

CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

Equipo dip coater para la creación de películas delgadas

Autor:
Ing. Martin Abel Gambarotta

Director:
Dr. Gastón Corthey (CONICET)

Jurados:
Alejandro Permingeat (FIUBA, DETECAP)
Diego Fernández (UBA)
Julián Iglesias (UTN)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad de General San Martín, Buenos Aires,
entre marzo de 2020 y abril de 2022.*

Resumen

La presente memoria describe el desarrollo y la implementación de un equipo dip coater utilizado en la fabricación de películas delgadas en el campo de estudio de las nanociencias. Se abarcarán aspectos de software, hardware y también de diseño y fabricación mecánica.

El equipo que surge de este proyecto será comercializado por TECSCI S.A.S en el transcurso del año 2022. Todo el material relacionado estará disponible ya que la empresa adhiere a los principios del software y hardware libre.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Contexto	1
1.2. Técnicas de dip coating	2
1.3. Dip coaters en el mercado	3
1.4. Objetivos y alcance	5
1.4.1. Objetivos	5
1.4.2. Alcance	5
2. Introducción específica	7
2.1. Estudio preliminar	7
2.2. Circuitos integrados Trinamic	8
2.2.1. Driver TMC5130	9
2.3. Interfaz de usuario	11
2.4. Estructura mecánica	12
2.5. Sistema electrónico propuesto	14
3. Diseño e Implementación	17
3.1. Hardware	17
3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre	17
3.1.2. Etapa de alimentación	17
3.1.3. Etapa de comunicación	17
3.1.4. Driver TMC5130	19
3.1.5. Fabricación	19
3.2. Firmware	21
3.2.1. Capas de abstracción	21
3.2.2. Módulos principales de software	23
Control de movimientos	23
Interfaz usuario-máquina	25
Pantalla táctil	28
Comandos Json	28
Parámetros de calibración	28
3.3. Estructura mecánica	29
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC	29
Etapa CAD	29
Etapa CAM	30
3.3.2. Modelos 3D y real	31
4. Ensayos y resultados	35
4.1. Pruebas funcionales de hardware	35
4.1.1. Comunicación con periféricos	35

4.2.	Pruebas funcionales firmware	38
4.2.1.	Tiempo de ejecución de movimientos	38
4.3.	Calibración del equipo	40
4.3.1.	Desplazamiento lineal y micro pasos	40
4.4.	Caso de prueba	41
4.5.	Prueba de campo con personal capacitado	41
5.	Conclusiones	45
5.1.	Resultados obtenidos	45
5.2.	Próximos pasos	45
Bibliografía		47

Índice de figuras

1.1.	Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2.	Proceso completo desarrollado por el equipo ¹	2
1.3.	Films de dioxido de titanio TiO ₂ ²	3
1.4.	Equipo de la empresa Kibron.	4
1.5.	Equipos de la empresa Biolin Scientific.	4
1.6.	Equipo de la empresa Bungard.	4
2.1.	Espesor vs velocidad ³	7
2.2.	Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130 ⁴	9
2.3.	Diagrama en bloques TMC5130 ⁵	10
2.4.	Función stallguard2. ⁶	10
2.5.	Función coolstep. ⁷	11
2.6.	Guía Lineal IGUS. ⁸	13
2.7.	Fresadora Fagor GVC 600. ⁹	14
2.8.	Esquema de equipo propuesto.	15
3.1.	Módulo de entrada.	18
3.2.	Conversor UART-USB.	18
3.3.	Clock para el CI TMC5130.	19
3.4.	CI TMC5130.	20
3.5.	Modelo 3D Kicad.	20
3.6.	Placa fabricada MAYER SRL.	21
3.7.	Capas de abstracción de software.	22
3.8.	Software TMCL-IDE.	23
3.9.	Configuración de funcionalidades stallguard2 y coolstep.	24
3.10.	Configuración de rampa de seis puntos.	24
3.11.	Comandos de movimientos.	26
3.12.	Comandos de control.	27
3.13.	Lectura de registros del driver TMC5130.	27
3.14.	Comandos DOWN descartado por equipo en funcionamiento.	28
3.15.	Comandos de STOP procesado.	28
3.16.	Unidades.	29
3.17.	Pieza personalizada soporte de carro.	30
3.18.	Piezas personalizada soporte de estructura superior.	30
3.19.	Estrategias de mecanizado en software Bodcad.	31
3.20.	Piezas fabricadas en centro de mecanizado.	32
3.21.	Modelo 3D.	33
3.22.	Primer prototipo dip coater TECSCI.	34
4.1.	Datagrama de 40 bits.	35
4.2.	Ensayo sobre terminales SPI.	36
4.3.	Comando de lectura sobre registro 0x2D.	37
4.4.	Ensayo sobre terminales SPI.	37

4.5. Ensayo sobre terminales SPI.	37
4.6. Comparación de tiempos teóricos y registrados.	39
4.7. Error relativo porcentual.	39
4.8. Comparador digital Asimeto.	40
4.9. Ensayo de desplazamiento lineal.	41
4.10. Ensayo completo en laboratorio.	42
4.11. Ensayo con wafer de silicio.	43

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	5
2.1. Comparación Stone	12
4.1. Ensayo de tiempo en desplazamientos	38
4.2. Ensayo de desplazamiento	42
4.3. Ensayo de desplazamiento	42

Dedicado a mis padres!

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se explica brevemente el marco en el cual se desarrolló el trabajo y se dan las primeras definiciones sobre el equipo construido.

1.1. Contexto

El trabajo consistió en la construcción de un equipo comercial *dip coater*. El mismo se desarrolló en el marco de la fundación de la empresa TECSCI (*Technology for Science*).

La empresa tiene como visión ser referente internacional en el desarrollo de equipamiento científico y como misión pretende fabricar productos innovadores de alta calidad. Espera poder dar respuesta a las demandas de laboratorios de investigación, universidades y empresas de base tecnológica nacionales e internacionales.

Como valor agregado se destaca que la empresa adhiere a la filosofía del software y hardware libre [1], por lo tanto, el lector podrá acceder a todo el código fuente del firmware [2], a los archivos de diseño y fabricación del circuito impreso [3] y a los modelos de piezas mecánicas necesarias para replicar, reparar o adaptar el equipo según sus necesidades.

Las soluciones que propone se orientan a dar respuesta a las problemáticas que se comparten tanto en el mercado local como en el internacional:

- Elevado precio del equipamiento científico y de su mantenimiento.
- Contratación exclusiva de servicio técnico asociado al fabricante.
- Soluciones de software y hardware cerradas que no permiten la adaptación del instrumental a experimentos científicos personalizados.

La empresa está incubada en FUNINTEC (Fundación Unsam Innovación y Tecnología) y sus instalaciones se encuentran dentro del Campus Miguelete en la UNSAM (Universidad Nacional de San Martín). El contrato de incubación le permite contar con un taller mecánico con maquinaria suficiente para la fabricación de prototipos, con la posibilidad de poder escalarlos hacia una etapa de producción. A continuación se mencionan los recursos mas importantes:

- Torno CNC (*Computer Numerical Control*).
- Centro de mecanizado CNC.
- Torno y fresadora manual.

- Láser de corte.
- Cabina de *blasting*

En la siguiente figura 1.1 se observan los equipos mencionados.



FIGURA 1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.

La empresa también cuenta con un laboratorio de electrónica con equipos para diseño y prototipado electrónico.

1.2. Técnicas de dip coating

En los laboratorios de investigación aplicados en nanotecnologías existen diferentes equipos para la fabricación de películas delgadas o *thin films*. Las mismas consisten en capas de material de espesores variables, que comúnmente van desde las centenas de nanómetros hasta las decenas de micrómetros y se depositan sobre diferentes superficies.

Dip coating es una técnica que se emplea tanto en áreas de I+D (investigación y desarrollo) en la industria, como en la investigación científica en el campo de las nanociencias, se basa en la inmersión y extracción controlada de un sustrato en una solución química bajo estudio. En la figura 1.2 se observa una ejecución completa del movimiento desarrollado por un equipo dip coater.

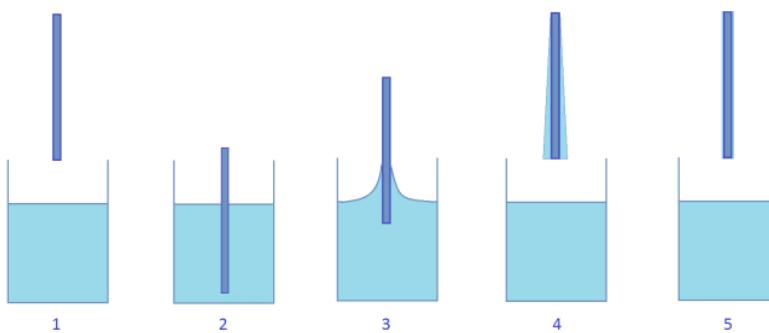


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹.

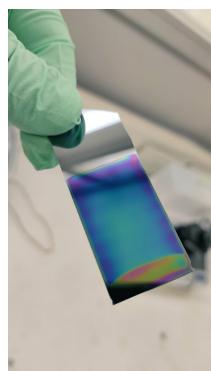
1. La muestra desciende a velocidad controlada.
2. La muestra queda sumergida un tiempo establecido por el usuario.

¹Imagen tomada de [4]

3. La muestra asciende a velocidad controlada, este es el punto más crítico del experimento, en donde el material queda adherido a la muestra. Se estudiarán en el capítulo 3 dos modelos matemáticos que explican este fenómeno y se dará una noción mas detallada de las velocidades que caracterizan al proceso.
4. Se extrae toda la muestra.
5. El usuario puede tener interés en volver a repetir el proceso un tiempo después.

La principal característica del equipo es brindarle al usuario la posibilidad de controlar la velocidad y aceleración de inmersión de la muestra, el tiempo de espera que la muestra queda sumergida y la extracción, teniendo la posibilidad de repetir el ciclo según se desee.

Como ejemplo de los resultados que se obtienen aplicando esta técnica se observan en la figura 1.3 films de dioxido de titanio TiO_2 . En la imagen A el film se preparó sobre un wafer de silicio y en la imagen B sobre un portaobjeto de vidrio.



(A) Film sobre wafer de silicio.



(B) Film sobre portaobjeto.

FIGURA 1.3. Films de dioxido de titanio TiO_2 ².

Cabe destacar que los espesores de capa logrados en este experimento fueron de entre 180 nm y 200 nm, con velocidades de inmersión y extracción configuradas en 180 mm/min.

Luego de un proceso dip coating, dependiendo del tipo de muestra que se genere, es necesario realizar tratamientos térmicos para finalizar el proceso. Los mismos se realizan con otro tipo de equipos y por lo tanto no serán parte de esta memoria.

1.3. Dip coaters en el mercado

Existen diferentes fabricantes a nivel internacional que comercializan este tipo de equipos pero ninguno a nivel local. Se presentan a continuación algunos equipos de diferentes fabricantes.

Se puede observar en la figura 1.4 el equipo de la empresa Kibron [5].

²Imagen tomada en los laboratorios del Instituto de Nanosistemas de la UNSAM.



FIGURA 1.4. Equipo de la empresa Kibron.

En la figura 1.5 se observan los equipos de la empresa Biolin Scientific [6], un equipo simple y otro con mayor funcionalidad. Si bien ambos controlan con exactitud la velocidad de inmersión y extracción, el último agrega una funcionalidad extra, que a través de una rotación en la base da la posibilidad de cambiar de manera automática y secuencial las soluciones donde se realizan las inmersiones. Ambos equipos necesitan estar conectados a una computadora corriendo un software para poder ser accionados.



(A) Equipo simple.



(B) Equipo avanzado.

FIGURA 1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.

Por último se presenta el equipo de la empresa Bungard [7], que puede observarse en la figura 1.6. Este equipo a diferencia de los otros cuenta con un display LCD y botonera, lo que permite al usuario realizar una configuración a pie de máquina.



FIGURA 1.6. Equipo de la empresa Bungard.

A continuación se presenta la tabla 1.1 en donde se comparan las especificaciones técnicas que los caracterizan.

TABLA 1.1. Especificaciones técnicas de otros equipos.

Equipo	Recorrido	Velocidad (mm/min)	Aceleración (m/min ²)	Interface
Bio Single Vessel M	300 mm	1 - 1000	no	PC
Bio Multiplie Vessel	70 mm	0.1 - 108	no	PC
Kibron LayerX	134 mm	0.06 - 300	no	PC
Bungard	600 mm	30 - 10000	no	Display LCD
Ossila [8]	100 mm	0.6 - 3000	no	PC
Holmarc [9]	100 mm	1.08 - 540	no	PC

Se pueden extraer entonces algunas conclusiones: ninguno de los equipos permite al usuario tener control sobre la aceleración en los movimientos de inmersión y extracción de muestra, la mayoría de los equipos depende de una comunicación USB-SERIAL con una computadora para poder ser ejecutados, ninguna de las empresas adhiere a los principios del software y hardware libre.

1.4. Objetivos y alcance

1.4.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo fue diseñar y fabricar el primer equipo comercial de la empresa TECSCI, con la perspectiva a futuro de ampliar la gama ofrecida de equipos de laboratorio para la investigación científica.

También es parte de los objetivos fundamentales que el equipo desarrollado incorpore mejoras respecto a sus competidores. Se planteará en los siguientes capítulos un estudio sobre el control de movimientos elegido y se presentará un sistema moderno de configuración de equipo.

1.4.2. Alcance

El presente trabajo incluye la presentación de un equipo comercial dip coater.

