

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 | 13 |
| 2.6. Herramientas de desarrollo | 15 |
| 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 | 18 |
| 3.1.4. Driver TMC5130 | 19 |
| 3.1.5. Diseño final | 20 |
| 3.1.6. Fabricación | 21 |
| 3.2. Firmware | 22 |
| 3.2.1. Capas de abstracción | 22 |
| 3.2.2. Módulos principales de software | 23 |
| Funcionamiento general | 23 |
| Control de movimientos | 23 |
| Consola de comandos | 27 |
| Pantalla táctil | 29 |
| Registros de variables ambientales | 31 |
| Parámetros de calibración | 32 |
| 3.3. Estructura mecánica | 33 |
| 3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC | 33 |
| Etapa CAD | 33 |
| Etapa CAM | 34 |
| 3.3.2. Modelos 3D y real | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Ensayos y resultados | 39 |
| 4.1. Pruebas funcionales de hardware | 39 |
| 4.1.1. Comunicación con driver TMC5130 | 39 |
| 4.2. Pruebas funcionales del firmware | 41 |
| 4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos | 41 |
| 4.2.2. Ejecución de comandos | 42 |
| 4.3. Calibración del equipo | 44 |
| 4.3.1. Desplazamiento lineal y micropasos | 44 |
| 4.4. Caso de prueba | 47 |
| 4.5. Prueba de campo con personal capacitado | 47 |
| 4.6. Comparación con el estado del arte | 49 |
| 5. Conclusiones | 51 |
| 5.1. Resultados obtenidos | 51 |
| 5.2. Próximos pasos | 51 |
| Bibliografía | 53 |

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 | 9 |
| 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 NodeMCU + TMC5130-EVAL. | 17 |
| 3.2. | Módulo de entrada. | 18 |
| 3.3. | Conversor serie-USB. | 18 |
| 3.4. | Clock para el CI TMC5130. | 19 |
| 3.5. | CI TMC5130. | 20 |
| 3.6. | Modelo 3D Kicad. | 20 |
| 3.7. | Plaqueta electrónica final. | 21 |
| 3.8. | Capas de abstracción de software. | 22 |
| 3.9. | Software TMCL-IDE. | 24 |
| 3.10. | Configuración de funcionalidades stallguard2 y coolstep. | 25 |
| 3.11. | Configuración de rampa de seis puntos. | 25 |
| 3.12. | Comandos de movimientos. | 28 |
| 3.13. | Comandos de control. | 29 |
| 3.14. | Lectura de registros del driver TMC5130. | 29 |
| 3.15. | Datagrama desde microcontrolador hacia pantalla. | 29 |
| 3.16. | Datagrama desde pantalla hacia microcontrolador. | 30 |
| 3.17. | Secuencia de procesamientos de datos entrantes. | 31 |
| 3.18. | Pantalla de configuración de programa. | 31 |
| 3.19. | Módulo API BOSH. | 32 |
| 3.20. | Registro de datos en consola. | 32 |
| 3.21. | Unidades. | 33 |
| 3.22. | Pieza personalizada soporte de carro. | 34 |
| 3.23. | Piezas personalizada soporte de estructura superior. | 34 |
| 3.24. | Operaciones de mecanizado en software Bodcad. | 35 |
| 3.25. | Piezas fabricadas en centro de mecanizado. | 36 |
| 3.26. | Modelo 3D. | 37 |
| 3.27. | Primer prototipo dip coater TECSCI. | 37 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1. | Banco de pruebas. | 39 |
| 4.2. | Ensayo sobre terminales SPI. | 40 |
| 4.3. | Comando de lectura sobre registro [0x2D]. | 40 |
| 4.4. | Comando de escritura sobre registro [0x2D]. | 41 |
| 4.5. | Comando de lectura actualizado sobre registro [0x2D]. | 41 |
| 4.6. | Comparación de tiempos teóricos y registrados. | 43 |
| 4.7. | Error relativo porcentual. | 43 |
| 4.8. | Comando DOWN descartado por equipo en funcionamiento. | 44 |
| 4.9. | Comando STOP procesado. | 44 |
| 4.10. | Comparador digital Asimeto. | 45 |
| 4.11. | Ensayo de desplazamiento lineal. | 45 |
| 4.12. | Ensayo completo en laboratorio. | 47 |
| 4.13. | Wafer de silicio sobre carro. | 48 |
| 4.14. | Ensayo final. | 48 |
| 5.1. | Render de equipo comercial. | 52 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 1.1. Dip coaters en el mercado | 5 |
| 2.1. Comparación Stone | 12 |
| 4.1. Ensayo de tiempo en desplazamientos | 42 |
| 4.2. Ensayo de desplazamiento | 46 |
| 4.3. Ensayo de desplazamiento | 46 |
| 4.4. Dip coaters en el mercado | 49 |

;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 realizado 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*)[1].

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 [2], por lo tanto, el lector podrá acceder a todo el código fuente del firmware [3], a los archivos de diseño y fabricación del circuito impreso [4] 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 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 que consta de los siguientes pasos:

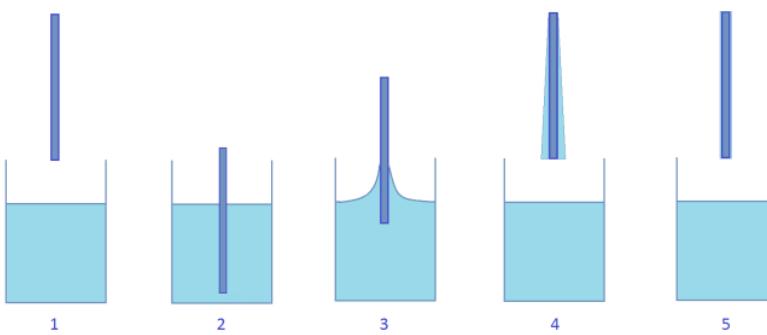


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹.

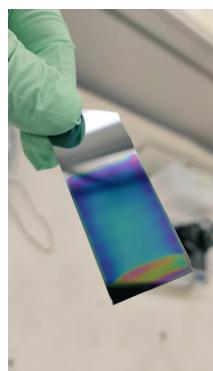
1. La muestra desciende a velocidad controlada.
2. La muestra queda sumergida un tiempo establecido por el usuario.

¹Imagen tomada de [5]

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. Valores de velocidad similares deberán estar contemplados en el desarrollo del presente equipo dip coater.

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 no forman parte del trabajo realizado.

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 productos de las empresas internacionales con mayor reconocimiento en el ámbito de las nanociencias.

Se puede observar en la figura 1.4 el equipo de la empresa Kibron [6].

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 [7], 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 [8], 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 [9] | 100 mm | 0.6 - 3000 | no | PC |
| Holmarc [10] | 100 mm | 1.08 - 540 | no | PC |

Del análisis de la tabla se pueden extraer 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, ninguna de las empresas adhiere a los principios del software y hardware libre.

También es importante aclarar que las investigaciones realizadas indican que el rango de velocidades más utilizado para la generación de *films* es el de 1 a 200 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Se destaca que la mayoría de los equipos presentados cumplen con dicha indicación.

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 abarca la presentación de un MVP (Producto Mínimo Viable) de equipo dip coater.

El trabajo realizado incluye:

- Driver de motor provisto por el fabricante TRINAMIC [11].
- Diseño de hardware con software de diseño KICAD [12].
- 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 incluye:

- 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 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*) [13], 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.

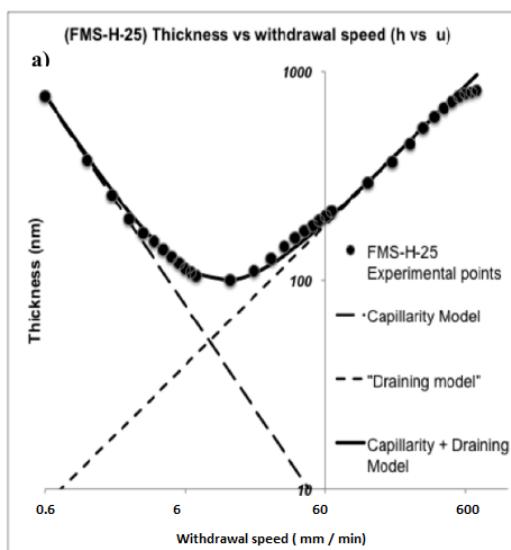


FIGURA 2.1. Espesor vs velocidad ¹.

¹Imagen tomada de [13].

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 remarcó 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 [14] para realizar los movimientos.
- Se utilizará un driver de motor de la marca Trinamic Motion Control.

Trinamic [11] se especializa en la fabricación de CI (Circuitos Integrados) para el control de diferentes tipos de motores, su tecnología se basa en convertir señales digitales en movimientos controlados. Tiene una amplia experiencia en la industria del control de motores y sus CI son utilizados en una gran variedad de productos. Actualmente fue adquirida por la compañía Analog Devices [15].

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 [16].

Todos los CI requieren una configuración inicial de parámetros que depende del tipo de motor y de la carga asociada al mismo. Para encontrarla la empresa ofrece el software TMCL-IDE y diferentes placas de desarrollo para trabajar sobre los diferentes drivers. La placa de desarrollo que corresponde al integrado seleccionado es la *TMC5130-Eval Evaluation Board* [17].

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.

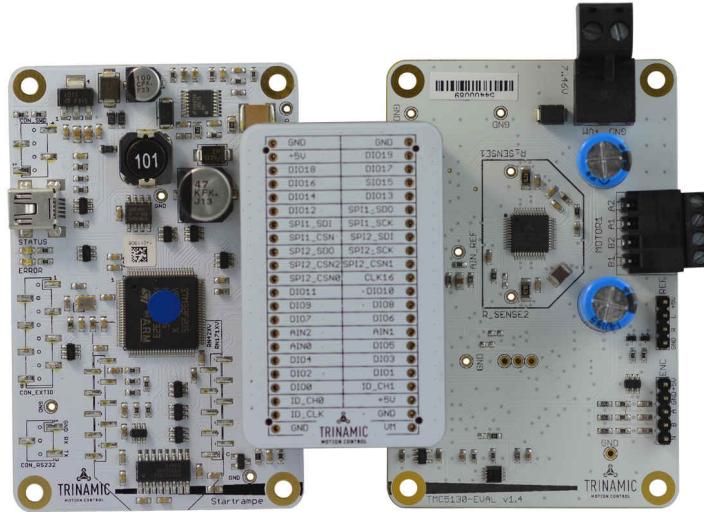


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130².

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

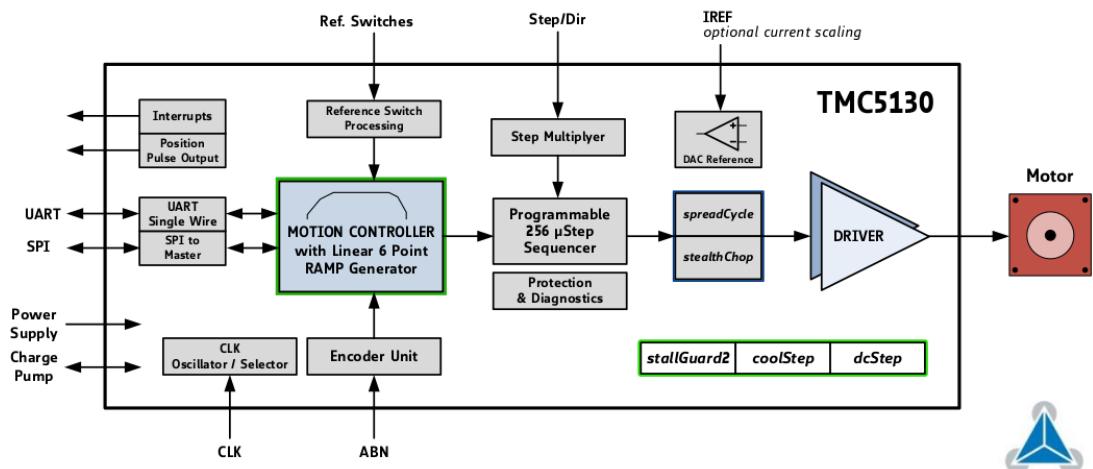


FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130³.

