 |
| | 23:1 | 54 | 258 | 1,03 | 1,79 | 0,97 | 2,40 |

Figura 49. Ficha técnica del motorreductor MR08A-012004.

El motor escogido es el MR08A-012 004, que posee un tren de engranajes de 2 etapas con relación de reducción 18:1, brindando una velocidad de rotación nominal de 330 rpm. Además, es capaz de entregar una cupla de 1,40 kgf.cm a la velocidad nominal (recordando que decrece con la velocidad) y una potencia de 0,0067 Hp (equivalente a 5 W). Se alimenta con 12 V (corriente continua) y las dimensiones pueden verse en la Figura 49. La aceleración angular que experimenta el eje al acoplarse al motor es de 36024 rad/s^2 . Esto genera un estado transitorio hasta alcanzar un régimen nominal de 1,16 ms.

5.3. Placa de Arduino.

La placa de Arduino es la encargada de controlar tanto la velocidad como el tiempo de ensayo, a través de la programación y procesamiento interno de valores de entrada.

Para la selección, se tuvo en cuenta la cantidad de pines necesarios y el costo que tienen las distintas placas. Se seleccionó la placa Arduino UNO, el modelo más básico dentro de la familia Arduino, ya que cuenta con la cantidad de pines necesaria para controlar los distintos componentes (display, teclado y controlador del motor). Además, es compatible con todo módulo o accesorio adicional que se quiera colocar (potenciómetros, sensores, etc.).

5.4. Controlador integrado.

Específicamente, se eligió el controlador 'L298N', compatible con Arduino y de precio accesible, que permite el control de velocidad y dirección (sentido de giro) de dos motores de corriente continua al mismo tiempo.

El módulo puede conducir motores que tengan voltajes entre 0 y 35 V, con una corriente máxima de 2 A. La Figura 50 muestra el módulo L298N con sus componentes y puntos de conexión.

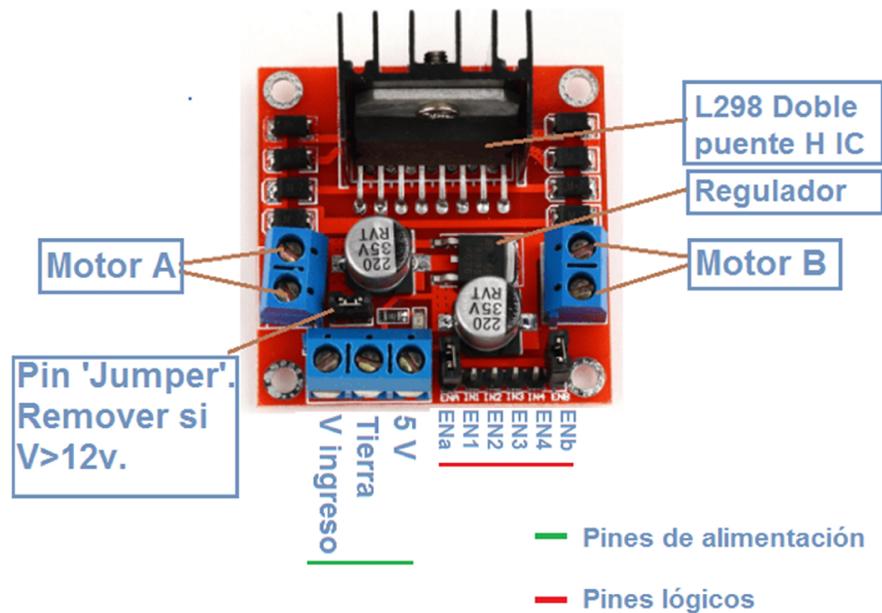


Figura 50. Módulo L298N.

En primer lugar, los pines lógicos IN1 e IN2 sirven para controlar el sentido de giro del motor A, y los pines IN3 e IN4 el del motor B. Luego, para regular la magnitud de la velocidad de rotación de los motores se debe quitar los jumpers y usar los pines ENA y ENB. Estos pines deben ser conectados a dos salidas PWM del Arduino. Si el controlador tiene los jumpers colocados, los motores girarán a la siempre a la misma velocidad.

En la Figura 51 se puede ver la conexión del motor de corriente continua, la placa de Arduino y el modulo integrado:

En la Figura 52 se muestran los elementos elegidos:

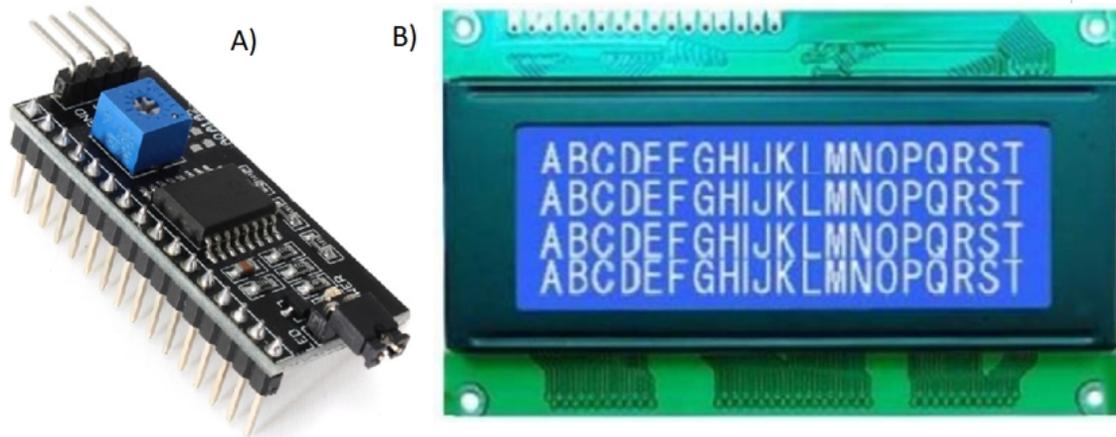


Figura 52. (a) Módulo I2C, (b) Display LCD 20x4.

5.6. Teclado matricial

El modelo seleccionado, luego de evaluar múltiples opciones que cumplan la misma función, es un teclado del tipo membrana de 4 filas y 4 columnas (conocido como 4x4). Es decir, que se tienen 16 botones: del 0 al 9 en números, de 'A' a 'D' de letras y dos caracteres especiales que son el asterisco (*) y el numeral (#).

En la Figura 53, se muestra un teclado de 4x4, junto con las conexiones internas que simplifican la programación y reducen los pines utilizados. Como se puede observar, en lugar de tener una salida por cada pulsador, se tiene una por fila (1 a 4, Figura 53 b) y una por columna (5 a 8, Figura 53 c). Conjugando ambas conexiones resulta el botón pulsado. Por ejemplo, pulsando el '8', se activan en simultaneo la fila 3 y la columna 2. Por lo tanto, en la programación se hace uso de esta configuración para ahorrar conectores de la placa Arduino.

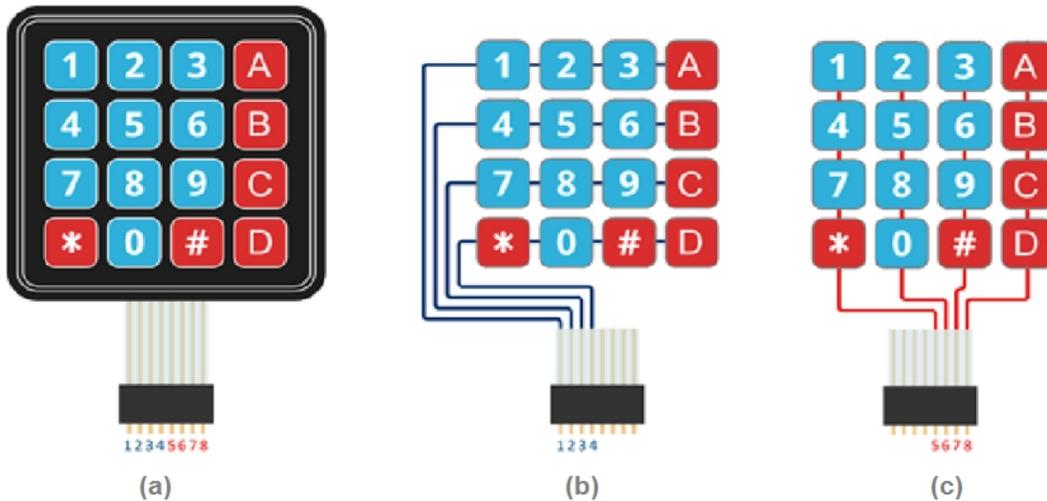


Figura 53. (a) Teclado matricial, (b) Conexión por filas, (c) Conexión por columnas.

5.7. Fuente de alimentación.

Los distintos componentes del sistema eléctrico consumen cierta cantidad de energía durante su funcionamiento. Por lo tanto, si se usa una fuente de 12 V, que corresponde a la tensión nominal del motor elegido, al mismo llega menos de lo esperado y nunca se podría alcanzar su velocidad máxima. Luego de ensayos preliminares, utilizando una fuente externa regulable en tensión, se determinó que se requieren 15 V para compensar las pérdidas del circuito y obtener la velocidad máxima disponible del motor sin causar daños a largo plazo.

Luego, para terminar de definir las características de la fuente a adquirir, se midió la corriente consumida por el circuito en estado de carga máxima, es decir, durante la realización de un ensayo a la máxima velocidad. El valor alcanzado resultó en 450 mA para el conjunto. Por cuestiones de sobre dimensionamiento, para poder añadir nuevos componentes a futuro, y contemplando la oferta en el mercado, se decidió por una fuente capaz de entregar 2000 mA cuando se encuentre en estado nominal. A modo de protección se colocó un fusible de 1500 mA en el ingreso de corriente al circuito dentro de la carcasa. Esto tiene que ver con evitar daños en los componentes de mayor valor económico por cortocircuito.

6. Proceso de fabricación y ensamblaje.

En esta etapa se aborda la fabricación de los componentes no comerciales y el ensamblaje del Calotester, que se basó en el diseño desarrollado en la sección 4. Dentro de la fabricación se distinguen las siguientes partes: piezas mecánicas y sistema eléctrico. Luego de la construcción se desarrolla el proceso de ensamble de subconjuntos y su fijación sobre la base del equipo.

6.1. Fabricación del sistema eléctrico.

Durante la etapa de diseño, se describió la necesidad de contar con una placa adicional, dependiente de la fuente de alimentación, que permita suministrar energía a los componentes eléctricos que más consumen. Estos son el display LCD, el controlador integrado y la placa de desarrollo de Arduino. Por lo tanto, se diseñó una placa de distribución que cuenta con pines de conexión, resistencias y diodos zener de magnitudes adecuadas para alimentar esos componentes.

La Figura 54 muestra un esquema de la placa, construida a partir de una plaqueta de pruebas, que es un tablero con agujeros rodeados de material conductor de forma individual. De esta manera, se pueden montar los componentes que se necesiten y se "fabrica" el camino conductor del lado del reverso.

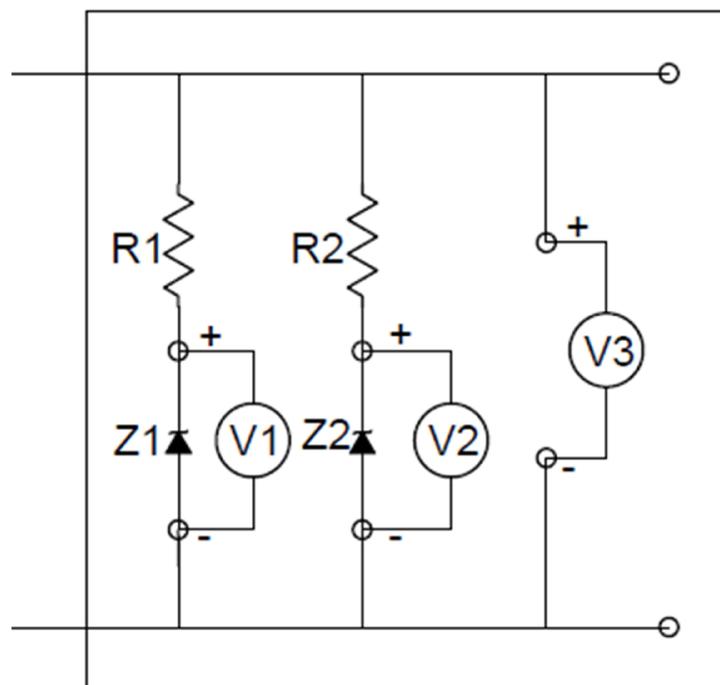


Figura 54. Placa de distribución.

Dentro de la placa se encuentran montadas dos resistencias de 180 Ohm y dos diodos zener, uno de 5,6 V y otro de 6,5 V (ambos de 1 W de potencia). Cada rama de la placa está destinada a alimentar un componente electrónico con una tensión prácticamente invariante frente a variaciones de la fuente de alimentación principal (funcionamiento básico de este tipo de diodos). El Z1 es el diodo de 5,6 V que alimenta el display. El Z2, de 6,5 V, alimenta la placa Arduino UNO. En la Figura 55 se muestra una imagen de la conexión real de los distintos componentes sobre la placa y en la Figura 56, se describen las conexiones eléctricas de todo el equipo.

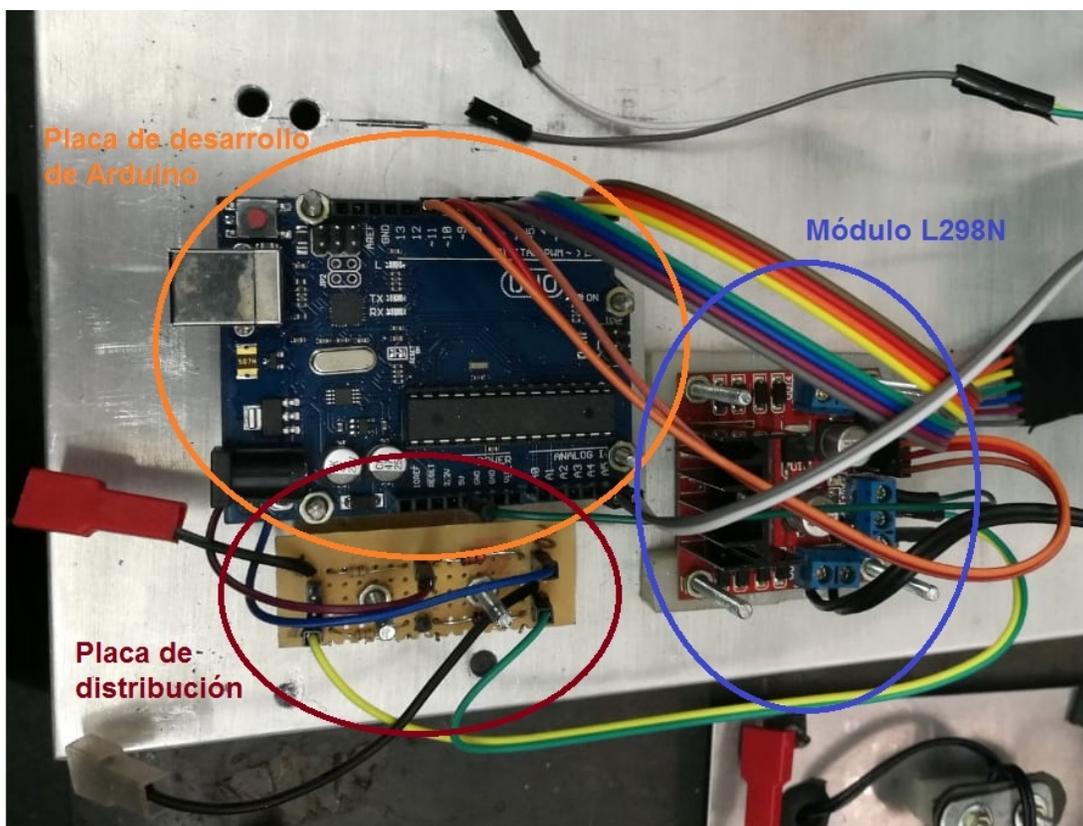


Figura 55. Conexiones eléctricas internas a la carcasa.

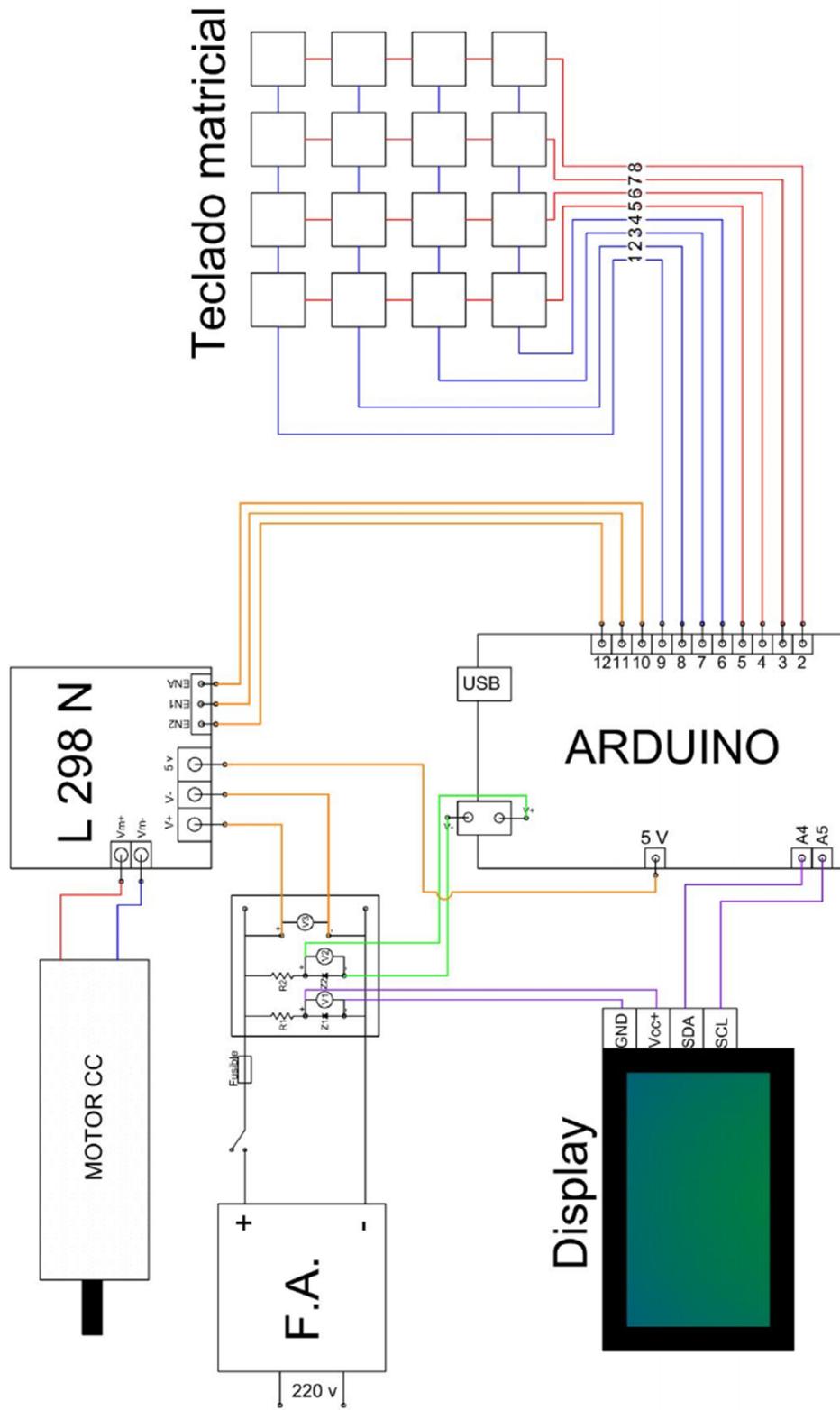


Figura 56. Esquema de conexiones eléctricas del equipo.

Se puede apreciar que todos los componentes se encuentran conectados en paralelo a la fuente de alimentación, por lo tanto, la corriente que debe entregar la fuente es la suma lineal de las corrientes consumidas por cada equipo individualmente. Así, ninguno pierde intensidad. En este sentido, el fusible se colocó, interrumpiendo la rama positiva de la fuente de alimentación, en un porta-fusible aéreo.

Por último, las plaquetas deben ir montadas sobre una base no conductora, porque tienen sus contactos en la parte inferior. Para ello, se fabricaron bases prismáticas de polietileno de alto peso molecular (APM).

6.2. Fabricación de piezas mecánicas.

El diseño permitió que todas las piezas fueran obtenidas a partir de cuatro operaciones básicas de arranque de viruta: fresado, torneado, taladrado y roscado. Además, se realizó una operación de terminación y ajuste: el escariado. El mecanizado completo fue realizado por el autor de este trabajo, en el taller de Máquinas-Herramientas de la Facultad de Ingeniería. Los planos de fabricación de cada componente se encuentran en el Anexo C del proyecto.

El desarrollo del proceso de fabricación se realizó escogiendo el subconjunto portamuestras como representativo, porque contempla todas las operaciones anteriormente mencionadas. Los demás componentes mecánicos fueron construidos bajo los mismos lineamientos, aunque no se describirán específicamente.

Para comenzar, el subconjunto en cuestión se ve representado en la Figura 57 obtenida del prototipo virtual. El carro portamuestras propiamente dicho puede deslizarse manualmente sobre un par de guías, montadas sobre asientos fijos a la base del equipo. Para ubicar en posición longitudinal, el conjunto cuenta con un tornillo de cabeza mariposa situado sobre la placa guía trasera del carro que permite ajustarlo y restringir el movimiento. Luego, el desplazamiento de las mordazas para producir el apriete sobre la muestra lo genera la rotación de un tornillo de movimiento y un sistema de guías montadas sobre asientos fijos al plano del portamuestras.

Como material de partida para todas las piezas prismáticas del subconjunto se utilizó una placa de aluminio de espesor 10 mm. Esta placa fue seccionada mediante corte con sierra manual para obtener las preformas de partida de las piezas a mecanizar. Cabe aclarar que la base del equipo, aunque no pertenece al subconjunto portamuestras, también se mecanizó a partir de la placa de 10 mm. Luego, ambos juegos de guías se obtuvieron de varillas de acero plata de 7 mm de diámetro y tolerancia de fabricación h7. Éstas fueron mecanizadas en sus extremos para lograr un ajuste prensado con los

asientos. Además, el material de partida del tornillo de movimiento fue una varilla roscada de acero (W3/8" x 16 hpp⁷) que se mecanizó para darle la forma final en las secciones correspondientes. Por último, las perillas se obtuvieron de una barra cilíndrica de aluminio.

La fijación entre componentes es con tornillos de rosca W3/16" x 24 hpp y cabeza Allen de 4 mm.