Abarcó los siguientes puntos:

- Driver de motor provisto por el fabricante TRINAMIC [10].
- Diseño de hardware con software de diseño KICAD [11].
- Fabricación de placa electrónica y montaje de componentes.
- Diseño y fabricación de partes mecánicas a través del mecanizado de aluminio.
- Incorporación de pantalla táctil para configuración y uso del equipo.

El trabajo no incluyó:

- Desarrollo de hardware con fuente de alimentación incorporada.
- Programación de la interfaz gráfica con el software de diseño provisto por el fabricante de la pantalla.
- Control del entorno con registro de humedad, temperatura y cámara de humedad.

Capítulo 2

Introducción específica

En el presente capítulo se introducen los módulos principales del equipo dip coater fabricado.

2.1. Estudio preliminar

Para entender la relación entre la velocidad de extracción y el espesor de material depositado se tuvo en consideración la siguiente publicación (*Preparation of Sol-Gel Films by Dip-Coating*) [12], que describe la técnica dip coating como un proceso dinámico, complejo y difícil de modelar, debido a los gradientes de concentración y viscosidad generados por evaporación de la solución.

La publicación se basa entonces en un estudio semi-experimental sobre varias soluciones químicas para predecir el espesor final de la película. Tiene en cuenta dos modelos matemáticos, un modelo de capilaridad asociado a extracciones en velocidades bajas y otro modelo de evaporación asociado a velocidades altas respecto al rango de estudio.

Se observa en la figura 2.1 la variación de los espesores fabricados respecto a las velocidades utilizadas, también se puede observar la relación entre los diferentes modelos aplicados.

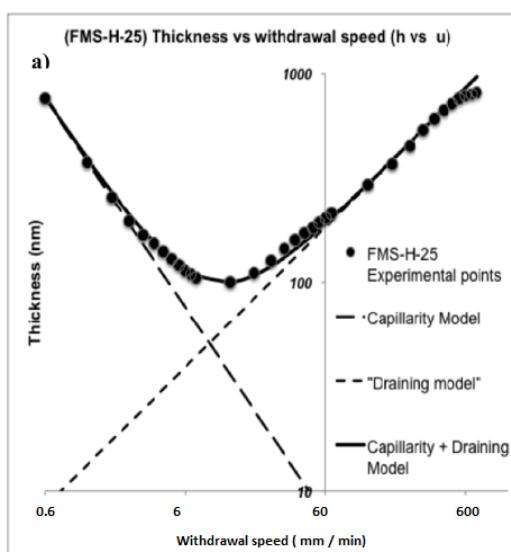


FIGURA 2.1. Espesor vs velocidad ¹.

¹Imagen tomada de [12].

Los resultados del experimento concluyen en que existe linealidad en la relación de espesor respecto a la velocidad de extracción entre $60 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ y $600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. También demuestra que en dicho rango de velocidades el fenómeno se explica por el modelo de evaporación.

Se desprende de este análisis la importancia de los siguientes requerimientos funcionales definidos por el cliente:

- El sistema debe contar con un rango de velocidades de desplazamiento de muestra entre $[1 - 1000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}]$.
- El sistema debe contar con un rango de aceleraciones de desplazamiento de muestra entre $[1000 - 15000 \frac{\text{m}}{\text{min}^2}]$.

Cabe destacar que todos los experimentos en la publicación fueron realizados a velocidad constante. De las reuniones con el cliente y del interés de trabajar en la frontera de la ciencia surgió la necesidad de poder darle al usuario la posibilidad de realizar experimentos a velocidad y aceleración controlada. Esto último es una cualidad que diferencia a este equipo respecto de todos los equipos comerciales analizados en la sección 1.3.

2.2. Circuitos integrados Trinamic

De reuniones con el cliente en donde se remarcaba la importancia de trabajar con un control preciso de motor y en base a experiencias de uso de equipos con tecnologías similares surge el interés de trabajar con un fabricante de driver específico. Se definen entonces los siguientes requerimientos:

- El equipo deberá contar con un motor paso a paso Nema 17 [13] para realizar los movimientos.
- Se utilizará un driver de motor de la marca TRINAMIC.

Trinamic Motion Control [10] se especializa en la fabricación de CI (Circuitos Integrados) para el control de diferentes tipos de motores, su lema se basa en convertir señales digitales en movimientos controlados. Tiene una experiencia de veinte años en la industria del control de motores, lo que garantiza en cierta medida la calidad de sus productos. Actualmente fue adquirida por la compañía Analog Devices [14].

Cabe destacar que los integrados fabricados por la empresa Trinamic se utilizan en diversas aplicaciones en donde la precisión es importante, como por ejemplo: impresión 3D, automatización industrial, robótica y equipos de laboratorio médico entre otras. Cuenta con una amplia gama de productos que se diferencian principalmente según el tipo de motor que se quiera accionar. Luego de estudiar las diferentes alternativas ofrecidas se eligió trabajar con el driver TMC5130 [15].

Todos los CI requieren una configuración inicial de parámetros, que dependen del tipo de motor y de la carga asociada al mismo. Es por eso que la empresa ofrece el software TMCL-IDE y diferentes placas de desarrollo para ayudar a realizar una correcta configuración de parámetros. La placa de desarrollo para este integrado es la *TMC5130-Eval Evaluation Board* [16].

El TMCL-IDE se ejecuta sobre una placa de desarrollo general compatible con diferentes kits de evaluación. En la figura 2.2 se observa a izquierda la placa Startrampe que se conecta entre la computadora y la placa de evaluación TMC5130-Eval que se observa a derecha. Finalmente el motor paso a paso se conecta a la placa de evaluación.

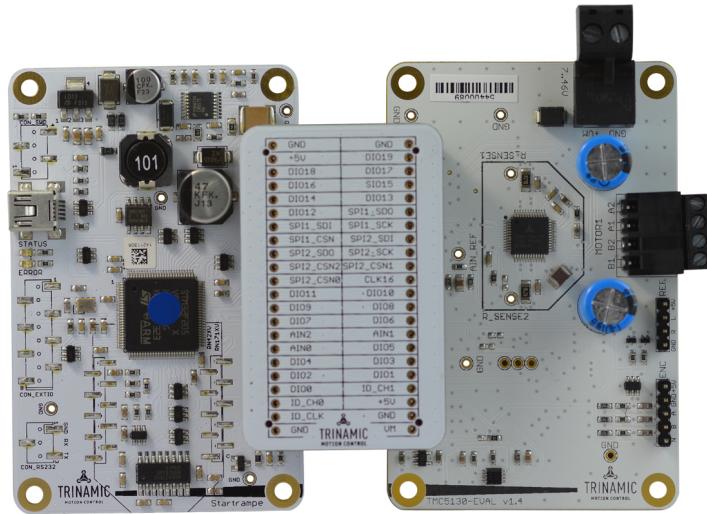


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130².

2.2.1. Driver TMC5130

El driver TMC5130 permite operar motores bipolares de dos fases comúnmente conocidos como motores paso a paso. El CI incorpora una etapa de potencia con tecnología *MOSFET* (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) que permite manejar corrientes de hasta dos amperios por fase. En el caso del dip coater el peso de la carga es despreciable, por lo tanto la corriente es suficiente. Se realizarán en el capítulo 4 los respectivos ensayos.

Se observa en la figura 2.3 el diagrama en bloque del CI.

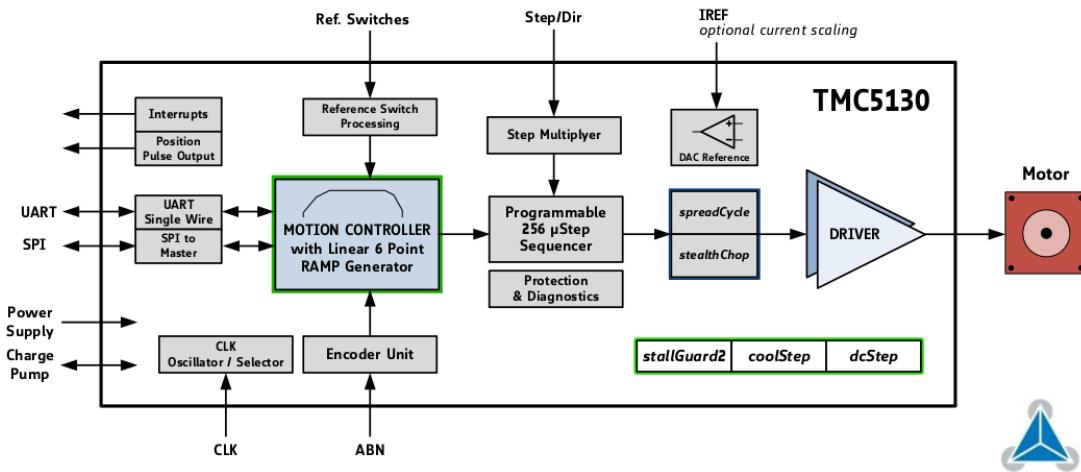
La comunicación con el CI se puede establecer a través del protocolo *UART* (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) o *SPI* (*Serial Peripheral Interface*), para el desarrollo de este trabajo se utilizó el protocolo de comunicación SPI.

Una característica importante a destacar es la posibilidad de programar la cantidad de pasos que da el motor. Los pasos están relacionados con las fases y con la cantidad de dientes que tiene el rotor y estator del motor. Un paso es el movimiento mínimo que el motor puede hacer. Un motor paso a paso, como su nombre lo indica, realiza movimientos a través de pasos sucesivos. Por ejemplo, es común contar con algún motor en donde la especificación indica que el paso es de 1.8° , esto significa que por cada vuelta de motor 360° , el mismo realizará 200 pasos.

Una funcionalidad que incorpora este CI es incrementar la cantidad de pasos, el fabricante los denomina micropasos, el driver puede generar hasta un máximo

²Imagen tomada de [10].

³Imagen tomada de [10].

FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130³.

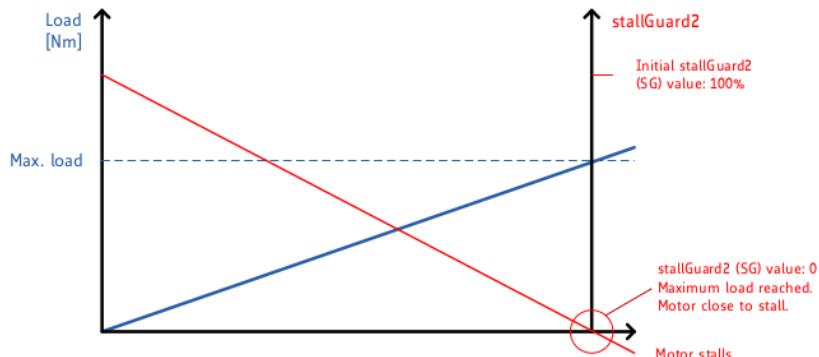
de 256 micropasos por cada paso del motor. Siguiendo con el ejemplo recién presentado, para un motor de paso 1.8° se tendrían en total 51200 micropasos como se observa en la ecuación 2.1.

$$(360/1,8) * 256 = 51200 \text{ micropasos por revolución} \quad (2.1)$$

El motor estará acoplado a un eje lineal que generará movimientos ascendentes y descendentes. Sobre este eje lineal se acoplará un carro de aluminio que tendrá una pinza que sostendrá las muestras.

Otra funcionalidad que se utilizará es *stallguard2*, una función de alta precisión que mide la fuerza contraelectromotriz generada en las bobinas del motor por cambios de carga en el eje. Como se observa en la figura 2.4 el valor del registro *stallguard2* se decrementa linealmente a medida que la carga aumenta.

Es decir, el motor gira con un valor asociado de fuerza contraelectromotriz dado por la carga acoplada al eje, si se aplica una fuerza contraria al movimiento programado o el recorrido del carro llega a un límite mecánico, la fuerza contraelectromotriz aumentará.

FIGURA 2.4. Función stallguard2.⁴

⁴Imagen tomada de [10].

En el capítulo 3 se estudiará el valor del registro stallguard2 configurado. Cada vez que el equipo se enciende se realizará un movimiento hacia un extremo del recorrido para buscar el cero de máquina. Se utilizará entonces esta medida para encontrar un límite mecánico del sistema y realizar un posicionamiento inicial. El uso de esta funcionalidad evita la incorporación de finales de carrera electromecánicos.

También se utilizará *coolstep*, una función que a través de mediciones de carga en el eje del motor adapta automáticamente la corriente suministrada hacia las bobinas, aumentando la eficiencia energética como puede observarse en la figura 2.5, cuyo efecto reduce la energía suministrada según hojas de datos [15] hasta un 75 %. Incluso en aplicaciones en donde la carga es constante, como es este equipo dip coater, ya que la carga variable representada por un wafer de silicio o un portaobjeto es completamente despreciable.