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

²Imagen tomada de [11].

Los pasos que definen a este tipo de motores están relacionados con las fases y con la cantidad de dientes que tienen en su rotor y estator. 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 de 256 micropasos por cada paso del motor. Siguiendo con el ejemplo recién presentado, para un motor de paso 1.8° se tendrán en total 51200 micropasos, como se observa en la ecuación 2.1.

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

Una característica importante a destacar es la posibilidad de programar la cantidad de pasos que da el motor. El CI cuenta con el registro XACTUAL que contiene la cantidad de pasos absolutos desde una referencia inicial. También cuenta con el registro XTARGET que contiene una posición objetivo, cuando se escribe este registro el CI se acciona hasta lograr que XACTUAL = XTARGET.

Otra funcionalidad que se utilizó fue *stallguard2*, una función que mide la fuerza contraelectromotriz generada en las bobinas del motor por cambios de carga en el eje. En la figura 2.4 se observa que el valor del registro stallguard2 se decremente linealmente a medida que la carga aumenta. Cuando se aplica una fuerza contraria al movimiento programado o el recorrido del carro llega a un límite mecánico, la fuerza contraelectromotriz aumenta.

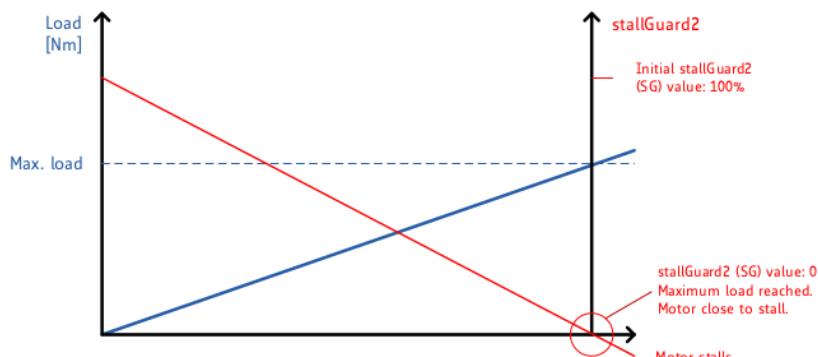


FIGURA 2.4. Función stallguard2.⁴

En el capítulo 3 se estudiará el valor del registro stallguard2 configurado. Cada vez que el equipo se enciende se realiza un movimiento hacia un extremo del recorrido para buscar el cero de máquina. Se utiliza 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 utilizó *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.

⁴Imagen tomada de [11].

El efecto final es reducir la energía suministrada según la hoja de datos [16] hasta un 75 %. Esto aplica incluso en equipos donde la carga es constante, como es el caso del dip coater, ya que la carga variable representada por un wafer de silicio o un portaobjeto es completamente despreciable.

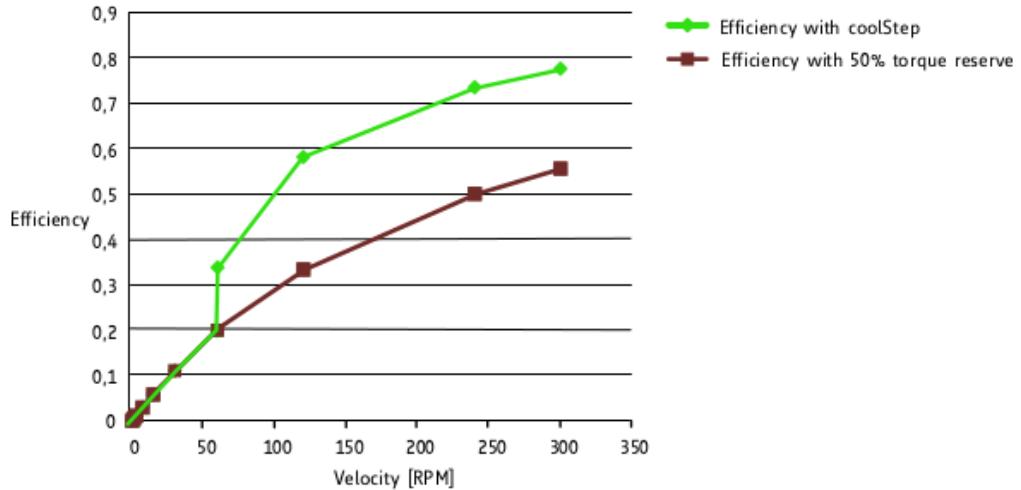


FIGURA 2.5. Función coolstep.⁵

Por último, se utilizó la función *dcStep*, que es un modo de commutación automático 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. 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:

- 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 se encargan 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,

⁵Imagen tomada de [11].

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 [18]. 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 serie.

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 [19], 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 [20], 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.

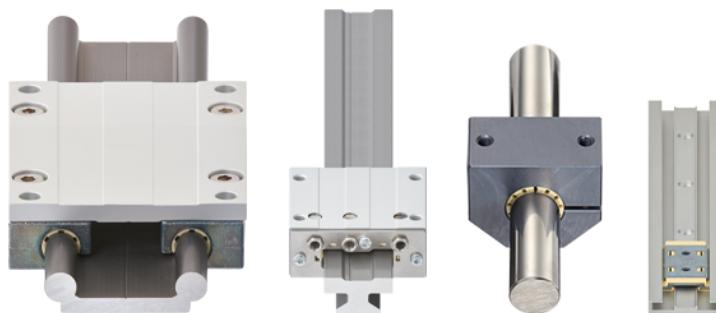


FIGURA 2.6. Guía Lineal IGUS.⁶

Para el diseño y fabricación de piezas mecanizadas en aluminio se trabajó con el software BOBCAD [21] 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 de la marca FAGOR [22] utilizada para la fabricación de las piezas del equipo dip coater. El control de la fresadora interpreta el código G-CODE también conocido como RS-274 [23] generado por el modulo CAM y lo convierte en movimientos de motores.

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.

⁶Imagen tomada de [20].

⁷Imagen tomada en el centro tecnológico de FUNINTEC.



FIGURA 2.7. Fresadora Fagor GVC 600.⁷

- El usuario debe poder guardar al menos 10 programas en la memoria no volátil del sistema.
- Se debe utilizar 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.
- Se deben registrar variables de humedad, 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 [24]. 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.

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.

El equipo estará entonces compuesto por el módulo ESP32-WROOM como unidad central de procesamiento. Contará con dos canales de comunicación serie, uno para establecer una consola de comandos que permita comunicar al equipo con una computadora, realizar pruebas de funcionamiento y configuraciones, y el otro 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.

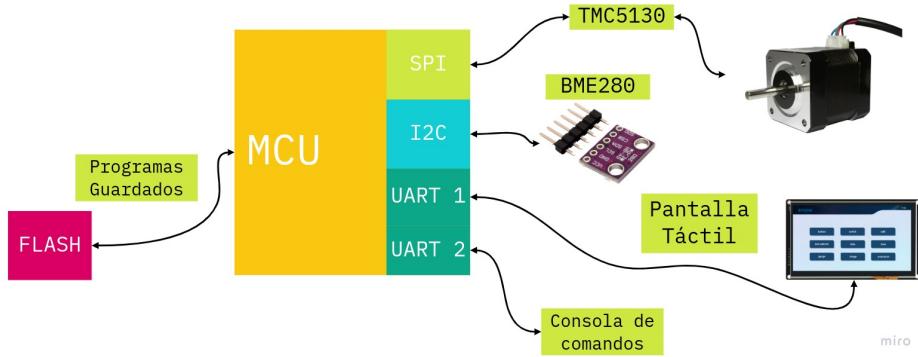


FIGURA 2.8. Esquema de equipo propuesto.

2.6. Herramientas de desarrollo

Para la implementación del hardware se utilizó el software libre de diseño de circuitos impresos KICAD [12], la elección del mismo se basó en los siguientes puntos:

- Las capacidades que brinda el software son suficientes para el desarrollo de este hardware.
- Se valora el apoyo del *CERN:European Organization for Nuclear Research* [25] al proyecto KICAD.

Para la implementación del firmware se trabajó con el *framework* ESP-IDF [31] 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 trabajó con el entorno de programación ECLIPSE IDE, la elección se basó en los siguientes puntos:

- El fabricante del microcontrolador ESPRESSIF ofrece *pluggings* para incorporar al entorno y facilitar el desarrollo.
- Existe documentación para la configuración del *framework* ESP-IDF [26] sobre el entorno.

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 y diseño y fabricación mecánica.

3.1. Hardware

3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre

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

- TMC5130-EVAL [17]
- NodeMCU [27]

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. Las primeras pruebas de implementación de hardware se realizaron interconectando ambos módulos como puede observarse en la figura 3.1.

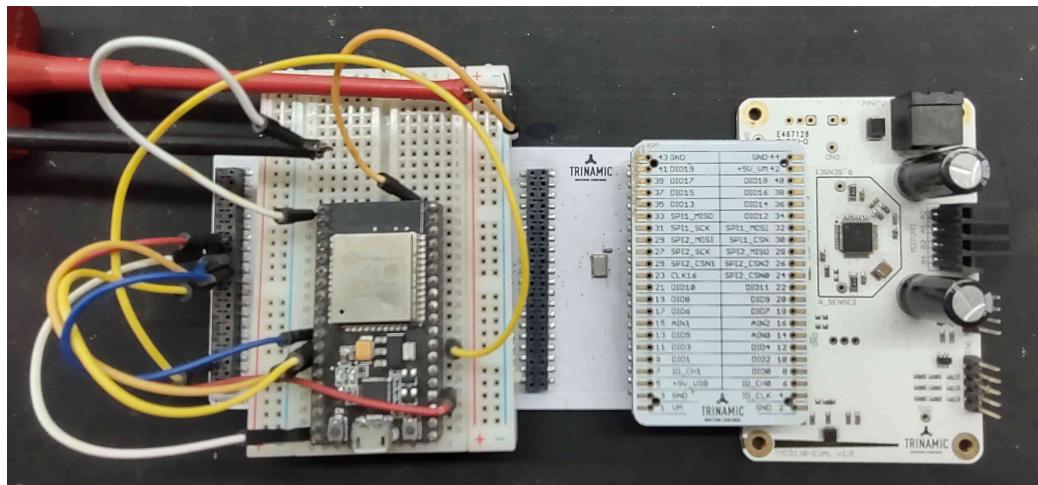


FIGURA 3.1. Módulo NodeMCU + TMC5130-EVAL.

3.1.2. Etapa de alimentación

Se observa en la figura 3.2 la etapa reguladora de tensión que permite alimentar al equipo con tensiones continuas de entre 24 V y 46 V. En el diseño 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 su hoja de datos. Luego a través de un regulador de tensión se obtienen 3,3 V que se utilizan para alimentar el microcontrolador.

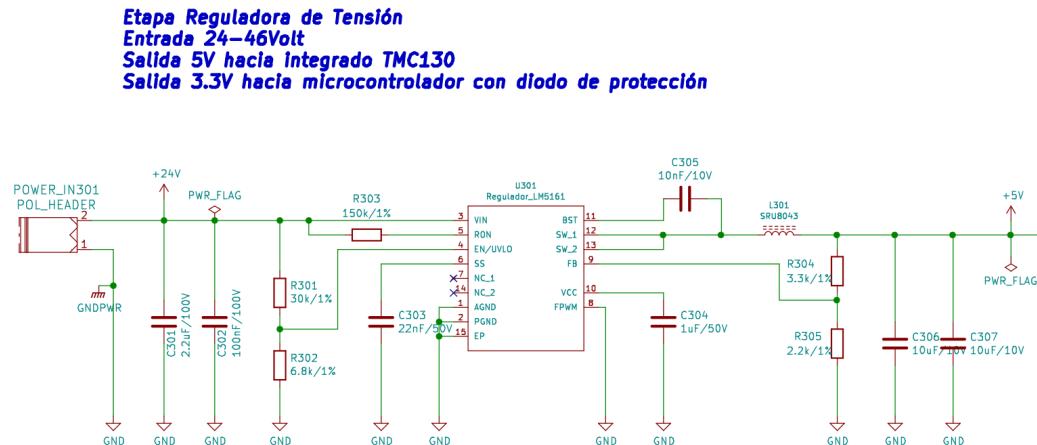


FIGURA 3.2. Módulo de entrada.