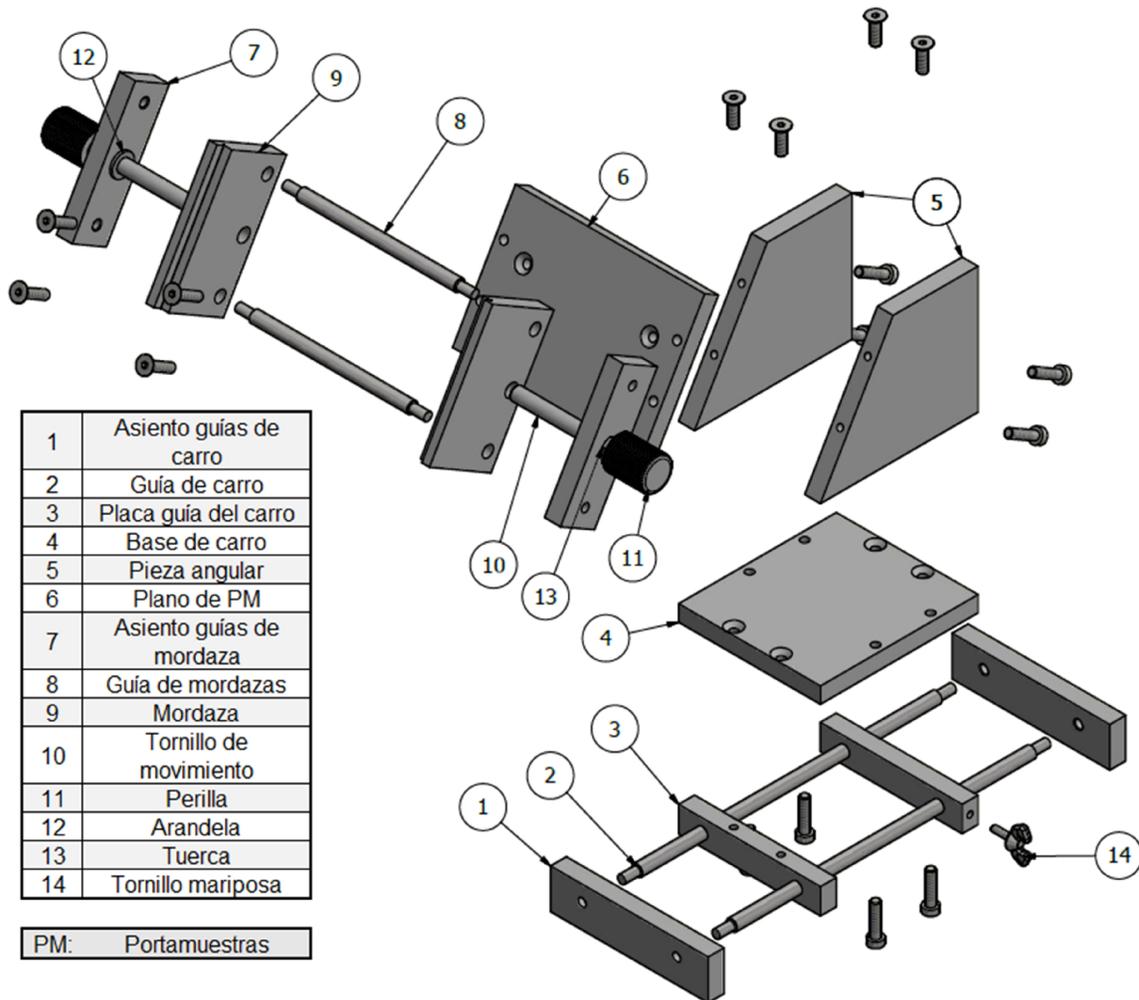


Figura 57. Prototipo virtual del portamuestras. Vista explotada.

Aquellas piezas que se diseñaron de a pares, fueron fabricadas en conjunto para que mantengan igualdad de medidas y el mismo posicionamiento de agujeros. Esto refiere a las piezas n° 1, 3, 5, 7 y 9 según la numeración establecida en la Figura 57. En una sección posterior se desarrollan los

⁷ Hpp: hilos por pulgada. Referido al paso en sistema inglés.

parámetros y tiempos de mecanizado para la fabricación de cada componente del equipo.

6.2.1. Fresado.

El fresado es una operación que permite obtener superficies planas, por lo que se utilizó para mecanizar todas las piezas prismáticas. La fresadora utilizada en este trabajo se observa en la Figura 58. La misma es del tipo combinada, con un husillo vertical y uno horizontal. En este tipo de máquina, la pieza se monta sobre la mesa y la herramienta se fija en alguno de los husillos. La herramienta es la que se encuentra girando para generar el movimiento de corte, mientras que la mesa posee los movimientos de avance longitudinal y transversal y de desplazamiento en profundidad.



Figura 58. Fresadora combinada utilizada para el mecanizado.

La sujeción de las piezas a la mesa se realizó con morsa, para las piezas más pequeñas o para aquellas

que requerían ser trabajadas con el husillo vertical, o con clamps, para las piezas que requerían ser trabajadas con el husillo horizontal. La morsa fue reglada y ajustada, con ayuda de un reloj comparador, para poder asegurar paralelismo y perpendicularidad durante el mecanizado. Para las piezas que se sujetaron con clamps, se colocó en la mesa un bloque rectificadado que funcionó como patrón, también reglado con el comparador en la dirección del husillo horizontal. Este permitió apoyar las piezas durante el trabajo asegurando perpendicularidad entre sus caras.

La herramienta utilizada para realizar todos los contorneados fue una fresa de 2 insertos y 32 mm de diámetro. Los planeados, por su parte, se realizaron con la misma herramienta en las piezas más pequeñas (piezas nº 1, 3 y 7 de la Figura 57) y con una fresa de 5 insertos y 63 mm de diámetro en el resto de las piezas (piezas nº 4, 5, 6 y 9), para disminuir la cantidad de pasadas. Las condiciones de corte se obtuvieron de manual [6].

Con los dos dispositivos correctamente reglados y la herramienta seleccionada, se comenzó a mecanizar. Para los contorneados se utilizó el husillo horizontal. Se realizó la fijación inicial de las preformas contra el bloque de referencia (eligiendo la cara con mejor terminación luego del fraccionamiento manual) y se mecanizó la primera cara plana. Posteriormente, se rotó el material 90° (usando la cara mecanizada en la operación anterior como referencia) y se mecanizó la segunda cara plana. Repitiendo esta metodología dos veces más se completó el contorneado de las cuatro caras de las piezas. Las dos operaciones finales se utilizaron también para llevar a medida los lados de las piezas.

Para realizar los planeados se utilizó el husillo vertical de la fresadora. La fijación en morsa se realizó con ayuda de separadores (bloques rectificadados) para dejar libre la superficie a mecanizar. En esa posición se verificó el paralelismo de la superficie a mecanizar con respecto a la mesa con ayuda de un comparador y, seguidamente, se realizó la operación de planeado propiamente dicha. Posteriormente, se dio vuelta la pieza y se repitió la metodología descripta llevando a medida el espesor de las piezas. De este modo, se completó el mecanizado de las seis caras de las piezas prismáticas.

Como caso particular, para las piezas angulares que dan la inclinación del portamuestras (piezas nº 5 en la Figura 57), el bloque de referencia debió ser rotado 30° respecto del eje del husillo horizontal, para que al mecanizar la cara correspondiente se obtenga el ángulo deseado de 60°. En este caso, se mecanizaron en primer lugar las tres caras rectas y luego se rotó el bloque de referencia para mecanizar la cara inclinada.

Otro par de piezas distintivas del resto son las mordazas (piezas nº 9 en la Figura 57). Estas tienen un

rebaje en forma de escalón en uno de sus lados que permite la sujeción las muestras. Este rebaje debía tener la misma profundidad en ambas piezas para que la muestra a ensayar no quede inclinada respecto al eje que impulsa la bolilla. Por lo tanto, las piezas se fijaron juntas en la morsa. Se verificó que las caras a mecanizar estuvieran a la misma altura y paralelas a la mesa de trabajo. Para realizar el primer escalón se hizo contacto en la cara superior de una de las piezas con la herramienta y se puso a cero el eje vertical del sistema de medición digital de la fresadora. Luego, se realizaron pasadas sucesivas hasta llegar a la profundidad deseada. Para realizar el segundo escalón también se realizaron pasadas sucesivas pero sin poner a cero el eje vertical del sistema de medición de modo de llegar a la misma profundidad que en el primer escalón.

6.2.2. Torneado.

El torneado es una operación que permite obtener superficies de revolución. En este trabajo se utilizó un torno paralelo (Figura 59). En este tipo de máquinas, la pieza puede ir montada en un portapiezas (plato) o entre puntas y la herramienta se fija en una torreta portaherramientas ubicada sobre un conjunto de carros horizontales. La pieza a mecanizar gira alrededor del eje del husillo principal de la máquina proporcionando el movimiento de corte, mientras que el conjunto de carros horizontales poseen los movimientos de avance longitudinal, transversal y oblicuo al eje del husillo y de desplazamiento en profundidad. En esta sección sólo se describe el proceso de fabricación de las piezas que requirieron operaciones de refrentado y cilindrado. Las piezas que requirieron operaciones de roscado en torno se describen en la sección correspondiente.



Figura 59. Torno paralelo empleado para el mecanizado.

En el conjunto portamuestras se distinguen cuatro piezas mecanizadas en torno: las guías del carro portamuestras, las guías de mordazas, los tornillos de movimiento y las perillas (piezas nº 2, 8, 10 y 11 en la Figura 57).

En el caso de las guías, solo se realizaron rebajes en sus extremos para conseguir el ajuste requerido con los respectivos asientos y un posicionado correcto, ya que el rebaje actúa como un tope. El proceso de mecanizado es idéntico para las cuatro guías. En primer lugar, se midió el diámetro de los agujeros producidos en los asientos donde las guías se montarían con interferencia. Al valor medido, se adicionó la magnitud de 0,1 mm en el diámetro para obtener la medida de cada rebaje. Luego, se montó el material sobre el plato de tres mordazas, dejando libre sólo los extremos para el mecanizado.

6.2.3. Taladrado.

Esta es una operación que se hace con el fin de obtener agujeros cilíndricos. La herramienta utilizada es la broca helicoidal. Esta operación se puede llevar adelante en cualquier máquina-herramienta que cuente con la posibilidad de incorporar el dispositivo de sujeción de este tipo de broca, más conocido como mandril. El movimiento de avance lo realiza la herramienta mientras que el movimiento de rotación puede ser realizado por la pieza en caso de hacerse torno o por la misma herramienta en caso de hacerse en fresadora o taladradora de banco.

Para las piezas prismáticas del portamuestras, los agujeros se realizaron en su totalidad en la fresadora antes descrita, colocando el mandril en el husillo vertical. Utilizando el sistema de medición digital de la fresadora, se marcaron y mecanizaron los agujeros con la mayor precisión posible. Para piezas idénticas realizadas de a pares, se realizaron los agujeros en simultáneo para asegurar posicionado y medida. En algunas piezas, se realizó un agujereado secundario no pasante para ocultar la cabeza de los tornillos de fijación.

El conjunto portamuestras presenta un único par de piezas de revolución que requirieron de agujeros: las perillas. Estos agujeros tienen la particularidad de ser no pasantes. Los mismos se realizaron en el torno paralelo anteriormente mencionado y se dispuso el mandril en el cabezal de la contrapunta. Para llegar a la profundidad requerida se utilizó la escala graduada del mecanismo de avance del cabezal móvil.

En todos los casos se emplearon brocas de HSS. Se realizaron pasadas sucesivas con brocas de diámetro creciente hasta llegar al diámetro requerido. Las condiciones de corte se obtuvieron de manual [6].

6.2.4. Roscado.

Esta operación permite la generación de roscas hembra a partir de un agujero previamente realizado o de roscas macho a partir de una superficie cilíndrica. Las roscas aseguran la sujeción entre piezas del conjunto. El roscado puede realizarse manualmente o en torno. Las herramientas manuales utilizadas para realizar roscas hembra y macho son el macho de roscar y la terraja, respectivamente. Para poder mecanizar una rosca en el torno, se requiere que la herramienta de corte tenga un ángulo de punta acorde al tipo de rosca a fabricar (Métrica: 60°, Whitworth: 55°) y que el torno tenga la posibilidad de acoplar el desplazamiento del carro con el giro del husillo principal para lograr el paso deseado.

Como se mencionó anteriormente, en el conjunto portamuestras (y en el resto del equipo) se utilizó tornillería Whitworth. Para las piezas prismáticas y las perillas, los roscados se realizaron de forma manual. En la Tabla 1 se detallan los diámetros de broca necesarios para las roscas realizadas.

Tabla 1. Roscas y diámetros utilizados en el conjunto portamuestras [6].

| Rosca (pulgadas) | Paso (hilos por pulgadas) | Diámetro de fondo (mm) | Diámetro de broca (mm) |
|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 3/16 | 24 | 4.76 | 3.75 |
| 1/4 | 20 | 6.35 | 5 |
| 3/8 | 16 | 9.53 | 8 |

Por último, la fabricación de las roscas en los tornillos de movimiento del lado que ajustan las perillas se comenzó en el torno paralelo y se terminó con terraja porque la dureza del material hacía muy dificultoso el trabajo manual. Además, de esta forma resultó una rosca mejor terminada.

6.2.5. Escariado.

El escariado es un proceso de arranque de viruta que se realiza para conseguir ciertas tolerancias dimensionales y, además, un buen acabado superficial. El escariado se realiza con una herramienta denominada escariador o calisuar, al que se le imprimen dos movimientos, uno de giro sobre su eje, y otro de desplazamiento rectilíneo a lo largo de dicho eje. Este proceso se puede realizar a mano o bien automáticamente con una máquina-herramienta que permita esos movimientos, como pueden ser un torno, una fresadora o una taladradora. Esta operación fue realizada de forma manual en aquellos componentes que deberían ser guiados con cierta precisión, como son las mordazas (piezas nº 9 en la Figura 57) y las placas guía del carro portamuestras (piezas nº 3 en la Figura 57). El escariador utilizado fue de 7 mm de diámetro con una tolerancia H7. Esto implica medidas límites de 7 y 7,015 mm, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, para las guías (piezas nº 2 y 8 en la Figura 57) se eligieron varillas de acero plata de 7 mm de diámetro con una tolerancia de fabricación h7. Para esta tolerancia, los límites inferior y superior son 6,985 y 7 mm, respectivamente. Los diámetros reales de las varillas y los agujeros escariados en las mordazas y las placas guía del carro resultaron 6,985 y 7,015 mm, respectivamente. En consecuencia, se obtuvieron ajustes con un juego real de 0,03 mm.

6.3. Ensamble del equipo.

Luego de la fabricación de los componentes individuales se llevó a cabo el proceso de ensamblaje de subconjuntos y al montaje de estos subconjuntos en la base del equipo. En las siguientes figuras se muestran los distintos subconjuntos del equipo ya ensamblados y, finalmente, el equipo completo.

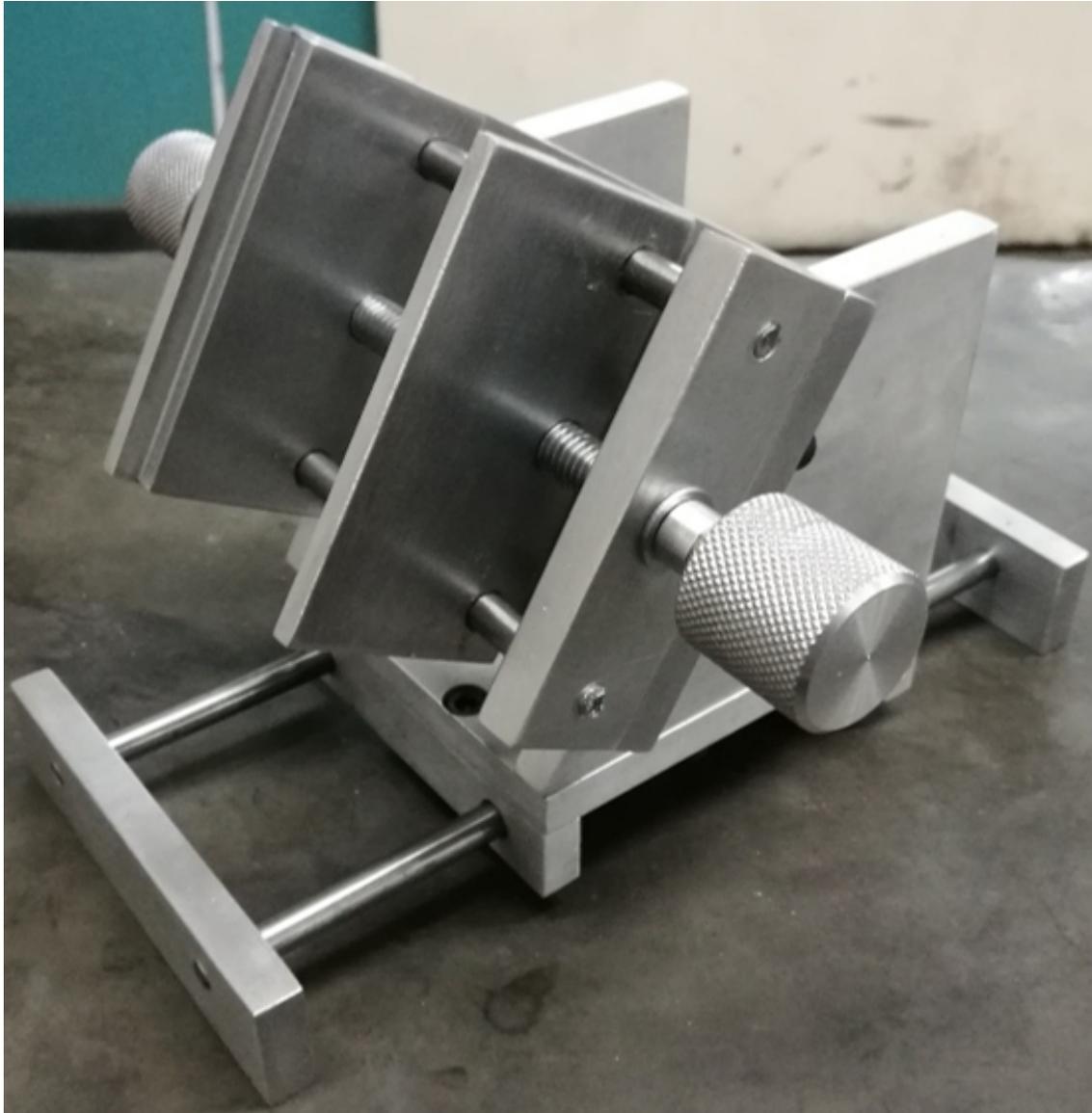


Figura 61. Conjunto portamuestras ensamblado.



Figura 62. Ensamble del carro de portamuestras.

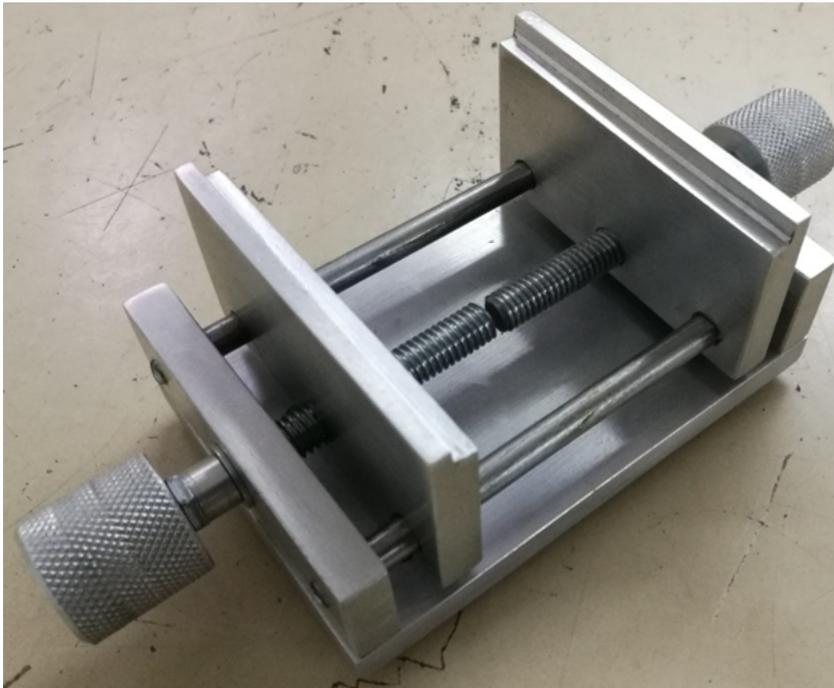


Figura 63. Ensamble del sistema de sujeción.

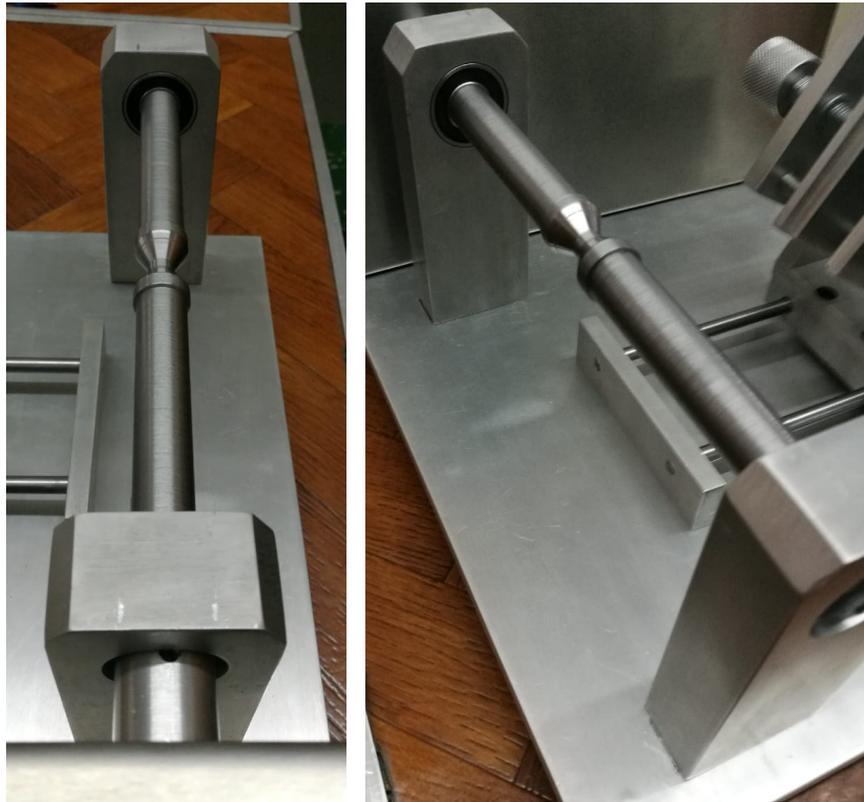


Figura 64. Ensamble del eje principal sobre los soportes.