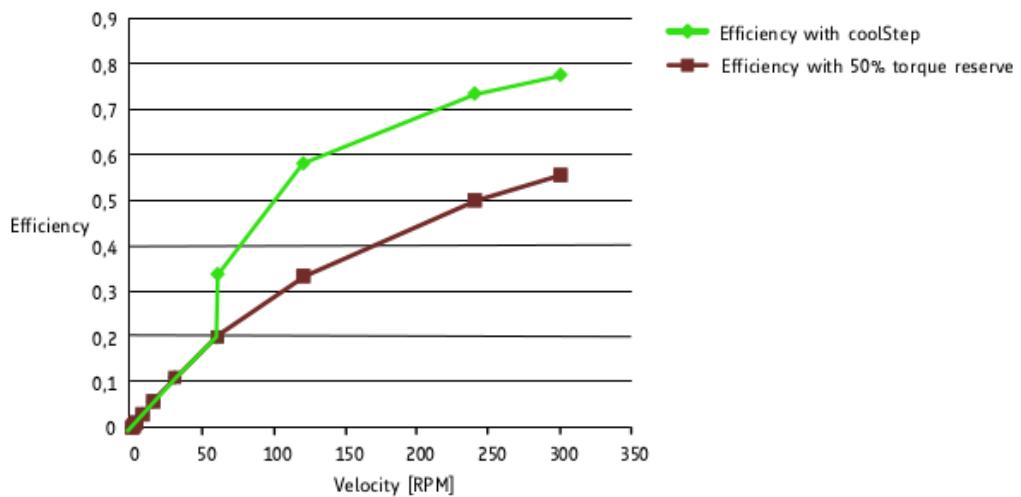


FIGURA 2.5. Función coolstep.⁵

Por último se utilizará la función *dcStep*, que es un modo de conmutación automática que ajusta la velocidad del motor en caso de existir sobrecarga en el eje, es decir que si no puede mover la carga acoplada al eje con la velocidad establecida, se ajusta a una velocidad menor para poder seguir en movimiento y no detenerse por completo.

El driver TMC5130 cuenta con cincuenta registros que se utilizan para configurar las funcionalidades del CI y controlar el motor. El acceso a los registros se realizará a través del protocolo SPI. En el capítulo 3 se darán más detalles de los registros configurados con la ayuda del software TMCL-IDE.

2.3. Interfaz de usuario

Respecto a la interacción entre el usuario y el equipo surgió en reuniones con el cliente la necesidad de contar con una interfaz moderna, que permita a un usuario dentro de un laboratorio configurar al equipo a pie de máquina. Dando lugar al siguiente requerimiento:

⁵Imagen tomada de [10].

- La configuración de la máquina debe poder realizarse a través de una pantalla táctil.

Se decidió trabajar con pantallas del tipo *HMI* (*Human Machine Interface*). Las mismas incorporan una unidad de procesamiento que se encarga exclusivamente del procesamiento gráfico. En general, cuentan con un software de diseño para la creación de la interfaz gráfica, es decir que permiten crear botones, barras, pantallas y diferentes tipos de objetos para interactuar con el usuario. Luego se le da funcionalidad a cada uno de estos objetos creados en el software y a través de un protocolo de comunicación se interactúa con el sistema de control, permitiendo finalmente controlar y configurar el equipo. En el caso de este equipo la pantalla se comunica con un microcontrolador, pero podría comunicarse con algún otro sistema de control como por ejemplo un *PLC* (*Programmable Logic Controller*).

Luego de una investigación de mercado se eligió a la empresa STONE [17]. El fabricante ofrece un catálogo amplio de pantallas que caracteriza según el tipo de aplicación y entorno de trabajo. Ofrece entonces pantallas para usos industriales, civiles o avanzados. Por las dimensiones finales del equipo y el tipo de uso se optó por pantallas avanzadas de 4.3 pulgadas. Se detallan en la tabla 2.1 las características técnicas de dos pantallas de 4.3 pulgadas del fabricante.

TABLA 2.1. Comparación pantallas táctiles Stone 4.3.

	STWI043WT	STVI043WT
CPU	Cortex A8	CortexM4
Refresh Rate	1G Hz	200 MHz
Image format	png, bmp, jpg, svg, gif	bmp, jpg
Resolution	480×272 pixel	480×272 pixel
Flash	256 MB	128 MB
Color	262 K	65 K
PCB	2.0 mm black, ROHS	1.6 mm green
Touch Type	Resistive	Resistive
Interface	RS232/RS422/RS485/TTL	RS232/RS485/TTL

El modelo elegido fue el STWI043WT, que pertenece a la nueva línea productos, tiene mayor capacidad de procesamiento, cuenta con un software nuevo de configuración con mayores funcionalidades respecto al utilizado por el otro modelo y la diferencia de precios no supera el 15 %.

La comunicación de la pantalla STWI043WT con el microcontrolador se estableció a través del protocolo UART.

2.4. Estructura mecánica

Se presentan a continuación los siguientes requerimientos asociados a las partes mecánicas del equipo:

- La estructura principal del equipo debe ser fabricada con perfil de aluminio anodizado natural.
- El recorrido mecánico de desplazamiento de muestra debe ser como mínimo de [3500 mm].

- Las piezas especiales del equipo deben ser mecanizadas en aluminio.

Se decidió trabajar con el proveedor Perfiles de Aluminio .NET [18], que cuenta con diferentes modelos y dimensiones de perfiles necesarios para la fabricación de la estructura.

El equipo cuenta con una guía lineal acoplada al perfil principal. Para la elección de la misma se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El ambiente cambia según las soluciones químicas utilizadas. Es posible entonces que se trabaje con soluciones corrosivas que afecten la estructura.
2. El uso de lubricantes en las guías podría afectar la calidad del experimento.
3. Se deben evitar vibraciones en la estructura para no dañar la calidad del *film*.

Se decidió entonces trabajar con la empresa IGUS [19], que se especializa en la fabricación de polímeros. La misma ofrece guías lineales que se deslizan en lugar de rodar, y por lo tanto no utilizan rodamientos metálicos. Los polímeros están combinados con materiales anticorrosivos y no requieren de la aplicación de lubricante, es decir, que conforman un entorno de trabajo limpio y libre de mantenimiento periódico. Se observa en la figura 2.6 cuatro tipos de guías en donde se puede apreciar el polímero auto-lubricado que se ubica entre el eje y el carro.



FIGURA 2.6. Guía Lineal IGUS.⁶

Para el diseño y fabricación de piezas mecanizadas en aluminio se trabajó con el software BOBCAD [20] CAD/CAM (*Computer-Aided Design /Computer-Aided Manufacturing*). Un software utilizado en la industria manufacturera, que se encuentra constituido por dos módulos fundamentales que permiten abarcar aspectos de diseño y modelado de pieza y luego de fabricación.

Con la parte CAD se diseña el modelo 3D de la pieza. Con el fin de corregir errores de diseño con mayor velocidad, se realiza una impresión 3D con filamento plástico para probar las dimensiones y la factibilidad técnica de la pieza. Una vez que el modelo en su versión plástica queda aprobado, se comienza con la configuración del módulo CAM, este módulo se encarga de convertir, a través de diferentes estrategias, al modelo 3D en lenguaje de máquina que el equipo puede interpretar. Se observa en la imagen 2.7 la fresadora CNC (*Computer Numerical Control*) de la marca FAGOR [21] utilizada para la fabricación de las piezas del

⁶Imagen tomada de [19].

equipo dip coater. El control de la fresadora interpreta el código G-CODE también conocido como RS-274 [22] generado por el modulo CAM y lo convierte en los respectivos movimientos de motores.



FIGURA 2.7. Fresadora Fagor GVC 600.⁷

2.5. Sistema electrónico propuesto

Se presentan a continuación los siguientes requerimientos:

- El sistema debe permitir que el usuario pueda configurar en un programa variables de desplazamiento y tiempos de espera.
- Un programa previamente configurado debe poder ejecutarse o guardarse en memoria interna.
- El usuario debe poder guardar al menos 10 programas en la memoria no volátil del sistema.
- Se deberá utilizar un control de versionado de cambios durante el desarrollo del firmware.
- El desarrollo del firmware debe realizarse con capas de abstracción de software de tal manera que permita en un futuro cambiar de microcontrolador sin mayor esfuerzo.
- El desarrollo se realizará sobre un módulo microcontrolador ESP32.
- Deberá registrar variables de presión y temperatura [opcional].

De reuniones con el cliente y de la necesidad de trabajar con un equipo que permita a futuro contar con una comunicación Wi-Fi, surgió el requerimiento de trabajar con el módulo ESP32 [23]. El ESP32 es un módulo del tipo *SoC (System On Chip)*, es decir que además del microcontrolador y sus periféricos internos, agrega periféricos externos para brindar conectividad inalámbrica y almacenamiento extra para datos y programa.

⁷Imagen tomada en el centro tecnológico de FUNINTEC.

Teniendo en cuenta los requerimientos analizados en las secciones previas y los requerimientos analizados en esta sección se propuso, como se observa en la figura 2.8, el siguiente esquema de equipo dip coater.

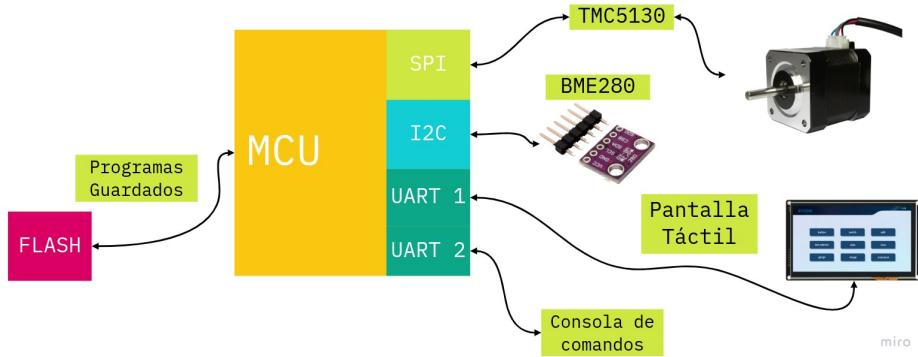


FIGURA 2.8. Esquema de equipo propuesto.

El equipo estará entonces compuesto por el módulo ESP32-WROOM como unidad central de procesamiento, contará con dos comunicaciones a través del periférico UART, una para establecer una consola de comandos que permita comunicar al equipo con una computadora y realizar pruebas de funcionamiento y configuraciones y la otra para comunicarse con la pantalla táctil. También establecerá un protocolo de almacenamiento para guardar los programas que el usuario cree en la memoria FLASH disponible. Finalmente contará con un módulo de comunicación sobre protocolo I2C para obtener datos del sensor de humedad y temperatura BME280.

Capítulo 3

Diseño e Implementación

En el siguiente capítulo se presenta el diseño y la implementación de las tres partes fundamentales del equipo. Se abarcan aspectos de diseño de hardware, desarrollo de firmware, diseño y fabricación mecánica.

3.1. Hardware

3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre

Para la implementación del hardware se utilizó el software libre de diseño de circuitos impresos KICAD [11], la elección del mismo se basó en que en sus últimas versiones presentó mejoras significativas respecto a sus predecesoras.

El diseño de la placa electrónica se baso en el estudio de los siguientes módulos:

- TMC5130-EVAL [16]
- NodeMCU [24]

Se destaca que ambos proyectos adhieren a la filosofía del hardware libre. Por lo tanto se pudieron descargar y estudiar los diagramas esquemáticos de ambas placas.

3.1.2. Etapa de alimentación

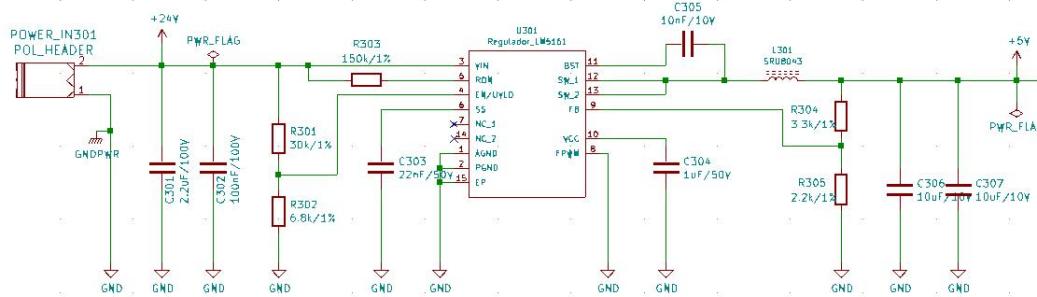
Otra etapa importante, como se observa en la figura 3.1, es el regulador de tensión que permite alimentar el equipo con tensiones continuas de entre 24 V y 46 V. Para tal fin se utilizó el CI LM5161 en modo *step-down buck converter*, una configuración que permite bajar la tensión de entrada según la relación de las resistencias de *feedback*. En este caso se configuró una salida de 5 V la cual tiene una eficiencia energética de 86 % según hojas de datos. Luego a través de un regulador de tensión se obtienen 3,3 V utilizados para alimentar el microcontrolador.

El equipo fue diseñado para ser alimentado con una fuente externa de tensión continua, simplificando así cuestiones regulatorias de certificación que deben cumplir equipos que se alimentan directamente a la red eléctrica.

3.1.3. Etapa de comunicación

El módulo NodeMCU es una placa de desarrollo que contiene el SoC ESP32-WROOM. A partir del estudio de su diseño, se implementó la etapa de conversión SERIAL-USB que puede observarse en la figura 3.2.

Etapa Reguladora de Tensión
Entrada 24–46Volt
Salida 5V hacia Integrado TMC130
Salida 3.3V hacia microcontrolador con diodo de protección



3. Descargar el firmware con el software de desarrollo.

La interfaz UART CP2102 consta de señales de transmisión y recepción de datos TX y RX respectivamente, también admite las señales de control RTS/CTS, DSR/DTR y X-On/X-Off. En el diseño se incorporó el uso de las terminales DTR y RTS para generar la secuencia de descarga de manera automática. Sin embargo la misma presentó cierta inestabilidad y no siempre se logró generar la secuencia correctamente, por tal motivo se implementará en la nueva versión de la placa botones para poder forzar dicha secuencia.