El equipo se diseñó para ser alimentado con una fuente externa de tensión continua, simplificando así cuestiones regulatorias de certificación que deben cumplir equipos que se alimentan directamente de 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 3.3.

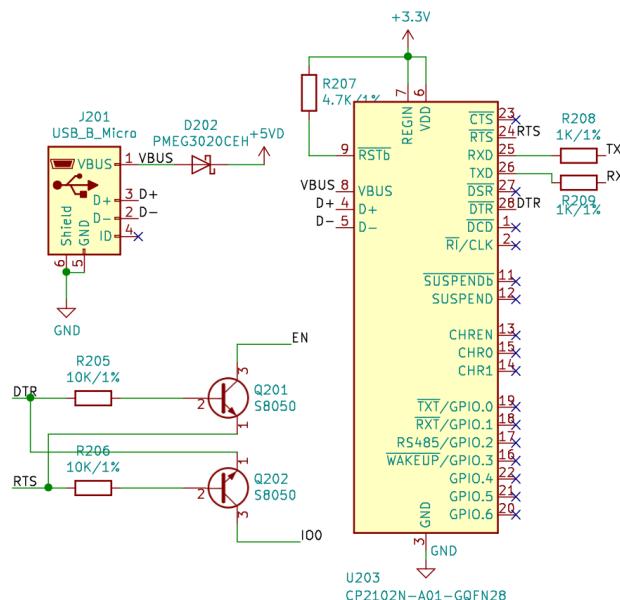


FIGURA 3.3. Conversor serie-USB.

Mantener esta etapa de entrada en la placa electrónica final habilita la conexión directa del equipo dip coater con un puerto USB de computadora, lo cual permite

establecer una comunicación constante con el periférico UART y descargar un firmware nuevo sin tener que contar con un programador externo. Se utilizó para esta etapa de conversión el CI CP2102.

Para descargar un firmware en el microcontrolador ESP32 se debe seguir la siguiente secuencia:

1. Mantener la terminal IO0 en GND.
2. Poner la terminal EN en GND para reiniciar el mismo.
3. El microcontrolador se inicia en modo *boot*.
4. Enviar firmware desde el entorno de desarrollo.

La interfaz UART CP2102 consta de señales de transmisión y recepción de datos TX y RX. También admite las señales de control RTS/CTS, DSR/DTR y X-ON/X-OFF. Se incorporó en el diseño 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, que se puede observar en la figura 3.4 el cual es necesario en aplicaciones de alta precisión.

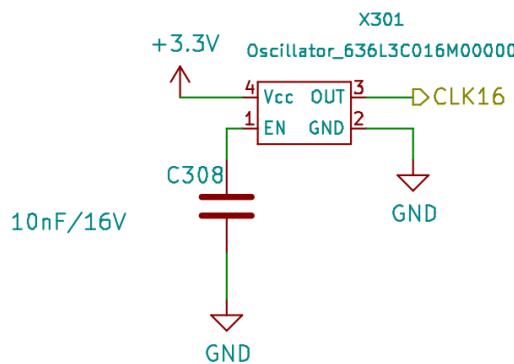


FIGURA 3.4. Clock para el CI TMC5130.

El driver se alimenta por las terminales VS/VSA con la tensión de entrada de la placa electrónica y por la terminal VCC con 5 V, los cuales son generados internamente por un regulador en la terminal 5VOUT. Si bien esta configuración funciona, se pretende mejorar el diseño en la próxima versión de la placa. El fabricante sugiere alimentar la terminal VCC con una tensión externa para evitar el uso del regulador de tensión interno y mejorar así la eficiencia térmica del CI.

Se observa en la figura 3.5 las conexiones del driver con el motor paso a paso, la etapa de alimentación y las conexiones del puerto SPI para la comunicación con el microcontrolador.

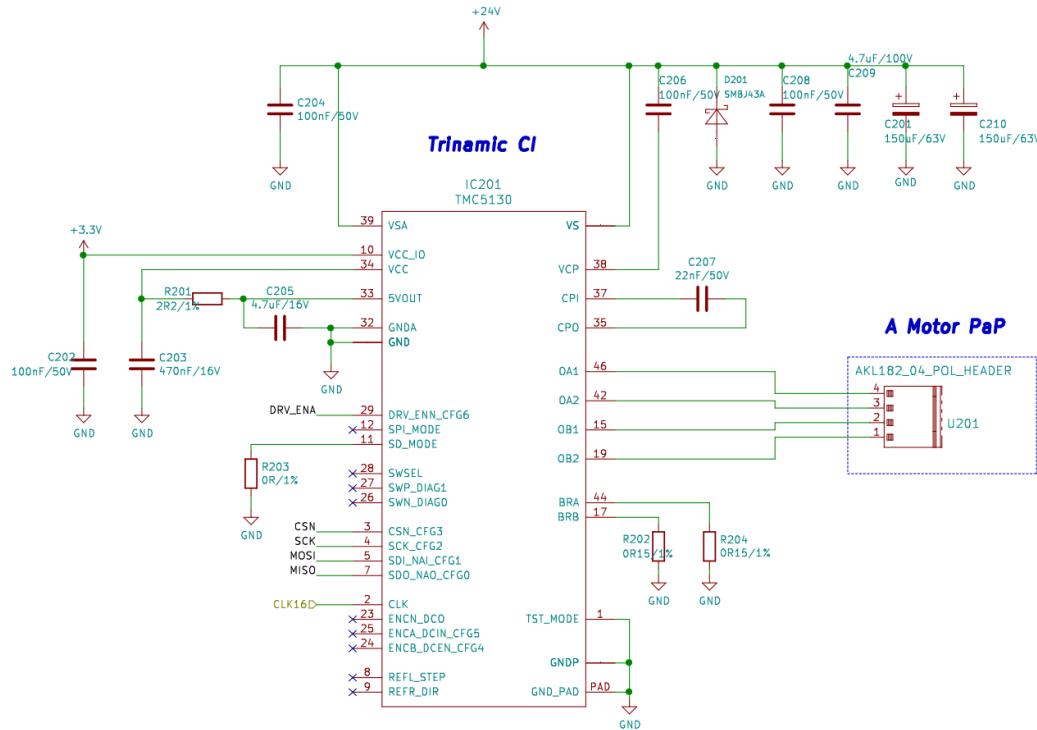


FIGURA 3.5. CI TMC5130.

3.1.5. Diseño final

Finalmente, se observa en la figura 3.6 el diseño 3D generado por el software KICAD.

Todo el diseño y material asociado se encuentra disponible en el repositorio de la empresa TECSCI [4]. La placa electrónica de este equipo dip coater cuenta con una licencia CERN OHL v.1.2 [28].

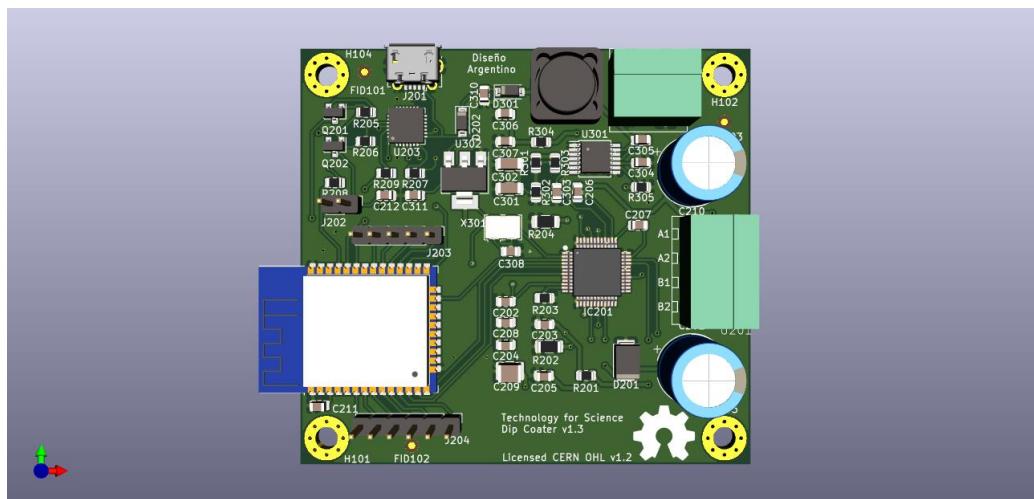


FIGURA 3.6. Modelo 3D Kicad.

3.1.6. Fabricación

La placa electrónica se fabricó con el proveedor local de circuitos impresos Ernesto Mayer S.A. [29]. A continuación se presenta la información de diseño de la misma y se describen restricciones impuestas por el propio fabricante:

- Grilla de posicionamiento principal: 0,25 mm.
- Grilla de ruteo principal: 0,25 mm.
- Agujeros de montaje: 3,2 mm.
- Pistas principales: 0,5 mm.
- Pistas inferiores: 0,25 mm, con límite particular 0,20mm (8 mils).
- Pistas superiores: 0,8 mm.
- Vías: 0,8 mm /0,4 mm, con límite particular 0,20mm (8 mils).
- Margen general: 0,22 mm.
- Margen particular: 0,2 mm, con límite particular 0,20 mm (8 mils).
- Fabricación: espesor 1,6mm FR4.
- Restricciones generales del fabricante: con límite estándar 0,254 mm (10 mils).

Luego de fabricar el PCB, se continuó con el montaje de componentes electrónicos superficiales, que estuvo a cargo de la empresa Asembli S.A. [30]. Se fabricó un primer lote de cinco placas. En la figura 3.7 se observa la placa con los componentes montados.

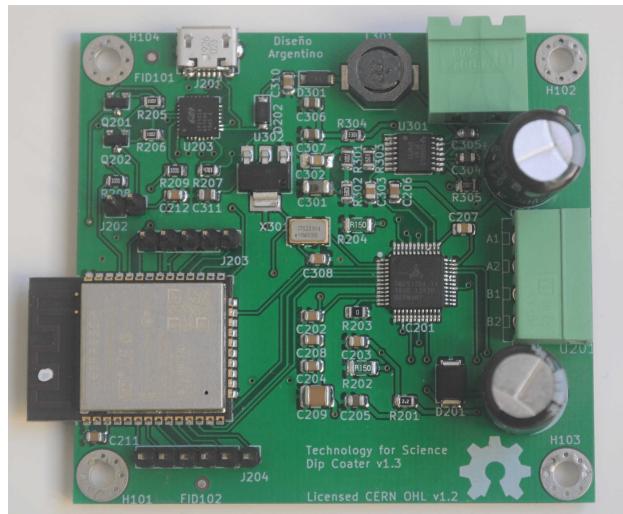


FIGURA 3.7. Plaqueta electrónica final.

3.2. Firmware

3.2.1. Capas de abstracción

Se desarrolló un firmware modular que permite incorporar código de manera incremental y ordenada. Se observan en la figura 3.8 las capas de abstracción de software implementadas. Esta solución tiene dos ideas fundamentales:

- 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 estas últimas solo pueden llamar a funciones de la capa inferior o capa BOARD.
- Las aplicaciones funcionan de manera independiente, las mismas se pueden habilitar o deshabilitar individualmente.