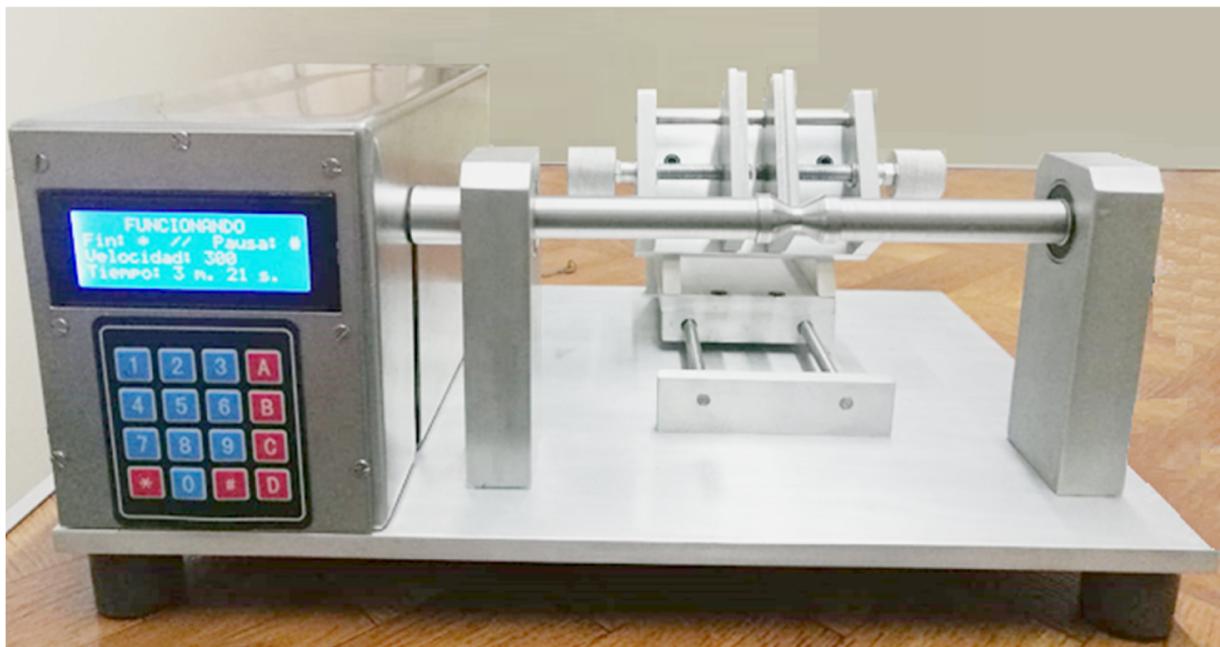


Figura 65. Equipo terminado.

6.4. Estimación de costos de fabricación del equipo.

El costo total de fabricación del equipo es la suma de los costos de los componentes comerciales y el valor estimado de mano de obra en el mecanizado y ensamble. En esta sección se detallan los gastos realizados y se estima el tiempo de mecanizado para todas las piezas del equipo. A partir de eso, se obtiene un valor total del equipo.

Cabe aclarar que el costo total del equipo puede reducirse considerablemente si las operaciones de mecanizado son realizadas por un operario calificado.

En el Anexo B se incluye un presupuesto obtenido de uno de los proveedores de equipos descriptos en la sección 2.

6.4.1. Costos de componentes comerciales.

En esta etapa, se hace la recopilación de gastos efectuados en componentes comerciales y material a partir de la cual se construyó el equipo. En la Tabla 2 se muestran los componentes, precio aproximado al tiempo de la compra y lugar del que fueron adquiridos los mismos:

Tabla 2. Gastos realizados en componentes comerciales.

| Descripción | Valor | Proveedor |
|---|-----------------------|------------------------|
| Patatas de goma | \$ 80,00 | Martín Goma |
| Carcasa, soportes de motor y tapas. (Chapa de acero inoxidable) | \$ 1.000,00 | Plegados Manz |
| Barra de acero SAE 1045 (eje) | \$ 200,00 | Metalúrgica Wolodarsky |
| Material aluminio (placa de 10 mm, barras cilíndricas y rectangulares) | \$ 3.920,00 | Fescap |
| Varillas de acero plata | \$ 611,00 | Seyco |
| Rodamientos | \$ 60,00 | Rivera Rodamientos |
| Bolillas | \$ 100,00 | Rivera Rodamientos |
| Bulonería en general | \$ 500,00 | Bulonera Comahue |
| Varilla roscada | Presente en el taller | |
| Interruptor | \$ 30,00 | Free-Electron |
| Fusibles y porta-fusibles | \$ 50,00 | Free-Electron |
| Fuente de alimentación | \$ 705,00 | Free-Electron |
| Motor CC | \$ 620,00 | IGNIS |
| Placa Arduino UNO | \$ 270,00 | Electronicmind |
| Display LCD 20 x 4 | \$ 260,00 | Electronicmind |
| Módulo I2C | \$ 80,00 | Electronicmind |
| Módulo L298N | \$ 170,00 | Electronicmind |
| Teclado matricial | \$ 65,00 | Electronicmind |

| | | |
|--------------------|-------------|-------------------|
| Placa experimental | \$ 70,00 | Free-Electron |
| Material adicional | \$ 200,00 | Fescap/Seyco/etc. |
| TOTAL | \$ 8.991,00 | |

6.4.2. Estimación de tiempos de mecanizado.

Se hizo una estimación de horas dedicadas a la fabricación de componentes no comerciales. En la Tabla 3 se brinda un detalle de tiempos de mecanizado (corte, maniobra y preparación) y longitud mecanizada para poder obtener un tiempo global de fabricación de las piezas, contemplando la cantidad de piezas para cada caso. Luego, evaluando el costo de mecanizado por hora de trabajo se obtuvo un costo de fabricación aproximado.

Consideraciones:

- Tiempo de maniobras: 3 veces el tiempo de corte
- Tiempo de preparación: 5 veces el tiempo de corte.
- Velocidad de avance torno paralelo: 60
- Velocidad de avance fresadora: 230 mm/min.
- Velocidad de avance manual para agujeros: 60 mm/min.
- Velocidad de avance manual de roscado: 12 mm/min.
- Velocidad de avance de escariado: 6 mm/min.

Tabla 3. Estimación de tiempos, velocidades y costos de fabricación.

| Nombre de pieza | Operación | Longitud mecanizada (mm) | Tiempo corte (min) | Tiempo maniobra (min) | Tiempo preparación (min) | TIEMPO (min) |
|------------------------|-------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|--------------|
| Base del equipo | Contorneado | 1784 | 23,27 | 69,81 | 116,35 | 209,43 |
| | Planeado | 3360 | 58,43 | 175,3 | 292,17 | 525,91 |
| | Agujereado | 10 | 5,83 | 17,5 | 29,17 | 52,5 |
| | Roscado | 8 | 2,67 | 8 | 13,33 | 24 |
| Soporte de eje | Contorneado | 1368 | 5,95 | 17,84 | 29,74 | 107,06 |
| | Planeado | 1140 | 4,96 | 14,87 | 24,78 | 89,22 |
| | Agujereado | 60 | 5 | 15 | 25 | 90 |
| | Torneado | 50 | 3,18 | 9,54 | 15,89 | 57,22 |
| | Roscado | 40 | 3,33 | 10 | 16,67 | 60 |
| Asiento guías de carro | Contorneado | 634 | 8,27 | 24,81 | 41,35 | 74,43 |
| | Planeado | 196 | 1,7 | 5,11 | 8,52 | 15,34 |
| | Agujereado | 10 | 0,67 | 2 | 3,33 | 6 |
| | Roscado | 14 | 1,17 | 3,5 | 5,83 | 21 |

| | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| Placa guía del carro | Contorneado | 596 | 7,77 | 23,32 | 38,87 | 69,97 |
| | Planeado | 186 | 1,62 | 4,85 | 8,09 | 14,56 |
| | Agujereado | 15 | 1,25 | 3,75 | 6,25 | 11,25 |
| | Escariado | 15 | 5 | 15 | 25 | 45 |
| | Roscado | 14 | 1,75 | 5,25 | 8,75 | 31,5 |
| Base de carro | Contorneado | 764 | 9,97 | 29,9 | 49,83 | 89,69 |
| | Planeado | 500 | 8,7 | 26,09 | 43,48 | 78,26 |
| | Agujereado | 10 | 1,33 | 4 | 6,67 | 12 |
| Pieza angular | Contorneado | 744 | 9,7 | 29,11 | 48,52 | 87,34 |
| | Contorno angular | 196 | 10,23 | 30,68 | 51,13 | 92,03 |
| | Planeado | 960 | 8,35 | 25,04 | 41,74 | 150,26 |
| | Agujereado | 20 | 1,33 | 4 | 6,67 | 12 |
| | Roscado | 34 | 5,67 | 17 | 28,33 | 102 |
| Plano de portamuestras | Contorneado | 784 | 10,23 | 30,68 | 51,13 | 92,03 |
| | Planeado | 560 | 9,74 | 29,22 | 48,7 | 87,65 |
| | Agujereado | 10 | 1,33 | 4 | 6,67 | 12 |
| Asiento guías de mordaza | Contorneado | 594 | 7,75 | 23,24 | 38,74 | 69,73 |
| | Planeado | 176 | 1,53 | 4,59 | 7,65 | 13,77 |
| | Agujereado | 10 | 0,67 | 2 | 3,33 | 6 |
| | Roscado | 20 | 1,67 | 5 | 8,33 | 30 |
| Mordaza | Contorneado | 634 | 8,27 | 24,81 | 41,35 | 74,43 |
| | Planeado | 480 | 4,17 | 12,52 | 20,87 | 37,57 |
| | Rebaje | 352 | 3,83 | 11,48 | 19,13 | 68,87 |
| | Agujereado | 15 | 0,5 | 1,5 | 2,5 | 4,5 |
| | Escariado | 15 | 5 | 15 | 25 | 45 |
| Perilla | Torneado | 50 | 2,12 | 6,36 | 10,6 | 38,15 |
| | Agujereado | 40 | 0,67 | 2 | 3,33 | 12 |
| | Roscado | 34 | 1,42 | 4,25 | 7,08 | 25,5 |
| | Moleteado | 50 | 0,85 | 2,54 | 4,24 | 15,26 |
| Tornillo de Movimiento | Torneado | 60 | 1,53 | 4,58 | 7,63 | 27,46 |
| | Roscado | 40 | 1,67 | 5 | 8,33 | 30 |
| Eje principal | Torneado | 240 | 12,21 | 36,62 | 61,03 | 109,86 |
| Base placa electrónica | Contorneado | 648 | 0,94 | 2,82 | 4,7 | 25,36 |
| | Planeado | 438 | 0,63 | 1,9 | 3,17 | 17,14 |
| | Agujereado | 36 | 0,4 | 1,2 | 2 | 10,8 |
| Guía de carro | Torneado | 20 | 1,36 | 4,07 | 6,78 | 24,41 |
| Guía de mordaza | Torneado | 20 | 1,36 | 4,07 | 6,78 | 24,41 |
| Acople | Torneado | 30 | 2,03 | 6,1 | 10,17 | 18,31 |
| | Agujereado longitudinal | 50 | 2,5 | 7,5 | 12,5 | 22,5 |
| | Agujereado transversal | 10 | 0,33 | 1 | 1,67 | 3 |
| | Roscado | 10 | 1,67 | 5 | 8,33 | 15 |
| Tiempo de Mecanizado (hs) | | | | | | 51,48 |
| Tiempo de Ensamble (hs) | | | | | | 8 |
| Tiempo TOTAL (hs) | | | | | | 59,48 |

El costo de mecanizado se estima en €30 por hora de trabajo. Por lo tanto, para los tiempos totales de fabricación obtenidos, el costo resulta en €1784,40. Para una cotización del euro en \$47, se obtiene un valor total de \$83.866,80. Finalmente, el costo total de fabricación resulta en **\$92.857,80**. A modo de referencia, si se utiliza la cotización actual del dólar a \$42, el costo total equivale a **u\$s 2.210,9**. El equipo presupuestado tiene un valor de €543,60, por lo que se puede notar una gran diferencia con los valores que se manejan comercialmente.

7. Puesta en funcionamiento y ensayos preliminares.

En esta sección se realizó la puesta en funcionamiento del equipo, que implicó la verificación del programa controlador del equipo y el ajuste del control de velocidad. Además, se generó una etapa de ensayos preliminares sobre muestras con recubrimientos de espesor conocido.

7.1. Puesta en funcionamiento.

Para comenzar a operar, el programa controlador del equipo debe ser verificado para que lo pensado cuando se programó en la placa de desarrollo (ver programa en la sección Anexo B) tenga coincidencia con lo que el equipo efectúa realmente. Para funcionar se piden valores de tiempo de duración del ensayo (en minutos y segundos) y velocidad de rotación del eje (en rpm). En cuanto a la variable temporal, como se mencionó anteriormente, con códigos de 'retraso' internos se puede resolver sin mayores inconvenientes. Pero para el caso de la velocidad, las rpm deben ser traducidas a valores de tensión eléctrica modulada por amplitud de pulso (PWM) por medio de un cálculo.

La forma en que esto se logra es evaluando la curva experimental de velocidad de giro del eje en función del valor de la salida PWM (0 a 255) mediante un programa auxiliar diseñado con este fin. Para obtener esta curva se varió el valor porcentual de la salida PWM y se midió la velocidad de giro resultante por medio de un tacómetro digital. Luego, para lograr una curva que se adapte a la necesidad del equipo, donde se ingrese con velocidad y se obtenga un valor de PWM, se graficó de manera inversa. La curva obtenida se aproximó con una función polinómica de grado 5. Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) superior a 0,997, por lo que se supuso como satisfactoria a esta aproximación. En la Figura 66 se observa el arreglo empleado y en la Figura 67 se muestra la curva experimental relevada (una vez invertidos los valores).

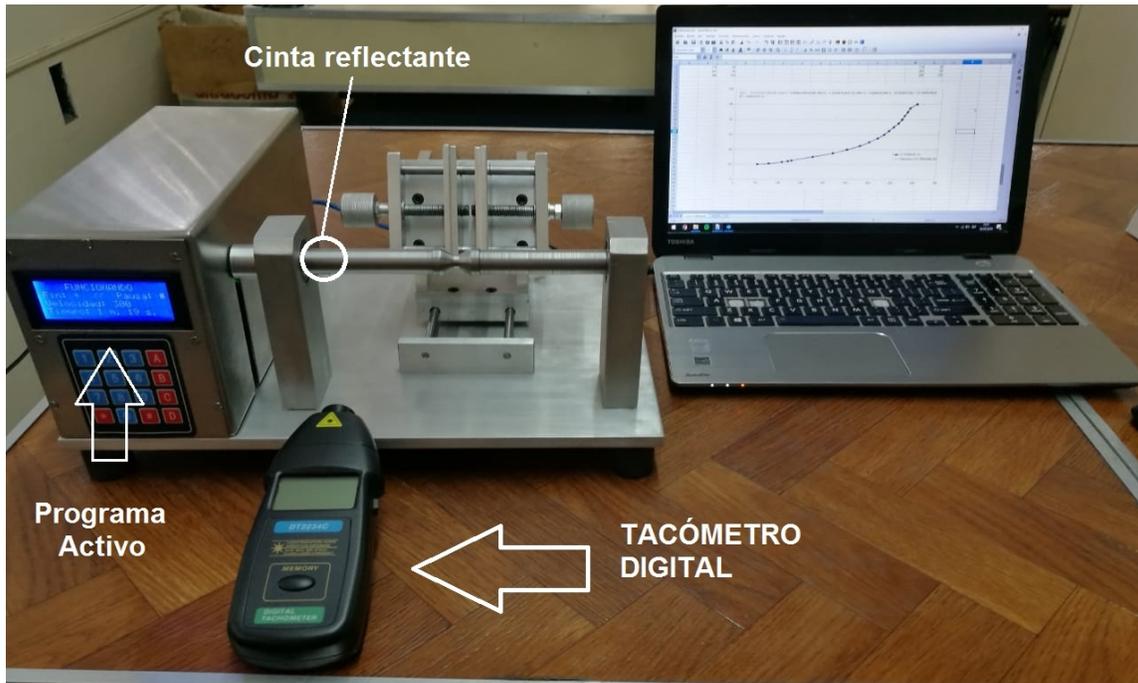


Figura 66. Arreglo para el proceso de ajuste de la velocidad de giro del eje.

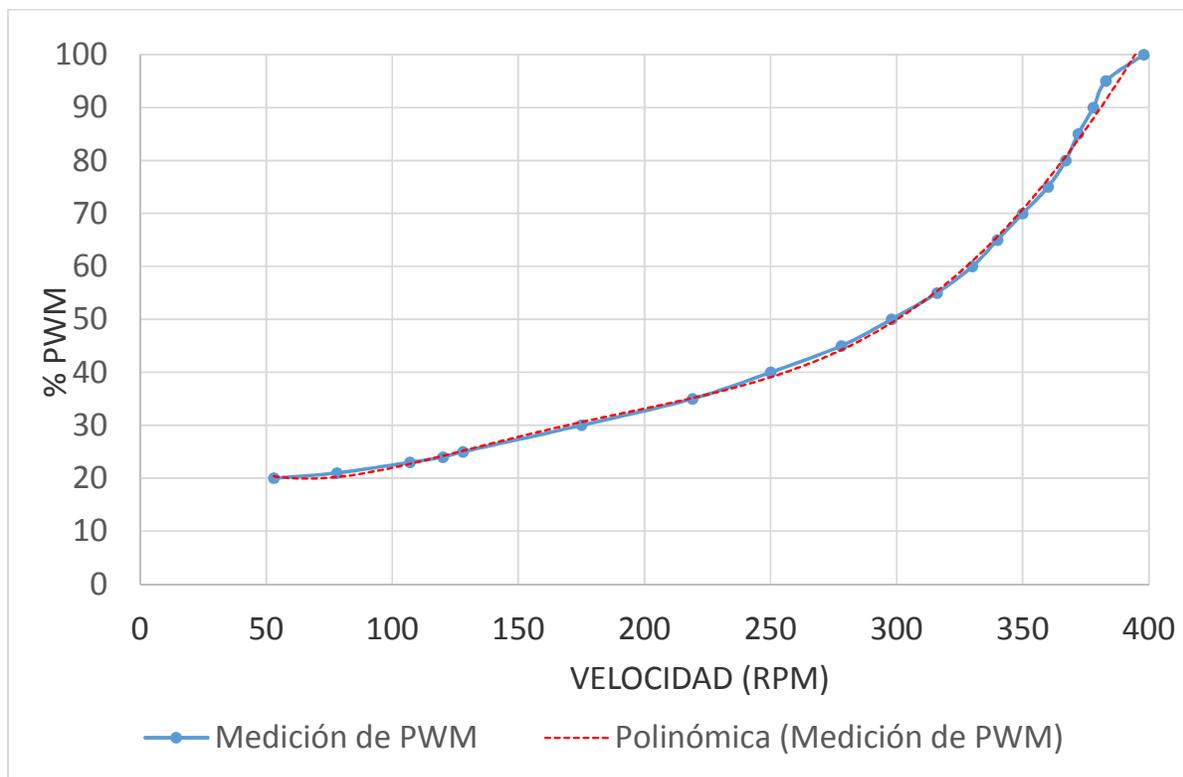


Figura 67. Curva experimental de valor de PWM en función de velocidad de rotación.

Una vez obtenidos los coeficientes del polinomio, que responden al comportamiento del equipo, fueron llevados al programa principal en forma de vector (por simplicidad para calcular). Luego, a partir de un valor de velocidad de rotación deseada se puede calcular el valor de la salida PWM requerido.

A continuación se muestra el polinomio de ajuste obtenido:

$$P(x) = 37,78 - 0,6763 \cdot X + 0,0086 \cdot X^2 - 4,3019 \times 10^{-5} \cdot X^3 + 9,6898 \times 10^{-8} \cdot X^4 - 7,4725 \times 10^{-11} \cdot X^5.$$

Donde X es el valor de velocidad de rotación ingresada por teclado y P(x) es el valor PWM necesario para obtener esa velocidad.

7.2. Ensayos preliminares.

Luego de verificar el correcto funcionamiento de la programación realizada y de ajustar la velocidad de giro del equipo, se realizaron ensayos con muestras de espesor de recubrimiento conocido por medio de otra técnica (o por medio de la misma técnica pero utilizando otro equipo) para corroborar el funcionamiento del mismo y, en caso de ser necesario, corregir posibles fuentes de error. Para ello, se utilizaron las muestras indicadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Muestras utilizadas en los ensayos preliminares.

| Muestra Nº | Material del sustrato | Terminación superficial del sustrato | Material del recubrimiento ⁹ | Técnica de medición del espesor ¹⁰ |
|---------------|--|--|--|---|
| 1 | Acero AISI/SAE 4140 (Templado y revenido) | Pulido espejo | TiN | Calotester ¹¹ |
| 2 | ADI 280 | Pulido lija #1000 | TiN | SEM |
| 3 | ADI 280 | Rectificado | TiN | SEM |
| 4 | Acero inoxidable AISI 440 | Pulido espejo | TiN | Calotester ¹¹ |

⁹ TiN: Nitruro de Titanio.

¹⁰ SEM: 'Scanning electron microscope'. Mediciones con microscopio electrónico de barrido.

¹¹ El Calotester utilizado para la medición es el presente en INFIP, desarrollado en sección 4.

En las Figuras 68 y 71 se muestran las mediciones de espesor realizadas a partir del uso del Calotester con esfera de diámetro 25,4 mm, para las muestras 1 y 4, respectivamente. Además, en las Figuras 69 y 70 se muestran los resultados de espesor medido por SEM. Estas mediciones fueron utilizadas como referencia para validar las realizadas con el equipo construido.

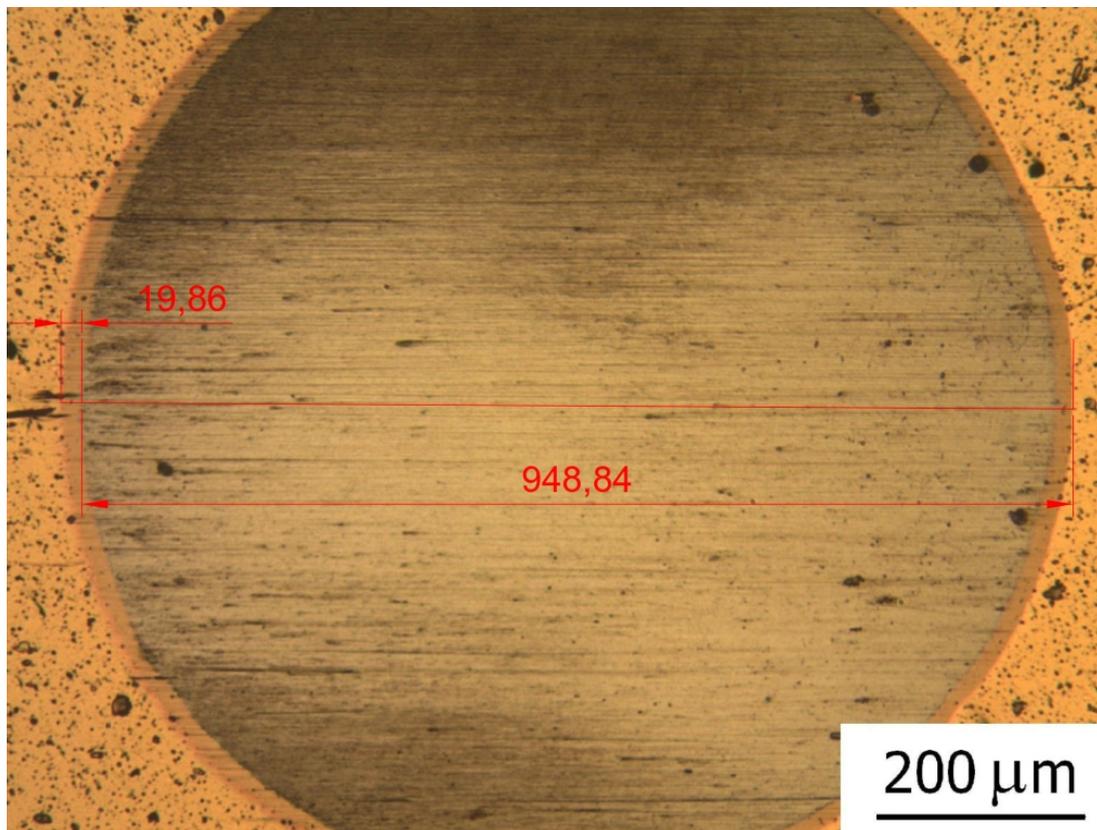


Figura 68. Mediciones realizadas sobre la impronta hecha en la muestra Nro. 1 con Calotester de INFIP. Valores expresados en μm .