3.1.4. Driver TMC5130

El módulo TMC5130-EVAL, como se describió en la sección 2.2, contiene al CI TMC5130. Del estudio de esta placa de evaluación se extrajeron las configuraciones necesarias para lograr la correcta utilización del driver. Se tuvieron en cuenta las recomendaciones de diseño establecidas por el fabricante, como por ejemplo: la incorporación de un clock externo de 16 MHz como se observa en la figura 3.3 el cual es necesario en aplicaciones de alta precisión.

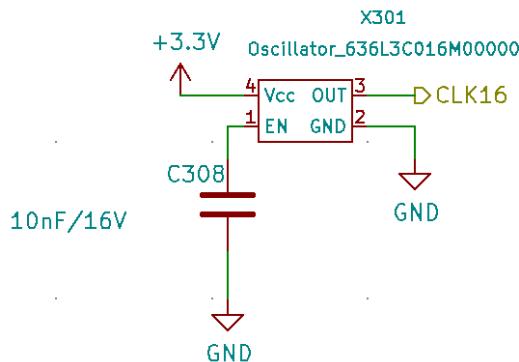


FIGURA 3.3. Clock para el CI TMC5130.

A continuación se observa en la figura 3.4 las conexiones del driver con el motor paso a paso y el puerto SPI utilizado para la comunicación con el microcontrolador.

Finalmente, se observa en la figura 3.5 el diseño 3D generado por el software KICAD.

Todo el diseño y material asociado se encuentra disponible en el repositorio de la empresa TECSCI [3]. La placa electrónica de este equipo dip coater cuenta con una licencia CERN OHL v.1.2 [25].

3.1.5. Fabricación

La placa electrónica se fabricó con el proveedor local de circuitos impresos Ernesto Mayer S.A. [26]. A continuación se presenta la información de diseño de la misma y se describen algunas restricciones de diseños impuestas por el fabricante:

- Grilla de posicionamiento principal: 0.25 mm.
- Grilla de ruteo principal: 0.25 mm.

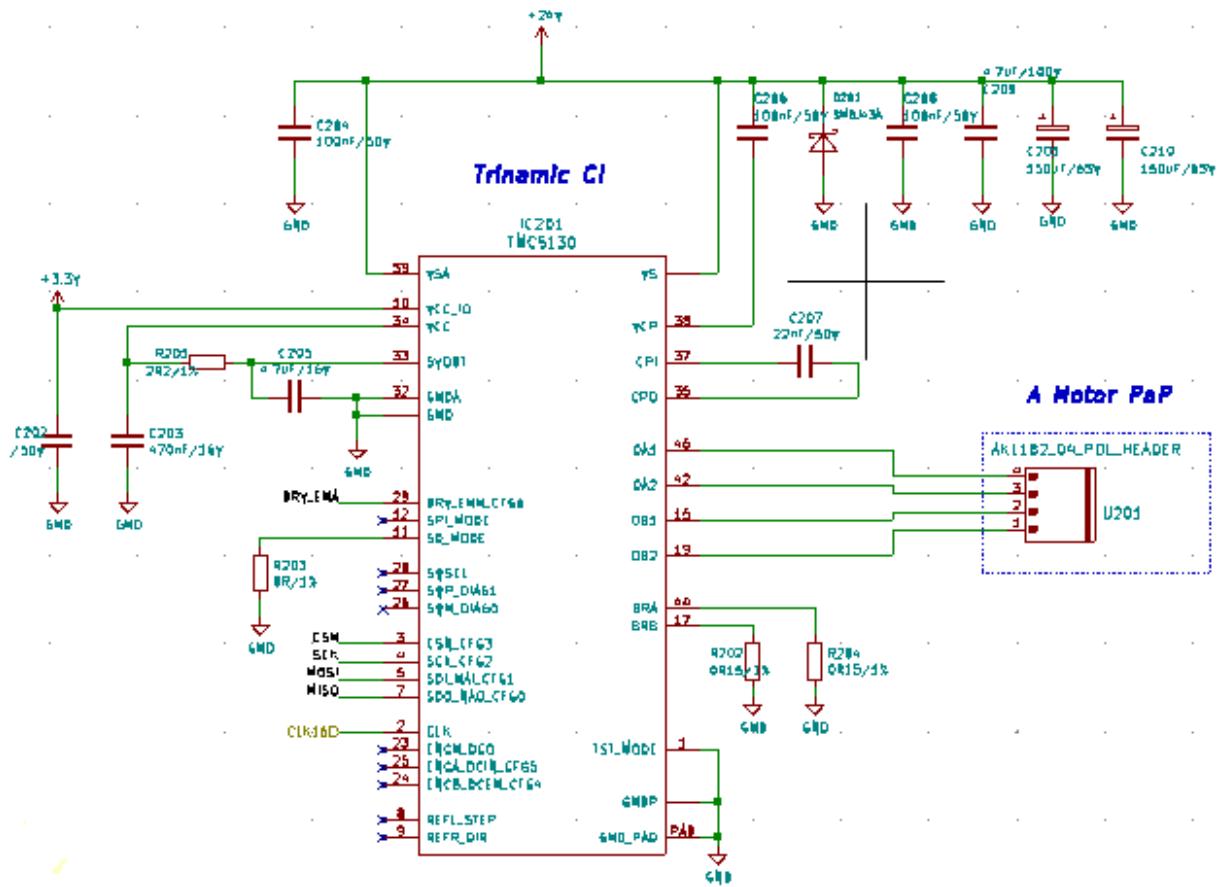


FIGURA 3.4. CI TMC5130.

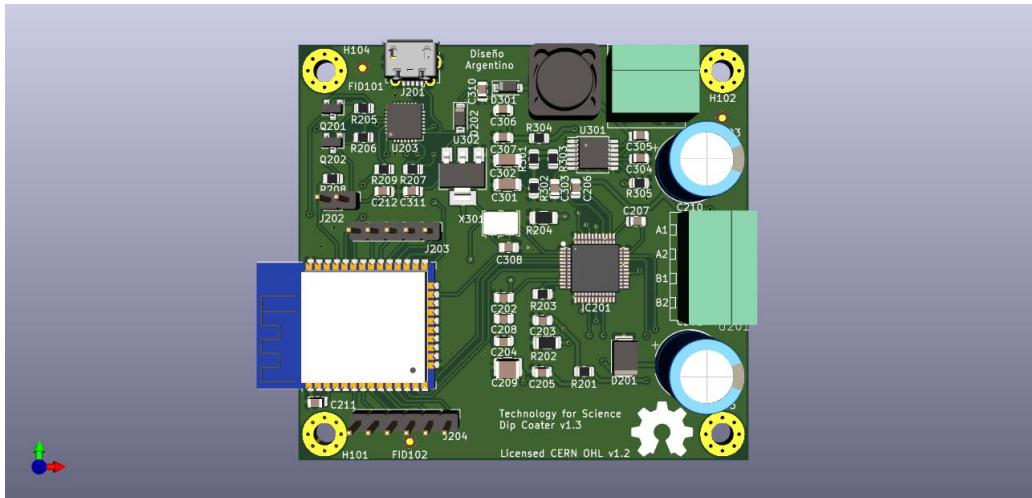


FIGURA 3.5. Modelo 3D Kicad.

- Agujeros de montaje: 3.2 mm.
 - Pistas principales: 0.5 mm.
 - Pistas inferiores: 0.25 mm (límite particular 8 mils(0.20mm)).
 - Pistas superiores: 0.8 mm.

- Vías: 0.8 mm /0.4 mm (límite particular 8 mils(0.20mm)).
- Margen general: 0.22 mm.
- Margen particular: 0.2 mm (límite particular 8 mils(0.20 mm)).
- Fabricación: espesor 1.6mm FR4.
- Restricciones generales del fabricante: estándar 10 mils(0.254 mm).

Luego de fabricar el PCB, se continuó con el montaje de componentes electrónicos superficiales, que estuvo a cargo de la empresa Asemblí S.A. [27]. Se fabricó un primer lote de cinco placas. A continuación en la figura 3.6 se observa la placa con sus componentes montados.

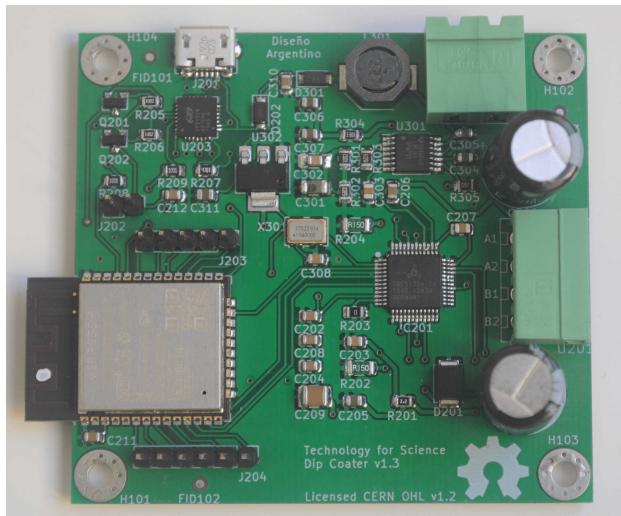


FIGURA 3.6. Placa fabricada MAYER SRL.

3.2. Firmware

3.2.1. Capas de abstracción

Para la implementación del firmware se trabajó con el *framework* ESP-IDF [28] provisto por el fabricante del microcontrolador. Dicho entorno se ejecuta sobre FreeRTOS, que es un sistema operativo de tiempo real utilizado en dispositivos embebidos que permite un desarrollo de software bajo un esquema multi-tareas.

Se desarrolló un firmware modular que atomiza el funcionamiento en diferentes bloques de software, lo cual permite incorporar código de manera incremental y ordenada. Se observan en la figura 3.7 las capas de abstracción de software implementadas.

La idea principal de esta modularización es la de no permitir llamados a funciones entre capas discontinuas. Los módulos de la capa superior o capa APP solo pueden hacer llamados a funciones de la capa intermedia o capa API (*Application Programming Interfaces*) y estos últimos solo pueden llamar a funciones de la capa inferior o capa BOARD.

La capa tres corresponde a la capa de aplicaciones. El firmware cuenta con 3 aplicaciones fundamentales para el funcionamiento del equipo y una aplicación de

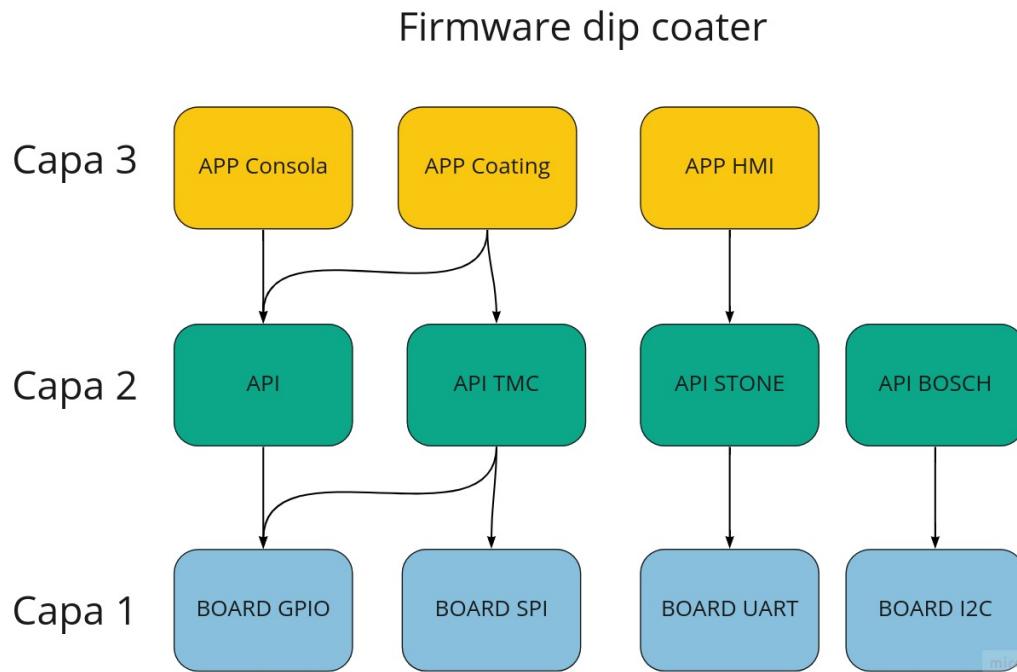


FIGURA 3.7. Capas de abstracción de software.

testing utilizada para probar nuevos componentes de software. Cada aplicación contiene al menos una *task* del sistema operativo freeRTOS.

- APP coating: se encarga de la comunicación con el driver TMC5130 y de la ejecución de todos los movimientos.
- APP consola: administra una consola de comandos que permite ejecutar y configurar el equipo a través de una comunicación serial, recibe comandos en la consola serial y los envía a través de una cola de freeRTOS a la app coating para ser procesados.
- APP hmi: administra la interfaz de configuración, establece una comunicación serial con la pantalla táctil, recibe comandos a través de una cola de freeRTOS y los envía a la app coating para ser procesados.
- APP test: se utiliza para probar nuevos componentes y realizar tests sobre el sistema. Se activa y desactiva según la necesidad de uso.

La capa dos esta compuesta por bloques de código provistos por los fabricantes de drivers.

