

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	12
2.4. Estructura mecánica	13
2.5. Equipo electrónico propuesto	14
3. Diseño e Implementación	17
3.1. Hardware	17
3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre	17
3.1.2. Fabricación	17
3.2. Firmware	20
3.2.1. Capas de abstracción	20
3.2.2. Framework de trabajo	20
3.2.3. Módulos principales	20
3.3. Estructura mecánica	20
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC	20
3.3.2. Modelos 3D y real	20
4. Ensayos y resultados	25
4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño	25
4.1.1. Comunicación con periféricos	25
4.1.2. Ensayo de funcionamiento continuo	25
4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño	25
4.2.1. Tiempo de ejecución de programas	25
4.3. Calibración mecánica del equipo	25
4.4. Pruebas de campo con personal capacitado	25
5. Conclusiones	27
5.1. Resultados obtenidos	27
5.2. Próximos pasos	27

Índice de figuras

1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo. Imagen tomada de ¹	2
1.3. Films de dioxido de titanio TiO ₂ ²	3
1.4. Equipo de la empresa Kibron.	4
1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.	4
1.6. Equipo de la empresa Bungard.	4
2.1. Espesor vs velocidad ³	7
2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130 ⁴	9
2.3. Diagrama en bloques TMC5130 ⁵	10
2.4. Función stallGuard2.	11
2.5. Función coolStep.	11
2.6. Guía Lineal IGUS.	13
2.7. Fresadora Fagor GVC 600.	14
2.8. Esquema propuesto.	15
3.1. Conversor UART-USB.	18
3.2. Clock para el CI TMC5130.	18
3.3. Módulo ESP32.	18
3.4. Módulo de entrada.	19
3.5. CI TMC5130.	19
3.6. Modelo 3D Kicad.	19
3.7. Placa fabricada MAYER SRL.	20
3.8. Pieza personalizada para el carro.	21
3.9. Estrategias de mecanizado en software Bodcad.	21
3.10. Piezas personalizado para sostener estructura superior.	22
3.11. Modelo 3D.	22
3.12. Primer prototipo dip coater TECSCI.	23

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	5
2.1. Comparación Stone	12

Dedicado a mis padres!

Capítulo 1

Introducción general

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

1.1. Contexto

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

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

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

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 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 impacto de esta incubación es positivo, ya que brinda herramientas para poder llevar a cabo los trabajos mecánicos necesarios para la fabricación del equipo. En la figura 1.1 podemos ver el taller mecánico donde se pueden fabricar todo tipo de piezas a través del mecanizado CNC (*Computer Numerical Control*), necesarias en una etapa de prototipado y también con la posibilidad de poder escalarlo hacia una etapa de producción.



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* que consisten en capas de material de espesores variables, que comúnmente van desde las centenas de nanómetros hasta las decenas de micrómetros y se depositan sobre diferentes superficies.

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

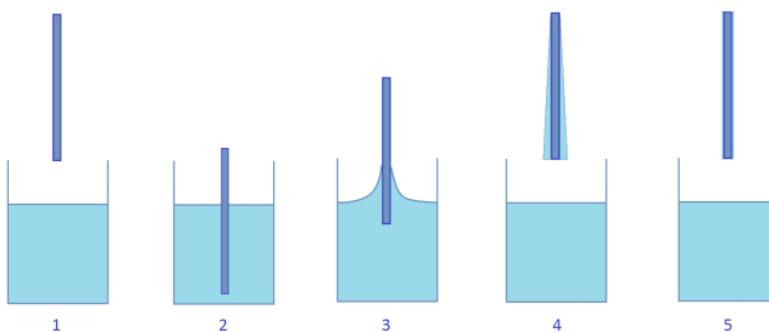


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo. Imagen tomada de ¹.