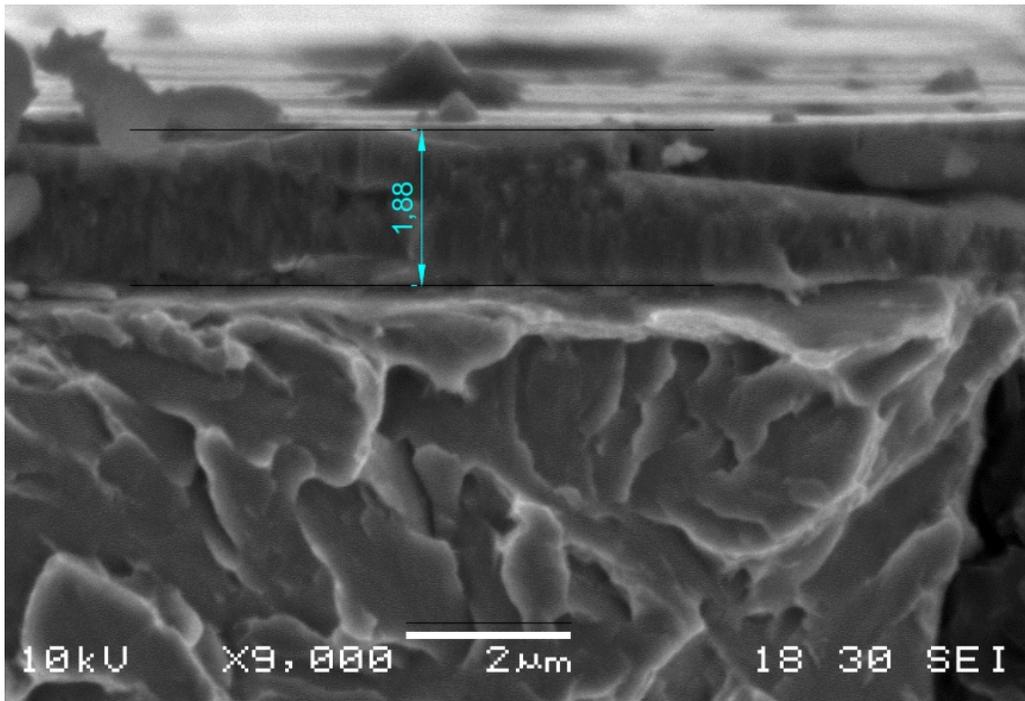


Figura 69. Medición sobre muestra Nro. 2 evaluada por SEM.

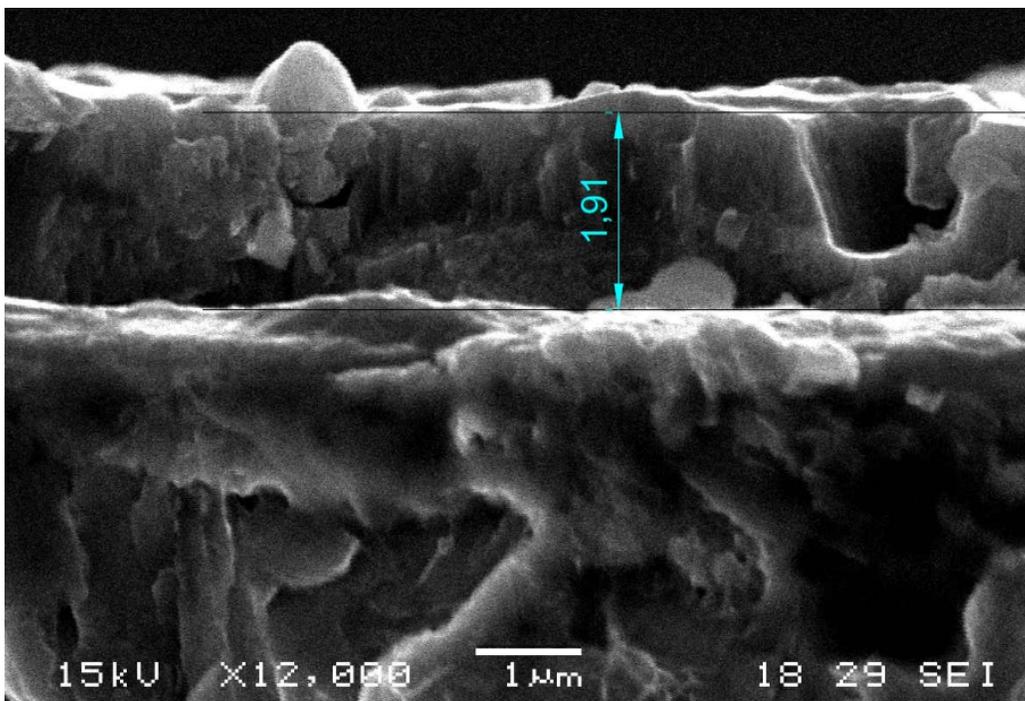


Figura 70. Medición sobre muestra Nro. 3 evaluada por SEM.

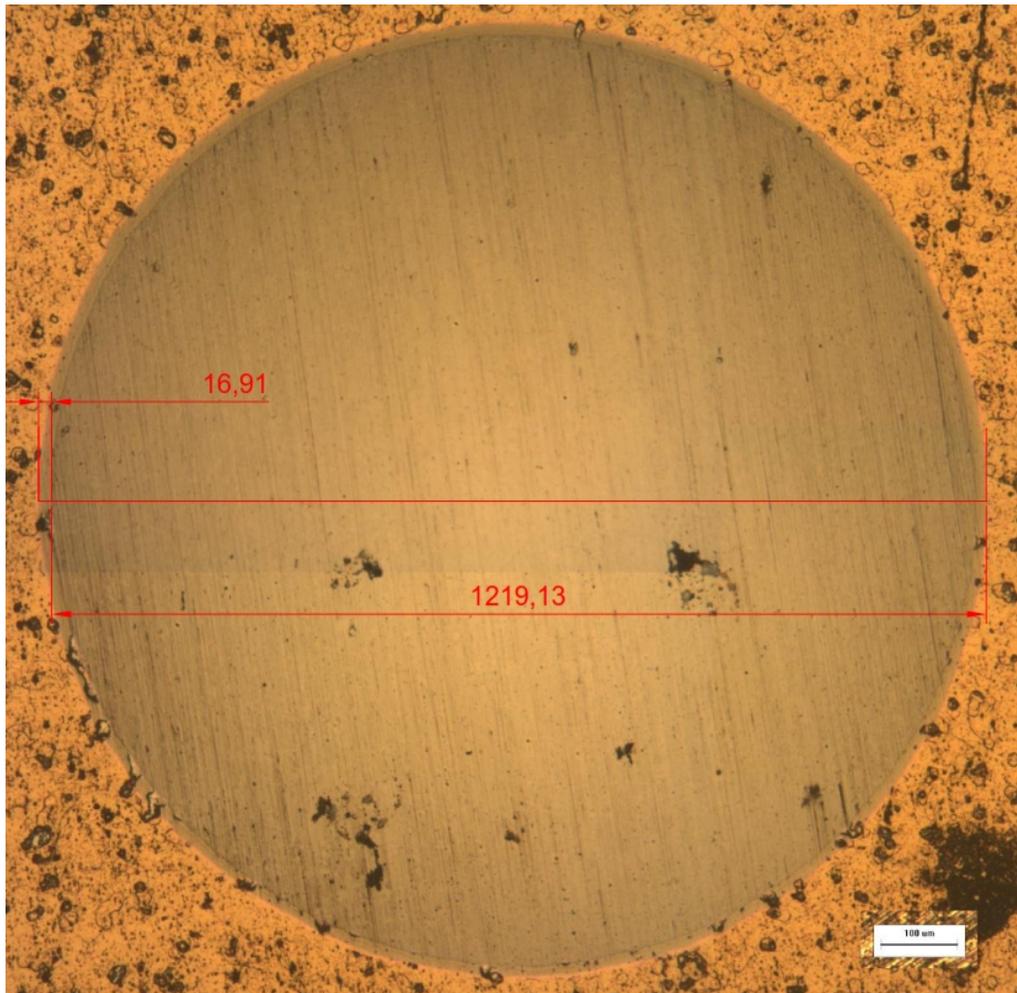


Figura 71. Mediciones realizadas sobre la impronta hecha en la muestra Nro. 4 con Calotester de INFIP. Valores expresados en μm .

Luego, en las Figuras 72 a 79 se muestran las improntas producidas por el equipo construido. En la Tabla 5 se indican los parámetros utilizados en cada ensayo y los resultados obtenidos.

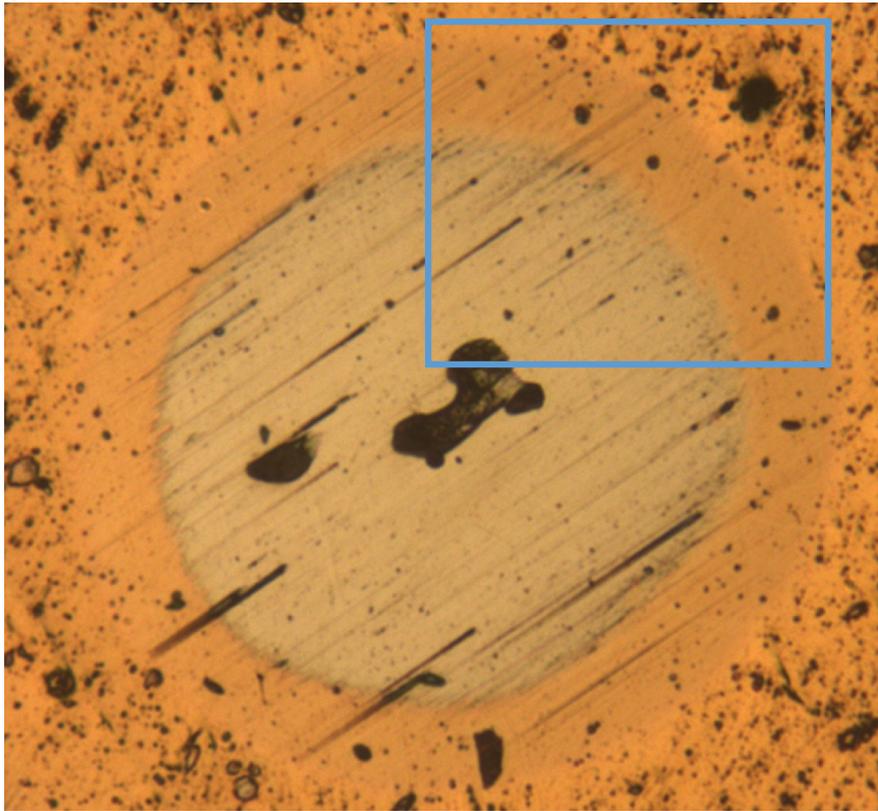


Figura 72. Impronta sobre muestra Nro. 1 con esfera de 25,4 mm de diámetro.

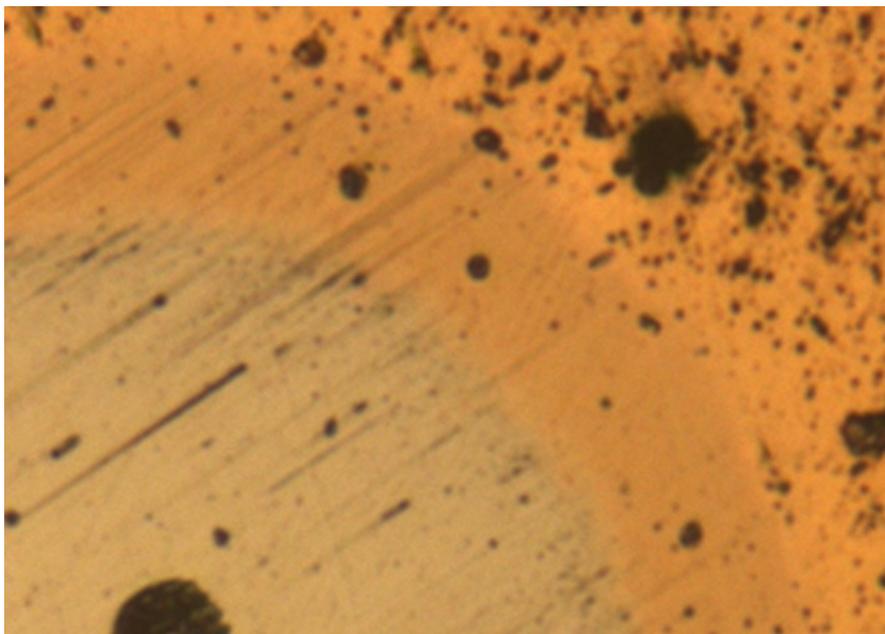


Figura 73. Detalle de la impronta sobre muestra Nro. 1.

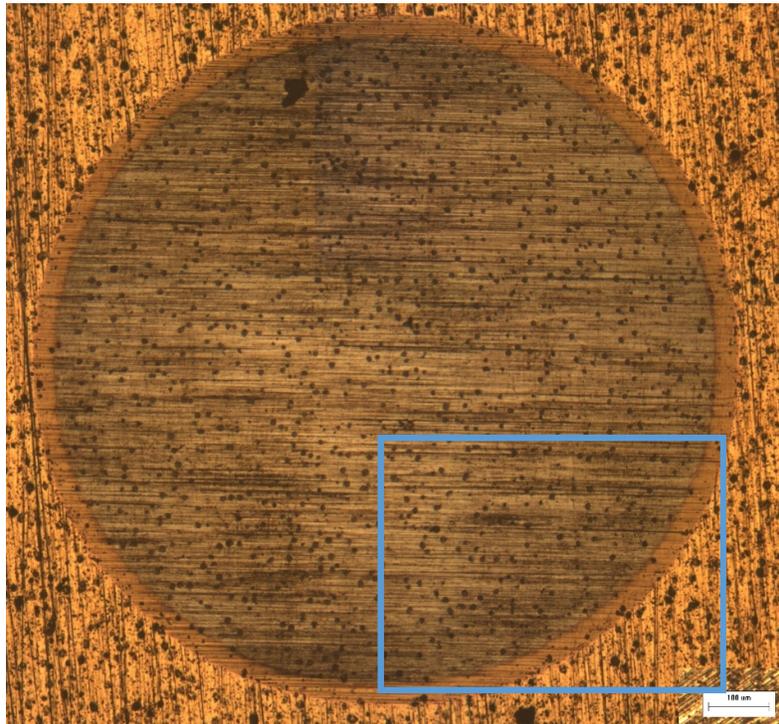


Figura 74. Impronta sobre muestra Nro. 2 con esfera de 25,4 mm de diámetro.



Figura 75. Detalle de la impronta sobre muestra Nro. 2.



Figura 76. Impronta sobre muestra Nro. 3 con esfera de 20 mm de diámetro.

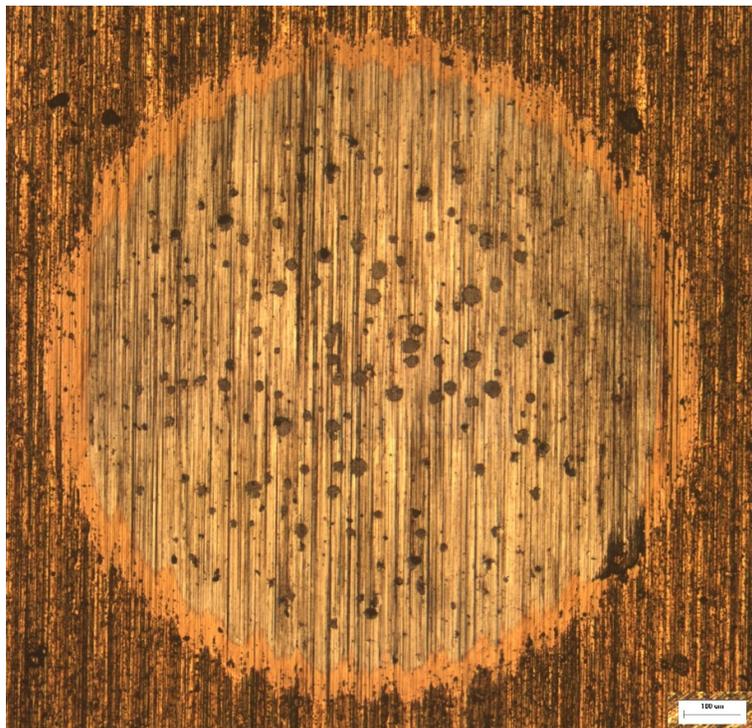


Figura 77. Impronta sobre muestra Nro. 3 con esfera de 30 mm de diámetro.

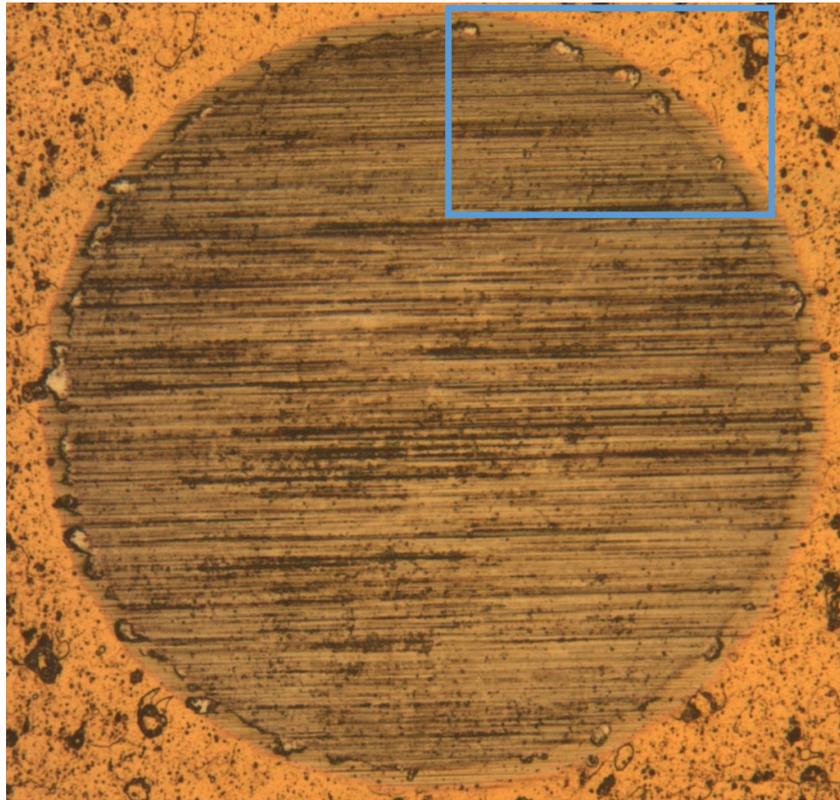


Figura 78. Impronta sobre muestra Nro. 4 con esfera de 30 mm de diámetro.

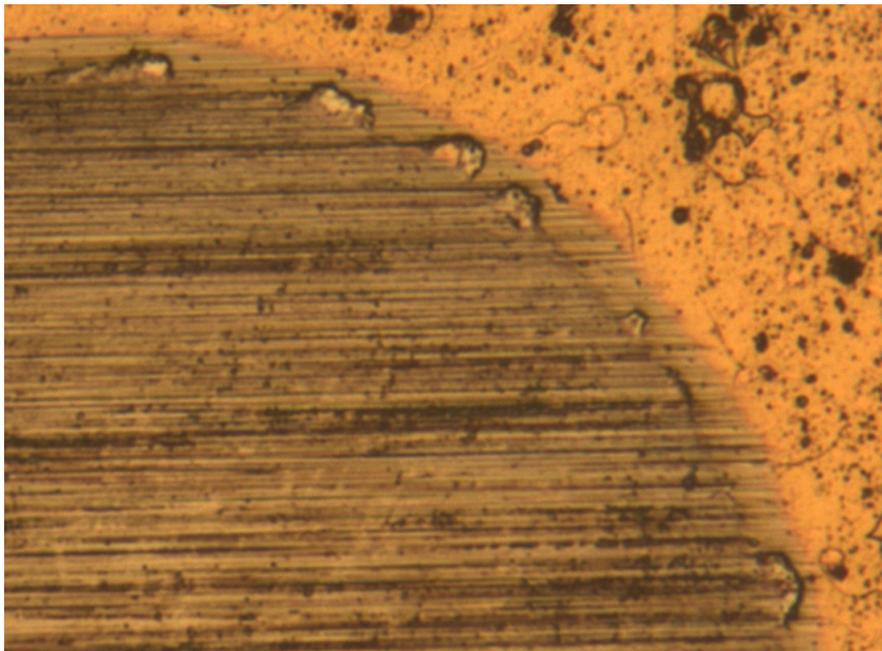


Figura 79. Detalle de la impronta sobre muestra Nro. 4.

Cabe aclarar que las irregularidades observadas en las improntas de las Figuras 76 y 77 se deben al proceso de rectificado empleado para terminar superficialmente los sustratos previamente a la deposición.

Tabla 5. Resultados de ensayos realizados.

| Nro. de Muestra | Diámetro de esfera (mm.) | Tiempo (min.) | Velocidad (RPM) | Espesor medido (μm) | Espesor de referencia (μm) |
|------------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|--|---|
| 1 | 25,4 | 2 | 300 | 0,7799 | 0,74 |
| | 25,4 | 2,3 | 300 | 0,7376 | |
| | 25,4 | 2 | 300 | 0,6825 | |
| | 25,4 | 1,5 | 300 | 0,7704 | |
| 2 | 25,4 | 1,5 | 300 | 1,916 | 1,88 |
| | 30 | 2 | 300 | 1,936 | |
| 3 | 20 | 1,5 | 300 | 1,921 | 1,91 |
| | 25,4 | 1,5 | 300 | 1,916 | |
| | 30 | 1,5 | 300 | 1,936 | |
| 4 | 20 | 1,5 | 300 | 0,8104 | 0,81 |
| | 30 | 1,5 | 300 | 0,8375 | |

Puede verse que los resultados de las mediciones efectuadas con el equipo construido se encuentran dentro del 10% de error respecto a los espesores de referencia. De esta manera, se valida el proceso de medición realizado con el equipo.

8. Conclusiones.

A lo largo de este proyecto se ha logrado diseñar, fabricar y poner en funcionamiento un equipo simple, flexible y con capacidad de ensayar diversos tipos de muestra en cuanto a material, tamaño, geometría y espesor de recubrimiento.