- API TMC: provista por el fabricante Trinamic y adaptada para ser ejecutada bajo el framework ESP-IDF.
- API BOSH: provista por el fabricante y adaptada a este firmware.
- API TECSCI: contiene los módulos de software para el manejo de la capa BOARD, es un módulo que está en constante crecimiento con los diferentes desarrollos que la compañía TECSCI.

La capa uno interacciona con los módulos de hardware del microcontrolador, es decir, que esta capa es la única que contiene todos los llamados a funciones disponibles en el framework ESP-IDF, llamados a periféricos como por ejemplo:

UART, GPIO, SPI, I2C entre otros, son realizados desde esta capa. En el caso de que en un futuro se quiera realizar un cambio de microcontrolador, esta sería la única capa que debería reescribirse en mayor medida, permitiendo así reutilizar el software escrito en capas superiores.

Cabe aclarar que este diseño de software es un concepto que se fue implementando a través de las sucesivas refactorizaciones del firmware actual, es posible entonces encontrar algunas excepciones al mismo que se irán corrigiendo en futuras actualizaciones.

3.2.2. Módulos principales de software

Control de movimientos

La aplicación app coating contiene toda la lógica de control de movimientos, la misma se encarga de realizar la configuración inicial del driver TMC5130, de ejecutar los procesos completos de dip coating y de procesar comandos individuales para generar diferentes tipos de movimientos.

Como se mencionó en la subsección 2.2.1 la configuración inicial del driver es compleja, por tal motivo se utilizo el software TMCL-IDE provisto por el fabricante para realizar la configuración de los registros de manera interactiva. Cabe destacar que con este software se pueden configurar todos los driver que la compañía ofrece, abarcando desde motores paso a paso hasta servomotores, motores brushless y de corriente continua.

En esta etapa de configuración es recomendable que el motor este acoplado al eje lineal, junto con el tornillo, la tuerca y el carro ya que el driver registra la corriente que circula por las bobinas del motor y calcula la fuerza contraelectromotriz que el eje esta ejerciendo. En la siguiente figura 3.8 se observa el entorno de desarrollo TMCL-IDE.

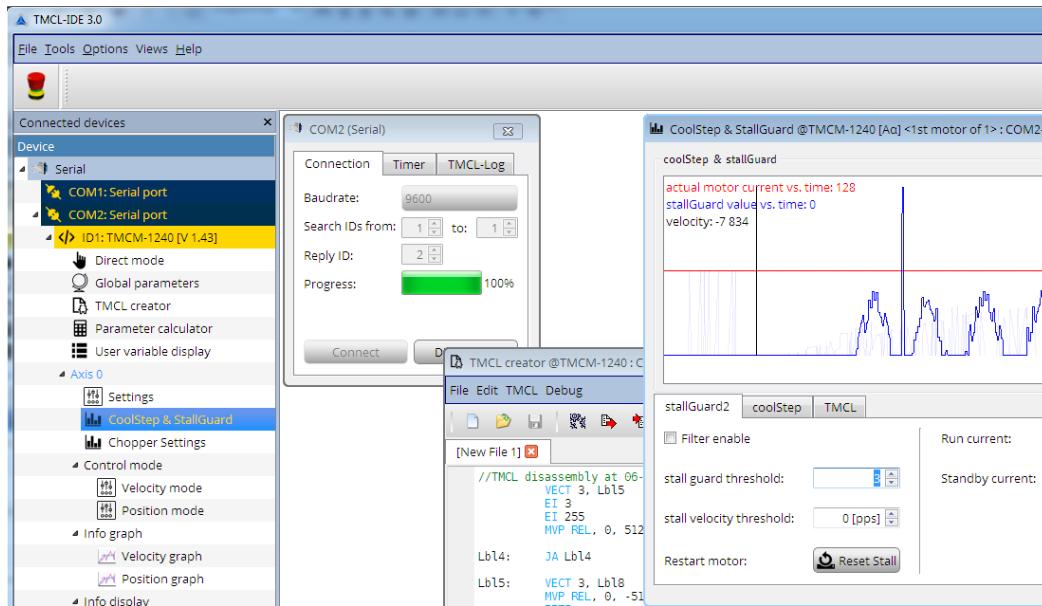


FIGURA 3.8. Software TMCL-IDE.

A continuación en la figura 3.9 se puede observar el *wizard* de configuración de las funciones *stallguard2* y *coolstep*. Como se mencionó en el capítulo 2 es posible

usar stallguard2 para detectar los límites mecánicos de recorrido. El parámetro *stall guard threshold* relaciona la fuerza contraelectromotriz registrada por el driver. A medida que se detecta mayor fuerza, es decir mayor oposición al movimiento y mayor corriente en los motores, el valor de stallguard2 disminuye. Se debe configurar entonces un valor de detección para que el driver generare un evento.

El firmware cuenta con una función llamada *mod-coating-process-cero-machine* que se encarga de detectar el evento que el driver envía cuando se detecta un final de carrera. La misma se encarga de parar el motor, generar un desplazamiento en sentido contrario y establecer una nueva posición.

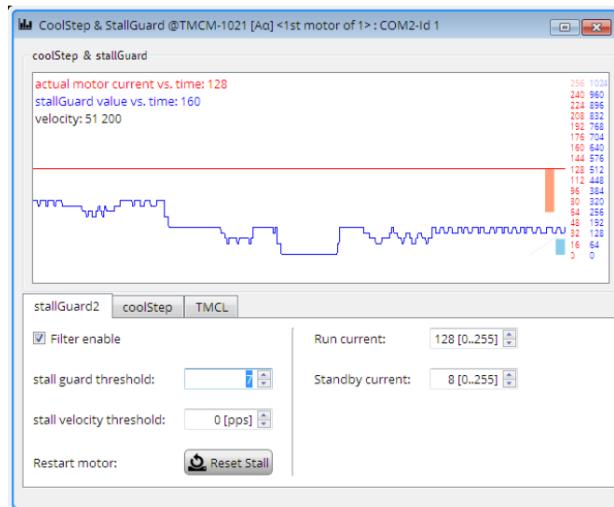


FIGURA 3.9. Configuración de funcionalidades stalldguard2 y coolstep.

Otros parámetros importantes a configurar son los que definen la rampa de aceleración de los desplazamientos. El driver permite configurar una rampa de aceleraciones de seis puntos. Se observa en la figura 3.10 los parámetros A1, AMAX, D1, DMAX, V1 y VMAX que deben configurarse para definir el movimiento, los mismos son parámetros de aceleración, desaceleración y velocidad.

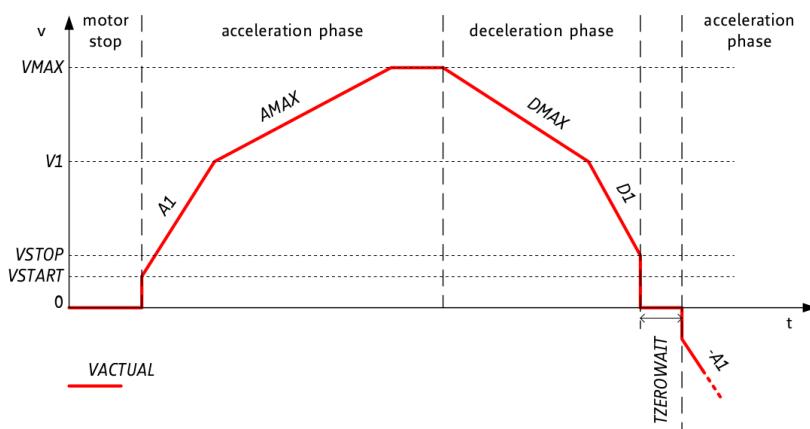


FIGURA 3.10. Configuración de rampa de seis puntos.

Todos los movimientos del equipo dip coater están definidos de la siguiente manera.

```

1 // Velocidad
2 //V1
3 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_V1, (arg->velocity) / 2);
4 //VMAX
5 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VMAX, arg->velocity);
6 //VSTART
7 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VSTART, 0);
8 //VSTOP
9 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VSTOP, 100);

10 // Seteo Aceleracion
11 //A1
12 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_A1, arg->acceleration);
13 //AMAX
14 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_AMAX, arg->acceleration);

15 // Seteo Desaceleracion
16 //DMAX
17 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_DMAX, arg->acceleration);
18 //D1
19 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_D1, arg->acceleration);

```

CÓDIGO 3.1. Macros para configurar de desplazamientos.

Para el control de los movimientos se optó por generar una rampa de cuatro puntos que el usuario puede configurar según lo deseé. Se implementó entonces la siguiente relación de variables:

- A1 = AMAX (Aceleración establecida por usuario).
- D1 = DMAX (Desaceleración establecida por usuario).
- VMAX (Velocidad establecida por usuario).
- V1 = VMAX / 2 (Velocidad fija del movimiento).

App coating puede recibir a través de implementaciones de colas de FreeRTOS comandos de ejecución desde la app hmi y desde app consola.

Interfaz usuario-máquina

Las aplicaciones app consola y app hmi se encargan de la comunicación con el usuario del equipo y son las encargadas de enviar mensajes a la aplicación app coating que ejecuta y controla los movimientos. El equipo dip coater puede ser utilizado de dos maneras diferentes detalladas a continuación:

1. A través de una consola de comandos.
2. A través de la pantalla táctil.

Ambas opciones permiten ejecutar un ciclo completo de dip coating y también permiten ejecutar comandos de manera individual.

App consola permite establecer un canal de comunicación entre el equipo dip coater y un ordenador a través de una comunicación UART. Como se mencionó en la subsección 3.1.1 la placa electrónica incorpora un conversor UART-USB que permite conectar el equipo directamente a través de un cable USB. Se observan a continuación los comandos definidos en la consola para poder interactuar.

```

setcommandcustomapp [--dv=<n>] [--da=<n>] [--dw=<n>] [--uv=<n>] [--ua=<n>] [--uw=<n>] [--ln=<n>]
  Dip Coating Set Program Custom
    --dv=<n> Down Velocity
    --da=<n> Down Acceleration
    --dw=<n> Down Wait ,ms
    --uv=<n> Up Velocity
    --ua=<n> Up Acceleration
    --uw=<n> Up Wait, ms
    --ln=<n> Total Loop

cerosample
  Dip Coating Program Set Cero of sample

depthsample [-d <n>]
  Dip Coating Program Set Delta Depth Sample
    -d <n> Delta Depth Sample [mm]

ceromachine
  Dip Coating Set Cero Machine

run
  Dip Coating Start

downfast
  Dip Coating Down Fast

down
  Dip Coating Down

downslow
  Dip Coating Down Fast

upfast
  Dip Coating Up Fast

up
  Dip Coating Up

upslow
  Dip Coating Up Slow

stop
  Dip Coating Emergency Stop

```

FIGURA 3.11. Comandos de movimientos.

El comando *setcommandcustomapp* permite ejecutar el proceso completo dip coating, para hacerlo hay que cargar todos los parámetros requeridos por el comando que se detallan a continuación:

1. Velocidad y aceleración para abajo y arriba.
2. Tiempos de espera en posición superior y inferior.
3. Cantidad de veces de repetición de ciclo.
4. Posición inicial de comienzo del movimiento.
5. Distancia total que de recorrido.

El resto de los comandos *ceromachine*, *down*, *downfast*, *up*, *upfast*, *depthsample* entre otros permiten movimiento simples que sirven por ejemplo para posicionar la muestra.

También como se observa en la figura 3.12 existen comandos como *read-register*, *write-register* que sirven por ejemplo para leer o escribir registros del driver, los cuales son muy importantes para poder consultar el estado de los mismos en todo momento.

```

data
  Dip Coating Read all data saved

ena
  Dip Coating General Enable Driver TMC5130

dis
  Dip Coating General Disable Driver TMC5130

reset
  Dip Coating Reset

timestamp
  Dip Coating System Time

read_register_tmc [-a <n>]
  Read TMC Register
  -a, --address to write=<n> Write TMC Register [HEX]
  -v, --value=<n> Write TMC Register [HEX]

write_register_tmc [-a <n>] [-v <n>]
  Write TMC Register
  -a, --address to write=<n> Write TMC Register [HEX]
  -v, --value=<n> Write TMC Register [HEX]

```

FIGURA 3.12. Comandos de control.

Como ejemplo se observa a continuación en la figura 3.13 una consulta al registro XACTUAL[0x21] que expresa la posición actual en micro pasos desde la referencia inicial y otra consulta al registro XTARGET[0x2D] cuyo valor expresa la posición objetivo en micro pasos que se deseé alcanzar. En este ejemplo XACTUAL es igual a XTARGET ya que el equipo estaba detenido. Para ejecutar un movimiento se debe configurar una nueva posición en XTARGET para accionar el motor hasta que XACTUAL sea igual a XTARGET.

```

tecscl_dipcoater> read_register_tmc -a 0x21
I (1572337) mod_console_commands: Address->0x21 Value->0x00108e95
tecscl_dipcoater> read_register_tmc -a 0x2D
I (1580067) mod_console_commands: Address->0x2d Value->0x00108e95
tecscl_dipcoater> █

```

FIGURA 3.13. Lectura de registros del driver TMC5130.

Cada vez que el usuario ejecuta un comando de movimiento en la consola, la aplicación *app console* procesa y envía el mensaje a través de una cola de FreeRTOS hacia la aplicación *app coating*. Si la máquina está ejecutando un movimiento individual o un proceso dip coating completo y recibe un comando nuevo, el mismo por seguridad es descartado, es decir que los mensajes no se encolan. En la figura 3.14 se observa que luego de iniciar el proceso dip coating se envía el comando DOWN y el mismo es descartado sin afectar el proceso.