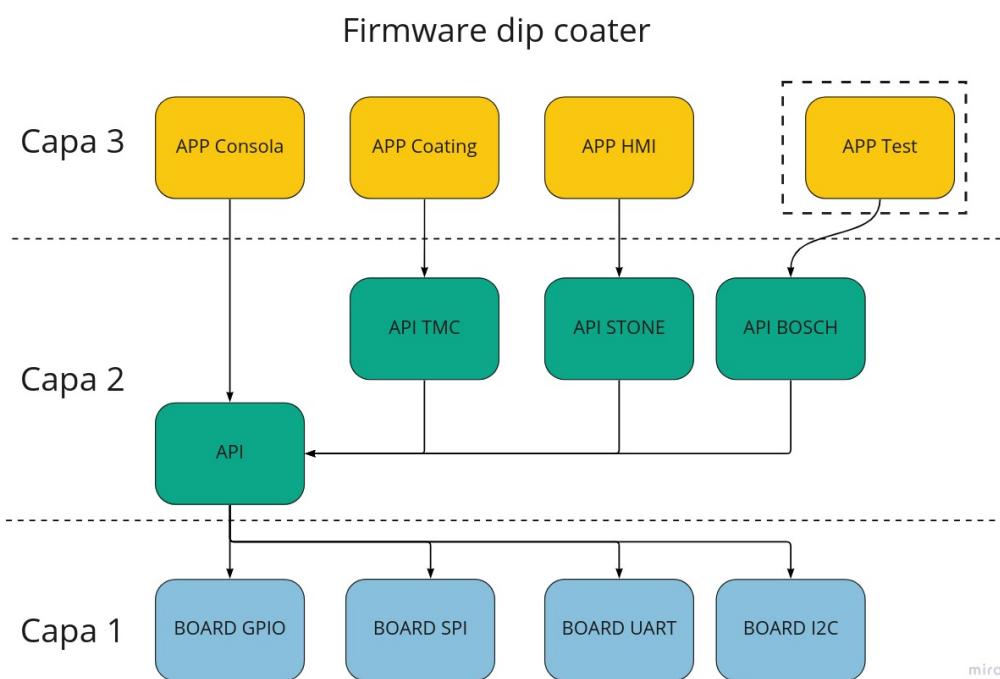


FIGURA 3.8. Capas de abstracción de software.

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 testing utilizada para probar nuevos componentes de software. Cada aplicación contiene al menos una *task* del sistema operativo freeRTOS. A continuación se detallan las aplicaciones:

- APP coating: se encarga de la comunicación con el driver TMC5130, de la ejecución de movimientos individuales y del proceso completo de dip coating.
- APP consola: administra una consola de comandos que permite ejecutar y configurar el equipo a través de una comunicación serial. Recibe y procesa comandos de la consola y los envía a través de una *queue* de freeRTOS a la app coating.

- APP hmi: administra la interfaz de configuración, establece una comunicación serial con la pantalla táctil, recibe comandos a través de una *queue* de freeRTOS y los envía a la app coating para ser procesados.
- APP test: se utiliza para probar nuevos componentes y realizar *test* sobre el sistema.

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 STONE: contiene los módulos de software que interaccionan con la pantalla táctil.
- API: se utiliza como puente hacia la capa BOARD que tiene acceso a los periféricos del microcontrolador y con módulos de software del *framework* ESP-IDF.

La capa uno es la que interacciona con los módulos de hardware del microcontrolador. Por lo tanto, esta capa es la única que contiene llamados a funciones disponibles en el framework ESP-IDF, como por ejemplo las funciones de configuración de los periféricos UART, GPIO, SPI, etc. Es importante mencionar que si debido a un rediseño se decide cambiar el microcontrolador utilizado, solo se deberán reescribir los módulos pertenecientes a esta capa y se podrá mantener el resto del programa sin alteraciones.

3.2.2. Módulos principales de software

Funcionamiento general

El equipo dip coater puede ser utilizado de dos maneras diferentes:

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

Ambas opciones permiten ejecutar un ciclo completo de dip coating y también permiten ejecutar comandos de manera individual. Las aplicaciones app consola y app hmi se encargan de la interacción con el usuario y son las encargadas de enviar a la aplicación app coating los comandos para ejecutar los distintos movimientos.

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 acciones.

Como se mencionó en la subsección 2.2.1 calcular los parámetros iniciales del driver es una tarea compleja, por lo que se optó por utilizar el software TMCL-IDE provisto por el fabricante y realizar la configuración de los registros de manera interactiva.

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 figura 3.9 se observa el entorno de desarrollo TMCL-IDE.

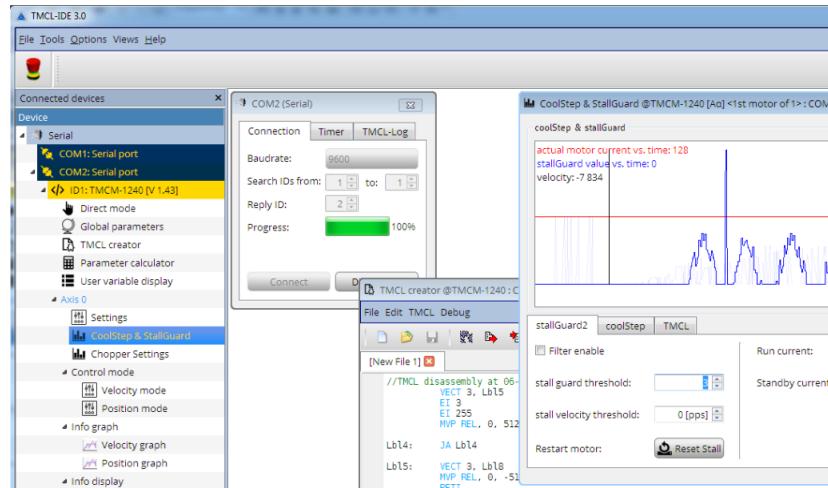


FIGURA 3.9. Software TMCL-IDE.

En la figura 3.10 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 límite de detección para que una vez alcanzado se genere un evento.

El firmware cuenta con una función llamada mod-coating-process-cero-machine que utiliza *stallguard2*. 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. Esta función se ejecuta al encender el equipo y sirve para posicionar el carro.

Otros parámetros importantes a configurar son los que definen la rampa de aceleración del desplazamiento. El driver permite configurar una rampa de seis puntos donde los valores a encontrar, A1, AMAX, D1, DMAX, V1 y VMAX corresponden a la aceleración, desaceleración y velocidad, como se observa en la figura 3.11.

Para el control de los movimientos se optó por generar una rampa de cuatro puntos. Se implementó 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).

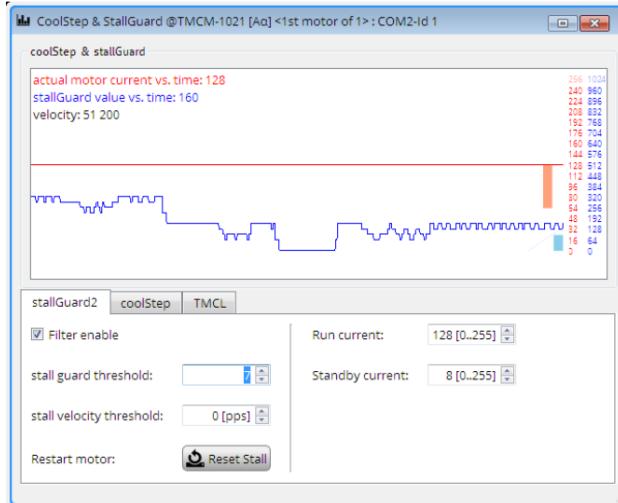


FIGURA 3.10. Configuración de funcionalidades stallGuard2 y coolstep.

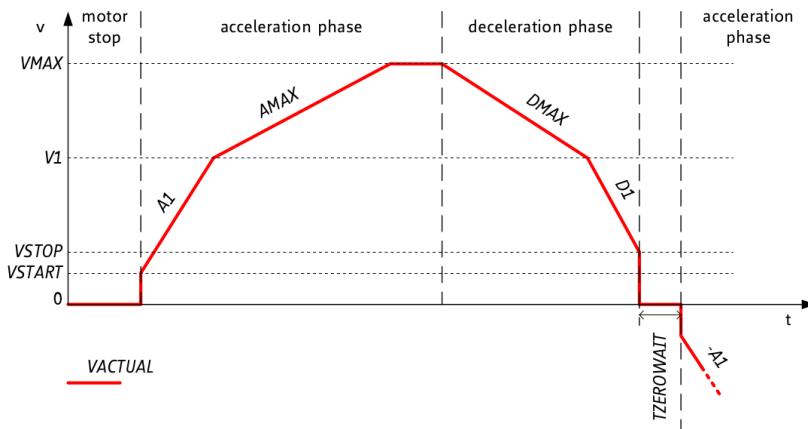


FIGURA 3.11. Configuración de rampa de seis puntos.

Estas relaciones de variables están fijas en el firmware y no pueden ser cambiadas por el usuario, es decir que los movimientos del equipo siempre responden a una rampa de aceleración de cuatro puntos.

A modo de ejemplo, se presenta el fragmento de código 3.1 que pertenece a la aplicación app coating y se ejecuta cuando llega un comando de movimiento individual.

```

1 int HandlerDown_without_program(processCommandArgSpin_t* arg) {
2     int32_t reg_rampstat, position_actual , position_target;
3     processDipCoating.config.status=1;
4     Evalboards.ch1.enableDriver(DRIVER_ENABLE);
5
6     //Leo Posicion Actual
7     Evalboards.ch1.readRegister(0, 0x21, &position_actual);
8     // Set velocidad
9     //V1
10    Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_V1, (arg->velocity) / 2);
11    //VMAX
12    Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VMAX, arg->velocity);
13    //VSTART
14    Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VSTART, 0);

```

```

15 //VSTOP
16 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VSTOP, 100);
17 // Set aceleracion y desaceleracion
18 //A1
19 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_A1, arg->acceleration);
20 //AMAX
21 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_AMAX, arg->acceleration);
22 // Seteo desaceleracion
23 //DMAX
24 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_DMAX, arg->acceleration);
25 //D1
26 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_D1, arg->acceleration);
27
28 /* Seteo de registro XTARGET*/
29 position_target=position_actual+arg->displacement_z;
30 position_target = mod_coating_handlers_control_limit_(position_target)
31 ;
32 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_XTARGET, position_target);
33
34 /*Detecto el flag que detecta XACTUAL=XTARGET y apago driver*/
35 while (1 == processDipCoating.config.status) {
36     Evalboards.ch1.readRegister (0, TMC5130_RAMPSTAT, &reg_rampstat);
37     /*Leo registro y comparo, velocidad zero y position_actual ==
38     position_target */
39     if (reg_rampstat & 0x00000600) {
40         break;
41     }
42     else {
43         vTaskDelay (OS_CONFIG_MOD_HANDLERS_COMMANDS_TASK_PERIOD /
44         portTICK_PERIOD_MS);
45     }
46     vTaskDelay(OS_CONFIG_MOD_HANDLERS_COMMANDS_TASK_PERIOD_LONG /
47     portTICK_PERIOD_MS);
48     processDipCoating.config.status=0;
49     Evalboards.ch1.enableDriver(DRIVER_DISABLE);
50
51     return 0;
52 }

```

CÓDIGO 3.1. Ejecución de comando DOWN.

Se detallan a continuación las líneas más importantes:

- 1 Recepción de estructura de datos con valores de aceleración, velocidad y desplazamiento.
- 4 Habilitación del driver.
- 7 Registro de la posición actual.
- 8-26 Carga de parámetros de velocidad y aceleración que forman rampa de cuatro puntos.
- 29 Suma el desplazamiento deseado con la posición actual.
- 30 Control de límites mecánicos.
- 31 Se escribe el registro XTARGET y se da inicio al movimiento.
- 37 Dentro de un ciclo *while* se controlan dos bits del registro RAMPSTAT que se activan cuando XACTUAL = XTARGET (fin del movimiento).