El Calotester ofrece un amplio rango de parámetros de ensayo con simplicidad en el manejo y selección de valores, además de brindar una comunicación rápida y fácil de entender por cualquier usuario.

Este desarrollo es el cierre de todo lo aprendido durante el transcurso de la carrera de Ingeniería Mecánica. Se intentaron plasmar, en este escrito, todos los conocimientos adquiridos durante el desarrollo del equipo.

Al realizar el proyecto, quedó demostrado lo complejo y multidisciplinario que es realizar un diseño mecánico, fabricarlo y ponerlo en funcionamiento porque las variables que hay en juego al momento de desarrollar una máquina son muchas.

El autor tuvo la libertad para poder participar activamente en el proceso de diseño, selección y fabricación de todos los componentes, detectando aciertos y defectos. Luego, desarrollar la puesta a punto y alcanzar satisfactoriamente los objetivos principales, planteados desde el inicio.

El análisis del costo de fabricación del equipo mostró una notable diferencia económica con los equipos comerciales, por lo tanto, se concluye que se han cumplido los objetivos planteados a un valor accesible.

9. Trabajos futuros.

Como opciones para continuar trabajando sobre el equipo con proyectos a futuro se plantean la posibilidad de automatizar el suministro de abrasivo, con ayuda de una bomba controlada de la misma forma que el motor y la inclusión de dispositivos para medición óptica en el lugar de muestreo con el fin de obtener un cálculo automático del espesor sin mover la muestra.

Estas posibilidades, como muchas otras, permitirían tener un equipo con mayores capacidades y mejorar el relevamiento de muestras.

10. Referencias.

1. Holmerg K., Matthews A. (2009), “Coatings Tribology”, Tribology Series N° 28. Elsevier Science B.V. Holanda.
2. C. Donnet, A. Erdemir (2004). Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings, Surface and Coatings Technology.
3. Colombo, D. A. (2013). Recubrimientos PVD de TiN y CrN sobre fundiciones de hierro con grafito esférico: influencia de las características del sustrato y del recubrimiento sobre las propiedades mecánicas y la resistencia al desgaste. Tesis para optar al grado académico de: Doctor en Ciencia de Materiales, Universidad Nacional de Mar del Plata.
4. Ohring, M. (1992). “The Materials Science of Thin Films”. Academic Press, Estados Unidos
5. Comisión Nacional de Energía Atómica (2005), “Procesamiento de Materiales por Plasma”, Octavo Curso Latinoamericano, Buenos Aires, Argentina.
6. Casillas, A.L.; “Cálculos de Taller”. En España por editorial Máquinas.

Sítios web de interés

<https://www.arduino.cc/>

<http://www.aceroplat.com.ar/tecnica07.asp>

<http://www.skf.com/group/products/index.html>

<http://www.ignismotor.com/>

<https://wiki.anton-paar.com/en/articles/>

<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/163430-Metodos-para-la-medicion-del-espesor-de-recubrimientos.html>

ANEXO A: Programa de funcionamiento.

El siguiente programa, desarrollado en la placa de procesamiento Arduino, es el encargado de hacer funcionar el conjunto:

//Programa controlador del equipo//

```
//Inclusión de librerías//
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Keypad.h>

//Variables de funcionamiento; Inicializadas en Cero//
Int velocidad = 0;
Int minutos = 0;
Int segundos = 0;

//Coeficientes del polinomio, ordenados en orden creciente al grado//
Const float f [6] = {37.7840628546,-0.6763407155, 0.0085925358,-0.0000430185030344714,
0.0000000968984079403198,-0.0000000000747251447228472};

//Pines utilizados por el L298N//
Int IN1 = 11; // Input1 conectada al pin 12
Int IN2 = 12; // Input2 conectada al pin 11
Int ENA = 10; // ENA conectada al pin 10 de Arduino

//Constantes útiles//
Const int mm = 30; //minutos máximos de la máquina//
Const int vv= 400; //velocidad máximo de la máquina//
Const int ss= 59; //segundo máximos de la máquina//
Const int vm= 50; //velocidad mínima de la máquina//

Const int tl= 2000; //tiempo de lectura estándar//

Const int v = 300; //velocidad programa estándar//
Const int m = 2; //minutos programa estándar//
Const int s = 0; //segundos programa estándar//

//Variables auxiliares//
Int aux= 1; //auxiliar para poner en marcha funcionamiento//
Int num= 0; //auxiliar para tomar números de teclado//
Char tecla; //auxiliar para tomar carácter de teclado//

//Declaración de variables keypad//
Const byte filas = 4; //4 filas//
Const byte columnas = 4; //4 columnas//
Byte pinesF [filas] = {9, 8, 7, 6}; //Definimos los pines a los que estarán conectadas las filas de nuestra matriz==
“pinesF”//
Byte pinesC [columnas] = {5, 4, 3, 2}; //Definimos los pines a los que estarán conectadas las columnas de nuestra
matriz== “pinesC”//
Char teclas [filas] [columnas] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};
```

```
//Ahora declaramos las teclas que conforman nuestra matriz, EN ORDEN//
Keypad teclado =Keypad (makeKeypad (teclas), pinesF, pinesC, filas, columnas);
//Esta instrucción sirve para realizar el mapeo de nuestro teclado matricial//

//Declaración de conjunto DISPLAY LCD//
LiquidCrystal_I2Clcd (0x27, 20, 4);

Void setup () {
  //Declaración de variables que serán pines de salida//
  PinMode (ENA, OUTPUT);
  PinMode (IN1, OUTPUT);
  PinMode (IN2, OUTPUT);

  lcd.init(); // Inicializar el LCD.//
  lcd.backlight(); //Encender la luz de fondo.//
  lcd.clear(); //Borra la pantalla LCD y posiciona el cursor en la esquina superior izquierda (posición (0,0)).//
}

voidloop() {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Para comenzar: '# '");
  leer();
  aux= 1;
  if (tecla=="#") {
    aux= 0;
    lcd.clear();
    while (aux == 0) {
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("A:Velocidad: ");
      lcd.print(velocidad);
      lcd.setCursor(17, 0);
      lcd.print(v);
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("B:Minutos: ");
      lcd.print(minutos);
      lcd.setCursor(17, 1);
      lcd.print(m);
      lcd.setCursor(0, 2);
      lcd.print("C:Segundos: ");
      lcd.print(segundos);
      lcd.setCursor(17, 2);
      lcd.print(s);
      lcd.setCursor(0, 3);
      lcd.print("D:Programa/ *:inicio");
      leer();
      if (tecla!= 0) {
        lcd.clear();
        switch (tecla) {
          case'A':
            tomarVel();
            lcd.clear();
            break;
          case'B':
            tomarMin();
            lcd.clear();
            break;
          case'C':
```

```
    tomarSeg();
    lcd.clear();
    break;
case'D':
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.println("Por defecto + inicio");
    velocidad= v; //Valores x defecto//
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("  Velocidad: ");
    lcd.print(velocidad);
    minutos= m;
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("  Minutos: ");
    lcd.print(minutos);
    segundos= s;
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("  Segundos: ");
    lcd.print(segundos);
    delay(2 *tl);
    break;
default: {
    if (num< 10 ||tecla=='#') {
        lcd.clear();
        lcd.print("--Tecla no valida--");
        delay(tl/ 3);
        lcd.clear();
    }
}
}
}
if (tecla=='*'||tecla=='D') {
    aux= 1;
    delay(tl/ 2);
} //fin if de salida//
}
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("-FIN CARGA DE DATOS-");
delay(tl);
if (velocidad != 0) {
    if ((minutos != 0 || segundos != 0)) {
        funcionar();
    }
    else {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("  VELOCIDAD !=0  ");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("    v: ");
        lcd.print(velocidad);
        lcd.setCursor(0, 2);
        lcd.print("  TIEMPO NULO  ");
        lcd.setCursor(0, 3);
        lcd.print("  VUELVA A INGRESAR ");
        delay(tl);
        lcd.clear();
    }
}
```

```
    }  
  }  
  else {  
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print(" VELOCIDAD NULA ");  
    lcd.setCursor(0, 2);  
    lcd.print(" VUELVA A INGRESAR ");  
    delay(tl);  
    lcd.clear();  
  }  
}  
elseif (tecla!=0) {  
  lcd.clear();  
  lcd.print("Error, no eligio #");  
  delay(tl/ 2);  
}  
}  
} //FIN LOOP//  
  
//*****//  
  
void leer() {  
  tecla= 0;  
  num= 0;  
  tecla=teclado.getKey();  
  switch (tecla) {  
    case'1':num= 1; break;  
    case'2':num= 2; break;  
    case'3':num= 3; break;  
    case'4':num= 4; break;  
    case'5':num= 5; break;  
    case'6':num= 6; break;  
    case'7':num= 7; break;  
    case'8':num= 8; break;  
    case'9':num= 9; break;  
    case'0':num= 0; break;  
    default:num= 99;  
  }  
}  
} //Fin leer//  
  
//*****//  
  
void tomarVel() {  
  tecla= 0;  
  num= 0;  
  velocidad= 0;  
  lcd.clear();  
  lcd.setCursor(0, 0);  
  lcd.print(" Indique velocidad ");  
  lcd.setCursor(0, 1);  
  lcd.print("Entre ");  
  lcd.print(vm);  
  lcd.print(" y ");  
  lcd.print(vv);  
  lcd.print(" rpm. ");  
  lcd.setCursor(0, 3);
```

```
lcd.print("Para terminar #");
for (inti= 0; i< 3; i++) {
  int j = 0; //variable de corte ante lecturaerrores//
  while (j == 0) {
    leer();
    if (tecla!=0) {
      if (num< 10) {
        j = 1;
        velocidad= velocidad * 10 +num;
        lcd.setCursor(0, 2);
        lcd.print("V: ");
        lcd.setCursor(i+ 4, 2);
        lcd.print(num);
        lcd.print(" rpm.");
        delay(tl/ 20);
      }
      else {
        if (tecla=='#') {
          j = 1;
          i= 3;
          num= 0;
        }
        else {
        }
      }
    }
  }
}
delay(tl);
}
//Fin tomar velocidad//
//*****//
```

```
voidtomarMin() {
  minutos= 0;
  tecla= 0;
  num= 0;
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" Indique minutos ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Menor a ");
  lcd.print(mm);
  lcd.print(" min. ");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Para terminar #");
  for (inti= 0; i< 2; i++) {
    int j = 0; //variable de corte ante lecturaerrores//
    while (j == 0) {
      leer();
      if (tecla!=0) {
        if (num< 10) {
          j = 1;
          minutos= minutos * 10 +num;
          lcd.setCursor(0, 2);
          lcd.print("M: ");
          lcd.setCursor(i+ 4, 2);
        }
      }
    }
  }
}
```

```
    lcd.print(num);
    lcd.print(" minutos.");
    delay(tl/ 20);
  }
  else {
    if (tecla=="#") {
      j = 1;
      i= 3;
      num= 0;
    }
    else {
    }
  }
}
}
}
delay(tl);
}
//Fin tomar minutos//
//*****//

voidtomarSeg() {
  segundos= 0;
  tecla= 0;
  num= 0;
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" Indique segundos ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Menor a ");
  lcd.print(ss);
  lcd.print(" seg. ");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Para terminar #");
  for (inti= 0; i< 2; i++) {
    int j = 0; //variable de corte ante lecturaerrores//
    while (j == 0) {
      leer();
      if (tecla!=0) {
        if (num< 10) {
          j = 1;
          segundos= segundos * 10 +num;
          lcd.setCursor(0, 2);
          lcd.print("S: ");
          lcd.setCursor(i+ 4, 2);
          lcd.print(num);
          lcd.print(" segundos.");
          delay(tl/ 20);
        }
        else {
          if (tecla=="#") {
            j = 1;
            i= 3;
            num= 0;
          }
          else {
          }
        }
      }
    }
  }
}
```

```
    }  
  }  
}  
}  
delay(tl);  
}  
//Fin toma segundos//  
//*****//  
  
voidfuncionar() {  
  int a = 0;  
  int b = 0;  
  int c = 0;  
  int pausa = 0;  
  //Preparamos la salida para que el motor gire en un sentido//  
  digitalWrite (IN1,LOW);  
  digitalWrite (IN2,HIGH);  
  
  //Variables auxiliares para escribir que se excedio el limite//  
  lcd.clear();  
  if (velocidad>vv) {  
    velocidad=vv;  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print("Vel mayor a limite");  
    a = 1;  
  }  
  else {  
    if (velocidad <vm) {  
      velocidad=vm;  
      lcd.setCursor(0, 0);  
      lcd.print("Vel menor a limite");  
      a = 1;  
    }  
    else {  
      lcd.setCursor(0, 0);  
      lcd.print("Velocidad correcta");  
    }  
  }  
  if (minutos > mm) {  
    minutos= mm;  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("Min mayor a limite");  
    b = 1;  
  }  
  else {  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("Minutos correctos");  
  }  
  if (segundos >ss) {  
    segundos=ss;  
    lcd.setCursor(0, 2);  
    lcd.print("Seg mayor a limite");  
    c = 1;  
  }  
  else {  
    lcd.setCursor(0, 2);  
    lcd.print("Segundos correctos");  
  }  
}
```

```
}
if ( a == 1 || b == 1 || c == 1 ) {
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Valor/es corregidos");
}
delay(tl);
int tiempo = ((minutos * 60) + (segundos)); // tiempo deseado, en segundos //
float v2 = 0; // Variable auxiliar de calculo % del total //
float v3 = 0; // Variable auxiliar de calculo entre 0 y 255 //

// calculo de % respecto al total para obtener las rpm deseadas - polinomio calibrado previamente //
for (inti= 0; i<= 5; i++) {
  v2 = v2 + (f[i] * pow(velocidad,i));
}
v3 = v2 * 255 / 100; // se calcula la tension correspondiente al porcentaje del PWM //
if (v3 >= 255) {
  v3 = 255;
}
if (v3 <= 0) {
  v3 = 0;
}

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("*****INICIO*****");
delay(tl* 0.5);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("  FUNCIONANDO  ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Fin: * // Pausa: #"); // Indicadores de finalizacion y parada //
analogWrite(ENA, v3); // PRENDE motor a velocidad indicada por v3 //
int tactual = (millis() / 1000); // inicializar el tiempo actual //
const int ti = (millis() / 1000); // Definir tiempo de inicio como invariante para calculos //
int t = tiempo + tactual; // calculo tiempo objetivo en segundos //
int tpausa = 0; // Inicializar pausa en cero //
int tip = 0;

while (tactual < t) {
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Velocidad: ");
  lcd.print(velocidad);
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Tiempo: ");
  int tmaux = ((millis() / 1000) - ti - tpausa) / 60; // Minutos auxiliares para escritura //
  lcd.print(tmaux);
  lcd.print(" m. ");
  int tsaux = ((millis() / 1000) - ti - tpausa); // Segundos auxiliares para escritura //
  int ttaux = tsaux - (60 * tmaux);
  lcd.print(ttaux);
  if (ttaux >= 10) {
    lcd.print(" s.");
  }
  else {
    lcd.print(" s. ");
  }
}
```

```
leer();
if (tecla!= 0) {
  if (tecla=='*') {
    tpausa= 0 - t;
  }
  if (tecla=='#') {
    pausa= 1;
    tip= (millis() / 1000); // Toma tiempo de inicio de pausa//
    analogWrite(ENA, 0);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("----Menu de Pausa---");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Tiempo: ");
    lcd.print(maux);
    lcd.print(" m. ");
    lcd.print(taux);
    if (taux>= 10) {
      lcd.print(" s.");
    }
    else {
      lcd.print(" s. ");
    }
  }
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Reanudar: A,B,C o D ");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Finalizar: * ");
}

while (pausa== 1) {
  leer();
  if (tecla!= 0) {
    if (tecla=='A'||tecla=='B'||tecla=='C'||tecla=='D' ) {
      pausa= 0;
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("  FUNCIONANDO  ");
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("Fin: * // Pausa: #");
      analogWrite(ENA, v3);
      inttfp= (millis() / 1000); // Toma tiempo final de pausa//
      tpausa=tfp-tip+tpausa;

    }
    else {
      if ( tecla=='*') {
        tpausa= 0 - t;
        pausa= 0;
      }
    }
  }
}
tactual= ((millis() / 1000) -tpausa);
} //fin while//
analogWrite(ENA, 0);
```

```
    delay(tl/ 2);  
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("*****FIN*****");  
    delay(tl/ 2);  
    lcd.clear();  
} //Fin funcionar//  
//*****//
```

ANEXO B: Presupuesto de Calotester comercial.

A modo comparativo, a continuación se muestra un presupuesto obtenido del importador en nuestro país de uno de los fabricantes descriptos en la sección 4, donde se observa una gran diferencia en costo respecto del que se obtuvo con la fabricación propia.



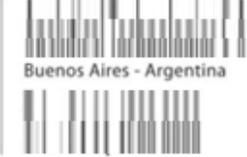
Agilent Technologies
Distribuidor Autorizado



GAM
GESTION DE LA CALIDAD
ISO 9000-1075
ISO 9001-2008



e-Net
EQUIPAMIENTO



Buenos Aires - Argentina



Documento no válido como factura

Sres: **UNIVERSIDAD DE MAR DEL PLATA**
Dir: Juan B. Alberdi 2695, Mar del Plata, Argentina
Attn: Alejo D. Mandri

Cotización

| | |
|----------------------------|----------|
| Número: | AF-047C |
| Fecha: | 19-02-19 |
| Página 1 de 2 | |
| Por consultas contactar a: | |
| Tel. Cel. | Email: |

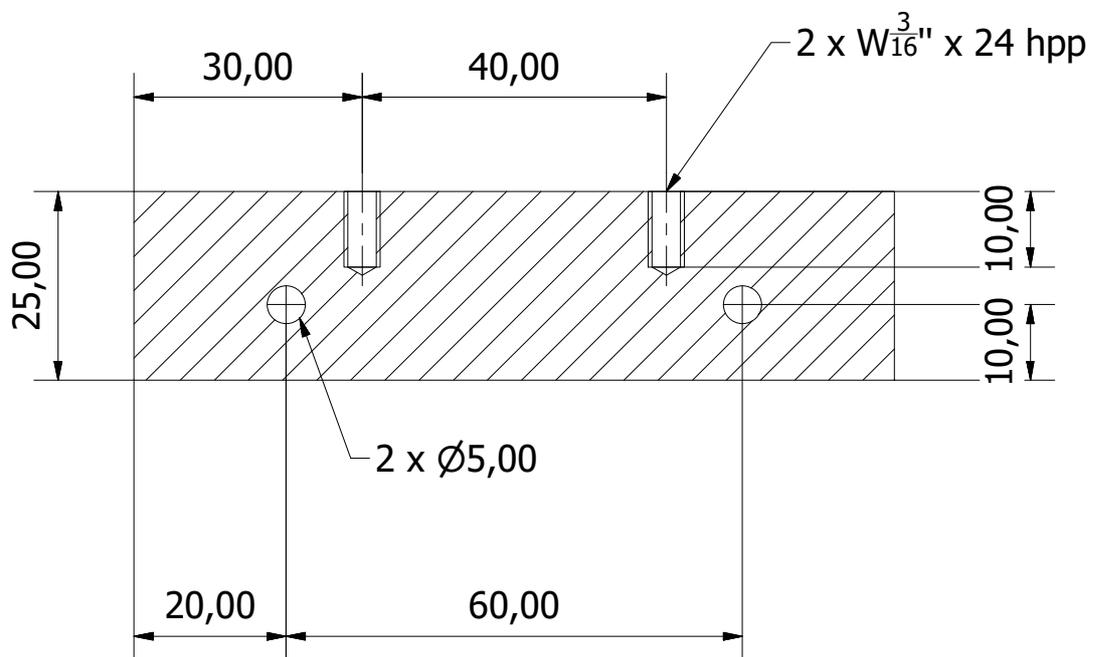
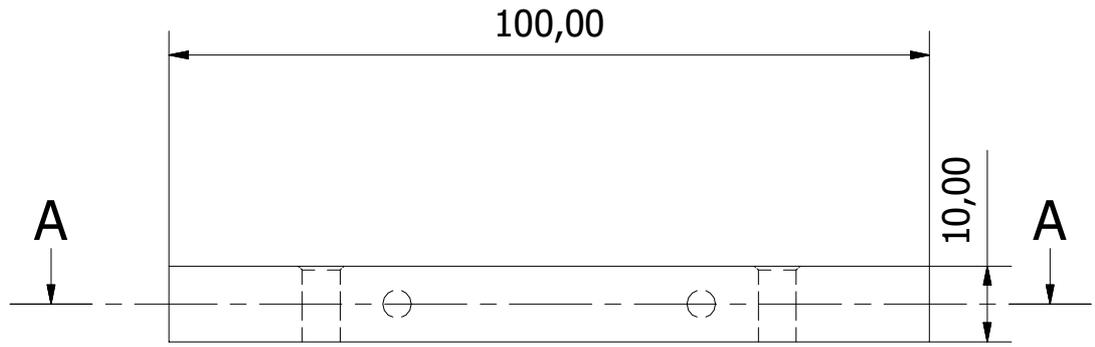
Precios en EUROS condición CIP Ezeiza, Buenos Aires

Detalle:

| Item | Cant | Producto | Descripción | Precio/Un. | Precio/Tot. |
|-------------------|------|------------|--|-----------------|-----------------|
| 1,1 | 1 | 145182 | (Anton-Paar) STANDARD COMPACT CALOTEST | 8.751,60 | 8.751,60 |
| 1,2 | 1 | Gastos CIP | Gastos de flete y seguro | 792,00 | 792,00 |
| Tot.Item 1 | | | | 9.543,60 | 9.543,60 |

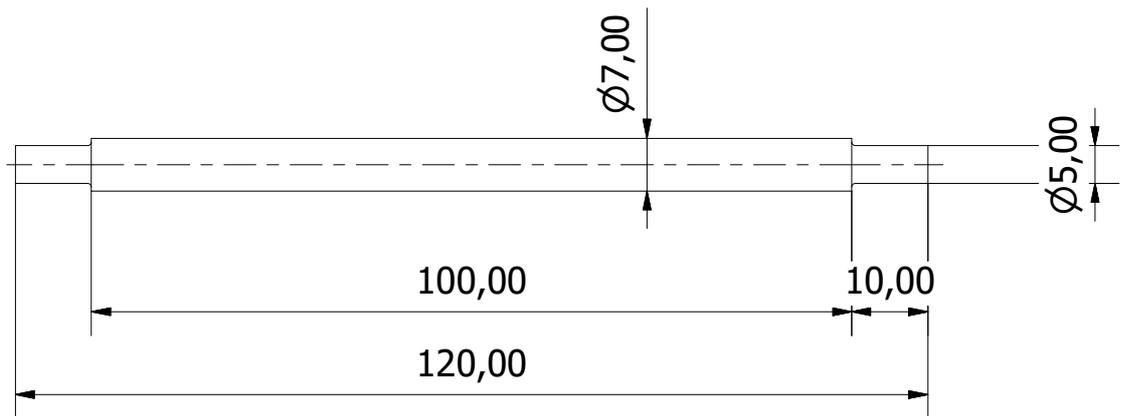
Figura 80. Presupuesto de Calotester de Anton-Paar.