El único comando de movimiento que no es descartado es el comando STOP, el cual tiene un tratamiento especial y en cualquier caso siempre se garantiza su ejecución.

```

I (1179177) app_hmi: state_window_running_program_
I (1179277) mod_coating_process : Proceso Iniciado - Motor Encendido
I (1179277) mod_coating_handlers: HandlerDownUntil
I (1179277) mod_coating_handlers: Vel:212000
I (1179287) mod_coating_handlers: Accel:65000
I (1179287) mod_coating_handlers: Desplazamiento hasta fluido en pasos:1549920

tecscl_dipcoater> down
E (1181577) mod_console_commands: Comando DOWN descartado, maquina trabajando
Command returned non-zero error code: 0x1 (ERROR)
tecscl_dipcoater> I (1185727) mod_coating_handlers: HandlerWait
I (1187727) mod_coating_handlers: HandlerDownLoop
I (1187727) mod_coating_handlers: Vel:226120
I (1187727) mod_coating_handlers: Accel:308187
I (1188977) mod_coating_handlers: HandlerWaitDown
I (1189977) mod_coating_handlers: HandlerUpLoop
I (1189977) mod_coating_handlers: Vel:226120
I (1189977) mod_coating_handlers: Accel:308187
I (1191227) mod_coating_handlers: HandlerWaitUp
I (1192227) mod_coating_handlers: HandlerFinish

```

FIGURA 3.14. Comandos DOWN descartado por equipo en funcionamiento.

```

I (1250627) mod_coating_process : Proceso Iniciado - Motor Encendido
I (1250627) mod_coating_handlers: HandlerDownUntil
I (1250627) mod_coating_handlers: Vel:212000
I (1250637) mod_coating_handlers: Accel:65000
I (1250637) mod_coating_handlers: Desplazamiento hasta fluido en pasos:129160

tecscl_dipcoater> stop
I (1252957) mod_console_commands: Comando STOP recibido
tecscl_dipcoater>

```

FIGURA 3.15. Comandos de STOP procesado.

Pantalla táctil

Comandos Json

Parámetros de calibración

La carpeta /components/config contiene tres archivos de configuración importantes.

- hardware.h: contiene todas las macros referidas a los pines de conexión del modelo de microcontrolador utilizado.
- os-config.h: contiene las macros de configuración de las tareas de FreeRTOS tal es el caso de tamaños, prioridades, y periodos de tiempo entre otras.
- machine.h: contiene las macros relacionadas con la calibración del equipo.

La macro más importante configurada en el archivo machine.h es MACHINE STEPS PER MILLIMETER y es necesario que este bien definida. En la sección 4.3 se demuestra el procedimiento realizado para definir su valor. Esta macro define la cantidad de micro pasos necesarios para generar el desplazamiento de 1 mm. La misma esta completamente relaciona con el paso del tornillo acoplado al eje del motor.

Con este valor de micro pasos por milímetro se pueden calcular los factores de corrección de unidades utilizados por el driver TMC5130. Las unidades de posición son expresados en unidades de micro pasos, las unidades de velocidad en micro pasos sobre segundos y las unidades de aceleración en micro pasos sobre segundos al cuadrado.

Se observa en la figura 3.16 extraída de la hoja de datos del driver TMC5130 [15] los factores de corrección que deben aplicarse cuando se cuenta con un clock externo incorporado en el circuito electrónico.

PARAMETER VS. UNITS		
Parameter / Symbol	Unit	calculation / description / comment
f _{CLK} [Hz]	[Hz]	clock frequency of the TMC5130A in [Hz]
s	[s]	second
US	µstep	
FS	fullstep	
µstep velocity v[Hz]	µsteps / s	v[Hz] = v[5130A] * (f _{CLK} [Hz]/2 / 2 ²³)
µstep acceleration a[Hz/s]	µsteps / s ²	a[Hz/s] = a[5130A] * f _{CLK} [Hz] ² / (512*256) / 2 ²⁴

FIGURA 3.16. Unidades.

Como se mencionó en la subsección 2.2.1 el equipo se configuró con 51200 micro pasos por vuelta completa.

```

1
2 #define MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER (12916)
3 #define MACHINE_EXT_CLOCK (16000000) //16MHz
4
5
6 /*FACTOR*/
7 /*((MACHINE_EXT_CLOCK/2)*(1/8388608))*/
8 #define MACHINE_USTEPS_VELOCITY_FACTOR (0.9536743164)
9 /*((MACHINE_EXT_CLOCK*MACHINE_EXT_CLOCK)/(512*256)/(16777216))*/
10 #define MACHINE_USTEPS_ACCELERATION_FACTOR (116.4153218)
11
12
13 /*UPPER AND LOWER MECHANICAL LIMIT*/
14
15 #define MACHINE_CONTROL_MECHANICAL_UPPER_LIMIT (
16     MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER * 10 ) // 10mm
16 #define MACHINE_CONTROL_MECHANICAL_LOWER_LIMIT (
17     MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER * 290) // 290mm

```

CÓDIGO 3.2. Macros de desplazamiento y factores de conversión.

3.3. Estructura mecánica

3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC Etapa CAD

Como se mencionó en la sección 2.4 se utilizó para el diseño mecánico del equipo el software BOBCAD. El módulo CAD del software permite realizar modelos 2D y 3D de pieza necesarios para la fabricación. El prototipo dip coater cuenta actualmente con dos piezas mecanizadas en aluminio.

Se observa en la figura 3.17 la pieza que se acopla al carro de la guía lineal presentada en la sección 2.4.

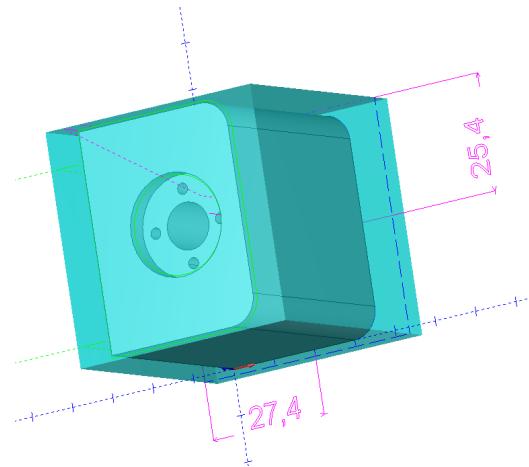


FIGURA 3.17. Pieza personalizada soporte de carro.

Y en la figura 3.18 el soporte superior que sostiene el motor paso a paso y el tornillo que esta acoplado al eje del motor.

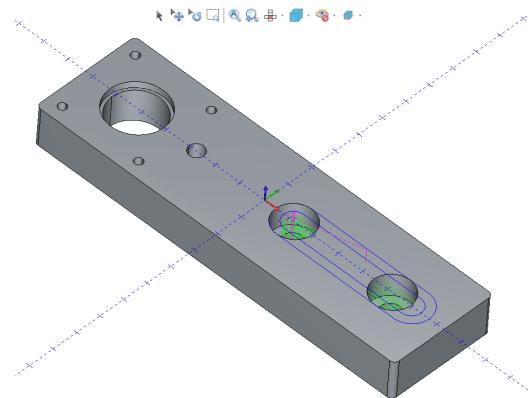


FIGURA 3.18. Piezas personalizada soporte de estructura superior.

Con el modelo 3D diseñado se fabricó una primera versión a través de impresión 3D en plástico, luego que las piezas fueron probadas, testeadas y aprobadas en el prototipo se paso a la fabricación en aluminio.

Etapa CAM

La estrategia utilizada en el mecanizado es por el método de arranque de viruta, es decir que se parte de un bloque de aluminio con volumen de material suficiente y se desbasta con herramientas de corte hasta modelar la pieza. Esta estrategia se programa en la parte CAM del software, se puede observar en la figura 3.19 un listado de las operaciones realizadas para la fabricación de una pieza.

Existen diferentes estrategias de mecanizado para diferentes tipos de operaciones tal es el caso de refrentado, vaciado, fresado de chaflán, taladro, roscado entre otras. Cada una de estas funciones en general se realizan con herramientas específicas que son definidas en la configuración del software. Estas piezas se fabricaron en dos etapas, primero se mecanizó la parte superior de las mismas y luego de una rotación de 180 ° se terminó de mecanizar la parte inferior.



FIGURA 3.19. Estrategias de mecanizado en software Bodcad.

El material mecanizado fue aluminio 6061, el mismo es una aleación endurecida compuesta por aluminio, magnesio y silicio, la elección se basó en que el mismo puede someterse a tratamientos de anodizado posteriores. El anodizado es un tratamiento electrolítico, que genera una capa superficial de óxido de aluminio (alúmina), de espesor superior que el aluminio en estado natural, tiene como ventajas la protección contra atmósferas agresivas, agentes químicos y una mayor dureza superficial.

Finalmente en la figura 3.20 se observan ambas piezas fabricadas.

3.3.2. Modelos 3D y real

A continuación en la figura 3.21 se presenta el primer modelo 3D diseñado de equipo dip coater.

Se detallan a continuación los siguientes componentes fundamentales del equipo:

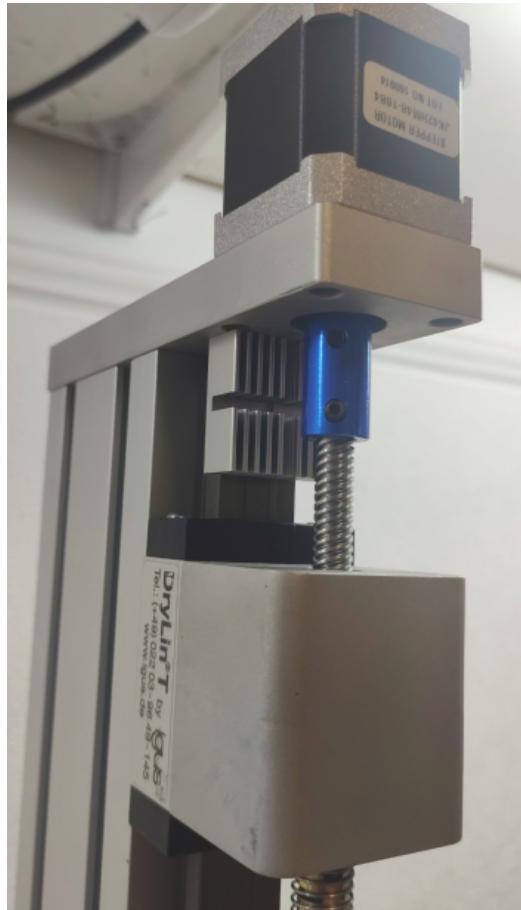


FIGURA 3.20. Piezas fabricadas en centro de mecanizado.

- Guiás lineales IGUS
- Mecanizado soporte superior y mecanizado carro
- Placa electrónica
- Pantalla táctil 4.3 inch

Luego de sucesivas iteraciones con pruebas de piezas impresas en material plástico se logró fabricar un primer prototipo completamente en metal que se presenta a continuación en la figura 3.22.

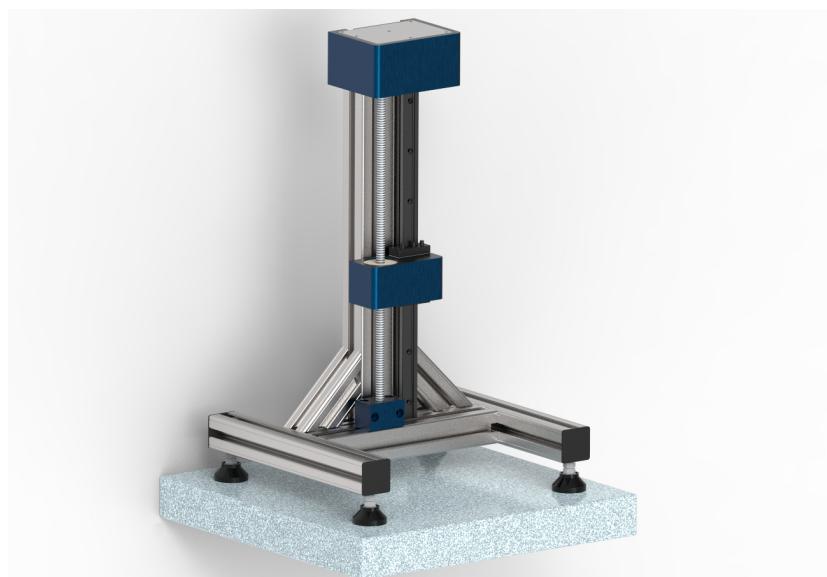


FIGURA 3.21. Modelo 3D.



FIGURA 3.22. Primer prototipo dip coater TECSCI.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Pruebas funcionales de hardware

En el presente capítulo se explican los ensayos realizados sobre el prototipo de equipo dip coater, se presentan y analizan los resultados obtenidos y se introducen posibles cambios para próximas versiones.

4.1.1. Comunicación con periféricos

El presente ensayo se realizó para verificar la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y el CI TMC5130, como se mencionó en el capítulo 3 dicha comunicación se establece a través del protocolo SPI.

El comunicacion con el CI TMC5130 està definida por un datagrama de 5 bytes, el primer byte define la dirección del registro y los 4 bytes restantes representan el valor del registro.

A continuación en la figura 4.1 se observa la estructura de datos para leer y escribir registros.