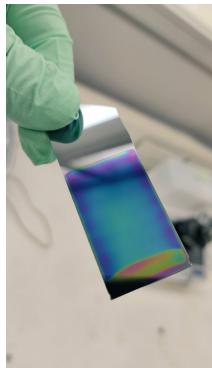
1. La muestra desciende a velocidad controlada.
2. La muestra queda sumergida un tiempo establecido por el usuario.

¹Imagen tomada de [4]

3. La muestra asciende a velocidad controlada, este es el punto más crítico del experimento, en donde el material queda adherido a la muestra, se estudiará en el capítulo 3 dos modelos matemáticos que explican este fenómeno y se dará una noción mas detallada de las velocidades que caracterizan el proceso.
4. Se extrae toda la muestra.
5. El usuario puede tener interés o no, en volver a repetir el proceso un tiempo después.

La principal característica del equipo es darle 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 podemos observar films de dioxido de titanio TiO_2 en la figura 1.3. 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 logrados en este experimento fueron entre 180 nm y 200 nm y la velocidad de inmersión y extracción de los sustratos de 180 mm/min.

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

1.3. Dip coaters en el mercado

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

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

En la figura 1.5 podemos ver los equipos de la empresa Biolin Scientific [6], un equipo simple y otro con mayor funcionalidad. Si bien ambos controlan con exactitud la velocidad de inmersión y extracción, el último agrega una funcionalidad

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



FIGURA 1.4. Equipo de la empresa Kibron.

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 presentamos el equipo de la empresa Bungard [7], que puede observarse en la figura 1.6. Este equipo a diferencia de los otros cuenta con un display LCD y botonera, 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.

Podemos entonces extraer algunas conclusiones, ninguno de los equipos permite al usuario tener control sobre la aceleración en los movimientos de inmersión y

TABLA 1.1. Especificaciones técnicas de otros equipos.

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

extracción de muestra, la mayoría de los equipos depende de una comunicación USB-SERIAL con una computadora para poder ser ejecutados, ninguna de las empresas adhiere a los principios del software y hardware libre.

1.4. Objetivos y alcance

1.4.1. Objetivos

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

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

1.4.2. Alcance

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

Abarcó los siguientes puntos:

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

El trabajo no incluyó:

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

Capítulo 2

Introducción específica

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

2.1. Estudio preliminar

Para entender la relación entre la velocidad de extracción y el espesor de material depositado se tuvo en consideración la siguiente publicación (*Preparation of Sol-Gel Films by Dip-Coating*) [12], que describe la técnica dip coating como un proceso dinámico, complejo, 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 velocidades utilizadas, también se puede observar la relación entre los diferentes modelos aplicados.

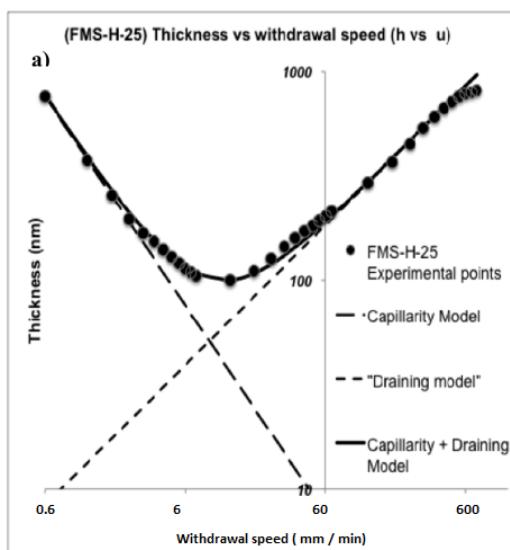


FIGURA 2.1. Espesor vs velocidad ¹.

¹Imagen tomada de [12].