ANEXO C: Planos de fabricación.

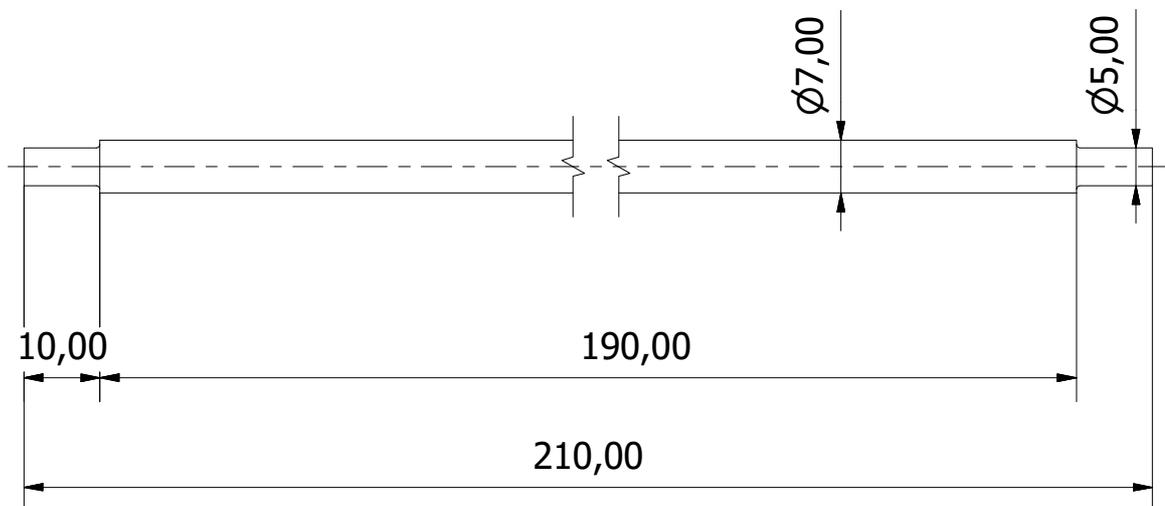


| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Asiento de guías del carro | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 2 | | Plano N°: 1 |
| Escala: 1:1 | | |

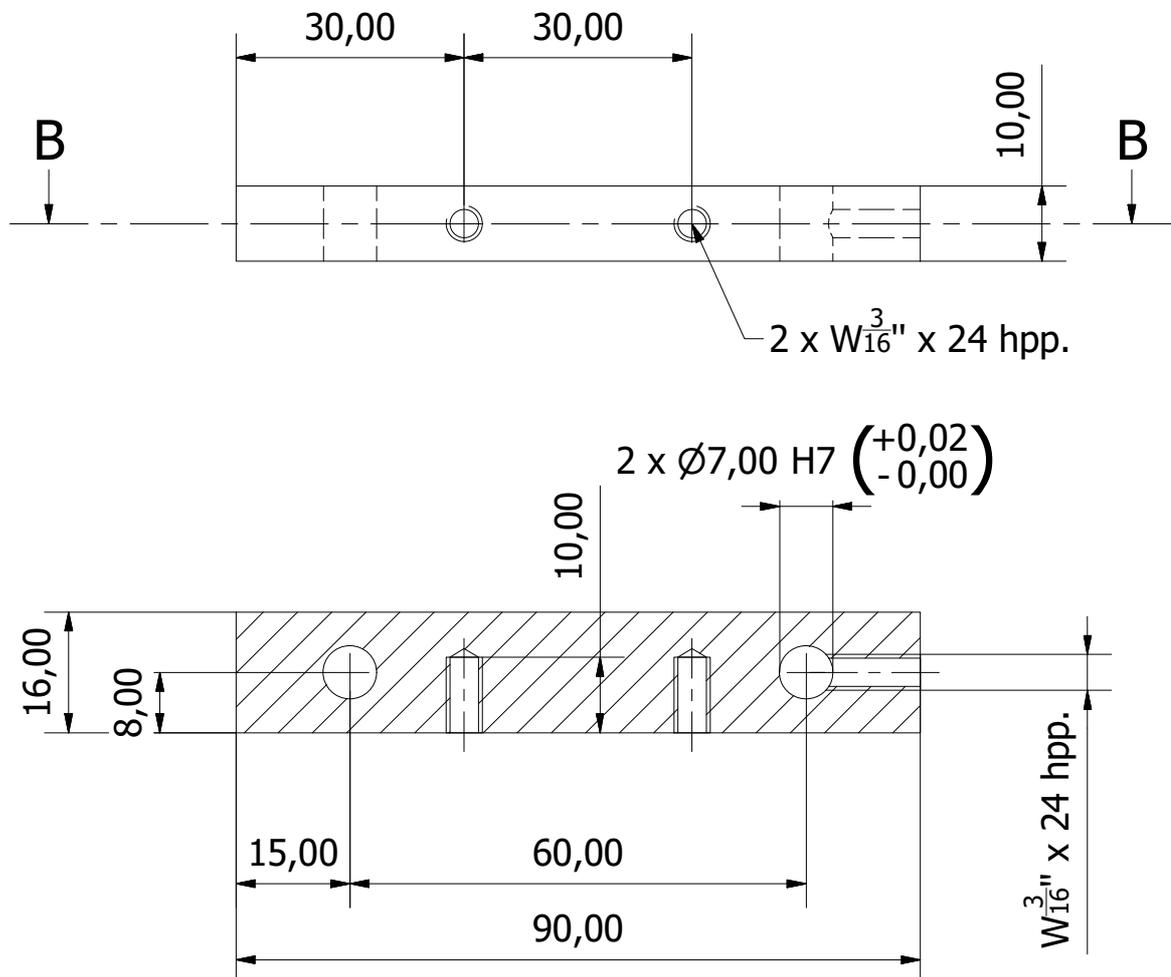
Guía de mordazas



Guía de carro

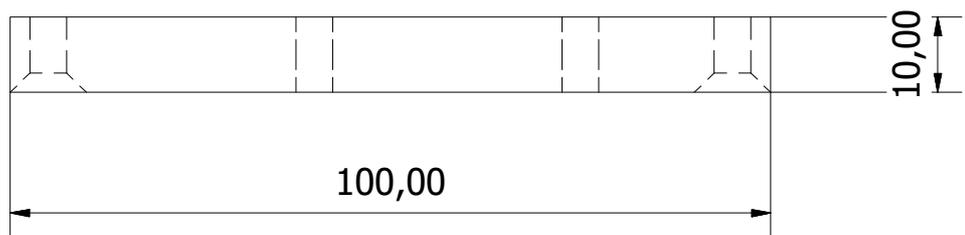
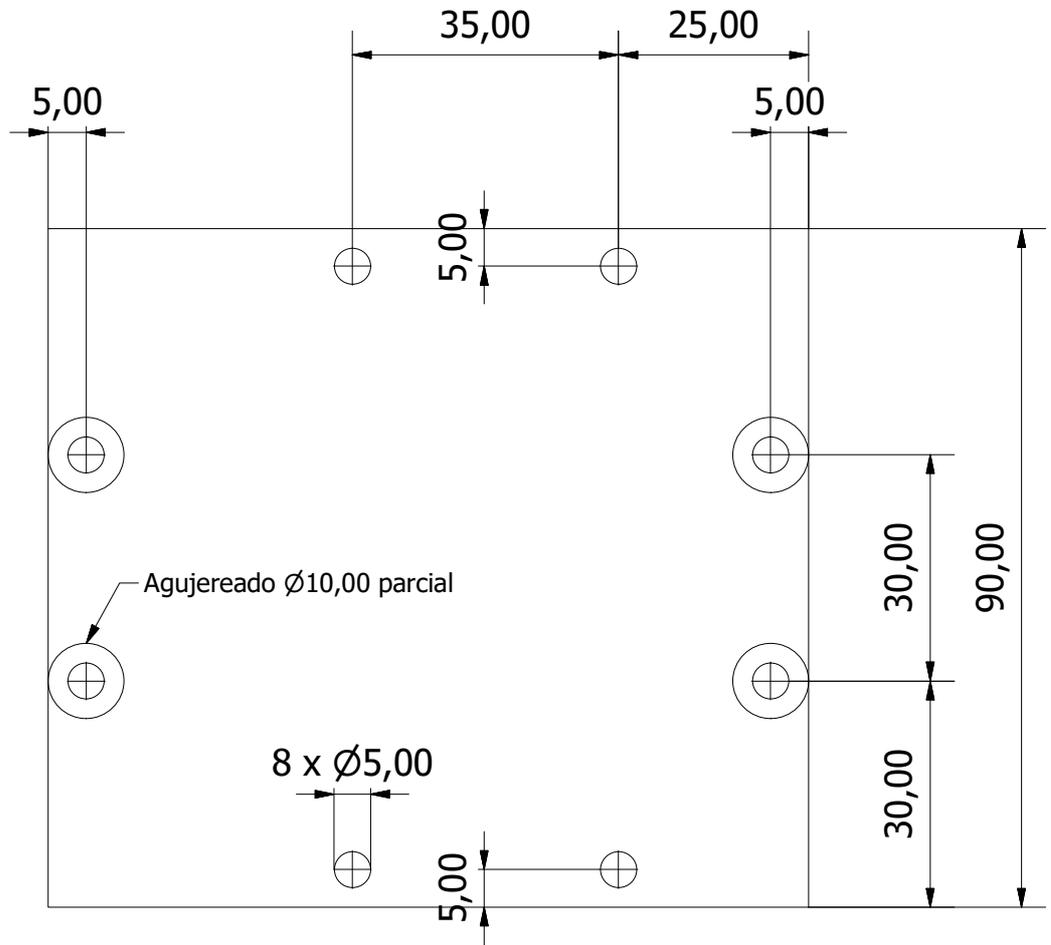


| | | |
|-----------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Acero plata | Guías de carro y mordazas | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 2 c/u | | Plano N°: 2 |
| Escala: 1:1 | | |

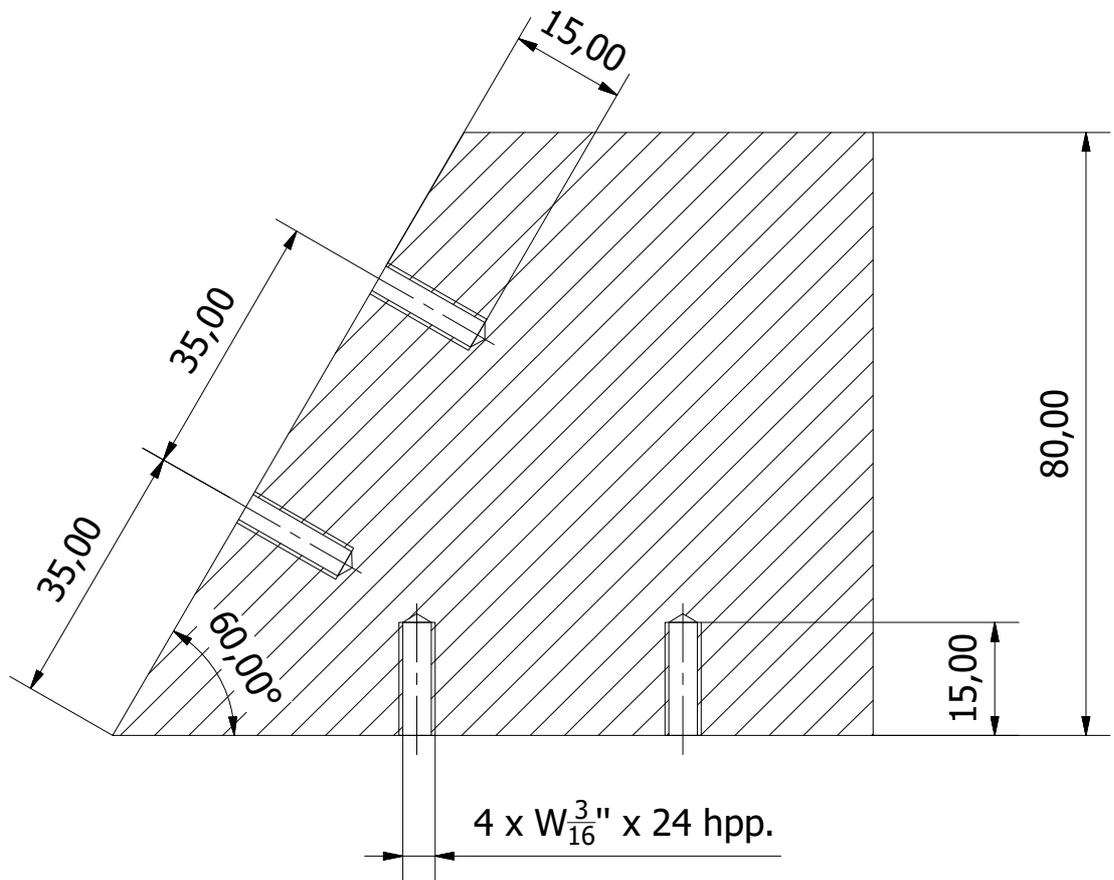
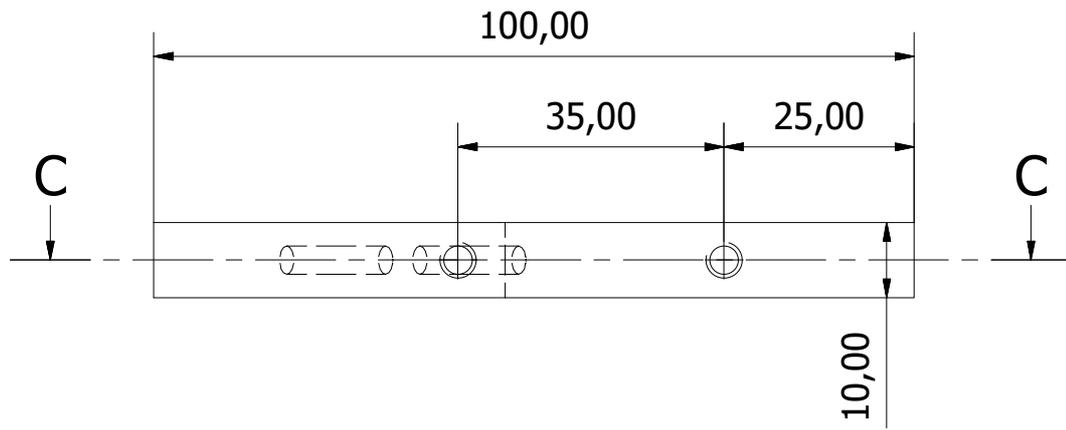


*La placa guía del carro delantera es idéntica pero sin el agujero roscado lateral.

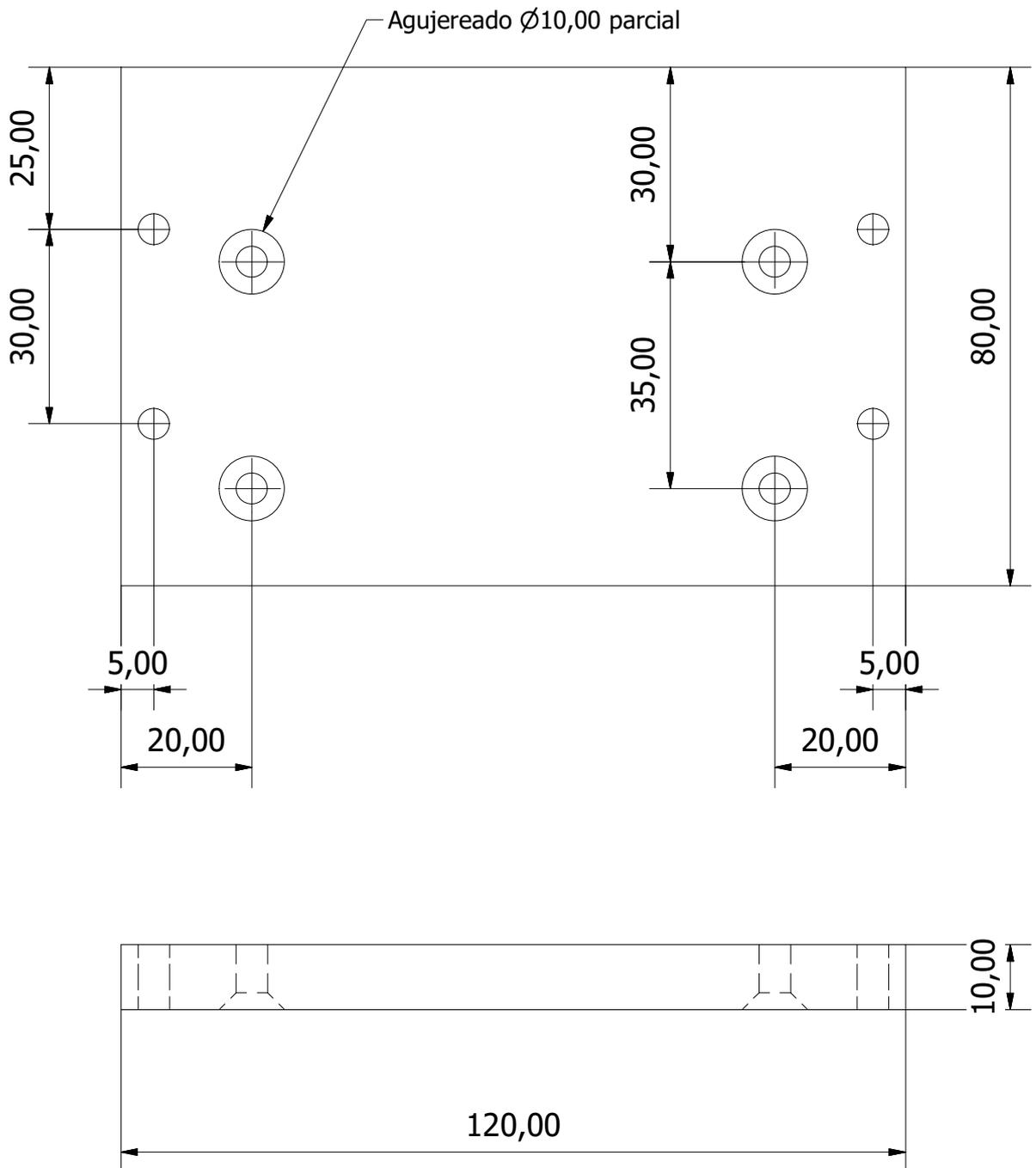
| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Placa guía del carro | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 2 | | Plano N°: 3 |
| Escala: 1:1 | | |



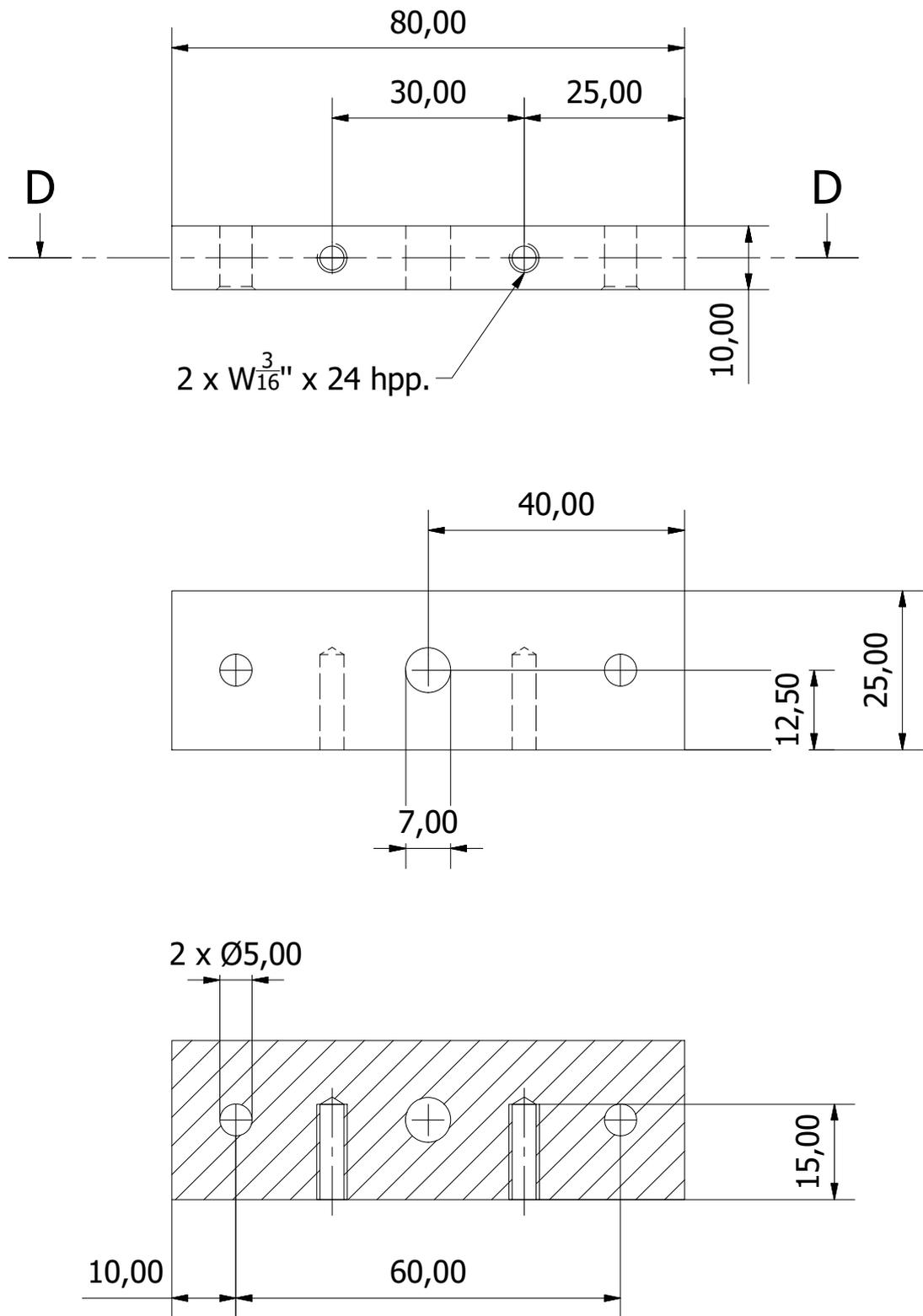
| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Base de carro | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 | | Plano N°: 4 |
| Escala: 1:1 | | |