46 Deshabilitación del driver si se cumple la condición anterior.

Otra parte importante de app coating es la definición del proceso completo de dip coating, el mismo está implementado con un arreglo de estructuras de tamaño fijo. Cada ítem del arreglo esta compuesto por el tipo de movimiento, los valores de parámetros que se reciben desde app consola o app hmi y punteros a funciones que ejecutan cada movimiento. Es decir que el proceso completo de dip coating está formado por una concatenación de movimientos individuales, como puede observarse en el siguiente fragmento de código 3.2.

```

1 processCommand_t cmdProcessCustom [MAX_ESTATIC_COMMAND] = {
2
3 /*Desplazamiento hasta muestra*/
4 { .commandnumber = PROCESS_COMMAND_DOWN,           .fp = HandlerDownUntil },
5 { .commandnumber = PROCESS_COMMAND_WAIT,           .fp = HandlerWait },
6 /*Comienzo de ciclo*/
7 { .commandnumber = PROCESS_COMMAND_DOWN,           .fp = HandlerDownLoop },
8 { .commandnumber = PROCESS_COMMAND_WAIT,           .fp = HandlerWaitDown },
9 { .commandnumber = PROCESS_COMMAND_UP,             .fp = HandlerUpLoop },
10 { .commandnumber = PROCESS_COMMAND_WAIT,           .fp = HandlerWaitUp },
11 /*Fin de ciclo */
12 { .commandnumber = PROCESS_COMMAND_FINISH,         .fpcommandhandler =
13   HandlerFinish },
14 };

```

CÓDIGO 3.2. Proceso completo de dip coating.

Esta implementación es fija en el firmware pero se puede modificar con facilidad. Surgió en charlas con investigadores usuarios de equipos dip coater el interés por la posibilidad de modificar el proceso. Particularmente se observó interés en poder extraer la muestra con dos velocidades diferentes para generar en un mismo *films* dos perfiles diferentes.

Consola de comandos

App consola permite establecer un canal de comunicación entre el equipo dip coater y un ordenador a través de una comunicación serial. Como se mencionó en la subsección 3.1.1, la placa electrónica incorpora un conversor serie TTL-USB que permite conectar el equipo directamente a través de un cable USB.

Se definen dos series de comandos:

- Comandos para usuarios que permiten ejecutar un proceso completo de dip coating y movimientos individuales.
- Comandos para realizar consultas y configuraciones del sistema, utilizados durante el desarrollo del trabajo.

En la figura 3.12 se observa la primera serie de comandos.

Para realizar un proceso dip coating a través de la consola se debe seguir el siguiente procedimiento de ejecución de comandos:

1. Down, up, etc: permiten mover la muestra hasta la posición inicial del experimento.
2. Cerosample: registra la posición.
3. Depthsample: configura la distancia de recorrido de la muestra.

```

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 3.12. Comandos de movimientos.

4. Setcommandcustomapp: configura la velocidad y aceleración ascendente y descendente, los tiempos de espera en posición superior e inferior y la cantidad de repeticiones del ciclo.
5. Run: inicia el proceso dip coating.
6. Stop: está disponible para que el usuario pueda detener el proceso.

Se observa en la figura 3.13 la segunda serie de comandos.

Estos comandos permiten utilizar al driver de manera independiente, realizar configuraciones y visualizar el estado de los registros. Los comandos read-register y write-register sirven para leer y escribir registros sobre el driver TMC5130.

A modo de ejemplo se observa en la figura 3.14 una consulta sobre el registro Xactual[0x21], que expresa la posición actual en micropasos desde la referencia inicial y otra consulta sobre el registro Xtarger[0x2D], cuyo valor expresa la posición objetivo en micropasos que se desea alcanzar. En este ejemplo Xactual = Xtarger ya que el carro estaba detenido. Para ejecutar un movimiento se debe configurar una posición en Xtarger, la misma accionará el motor hasta alcanzar Xactual = Xtarger. Previamente se deben configurar los registros de velocidad y aceleración.

```

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 3.13. Comandos de control.

```

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

```

FIGURA 3.14. Lectura de registros del driver TMC5130.

Pantalla táctil

La aplicación app hmi establece un canal de comunicación serial entre la pantalla táctil y el microcontrolador, la misma se encarga de procesar datagramas salientes y entrantes.

En la sección 2.3 se presentó el modelo STWI043WT elegido para el equipo dip coater, el mismo requiere para su configuración el desarrollo de un proyecto con el software *STONE GUI Desing Software*. La interfaz interactiva permite crear pantallas y diferentes tipos de objetos o *widgets* para brindar de funcionalidad a las mismas. El fabricante define también un protocolo de comunicación [32] para interactuar con los objetos que componen cada pantalla.

En la figura 3.16 se define el formato de datagrama para enviar datos desde el microcontrolador hacia la pantalla.

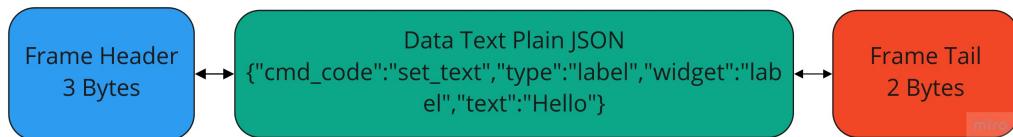


FIGURA 3.15. Datagrama desde microcontrolador hacia pantalla.

El datagrama está compuesto por tres bloques:

1. Frame header: 3 bytes fijos.
2. Data: Datos definidos en texto plano con formato *JSON (JavaScript Object Notation)*.
3. Frame tail: 2 bytes fijos.

El campo data define múltiples categorías, se mencionan a continuación las mas importantes:

- Cmd-code: Es un identificador único que define la instrucción.
- Type: Define el tipo de objeto.
- Widget: Define el nombre único del objeto.
- Text: Define el contenido del objeto, varia según el tipo de objeto.

En la figura 3.16 se define el formato de datagrama para enviar datos desde la pantalla hacia el microcontrolador. El datagrama esta compuesto por los siguientes bloques:

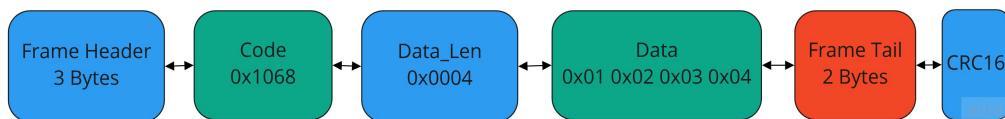


FIGURA 3.16. Datagrama desde pantalla hacia microcontrolador.

1. Frame header: 3 bytes fijos.
2. Code: Identificación única de objeto.
3. Data-Len: Define el largo del dato a transmitir.
4. Data: Su tamaño debe coincidir con el item anterior.
5. Frame tail: 2 bytes fijos.
6. CRC16: Para verificación de integridad del datagrama.

Para procesar los datagramas entrantes se implementó un bloque de código que analiza el buffer del periférico UART-1. Cuando hay datos disponibles el periférico envía un evento a través de una *queue* de freeRTOS. El evento UART-DATA se recibe en la *task* mod-hmi-RX-task-loop la cual comienza a procesar dichos datos mientras estén disponibles. En la figura 3.17 se observa el control que se va realizando a cada uno de los bytes entrantes. Si el datagrama pasa todas las condiciones es aceptado y enviado a la *task* app hmi task a través de una *queue* para ser procesado.

En la figura 3.18 se presenta la pantalla de configuración de programa creada con el software de diseño.

Al ejecutar el botón *play*, la pantalla envía un serie de datagramas con todos los parámetros configurados en la misma, los datagramas son procesados para verificar su validez y enviados hacia app coating para dar inicio al proceso.

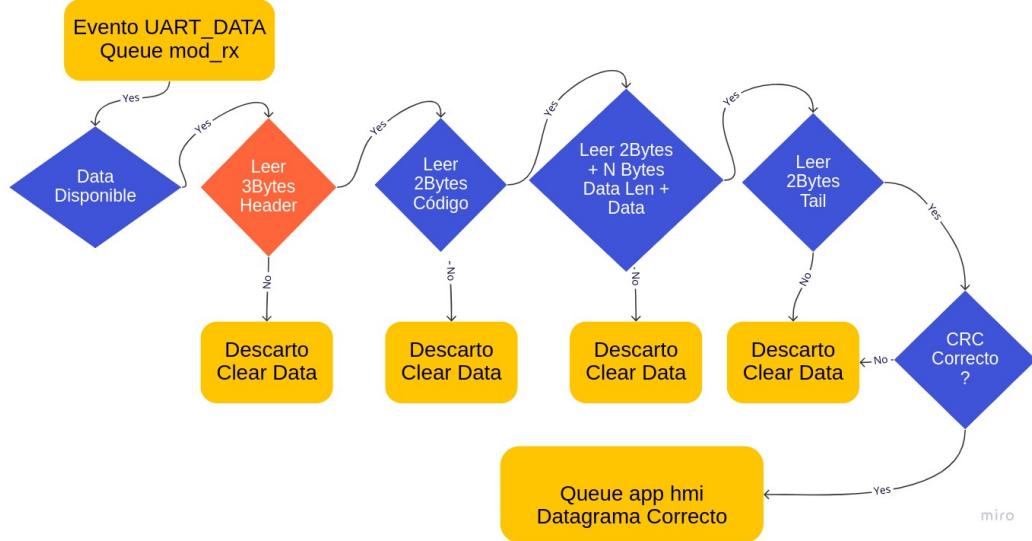


FIGURA 3.17. Secuencia de procesamientos de datos entrantes.

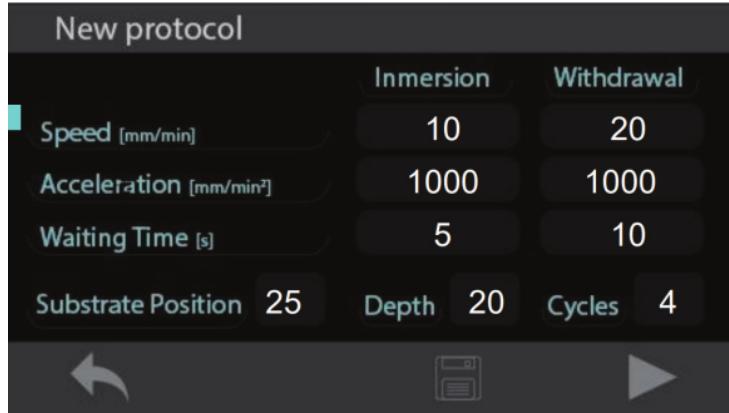


FIGURA 3.18. Pantalla de configuración de programa.

Registros de variables ambientales

En la sección 2.5 se presentó el requerimiento opcional que establece el registro de variables de humedad, presión y temperatura. El interés del cliente se fundamenta en que ciertos experimentos necesitan realizarse particularmente a humedad y temperatura controlada.

Para el registro de estas variables se incorporó al sistema un sensor BME280, el mismo integra en un solo CI sensores de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa. El fabricante ofrece en sus repositorios [33] ejemplos de implementaciones y una API para utilizar todas las funcionalidades del CI.

La comunicación entre el sensor y el microcontrolador se realizó a través del protocolo I2C, se incorporó el módulo del software BOARD I2C que se encarga de inicializar el periférico. También se implementó el módulo API BOSH BME, que trabaja con todas las funcionalidades que ofrece el fabricante en su API. En la figura 3.19 se observa el flujo de capas desarrollado:

API BOSH BME inicializada una estructura donde define los siguientes parámetros de interés:

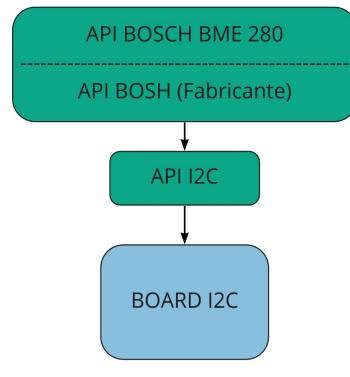


FIGURA 3.19. Módulo API BOSH.

- Dirección del dispositivo I2C.
- Función de lectura.
- Función de escritura.
- Función de delay.
- Configuración de modo normal de funcionamiento del sensor.

Para visualizar los datos registrados por el sensor se implementó sobre la APP TEST una rutina de consulta con llamado a funciones de la capa API BOSH BME, se observa en la siguiente figura 3.20 los datos registrados en consola.

```

TECSCI_SAS      ESP-IDF Console.
Type 'help' to get the list of commands.
Use UP/DOWN arrows to navigate through command history.
Press TAB when typing command name to auto-complete.
Press Ctrl+C will terminate the console environment.

tecsco_dipcoater>
I (2507) api_bosh_bme280.c: Temperatura:22.55, Presion:100811.02, Humedad:48.56

```

FIGURA 3.20. Registro de datos en consola.