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

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

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

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

2.2. Circuitos integrados Trinamic

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

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

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

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

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

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

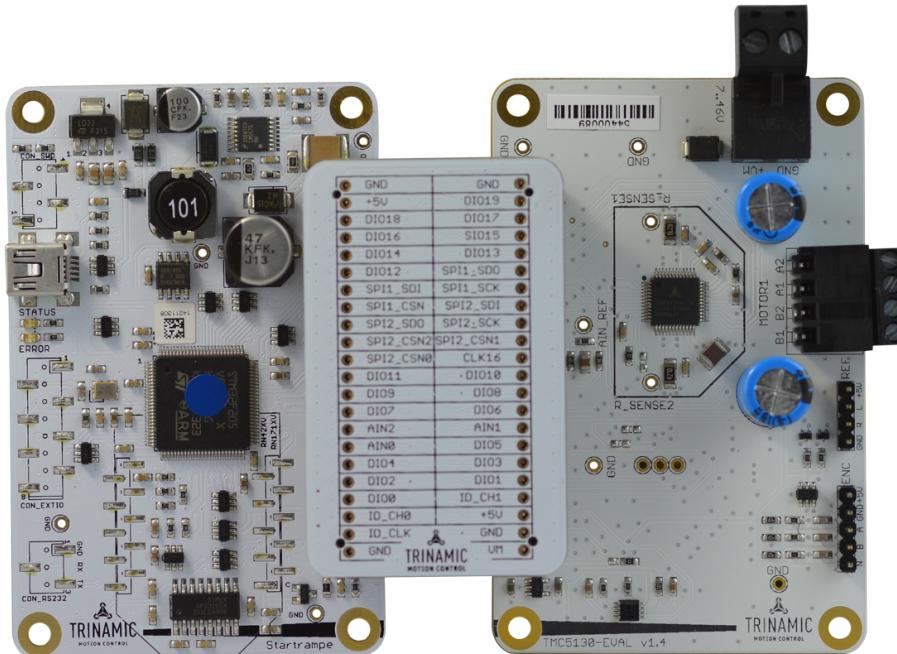


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130².

2.2.1. Driver TMC5130

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

Podemos observar en la figura 2.3 el diagrama en bloque del CI.

La comunicación con el CI se puede establecer a través del protocolo *UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)* o *SPI (Serial Peripheral Interface)*, en el caso de nuestro equipo utilizaremos la comunicación SPI.

Una característica importante a destacar es la posibilidad de programar la cantidad de pasos que da el motor. Los pasos están relacionados con las fases y con la cantidad de dientes que tiene el rotor y estator del motor. Un paso es el movimiento mínimo que el motor puede hacer. Un motor paso a paso, como su nombre lo indica, realiza movimientos a través de pasos sucesivos. Por ejemplo es comú-

²Imagen tomada de [10].

³Imagen tomada de [10].

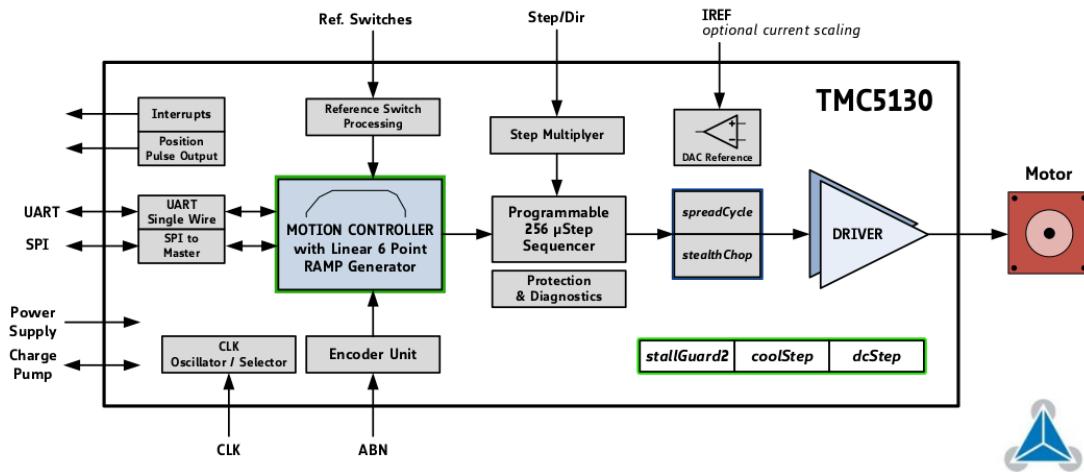


FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130³.

contar con algún motor en donde la especificación dice que el paso es de (1.8°), esto significa que por cada vuelta de motor (360°) el motor 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°) tendríamos en total 51200 micropasos como se observa en la ecuación 2.1.