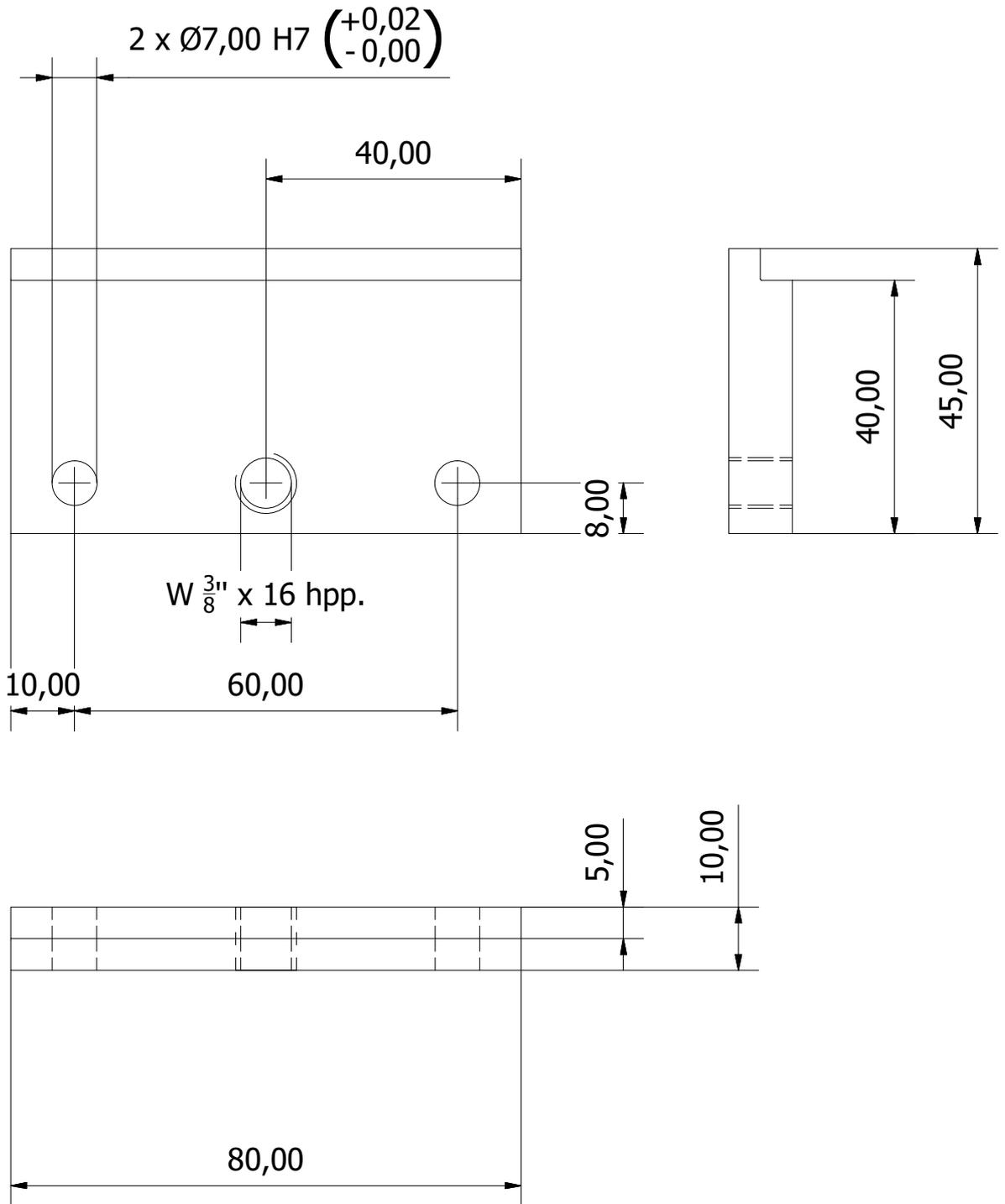
| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Pieza angular | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 2 | | Plano N°: 5 |
| Escala: 1:1 | | |



| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Plano de portamuestras | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 | | Plano N°: 6 |
| Escala: 1:1 | | |



| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Asiento de guías de mordaza | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 2 | | Plano N°: 7 |
| Escala: 1:1 | | |

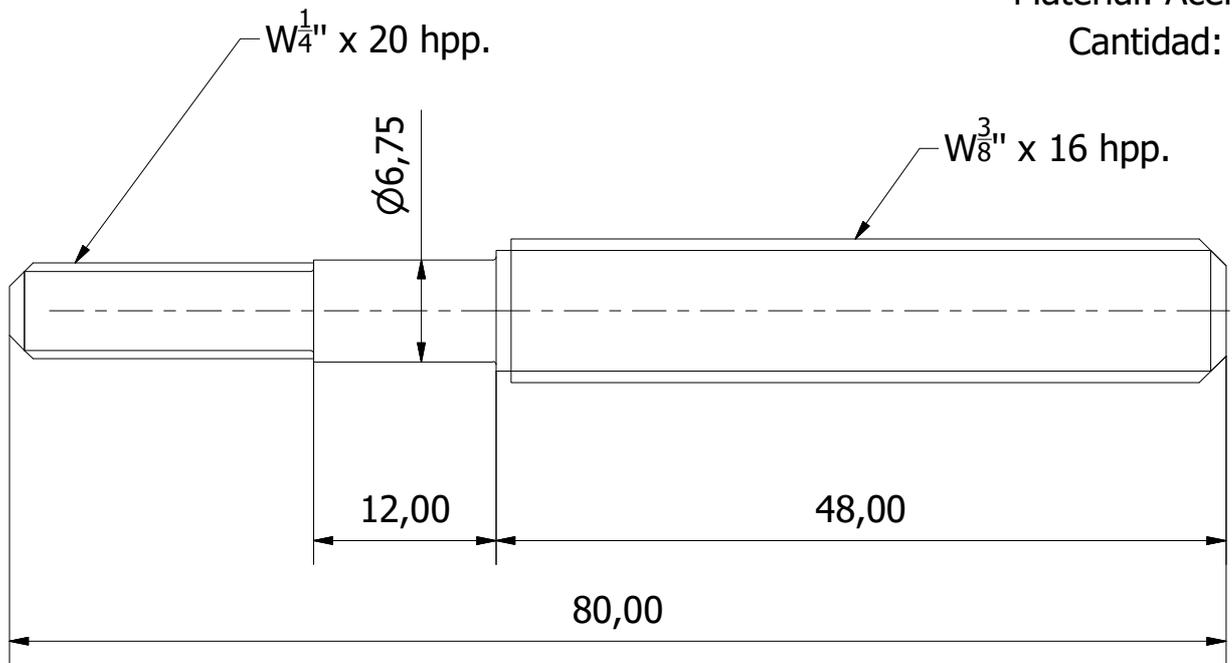


| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Mordaza | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 2 | | Plano N°: 8 |
| Escala: 1:1 | | |

Tornillo de movimiento

Material: Acero

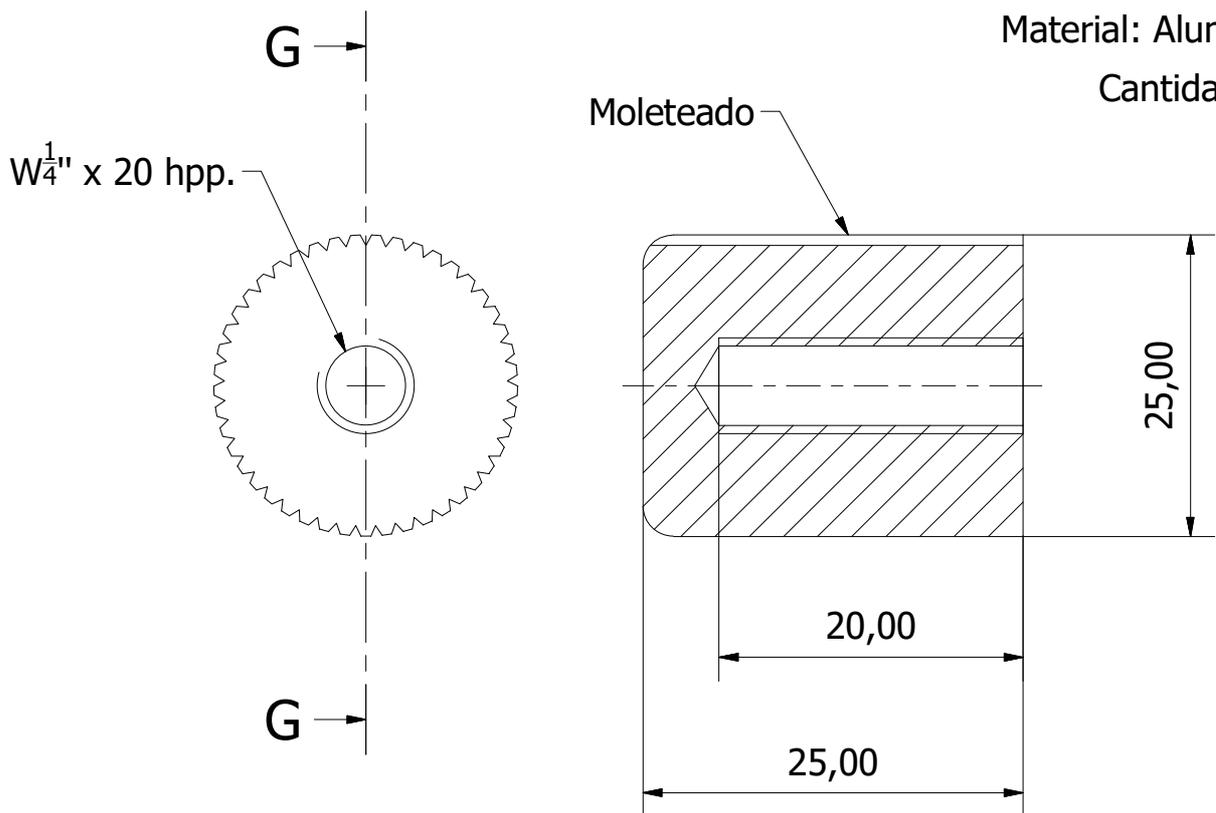
Cantidad: 2



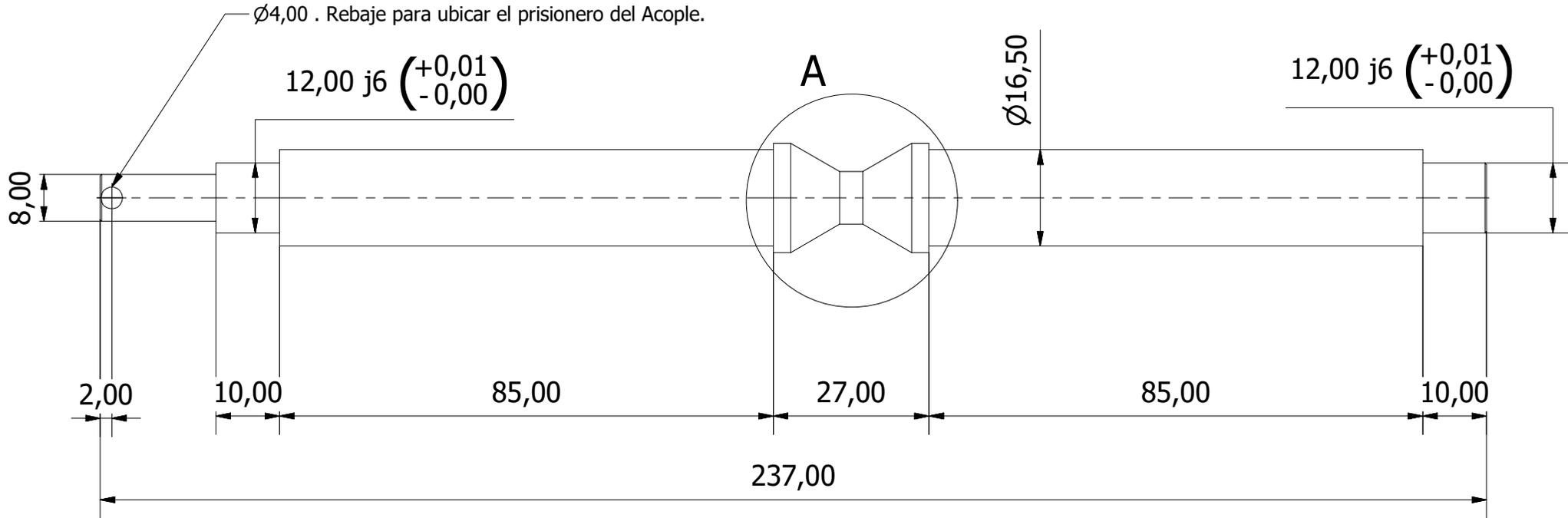
Perilla

Material: Aluminio

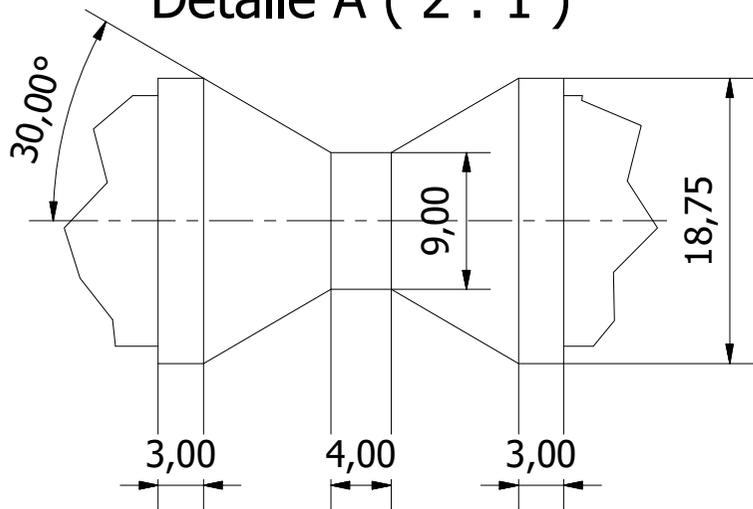
Cantidad: 2



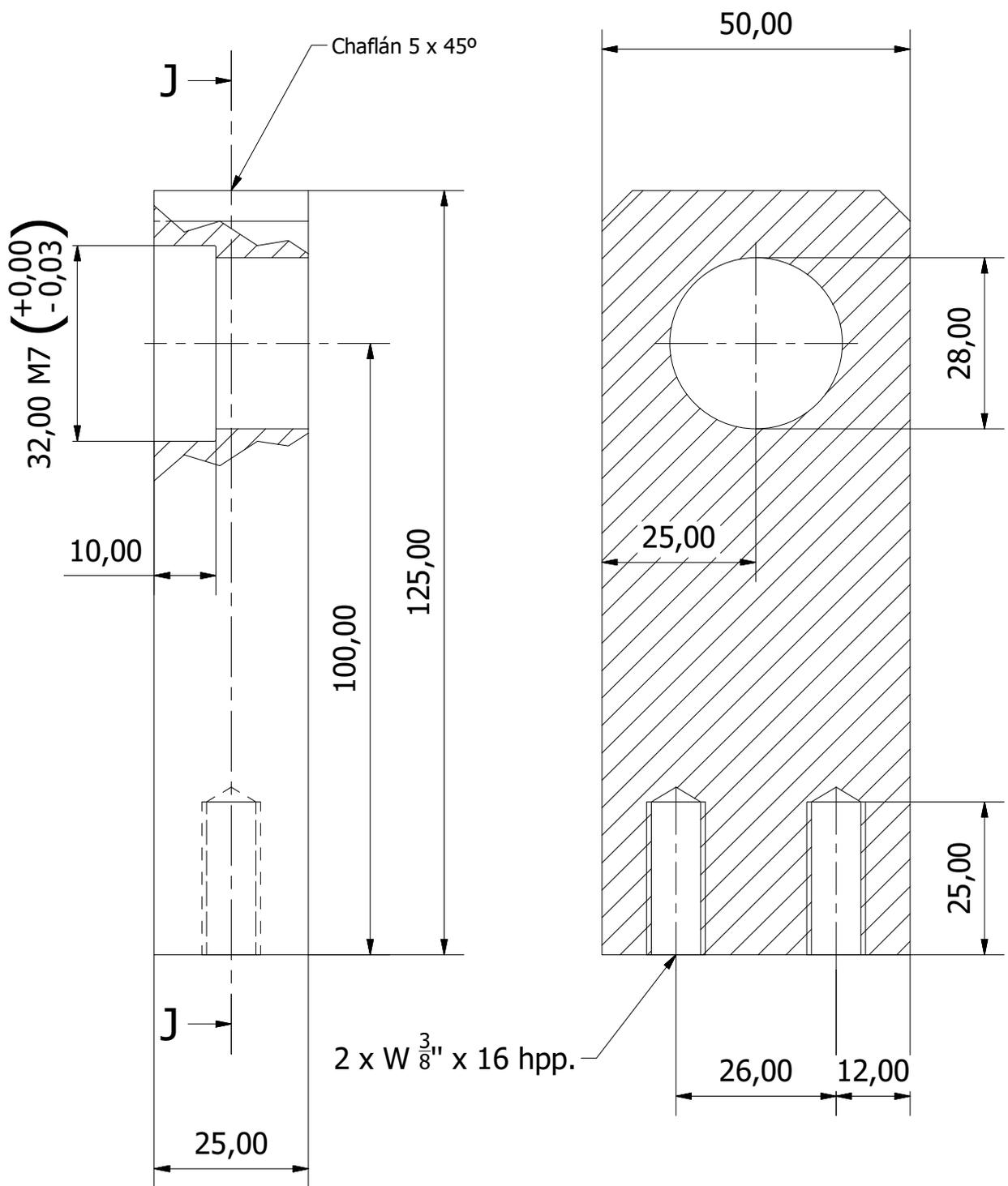
| | | |
|---------------|-------------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: | Tornillo de movimiento y Perilla | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: | | Plano N°: 9 |
| Escala: 2:1 | | |



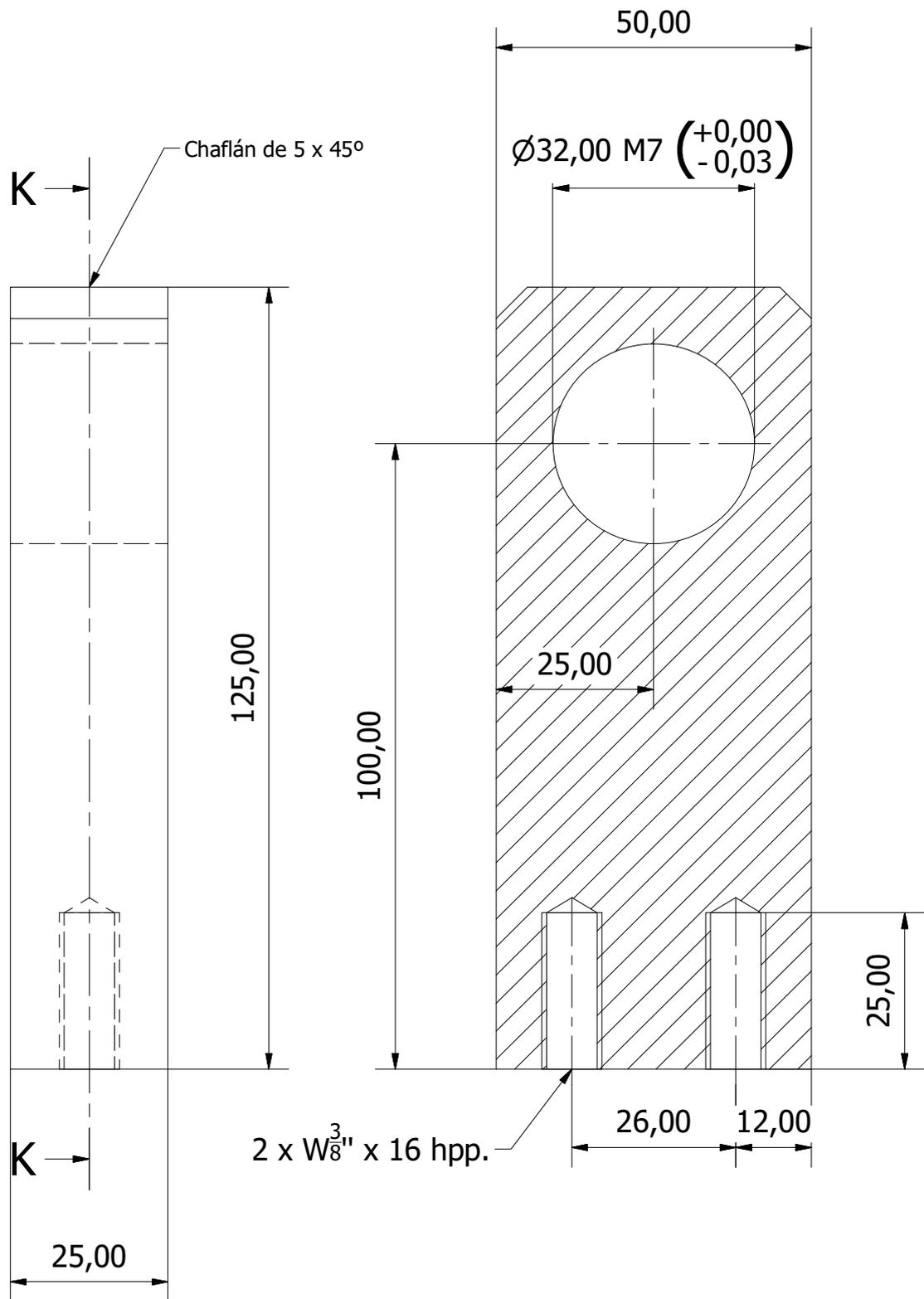
Detalle A (2 : 1)



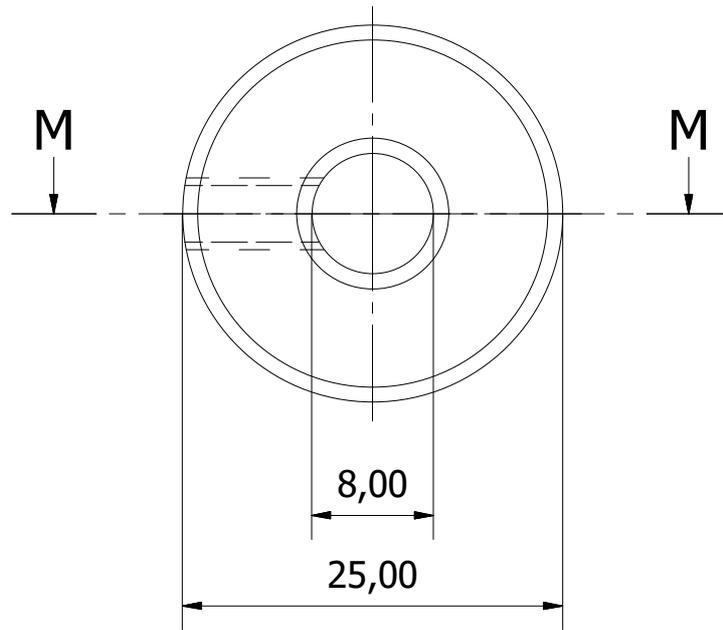
| | | |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Acero SAE1045 | Eje principal | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 | | Plano Nº: 10 |
| Escala: 1:1 | | |



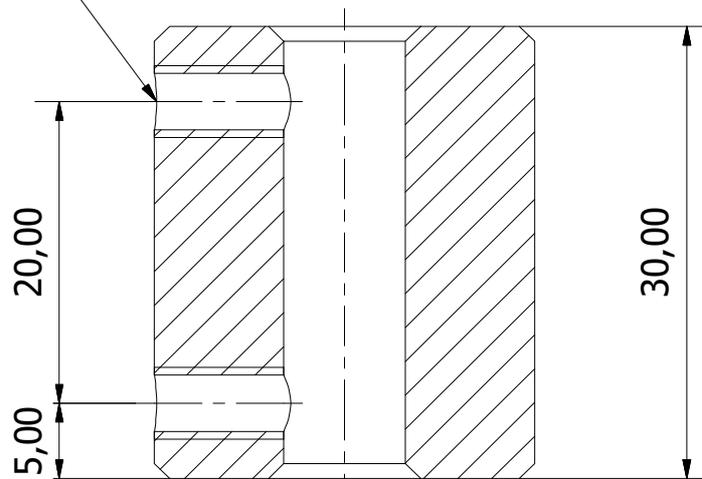
| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Soporte izquierdo del eje | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 | | Plano N°: 11 |
| Escala: 1:1 | | |



| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Soporte derecho del eje | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 | | Plano N°: 12 |
| Escala: 1:1 | | |