El desarrollo de este MPV incluyó el registro de variables ambientales pero no un control y corrección de las mismas con un sistema de control. Sin embargo, se pretende ofrecer en un futuro cercano la funcionalidad de cámara de humedad anexada a este MPV.

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 y colas de FreeRTOS. Incluye entre otros parámetros el tamaño del stack, la prioridad y el tiempo de ejecución de cada tarea.

- machine.h: contiene las macros relacionadas con la calibración mecánica del equipo.

La macro más importante configurada en el archivo machine.h es MACHINE STEPS PER MILLIMETER, que debe estar perfectamente determinada. En la sección 4.3 se demuestra el procedimiento realizado para obtener su valor. Esta macro define la cantidad de micropasos necesarios para generar el desplazamiento de 1 mm. La misma está completamente relacionada con el paso del tornillo acoplado al eje del motor. Las unidades de posición son expresados en micropasos, las unidades de velocidad en micropasos sobre segundos y las unidades de aceleración en micropasos sobre segundos al cuadrado.

Se observa en la figura 3.21, extraída de la hoja de datos del driver TMC5130, 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 3.21. Unidades.

Se observa en el fragmento de código 3.3 el cálculo de las constantes que corrigen los valores de velocidad y aceleración.

```

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 UPPER_LIMIT (MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER * 10) // 10mm
16 #define LOWER_LIMIT (MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER * 290) // 290mm

```

CÓDIGO 3.3. Macros de desplazamiento y factores de corrección.

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 piezas.

El prototipo dip coater cuenta actualmente con dos piezas mecanizadas en aluminio. Se observa en la figura 3.22 la pieza que se acopla al carro de la guía lineal presentada en la sección 2.4.

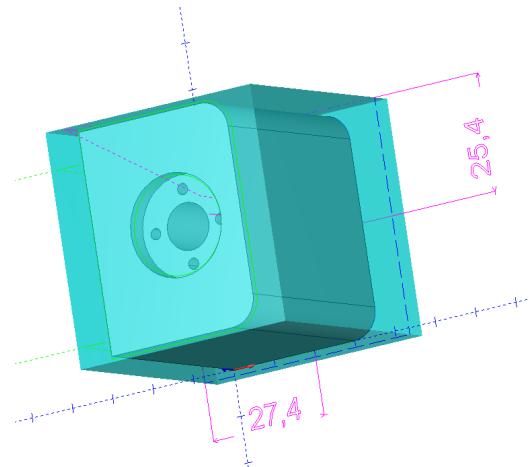


FIGURA 3.22. Pieza personalizada soporte de carro.

Y en la figura 3.23 el soporte superior que sostiene el motor paso a paso y el tornillo acoplado al eje del motor.

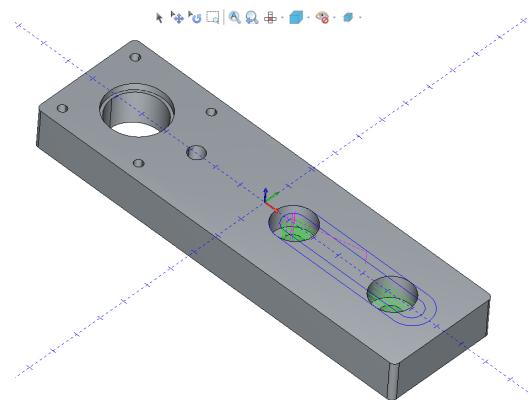


FIGURA 3.23. Piezas personalizada soporte de estructura superior.

Con los modelos 3D terminados, se fabricó un primer lote utilizando impresión 3D en plástico. Luego que las piezas fueron probadas, testeadas y aprobadas en el prototipo, se pasó a la fabricación final sobre aluminio.

Etapa CAM

La estrategia utilizada en el mecanizado CNC es el método de arranque de vía. Este consiste en partir de un bloque de aluminio con volumen de material suficiente y desbastar con herramientas de corte hasta modelar la pieza. Esta estrategia se programa en la parte CAM del software. Existen diferentes operaciones de mecanizado que se utilizan según el tipo de pieza que se deseé fabricar. Tal es el caso de refrentado, vaciado, fresado de chaflán, taladrado y roscado entre otras. Cada una de estas operaciones en general se realizan con herramientas específicas que son definidas en la configuración del software.

A modo de ejemplo se presenta en la figura 3.24 el listado de operaciones realizadas para la fabricación de la pieza soporte carro del equipo.



FIGURA 3.24. Operaciones de mecanizado en software Bodcad.

En general las piezas se fabrican en dos etapas, primero a través de diferentes operaciones se mecaniza la parte superior, luego se rota la pieza 180° y se mecaniza la parte inferior.

El material mecanizado para la fabricación de estas piezas 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 3.25 se observan ambas piezas fabricadas.

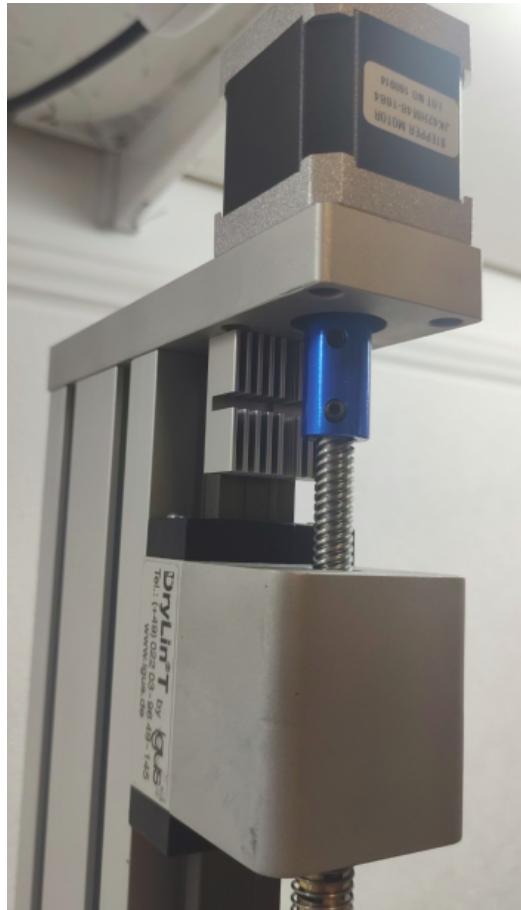


FIGURA 3.25. Piezas fabricadas en centro de mecanizado.

3.3.2. Modelos 3D y real

En la figura 3.26 se presenta el primer modelo 3D diseñado del equipo dip coater.

Luego de sucesivas iteraciones con pruebas de piezas impresas en material plástico se logró fabricar un primer prototipo completamente en metal que se presenta en la figura 3.27.

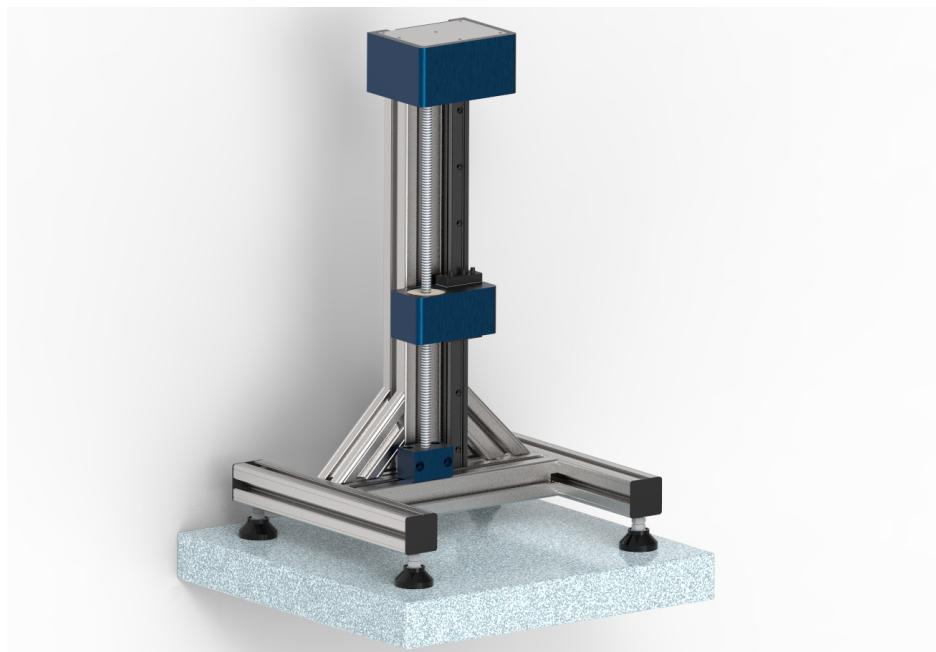


FIGURA 3.26. Modelo 3D.



FIGURA 3.27. 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 del equipo dip coater, se presentan y analizan los resultados obtenidos y se introducen posibles cambios para próximas versiones.

4.1.1. Comunicación con driver TMC5130

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. En la figura 4.1 se observa el esquema del banco de pruebas propuesto.

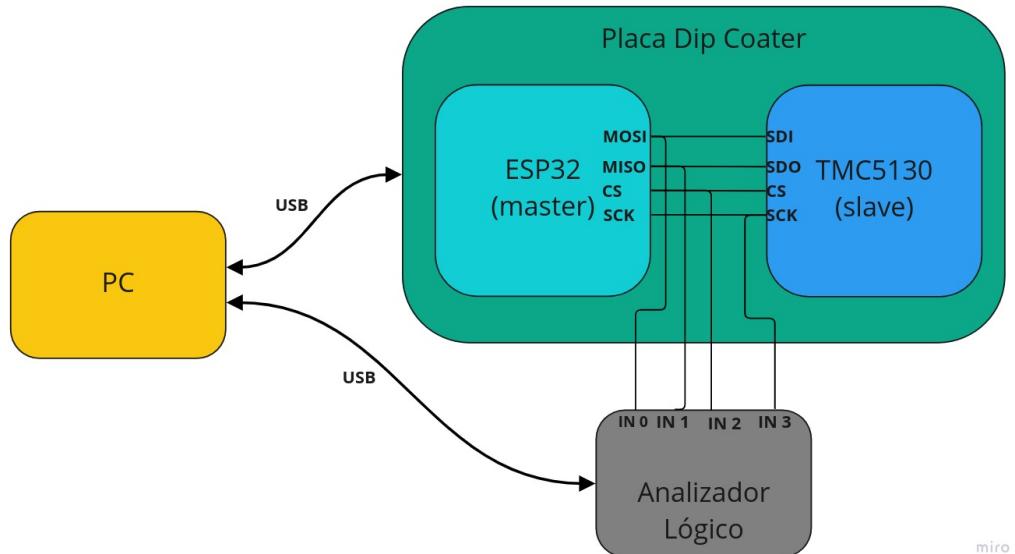


FIGURA 4.1. Banco de pruebas.

Para realizar el ensayo se conectó de manera provisoria el analizador lógico USB con las cuatro terminales que establecen la comunicación SPI entre el microcontrolador y el CI TMC5130. La comunicación con el CI TMC5130 está definida por datagramas de 5 bytes, el primer byte define la dirección del registro y los 4 bytes restantes representan su valor. Las operaciones de lectura y escritura tienen una diferencia que se representa en el byte de dirección. Cuando la operación es de escritura, se debe establecer en 1 el bit más significativo de dicho byte y cuando la operación es de lectura, la dirección no sufre alteración.

Se puede observar en la figura 4.2 el banco de pruebas.