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

En nuestro equipo el motor estará acoplado a un eje lineal para generar un movimiento. Por lo tanto cada micropaso del motor estará asociado a un desplazamiento lineal que se analizará en el capítulo 3.

Otra funcionalidad que se utilizará es *Stallguard2*, una función de alta precisión que mide la fuerza contraelectromotriz generada en las bobinas del motor por cambios de carga en el eje. Como se observa en la figura 2.4 el valor de stallguard se decrementa linealmente a medida que la carga en el eje del motor aumenta. En nuestro caso se utilizará esta funcionalidad para realizar un posicionamiento inicial que servirá de referencia para todos los desplazamientos posteriores. Cada vez que el equipo se enciende que ejecuta esta funcionalidad para buscar el respectivo cero de máquina.

También se utilizará *coolStep*, una función que a través de mediciones de carga en el eje del motor adapta automáticamente la corriente suministrada hacia las bobinas, aumentando la eficiencia como puede observarse en la figura 2.5, cuyo efecto reduce la energía según hojas de datos [15] hasta un 75 %. Incluso en aplicaciones en donde la carga es constante como es el caso de nuestro equipo.

Por último se utilizará la función *dcStep*, que es un modo de conmutación automática que ajusta la velocidad del motor en caso de existir cierta sobrecarga sobre 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.

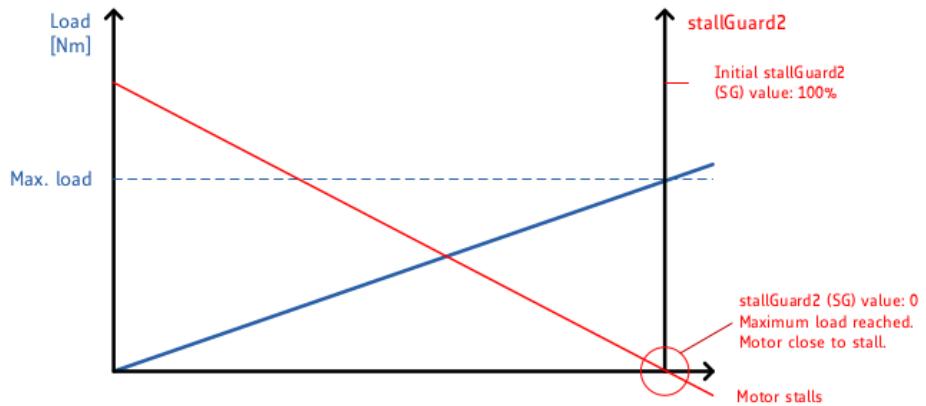


FIGURA 2.4. Función stallGuard2.

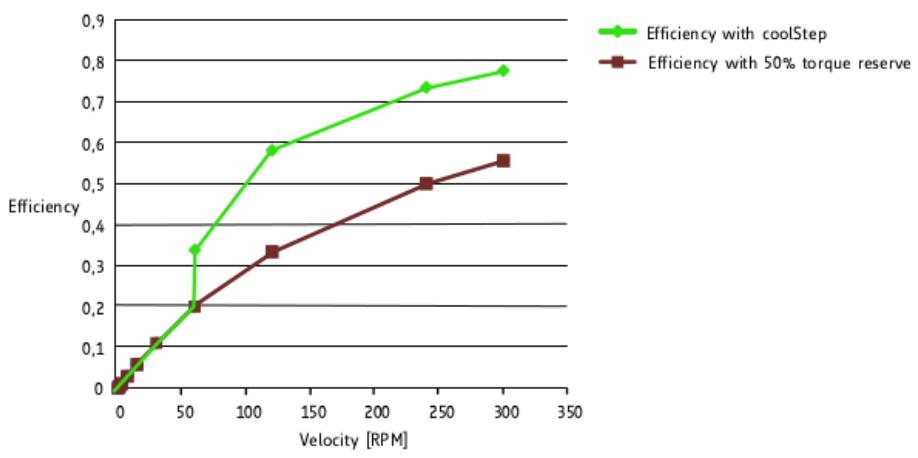


FIGURA 2.5. Función coolStep.