SPI DATAGRAM STRUCTURE																	
MSB (transmitted first)			40 bit						LSB (transmitted last)								
39 0							
→ 8 bit address ← 8 bit SPI status	↔ 32 bit data																
39 ... 32				31 ... 0													
→ to TMC5130A RW + 7 bit address ← from TMC5130A 8 bit SPI status	8 bit data			8 bit data			8 bit data			8 bit data							
39 / 38 ... 32	31 ... 24			23 ... 16			15 ... 8			7 ... 0							
w	38...32	31...28	27...24	23...20	19...16	15...12	11...8	7...4	3...0								
3 9	3 8	3 7	3 6	3 5	3 4	3 3	3 2	2 1	2 0	1 9	0 8						
3 9	3 8	3 7	3 6	3 5	3 4	3 3	3 2	2 1	2 0	1 9	0 8						
3 9	3 8	3 7	3 6	3 5	3 4	3 3	3 2	2 1	2 0	1 9	0 8						

FIGURA 4.1. Datagrama de 40 bits.

Las operaciones de lectura y escritura tienen una diferencia, que se ve representada por el bit más significativo de la trama de datos, es decir el bit 39. Cuando la operación es de lectura, el primer byte que representa la dirección del registro no sufre alteración. Cuando la operación es de escritura, se debe establecer en 1 el bit de la posición 39. Por ejemplo, si se pretende escribir un valor en el registro [0x22], el primer byte del datagrama debería ser $[0x22 + 0x80 = 0xA2]$, sumar $[0x80]$ representa poner en 1 el primer bit del byte más significativo del datagrama.

Para realizar el ensayo se conectó provisoriamente un analizador lógico USB a la placa electrónica, específicamente sobre los terminales que establecen la comunicación SPI entre el microcontrolador y el CI TMC5130. Se puede observar en la siguiente figura 4.2 el banco de prueba.

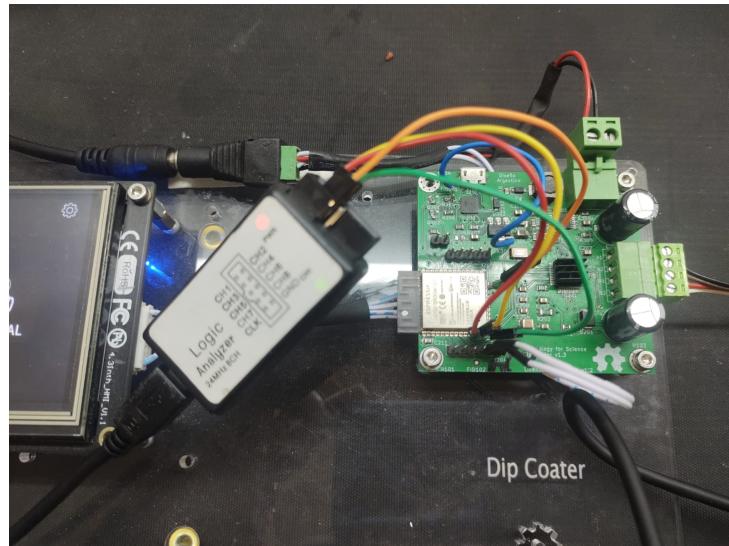


FIGURA 4.2. Ensayo sobre terminales SPI.

El procedimiento realizado fue el siguiente:

1. Se conectó el equipo dip coater con el software Putty para establecer una consola de comandos.
2. Se ejecutó el software del analizador lógico y se comenzó el registro de datos.
3. Se ejecutó el comando de lectura del registro [0x2D].
4. Se ejecutó el comando de escritura del registro [0x2D] con valor [0x00 0xFF 0x00 0x00].
5. Se realizó nuevamente una lectura del registro [0x2D] y para verificar el valor ingresado en el ítem anterior.

En la figura 4.3 se observa la ejecución del comando de lectura sobre el registro [0x2D].

- MOSI: [0x2D][0x00 0x00 0x00 0x00].
- MISO: [0x29][0x00 0x01 0xF8 0x88].

En la figura 4.4 se observa la ejecución del comando de escritura sobre el registro [0x2D] con valor [0x00 0xFF 0xFF 0x00].

- MOSI: [0x2D + 0x80 = 0xAD][0x00 0xFF 0x00 0x00].
- MISO: [0x11][0x00 0x01 0xF8 0x88].

En la figura 4.5 se observa la ejecución nuevamente del comando de lectura sobre el registro [0x2D].

- MOSI: [0x2D][0x00 0xFF 0x00 0x00].

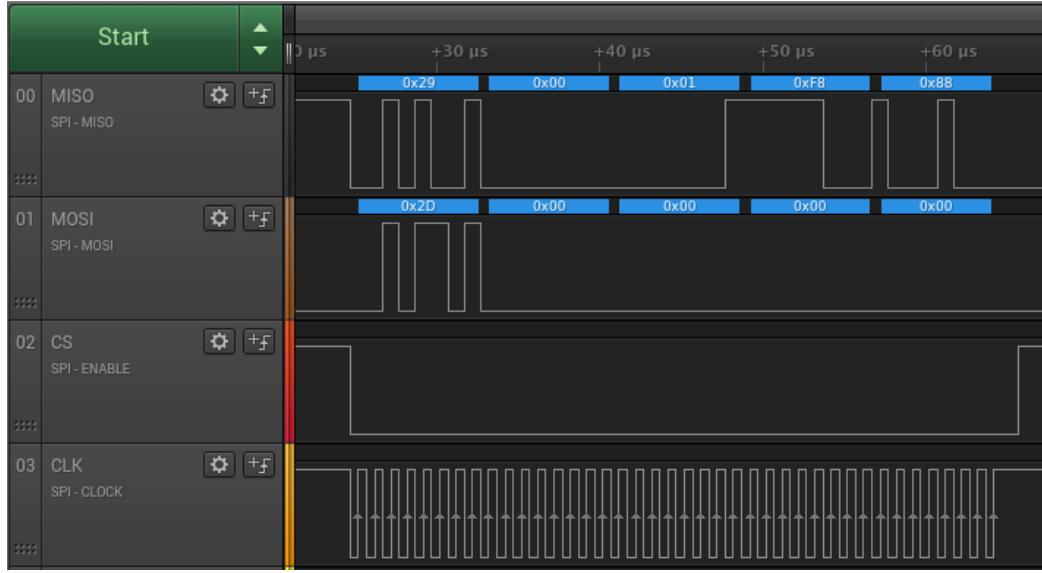


FIGURA 4.3. Comando de lectura sobre registro [0x2D].

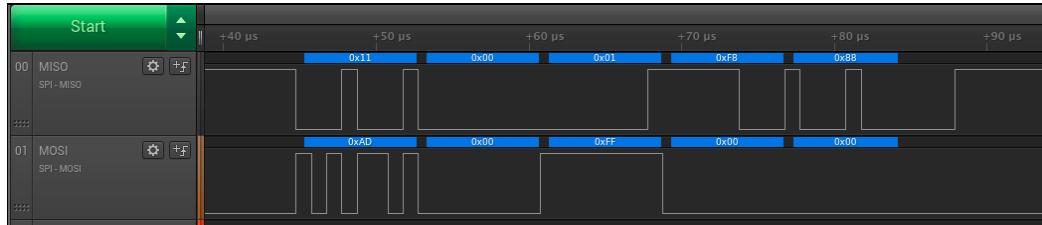


FIGURA 4.4. Comando de escritura sobre registro [0x2D].

- MISO: [0x11][0x00 0xFF 0x00 0x00].



FIGURA 4.5. Comando de lectura actualizado sobre registro [0x2D].

Se observa entonces que luego de estas operaciones el registro [0x2D] se actualizó correctamente con el valor [0x00 0xFF 0x00 0x00].

Con este ensayo se validó la correcta comunicación entre el microcontrolador y el CI TMC5130 para las operaciones de lectura y escritura de datos.

4.2. Pruebas funcionales firmware

4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos

El ensayo se realizó para verificar los parámetros que definen el desplazamiento de la muestra, es decir para verificar que las velocidades y aceleraciones que definen movimientos sean similares a las que surgen del cálculo teórico.

En el capítulo 3 se detalló la configuración de la rampa de seis puntos que define un movimiento y se mostró la configuración de los parámetros para obtener una rampa de cuatro puntos en donde la etapa de aceleración es igual a la etapa de desaceleración.

Dicha rampa está definida por la siguiente ecuación 4.1.

$$\vec{x} = \vec{x}_o + \vec{v}(t - t_o) + \frac{1}{2}\vec{a}(t - t_o)^2 \quad (4.1)$$

Por lo tanto, con los valores de aceleración, desaceleración, velocidad y desplazamiento se puede calcular el tiempo teórico necesario para la ejecución de un movimiento. A continuación en la siguiente tabla 4.1 se observan los valores de los parámetros ensayados.

TABLA 4.1. Ensayo de tiempos en desplazamiento

Velocidad (mm/min)	Aceleración-Desaceleración(m/min)	Desplazamiento(mm)
1 mm/min	100-500-1000-2100 m/min2	50 mm
10 mm/min	100-500-1000-2100 m/min2	50 mm
100 mm/min	100-500-1000-2100 m/min2	50 mm
200 mm/min	100-500-1000-2100 m/min2	50 mm
500 mm/min	100-500-1000-2100 m/min2	50 mm
800 mm/min	100-500-1000-2100 m/min2	50 mm

Para realizar el ensayo se programó una aplicación de prueba que realizaba el siguiente procedimiento:

1. Configuración de movimiento descendente con valores de velocidad, aceleración y desplazamiento.
2. Ejecución del movimiento y registro del tiempo del sistema.
3. Registro del tiempo del sistema al final del movimiento, cálculo de variación temporal y envío del dato por terminal UART.
4. Configuración y ejecución de movimiento ascendente con sus respectivos registros y envío de dato.
5. Incremento de la tabla hacia nuevos parámetros.
6. Repetición del ciclo.
7. Un ordenador conectado al equipo ejecuta un script de Python que almacena los datos recibidos en un archivo.

En la siguiente figura 4.6 se observa en el eje Y el tiempo en ms necesario para ejecutar cada movimiento, los dos puntos cercanos representan el descenso y

ascenso con los mismos parámetros de velocidad, aceleración y desplazamiento. El gráfico compara los tiempos teórico respecto a los tiempos registrados. A simple vista no se puede visualizar diferencias significativas entre ambos pares de puntos.

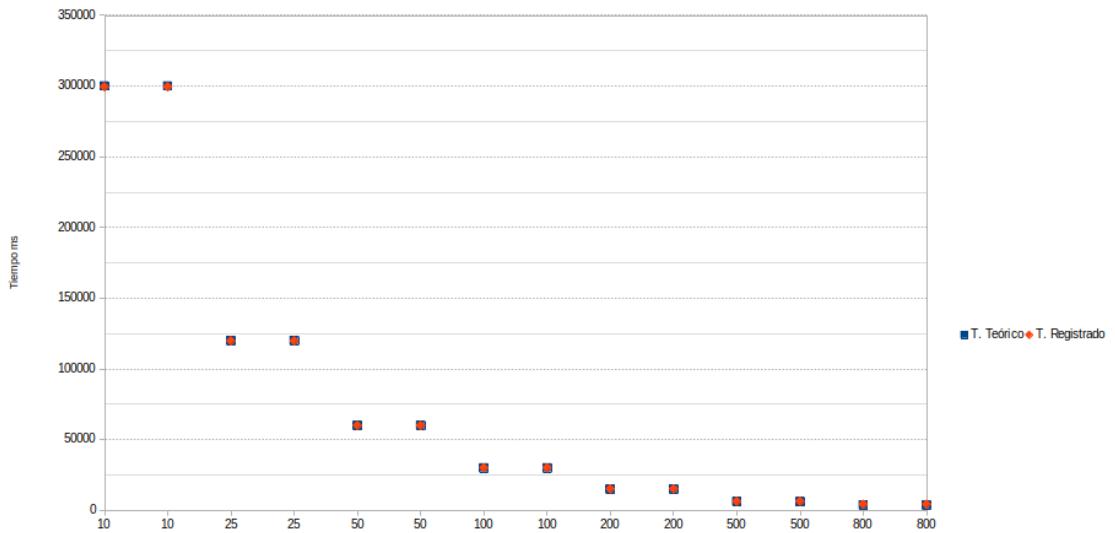


FIGURA 4.6. Comparación de tiempos teóricos y registrados.

Se presenta a continuación en la figura 4.7 un gráfico que representa los errores relativos porcentuales de las mediciones anteriores. Se puede deducir que existe un aumento del error relativo a velocidades altas, con un registro pico en la velocidad de 800 mm/min.

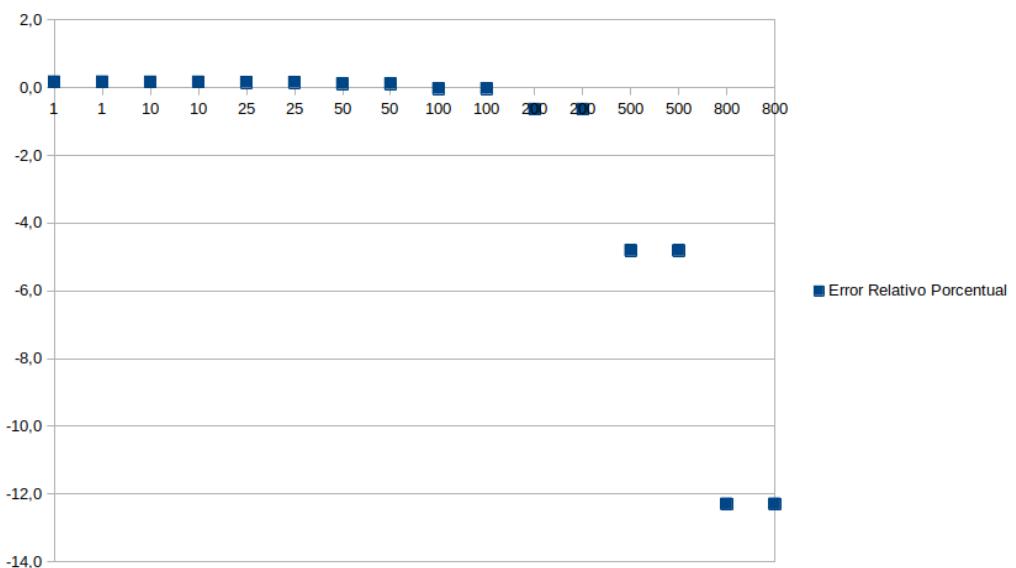


FIGURA 4.7. Error relativo porcentual.