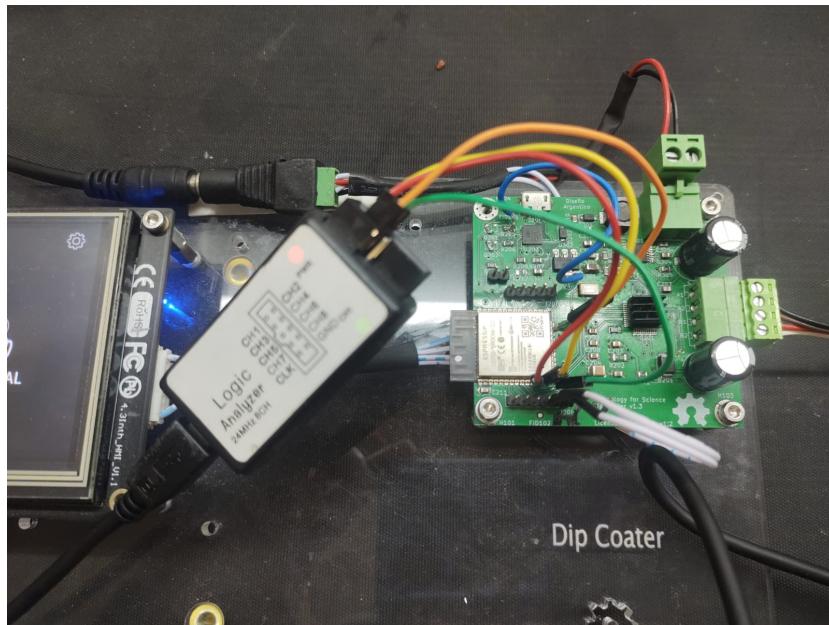


FIGURA 4.2. Ensayo sobre terminales SPI.

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] para verificar el valor ingresado en el item anterior.

El microcontrolador está configurado como dispositivo SPI *master*, por lo tanto, envía por el puerto MOSI y recibe por el puerto MISO. En la figura 4.3 se observa la ejecución del comando de lectura sobre el registro [0x2D].

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

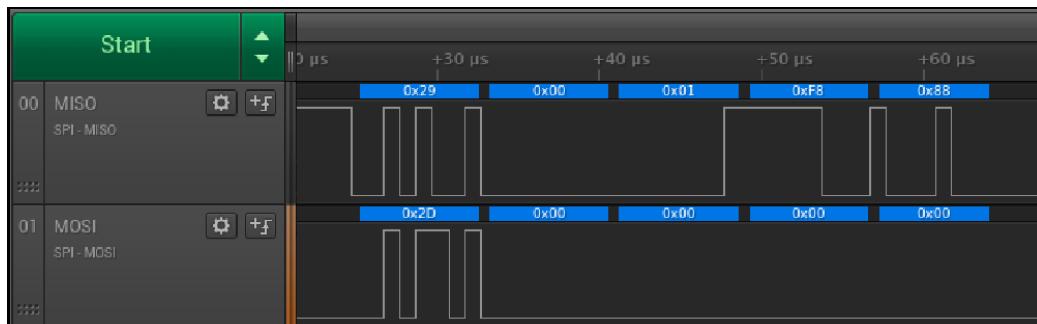


FIGURA 4.3. Comando de lectura sobre registro [0x2D].

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].

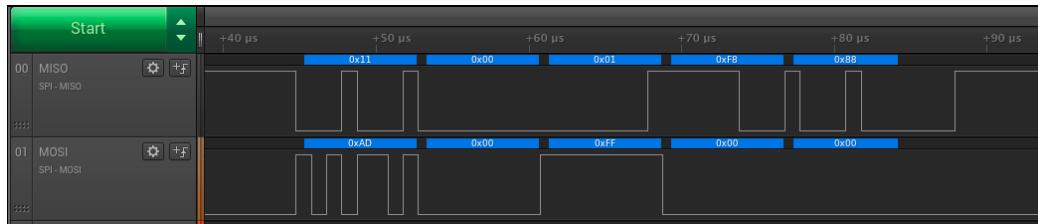


FIGURA 4.4. Comando de escritura sobre registro [0x2D].

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

- MOSI: [0x2D][0x00 0xFF 0x00 0x00].
- 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 comunicación SPI entre el microcontrolador y el CI TMC5130 para las operaciones de lectura y escritura de datos.

4.2. Pruebas funcionales del 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 cuatro puntos que define los movimientos del equipo. Con los valores de aceleración, desaceleración, velocidad y desplazamiento se calculó el tiempo teórico necesario para la ejecución de cada movimiento.

En la tabla 4.1 se observan los valores de los parámetros ensayados.

Para realizar el ensayo se implementó una aplicación de prueba que realiza el siguiente procedimiento:

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 |

1. Configuración de movimiento descendente con valores de velocidad, aceleración y desplazamiento.
2. Ejecución del movimiento descendente 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 serie.
4. Configuración y ejecución de movimiento ascendente con valores de velocidad, aceleración y desplazamiento.
5. Ejecución del movimiento ascendente y registro del tiempo del sistema.
6. Registro del tiempo del sistema al final del movimiento, cálculo de variación temporal y envío del dato por terminal serie.
7. Incremento de la tabla hacia nuevos parámetros de aceleración, velocidad y desplazamiento.
8. Repetición del ciclo.

Un ordenador conectado al equipo ejecuta un script de Python que guarda los datos recibidos en un archivo.

En la figura 4.6 se observa una comparación de tiempos teóricos respecto a tiempos registrados en el sistema. En el eje Y se representa el tiempo en milisegundos necesario para ejecutar cada movimiento y en el eje X la velocidad. Los puntos cercanos representan el movimiento descendente y ascendente con el mismo parámetro de velocidad y aceleración, por tal motivo se visualizan pares de puntos cercanos. El gráfico compara los tiempos teórico respecto a los tiempos registrados. A simple vista no se pueden visualizar diferencias significativas.

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

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.

4.2.2. Ejecución de comandos

El ensayo se realizó para verificar que solamente el comando stop es procesado cuando el equipo está en funcionamiento.

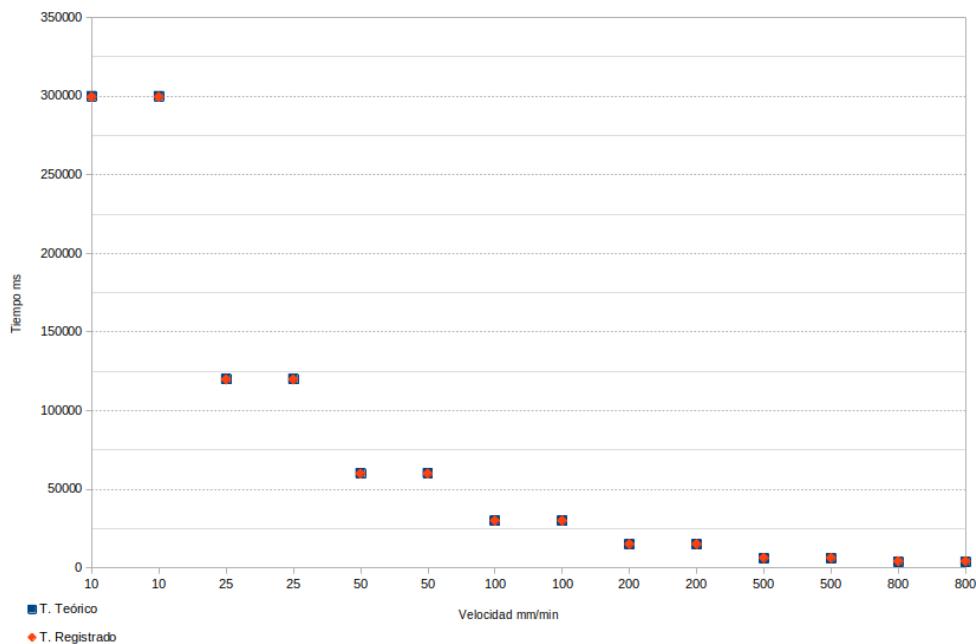


FIGURA 4.6. Comparación de tiempos teóricos y registrados.

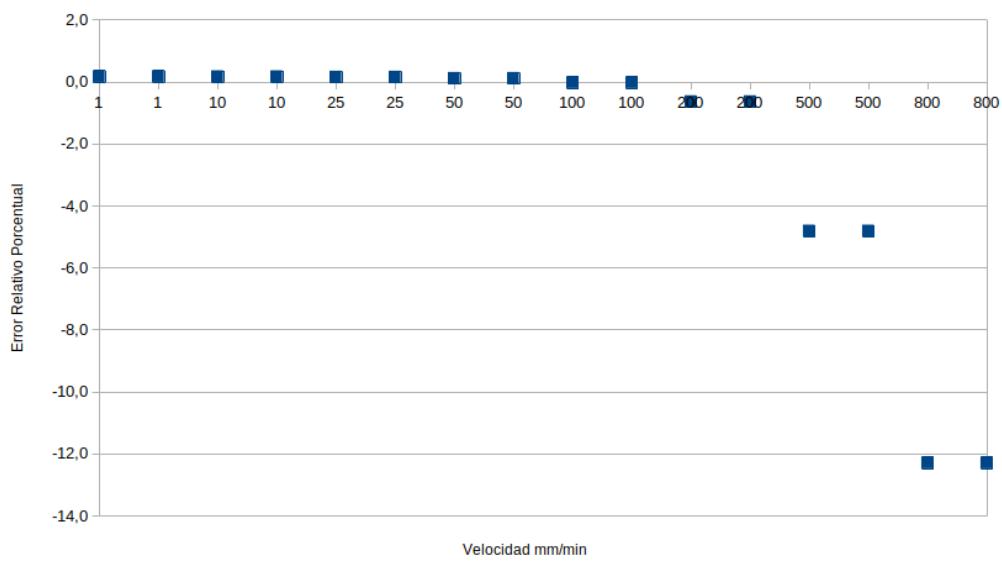


FIGURA 4.7. Error relativo porcentual.

Cada vez que el usuario ejecuta un comando sobre la consola, la aplicación app console procesa y envía el mensaje a través de una *queue* 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.

Para realizar el ensayo se implementó el siguiente procedimiento:

1. Ejecución de proceso dip coating.
2. Envió de comando DOWN.

3. Envío de comando STOP.

En la figura 4.8 se observa que luego de iniciar el proceso dip coating se envía el comando DOWN y el mismo es descartado sin afectar al proceso.

```
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 (118977) mod_coating_handlers: HandlerWaitDown
I (118977) mod_coating_handlers: HandlerUpLoop
I (118977) mod_coating_handlers: Vel:226120
I (118977) mod_coating_handlers: Accel:308187
I (1191227) mod_coating_handlers: HandlerWaitUp
I (1192227) mod_coating_handlers: HandlerFinish
```

FIGURA 4.8. Comando DOWN descartado por equipo en funcionamiento.