El driver TMC5130 cuenta con 50 registros que se utilizan para configurar las funcionalidades del CI y controlar el motor conectado. El acceso a los registros se realizará a través del protocolo SPI. En el capítulo 3 de darán mas detalles de los registros configurados con la ayuda del software TMCL-IDE.

2.3. Interfaz de usuario

Respecto a la interfaz usuario-máquina surgió en reuniones con el cliente la necesidad de contar con una interfaz moderna, que permita a un usuario dentro de un laboratorio configurar el 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)*, este tipo de pantallas incorpora una unidad de procesamiento que se encarga exclusivamente del procesamiento gráfico. Cuentan con un software de diseño para la creación de la interfaz gráfica, que a través de un protocolo de comunicación definido por cada fabricante interactúa con el sistema de control, permitiendo finalmente controlar y configurar el equipo. En nuestro caso la pantalla se comunica con un microcontrolador, pero podría comunicarse con algún otro sistema de control como por ejemplo un *PLC (programmable logic controller)*,

Luego de una investigación de mercado se eligió a la empresa STONE [17]. El fabricante ofrece un catálogo amplio de equipos y en nuestro caso por las dimensiones finales del equipo se optó por pantallas de 4.3 pulgadas. Se detalla 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	256MB	128MB
Color	262 K	65 K
PCB	2.0mm black, ROHS	1.6mm 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 realizará a través del protocolo UART.

2.4. Estructura mecánica

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

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

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

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

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

Se decidió entonces trabajar con la empresa IGUS [19], que se especializa en la fabricación de polímeros. La empresa ofrece guías lineales que se deslizan en lugar de rodar, es decir no tienen rodamientos. Los polímeros están combinados con materiales anticorrosivos y no requieren 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.

Para el diseño y fabricación de piezas mecanizadas en aluminio se trabajó con el software BOBCAD [20] CAD/CAM (*Computer-Aided Design /Computer-Aided Manufacturing*). Un software utilizado en la industria manufacturera compuesto por dos módulos fundamentales que abarcan los aspectos de diseño y luego de respectiva fabricación.

Con la parte CAD diseñamos un primer modelo 3D de pieza y antes de comenzar con el módulo CAM, realizamos una impresión 3D con filamento PLA para probar las dimensiones y factibilidad de la pieza. Una vez que el modelo queda aprobado comenzamos con el módulo CAM, este módulo se encarga de convertir el modelo 3D en lenguaje de máquina que el equipo puede interpretar. Se observa en la imagen 2.7 la fresadora CNC (*computer numerical control*) de la marca FAGOR [21] disponible en el taller mecánico. El control de la fresadora interpreta el código G-CODE también conocido como RS-274 [22] y lo convierte en los respectivos movimientos de motores.



FIGURA 2.7. Fresadora Fagor GVC 600.

2.5. Equipo electrónico propuesto

Se presentan a continuación los siguientes requerimientos:

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

De reuniones con el cliente y de la necesidad de trabajar con un equipo que permita a futuro contar con una comunicación Wi-Fi, surgió el requerimiento de trabajar con el módulo ESP32 [23].

El ESP32 es un módulo del tipo *SoC (system on a chip)* que integra mayores prestaciones a demás de su de unidad de procesamiento. Para almacenar los programas generados por el usuario se utilizará la memoria flash incorporada en el módulo.