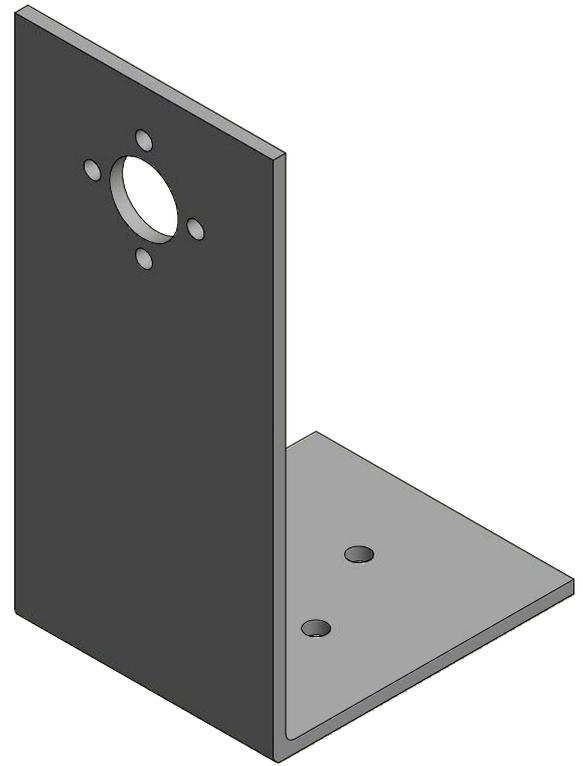
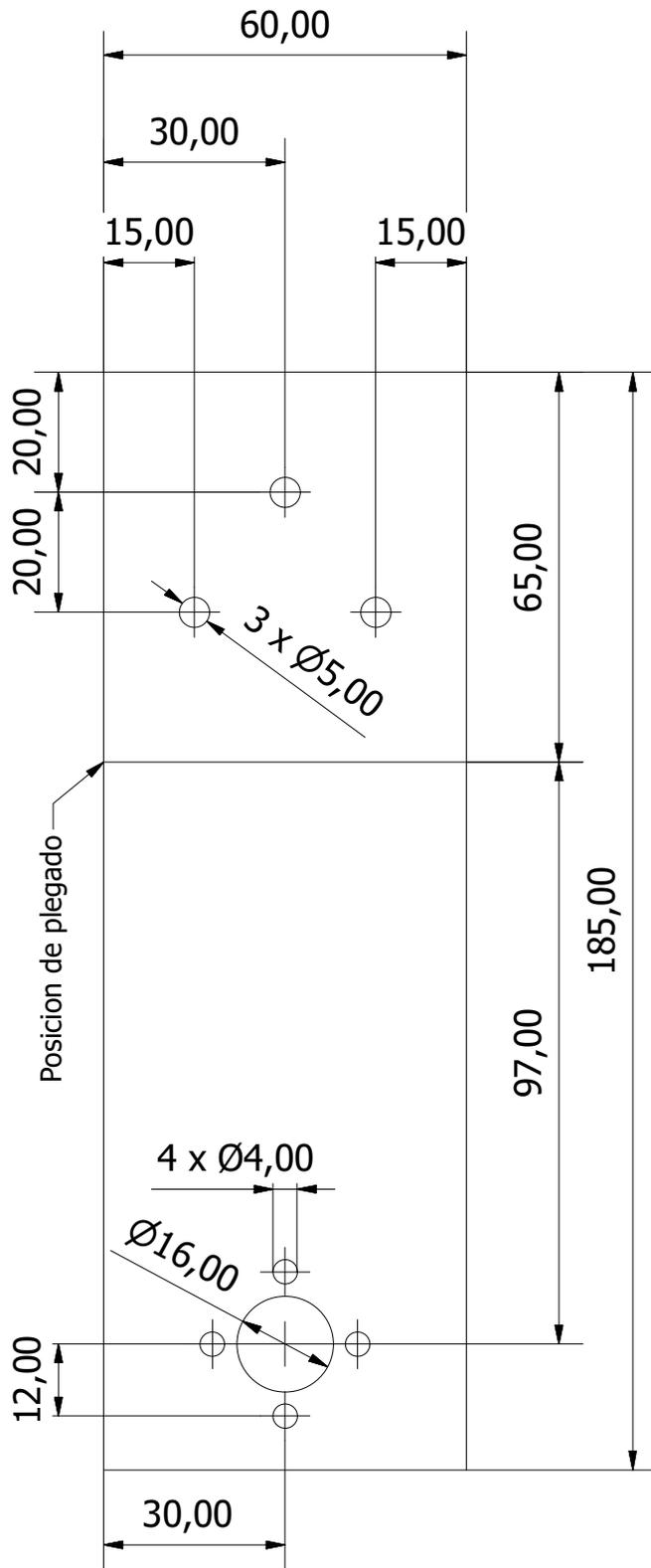


2 x W_{16}^3 " x 24 hpp.



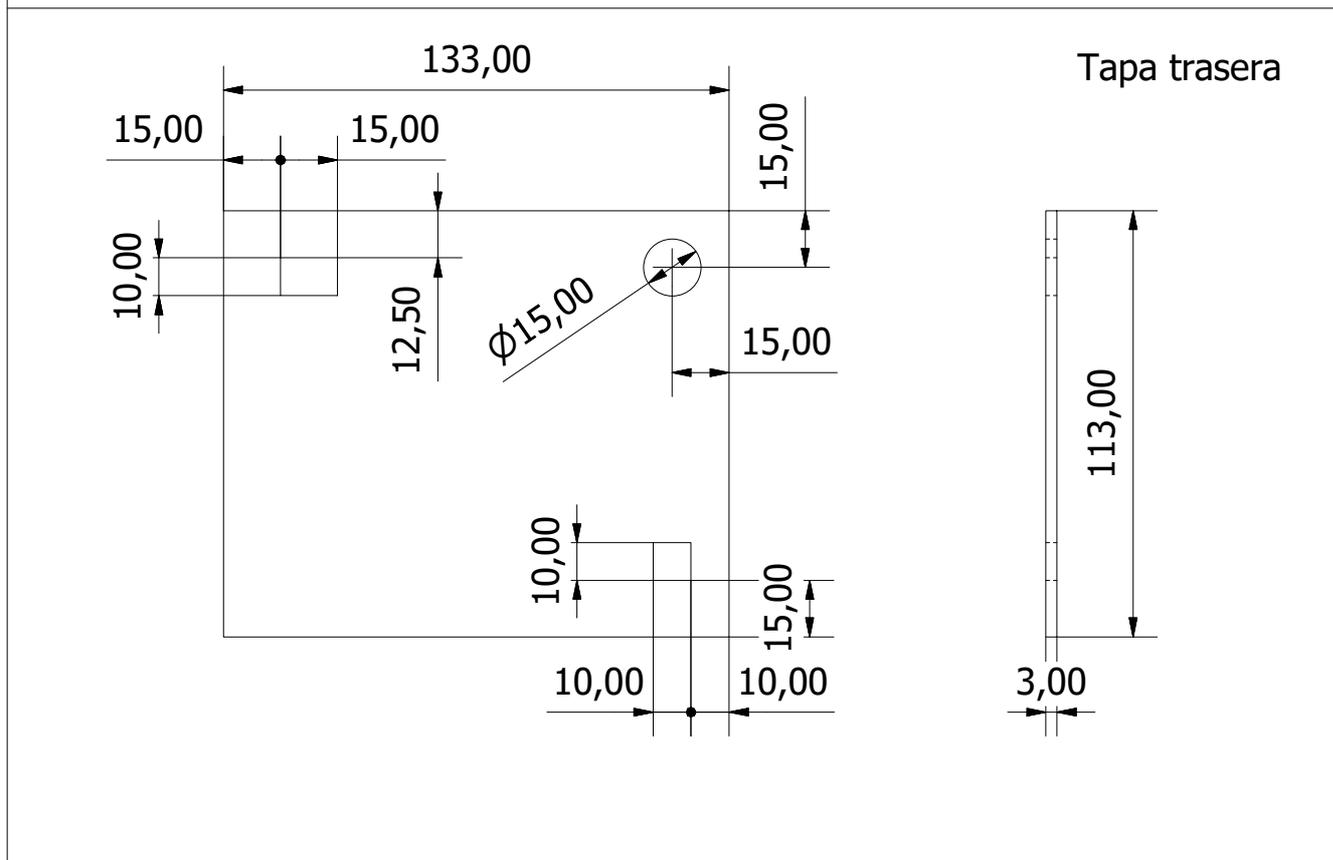
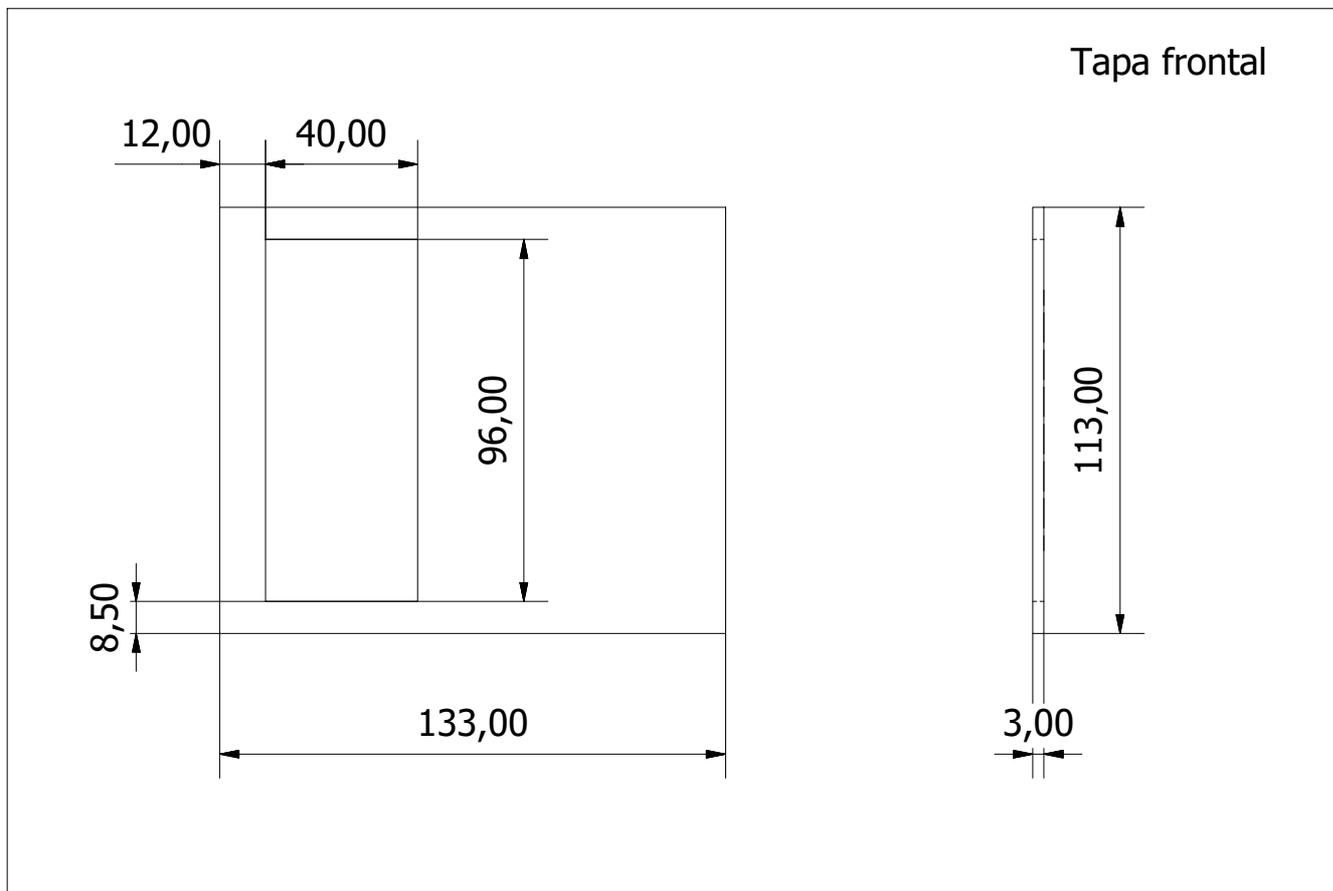
Chafilán interno y externo de 2 x 45°

| | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Aluminio | Acople | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 | | Plano N°: 13 |
| Escala: 2:1 | | |

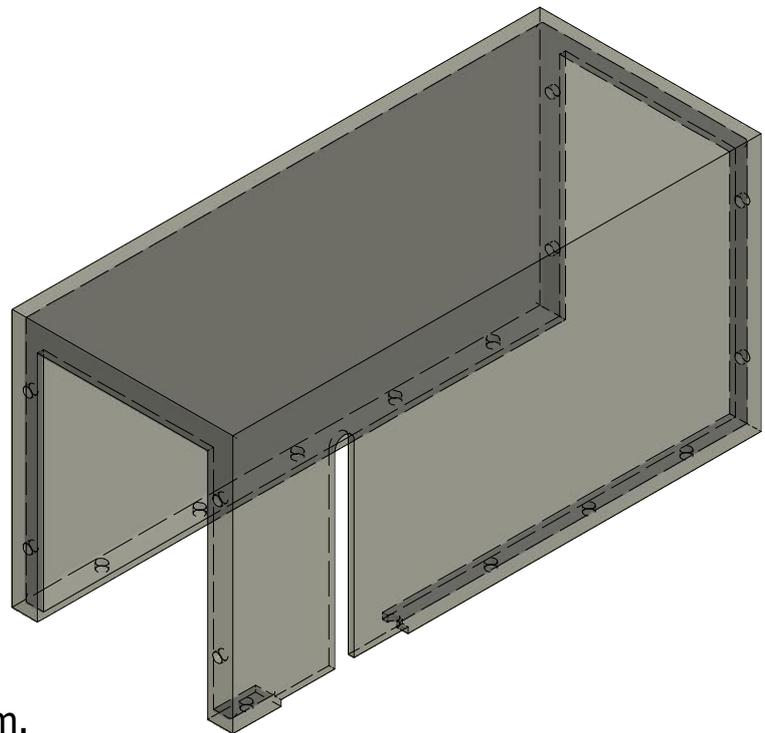
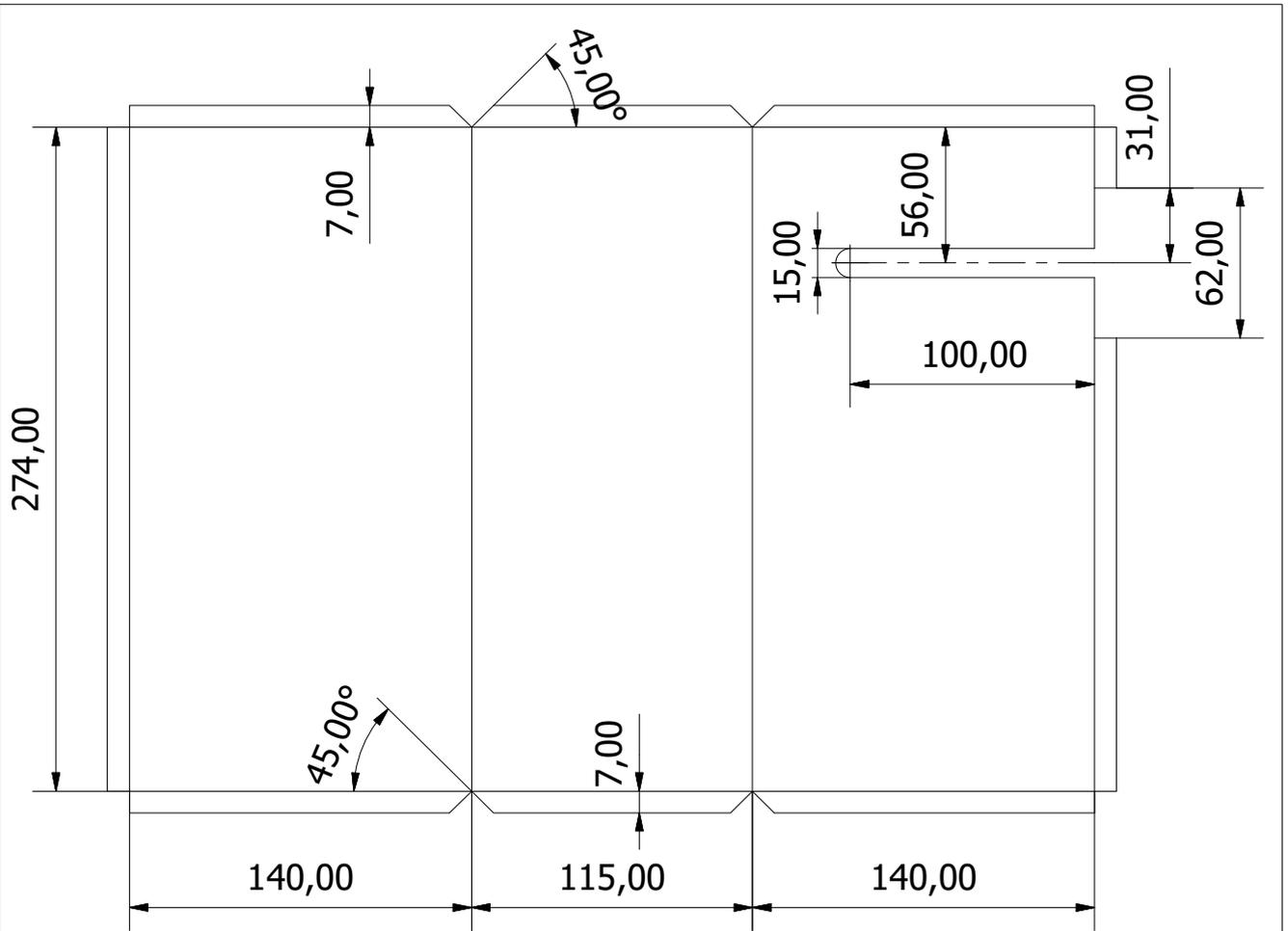


*Chapa de 3 mm de espesor.

| | | |
|----------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Acero inoxidable | Soporte de motor | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 | | Plano N°: 14 |
| Escala: 1:1 | | |

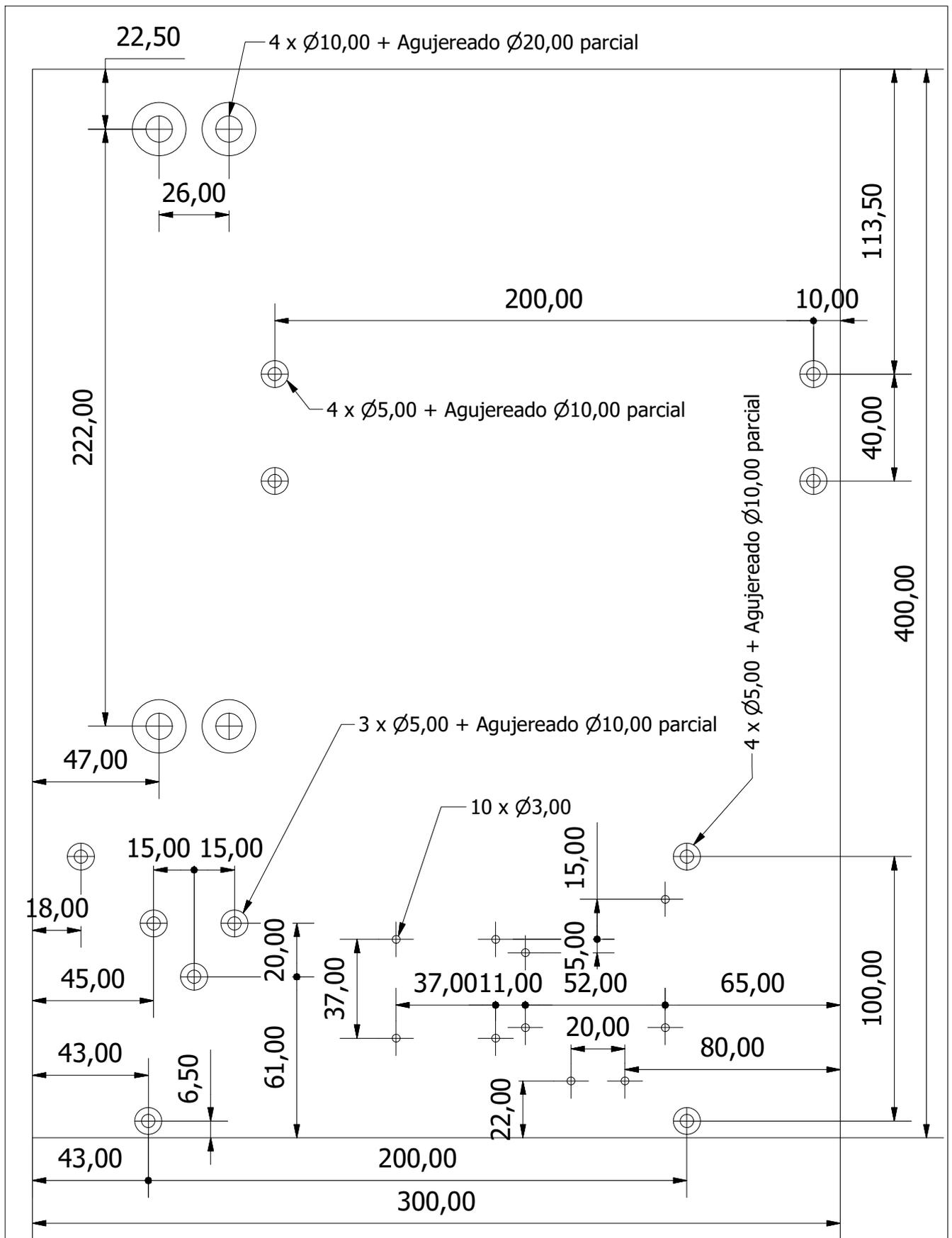


| | | |
|----------------------------|------------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Acero inoxidable | Tapas frontal y trasera de carcasa | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 c/u | | Plano N°: 15 |
| Escala: 1:2 | | |



*Chapa de espesor 1,50 mm.

| | | |
|----------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | |
| Material: Acero inoxidable | Carcasa | Fecha: Mayo 2019 |
| Cantidad: 1 | | Plano N°: 16 |
| Escala: 1:2,5 | | |



| | | | |
|--------------------|-----------------------------------|--|------------------|
| Neme, Ignacio | Facultad de Ingeniería U.N.M.D.P. | | |
| Material: Aluminio | Base del equipo | | |
| Cantidad: 1 | | | Fecha: Mayo 2019 |
| Escala: 1:2 | | | Plano N°: 17 |