El único comando de movimiento que no se descarta es el comando STOP, que tiene un tratamiento especial a través de una *queue* propia y siempre se garantiza su ejecución. En la figura 4.9 se observa la finalización del proceso.

```
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 4.9. Comando STOP procesado.

Se realizó el ensayo con todos los comandos individuales presentados en la sección 3.2.2 y se verificó el correcto funcionamiento.

4.3. Calibración del equipo

4.3.1. Desplazamiento lineal y micropasos

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

Para realizar las mediciones se utilizó un comparador digital de la marca Asimeto[34], el cual puede observarse en la figura 4.10. El mismo tiene una resolución de 0.001 mm y permite desplazamientos de 0 a 50 mm.



FIGURA 4.10. 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 micropasos 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.



FIGURA 4.11. Ensayo de desplazamiento lineal.

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 tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

TABLA 4.2. Ensayo de desplazamiento lineal descendente

| Posición absoluta | Desplazamiento | 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 |

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

TABLA 4.3. Ensayo de desplazamiento lineal ascendente

| Posición absoluta | Desplazamiento | 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 |

Para corregir el valor de micropasos 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 micropasos con los respectivos errores.
3. Realizar un promedio entre el valor corregido ascendente y el valor corregido descendente.

Inicialmente al comenzar el ensayo la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* estaba definida con un valor de 12737 micropasos por milímetros, luego de sucesivas correcciones la macro quedó definida en 12932 micropasos 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 fue inferior al 2.5 %.

4.4. Caso de prueba

4.5. Prueba de campo con personal capacitado

El ensayo consistió en realizar un procedimiento completo de uso sobre el equipo dip coater con personal capacitado del Instituto de Nanosistemas.

La prueba implicó realizar el primer *thin films* del equipo, se utilizó un wafer de silicio como sustrato y una solución de dióxido de titanio disuelto en etanol para formar un *film* de nanopartículas de titanio. La prueba se realizó en el laboratorio Nanoatelier del Instituto de Nanosistemas de la Unsam, se observa en la figura 4.12 el equipo instalado. Se incorporó sobre el equipo una cámara de acrílico para generar un ambiente aislado.

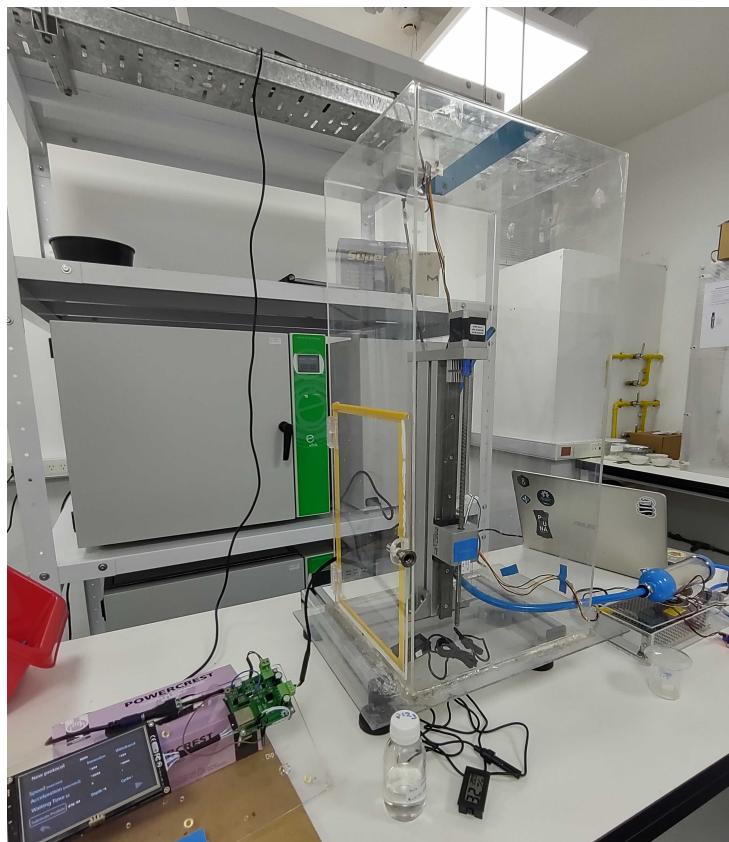


FIGURA 4.12. Ensayo completo en laboratorio.

Para realizar el experimento se siguió la siguiente secuencia:

1. Se conectó la cámara de acrílico del equipo a un suministro de aire comprimido. El suministro pasa por un filtro de sílica gel que baja la humedad del aire suministrado.
2. Se colocó un wafer de silicio sobre el carro del equipo y una solución dentro de una caja plástica debajo del carro como se observa en la figura 4.13.
3. Se encendió el equipo y el usuario configuró los parámetros del proceso a pie de máquina sobre la pantalla táctil.

4. En paralelo se controló la humedad de la cámara sobre la consola serial de un ordenador conectado al equipo.
5. Se esperó hasta lograr una humedad dentro de la cámara de 20 %.
6. Se inicio el proceso de dip coating.
7. Al finalizar se extrajo la muestra.

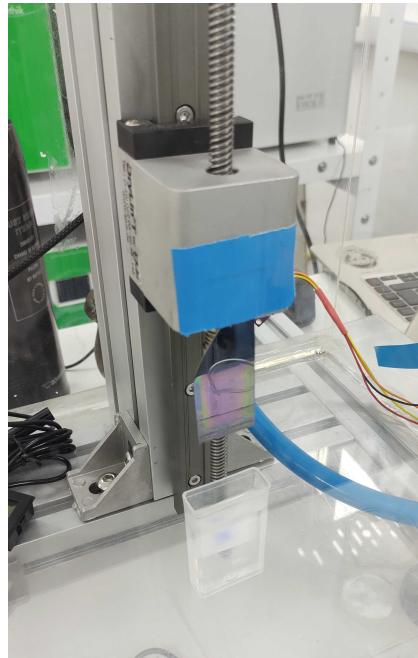


FIGURA 4.13. Wafer de silicio sobre carro.

Con este ensayo se pudo corroborar el funcionamiento correcto del equipo de manera integral, se destacó que los usuarios investigadores realizaron de manera intuitiva una correcta configuración de equipo. En la figura 4.14 se observa el primer *film* producido por el equipo. Los usuarios comentaron que el perfil visual que observaron sobre la muestra contaba con todas las características de un *film* correctamente fabricado.

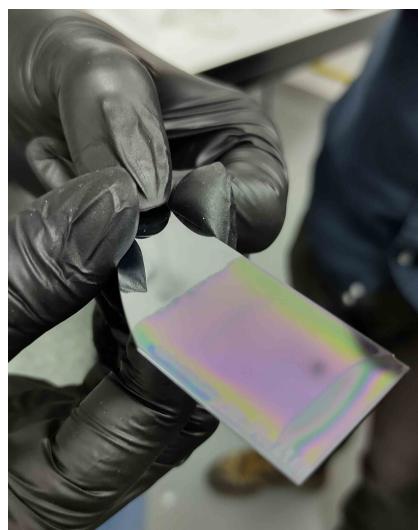


FIGURA 4.14. Ensayo final.

4.6. Comparación con el estado del arte

En esta sección se realiza una comparación del equipo fabricado respecto a los equipos comerciales presentados en la sección 1.3.

Se incorpora en la tabla 4.4 la columna *open source hardware* por la importancia que está especificación brinda al desarrollo del presente equipo.

TABLA 4.4. Comparación de especificaciones técnicas.

| Equipo | Recorrido | Velocidad (mm/min) | Aceleración (m/min ²) | Interface | Open Source Hardware |
|--------------------|-----------|-----------------------|--------------------------------------|-------------|----------------------------|
| Bio Single | 300 mm | 1 - 1000 | no | PC | no |
| Bio Multiplie | 70 mm | 0.1 - 108 | no | PC | no |
| Kibron LayerX | 134 mm | 0.06 - 300 | no | PC | no |
| Bungard | 600 mm | 30 - 10000 | no | Display LCD | no |
| Ossila | 100 mm | 0.6 - 3000 | no | PC | no |
| Holmarc | 100 mm | 1.08 - 540 | no | PC | no |
| Este Equipo | 300 mm | 1-800 | si | Touch-PC | si |

Se destacan aspectos únicos que diferencian este equipo respecto a los comerciales:

1. Puede realizar experimentos con control de la variable aceleración.
2. Se configura fácilmente a través de una pantalla táctil y también permite la configuración desde un ordenador.
3. Toda la información del equipo esta disponible, esto permite que el usuario aproveche todo el recurso según sus necesidades.

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 desarrollos. 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 de equipo dip coater que cuenta con las características suficientes para satisfacer las demandas de primeros usuarios. Se señalan a continuación los siguientes logros en el desarrollo del presente trabajo:

- Diseño y fabricación de un lote de cinco unidades con la primera versión de placa electrónica.
- Desarrollo de un firmware modular que cumple con todos los requerimientos y permite incorporar nuevas funcionalidades sin cambios importantes en la estructura.
- Generación de capacidad técnica suficiente para la fabricación de 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 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 incorporando los cambios mencionados en la sección 3.1.

- Se incorporará un módulo de software para controlar parámetros de humedad, que será integrado con el desarrollo futuro de una cámara de humedad compatible con este equipo.
- Durante el mes de octubre 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 trabaja en conjunto con un diseñador industrial para convertir este MVP en un producto comercial de la empresa TECSCI, el la figura 5.1 se observa el diseño que se está evaluando fabricar.



FIGURA 5.1. Render de equipo comercial.

Bibliografía

- [1] Technology for Scince. *TECSCI*. Visitado el 18-06-2022. URL: <https://www.tecsci.com.ar>.
- [2] OSH. *Open Source Hardware Association*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.oshwa.org/definition/spanish/>.
- [3] Martin Abel Gambarotta. *Firmware*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://gitlab.com/tecsci/dipcoater>.
- [4] Martin Abel Gambarotta. *Hardware*. Visitado el 15-03-2022. URL: https://github.com/martinch14/tecsci_dipcoater.hardware_kicad.
- [5] Nadetech. *Dip coating process*. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://nadetech.wordpress.com/2017/05/18/dip-coating/>.
- [6] Kibron. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.kibron.com/layerx-134>.
- [7] Biolin Scientific. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.biolinscientific.com/ksvnima/fabrication-and-deposition-of-thin-films/dip-coaters>.
- [8] Bungard. *Dip coater machine*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.bungard.de/en/machines/dip-coaters/rdc-15>.
- [9] Ossila. *Dip coater machine*. Visitado el 08-03-2022. URL: <https://www.ossila.com/products/dip-coater>.
- [10] Holmarc. *Dip coater machine*. Visitado el 10-03-2022. URL: https://www.holmarc.com/dip_coating_unit.php.
- [11] Trinamic. *Motion Control*. URL: <https://www.trinamic.com/>.
- [12] Kicad. *Open Source Electronics Design*. URL: <https://www.kicad.org/>.
- [13] 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>.
- [14] Nanotec. *Nema17*. Visitado el 29-03-2022. URL: <https://en.nanotec.com/products/250-st4118-stepper-motor-nema-17>.
- [15] Analog Devices. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.analog.com/en/index.html>.
- [16] Trinamic Motion Control. *TMC5130*. URL: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc5130a-ta/>.
- [17] TMC5130. *Schematic*. URL: <https://www.trinamic.com/support/eval-kits/details/tmc5130-eval/>.
- [18] Stoneitech. *HMI Stone Display*. URL: <https://www.stoneitech.com/>.
- [19] Perfiles de aluminio. *.Net*. Visitado el 22-03-2022. URL: <https://perfilesdealuminio.net/>.
- [20] Igus. *Plastics for longer life*. URL: <https://www.igus.com.ar/>.
- [21] Bobcad. *Bobcad CAD/CAM*. URL: <https://bobcad.com/>.
- [22] Fagor. *Fagor Automation*. URL: <https://www.fagorautomation.com/>.
- [23] Norma RS-274. *G-Code*. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823374.

- [24] ESP. *Espressif*. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://www.espressif.com/>.
- [25] Antonella Del Rosso. *KiCad software gets the CERN treatment*. 2015. URL: <https://home.cern/news/news/computing/kicad-software-gets-cern-treatment>.
- [26] *ESP-IDF over Eclipse IDE*. Visitado el 13-05-2022. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/release-v3.0/get-started/eclipse-setup.html>.
- [27] NodeMCU. *Open Source Hardware*. Visitado el 24-03-2022. URL: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0>.
- [28] CERN. *Open Hardware Licence*. URL: <https://ohwr.org/cernohl>.
- [29] Ernesto Mayer S.A. *Fabricante de circuitos impresos*. URL: <https://www.mayerpcb.com/>.
- [30] Asembli. *Montaje de Componentes*. URL: <https://www.asembli.com/>.
- [31] ESP-IDF. *Framework Espressif*. Visitado el 13-05-2022. URL: <https://github.com/espressif/esp-idf>.
- [32] Protocolo de comunicación STONE. *Protocolo STONE*. Visitado el 24-03-2022. URL: <https://www.stoneitech.com/wp-content/uploads/2022/06/Instruction-Sets-V1.5RC-20220615.pdf>.
- [33] Api Bosh. Visitado el 10-07-2022. URL: https://github.com/BoschSensortec/BME280_driver.
- [34] Asimeto. Visitado el 10-07-2022. URL: <https://www.asimeto.com/product-IP65-Digital-Indicators-Series-407.html>.