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

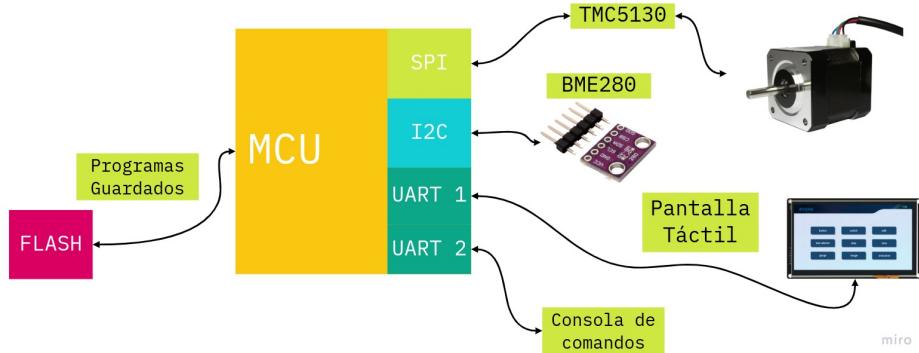


FIGURA 2.8. Esquema propuesto.

1. Módulo ESP32-WROOM.
2. Consola de comandos para establecer una comunicación entre el equipo y una computadora (Protocolo UART).
3. Driver TMC5130 (Protocolo SPI).
4. Pantalla táctil STONE STWI043WT (Protocolo UART).
5. Almacenamiento de programas (FLASH Interna).

Capítulo 3

Diseño e Implementación

En el siguiente capítulo se presentará el diseño y la implementación de las tres partes fundamentales del equipo. Se abarcarán aspectos de hardware, firmware y diseño mecánico.

3.1. Hardware

3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre

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

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

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

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.

El módulo NodeMCU en una placa de desarrollo que contiene el SoC ESP32-WROOM, cuenta también con un conversor SERIAL-USB que permite conectar el módulo directamente a un puerto USB de computadora. Permitiendo de esta manera descargar el firmware sin necesidad de contar con un programador externo. El la imagen

3.6

Finalmente podemos observar en la figura 3.6 el diseño 3D generado por el software KICAD. La placa cuenta con licencia CERN OHL v.1.2 [25].

3.1.2. Fabricación

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

- Grilla de posicionamiento principal: 0.25mm
- Grilla de ruteo principal: 0.25mm
- Agujeros de montaje: 3.2mm

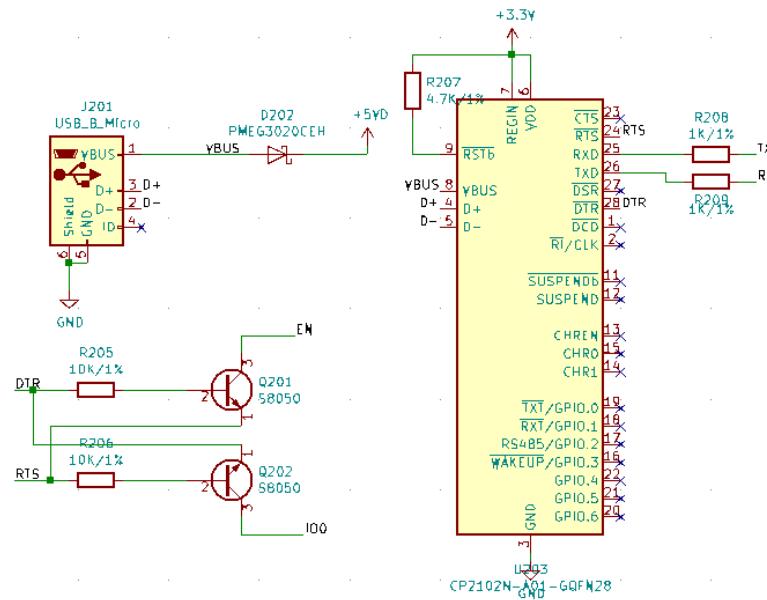


FIGURA 3.1. Conversor UART-USB.