Se concluye con este ensayo que el equipo es muy preciso en la mayor parte del rango para el cual fue diseñado teniendo un error relativo pico de 13 % en las velocidades superiores del rango de funcionamiento.

4.3. Calibración del equipo

4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos

Este ensayo se realizó para definir y ajustar la constante de desplazamiento que relaciona los micros pasos realizados por el motor con la distancia de desplazamiento del carro. La misma es una constante que está definida por las dimensiones del tornillo, es decir el paso del mismo, sobre el cual de desplaza el carro.

Para realizar las mediciones se utilizó un comparador digital de la marca Asimeto[29] el cual puede observarse en la figura 4.8, el mismo tiene una resolución de 0.0001 mm y permite desplazamientos de 0 a 50 mm.



FIGURA 4.8. Comparador digital Asimeto.

El ensayo consistió en medir seis desplazamientos sucesivos de 1 mm sobre el carro de manera descendente y luego de manera ascendente. Este ensayo es importante porque permite corregir la unidad de conversión de micro pasos a milímetros que utiliza el CI TMC5130 para realizar todos los movimientos. En la subsección 3.2.2 se mencionó la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* definida en el archivo hardware.h que surgió de este ensayo.

En la figura 4.11 se observa el banco de medición donde se visualiza el comparador Asimeto apoyado sobre una base metálica independiente con la punta del mismo en contacto directo con el carro de desplazamiento.

Para iniciar el ensayo se presiona el botón *origin* del comparador para poner en cero la medida, la sensibilidad del mismo es tan grande que es difícil lograr 0,000 mm debido a la acción misma de apretar el botón. Luego se realizan movimientos descendentes de 1 mm y se registran los datos. En la siguiente tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

De igual manera se confecciona la siguiente tabla 4.3 para los movimientos ascendentes.

Para corregir el valor de micro pasos por milímetros de desplazamiento se utilizó el siguiente procedimiento.

1. Realizar un promedio de los 6 errores relativos ascendentes y descendentes.
2. Ajustar el valor inicial de micro pasos con los respectivos errores.
3. Realizar un promedio entre el valor corregido ascendente y el valor corregido descendente.

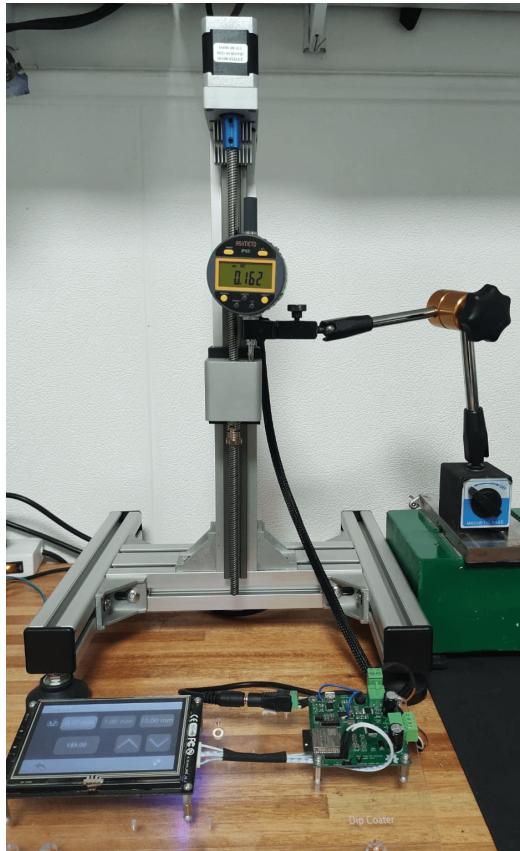


FIGURA 4.9. Ensayo de desplazamiento lineal.

Inicialmente al comenzar el ensayo la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* estaba definida con un valor de 12737 micro pasos por milímetros, luego de sucesivas correcciones la macro quedó definida en 12932 micro pasos por milímetros. Este ensayo se repitió cinco veces hasta llegar a los valores presentados en las tablas anteriores, en donde se observó que el porcentaje promedio de los errores relativos no afectaba en las décimas de milímetros.

4.4. Caso de prueba

4.5. Prueba de campo con personal capacitado

El siguiente ensayo consistió en una prueba completa del equipo dip coater con personal capacitado del Instituto de Nanosistemas. La prueba que se llevo a cabo consistió en realizar el primer *thin films* del equipo, se utilizó un wafer de silicio como sustrato y una solución de dioxido de titanio disuelto en etanol para formar un film de nanopartículas de titanio.

TABLA 4.2. Ensayo de desplazamiento lineal descendentes

Posición absoluta	Desplazamiento relativo	Error Relativo
0,058 mm		
1,051 mm	0,993 mm	0,007
2,035 mm	0,984 mm	0,016
3,034 mm	0,999 mm	0,001
4,054 mm	1,02 mm	-0,020
5,039 mm	0,985 mm	0,015
5,998 mm	0,959 mm	0,041

TABLA 4.3. Ensayo de desplazamiento lineal ascendentes

Posición absoluta	Desplazamiento relativo	Error Relativo
0,02 mm		
0,939 mm	0,019 mm	0,081
1,931 mm	0,992 mm	0,008
2,929 mm	0,998 mm	0,002
3,923 mm	0,994 mm	0,006
4,923 mm	1 mm	0
5,911 mm	0,988 mm	0,012



FIGURA 4.10. Ensayo completo en laboratorio.

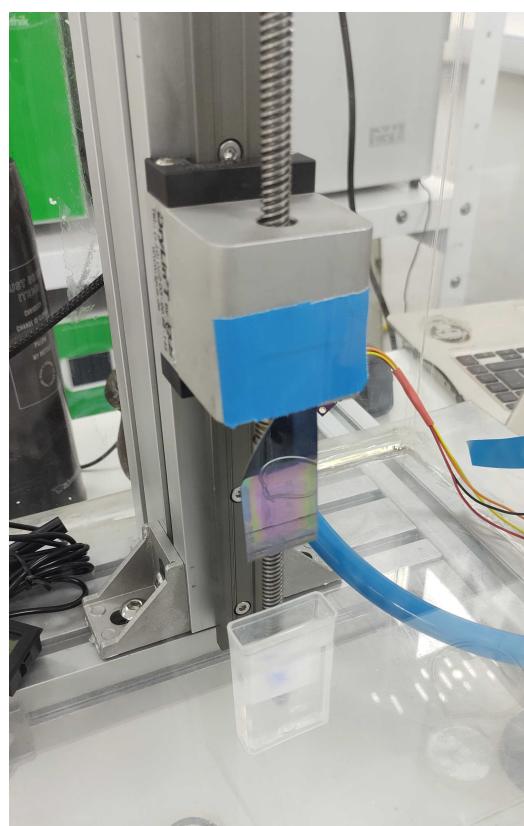


FIGURA 4.11. Ensayo con wafer de silicio.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones principales sobre la fabricación de un equipo dip coater, se detallan los logros más importantes del trabajo y se mencionan algunos puntos para mejorar en futuros trabajos. Por último se plantean los planes inmediatos de desarrollo, fabricación y comercialización del equipo.

5.1. Resultados obtenidos

El principal hito del trabajo fue fabricar un MVP (Producto Mínimo Viable) de equipo dip coater que cuente con las características suficientes para satisfacer las demandas de primeros usuarios. Se señalan a continuación los siguientes logros en el desarrollo del presente trabajo:

- Diseñar y fabricar un lote de cinco unidades con la primer versión de placa electrónica.
- Desarrollar un firmware modular que cumple con todos los requerimientos y permite incorporar nuevas funcionalidades sin cambios importantes en la estructura.
- Generar la capacidad técnica suficiente para fabricar las piezas mecanizadas del primer equipo.

Lamentablemente la planificación original no pudo ser sostenida. Abarcar íntegramente la fabricación de un MVP implicó demasiado trabajo para los tiempos y recursos establecidos. Existieron retrasos en el diseño y la fabricación mecánica lo que llevó a no poder estimar con exactitud los tiempos. Sin embargo, surge de este trabajo una base de conocimiento importante que permite comenzar con el desarrollo y la fabricación de otro MVP en tiempos más acotados y con una planificación más certera.

5.2. Próximos pasos

Se plantean los siguientes puntos fundamentales para el futuro inmediato del equipo:

- Se fabricará un lote nuevo de diez placas.
- Se incorporará un módulo de software para el registro de parámetros de humedad y temperatura , que será integrado con el desarrollo futuro de una cámara de humedad compatible con este equipo.

- Durante el mes de agosto del presente año, investigadores del INS (Instituto de Nanositemas) llevarán a cabo ensayos para caracterizar el equipo. El ensayo contemplará la generación de cincuenta *thin films* sobre soluciones químicas de TiO₂ y SiO₂ caracterizadas a través del método XRR (reflectometría de rayos-X). Surgirá de este ensayo un documento técnico con los resultados obtenidos.
- A través de un arreglo de cooperación se entregarán dos equipos a usuarios calificados para realizar pruebas funcionales y evaluar su satisfacción. Se realizarán cambios de ser necesario.
- Se trabajará en conjunto con un diseñador industrial para convertir este MVP en un producto comercial de la empresa TECSCI.

Bibliografía

- [1] OSH. *Open Source Hardware Association*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.oshwa.org/definition/spanish/>.
- [2] Martin Abel Gambarotta. *Firmware*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://gitlab.com/tecscli/dipcoater>.
- [3] Martin Abel Gambarotta. *Hardware*. Visitado el 15-03-2022. URL: https://github.com/martinch14/tecscli_dipcoater_hardware_kicad.
- [4] Nadetech. *Dip coating process*. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://nadetech.wordpress.com/2017/05/18/dip-coating/>.
- [5] Kibron. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.kibron.com/layerx-134>.
- [6] Biolin Scientific. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.biolinscientific.com/ksvnima/fabrication-and-deposition-of-thin-films/dip-coaters>.
- [7] Bungard. *Dip coater machine*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.bungard.de/en/machines/dip-coaters/rdc-15>.
- [8] Ossila. *Dip coater machine*. Visitado el 08-03-2022. URL: <https://www.ossila.com/products/dip-coater>.
- [9] Holmarc. *Dip coater machine*. Visitado el 10-03-2022. URL: https://www.holmarc.com/dip_coating_unit.php.
- [10] Trinamic. *Motion Control*. URL: <https://www.trinamic.com/>.
- [11] Kicad. *Open Source Electronics Design*. URL: <https://www.kicad.org/>.
- [12] Marco Faustini y col. «Preparation of Sol-Gel Films by Dip-Coating in Extreme Conditions». En: *J. Phys. Chem. C* 114.17 (2010), págs. 7637-7645. DOI: [10.1021/jp9114755](https://doi.org/10.1021/jp9114755). URL: <https://doi.org/10.1021/jp9114755>.
- [13] Nanotec. *Nema17*. Visitado el 29-03-2022. URL: <https://en.nanotec.com/products/250-st4118-stepper-motor-nema-17>.
- [14] Analog Devices. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.analog.com/en/index.html>.
- [15] Trinamic Motion Control. *TMC5130*. URL: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc5130a-ta/>.
- [16] TMC5130. *Schematic*. URL: <https://www.trinamic.com/support/eval-kits/details/tmc5130-eval/>.
- [17] Stoneitech. *HMI Stone Display*. URL: <https://www.stoneitech.com/>.
- [18] Perfiles de aluminio. *.Net*. Visitado el 22-03-2022. URL: <https://perfilesdealuminio.net/>.
- [19] Igus. *Plastics for longer life*. URL: <https://www.igus.com.ar/>.
- [20] Bobcad. *Bobcad CAD/CAM*. URL: <https://bobcad.com/>.
- [21] Fagor. *Fagor Automation*. URL: <https://www.fagorautomation.com/>.
- [22] Norma RS-274. *G-Code*. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823374.
- [23] ESP. *Espressif*. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://www.espressif.com/>.

- [24] NodeMCU. *Open Source Hardware*. Visitado el 24-03-2022. URL: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0>.
- [25] CERN. *Open Hardware Licence*. URL: <https://ohwr.org/cernohl>.
- [26] Ernesto Mayer S.A. *Fabricante de circuitos impresos*. URL: <https://www.mayerpcb.com/>.
- [27] Asembli. *Montaje de Componentes*. URL: <https://www.asembli.com/>.
- [28] ESP-IDF. *Framework Espressif*. Visitado el 13-05-2022. URL: <https://github.com/espressif/esp-idf>.
- [29] Asimeto. Visitado el 10-07-2022. URL: <https://www.asimeto.com/product-IP65-Digital-Indicators-Series-407.html>.