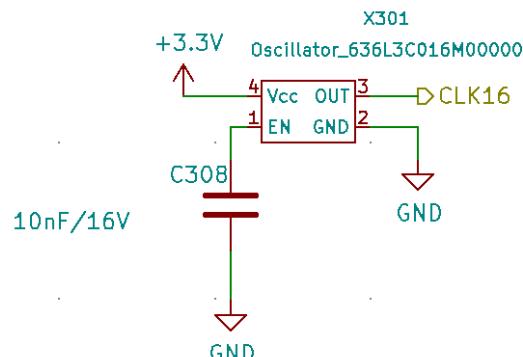


FIGURA 3.2. Clock para el CI TMC5130.

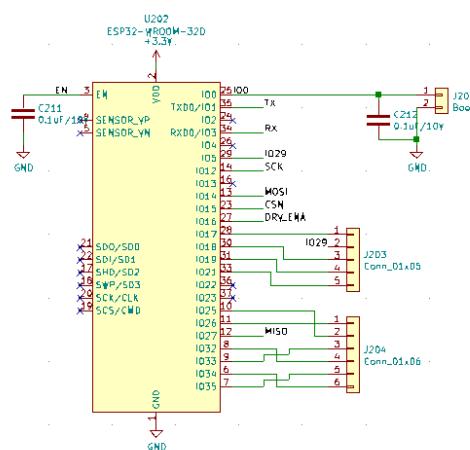


FIGURA 3.3. Módulo ESP32.

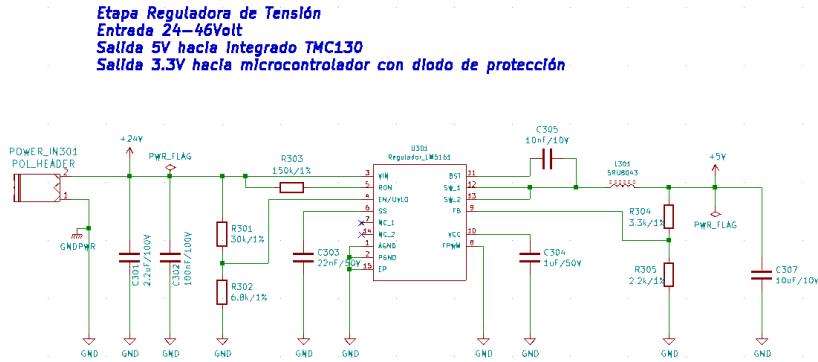


FIGURA 3.4. Módulo de entrada.

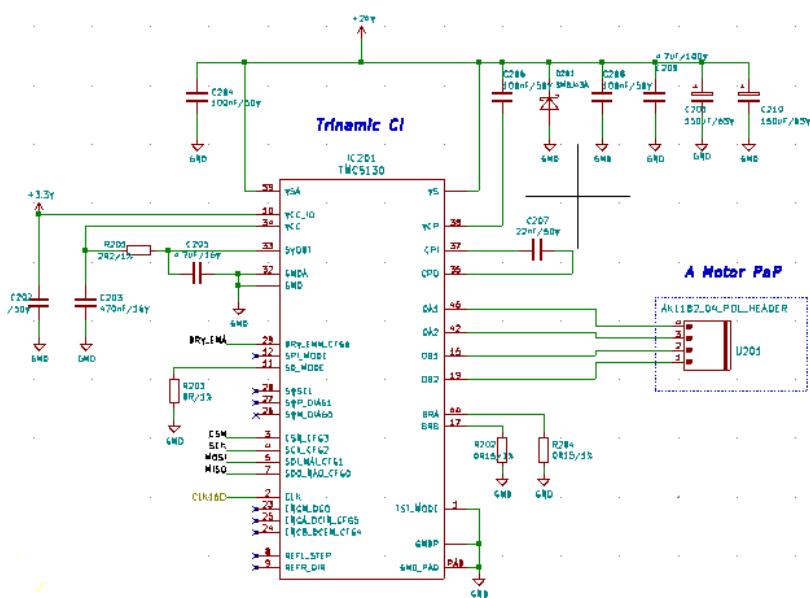


FIGURA 3.5. CI TMC5130.

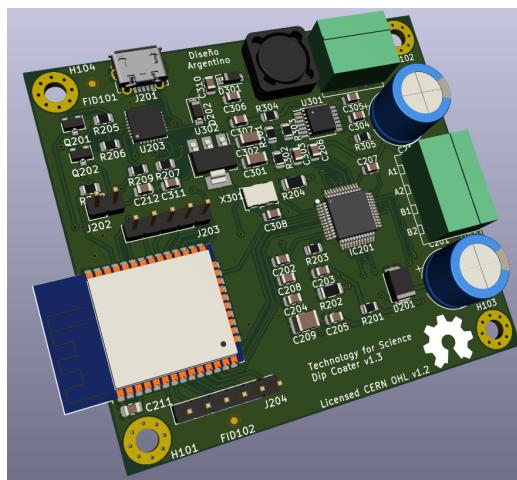


FIGURA 3.6. Modelo 3D Kicad.

- Pistas principales: 0.5mm
- Pistas inferiores: 0.25mm (límite particular 8mils(0.20mm))
- Pistas superiores: 0.8mm
- Vías: 0.8mm/0.4mm (límite particular 8mils(0.20mm))
- Margen general: 0.22 mm
- Margen particular: 0.2 mm (límite particular 8 mils(0.20mm))
- Fabricación: espesor 1.6mm FR4
- Restricciones generales del fabricante: estándar 10 mils

Luego de fabricar el PCB, se continuó con el todo el montaje de componentes electrónicos superficiales que estuvo a cargo de la empresa Asembli S.A. [27].



FIGURA 3.7. Placa fabricada MAYER SRL.

3.2. Firmware

3.2.1. Capas de abstracción

3.2.2. Framework de trabajo

3.2.3. Módulos principales

3.3. Estructura mecánica

3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC

Como se menciono en la 2.4 se utilizó para el software BOBCAD

3.3.2. Modelos 3D y real

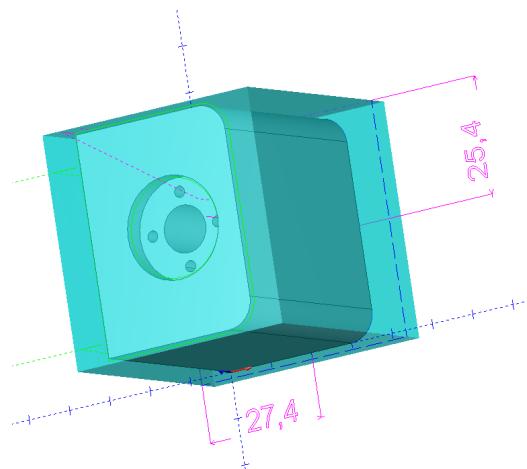


FIGURA 3.8. Pieza personalizada para el carro.



FIGURA 3.9. Estrategias de mecanizado en software Bodcad.

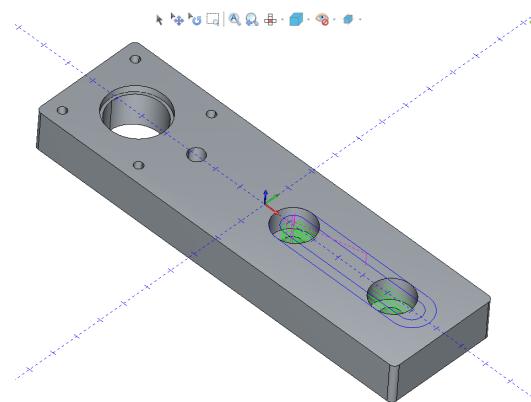


FIGURA 3.10. Piezas personalizado para sostener estructura superior.

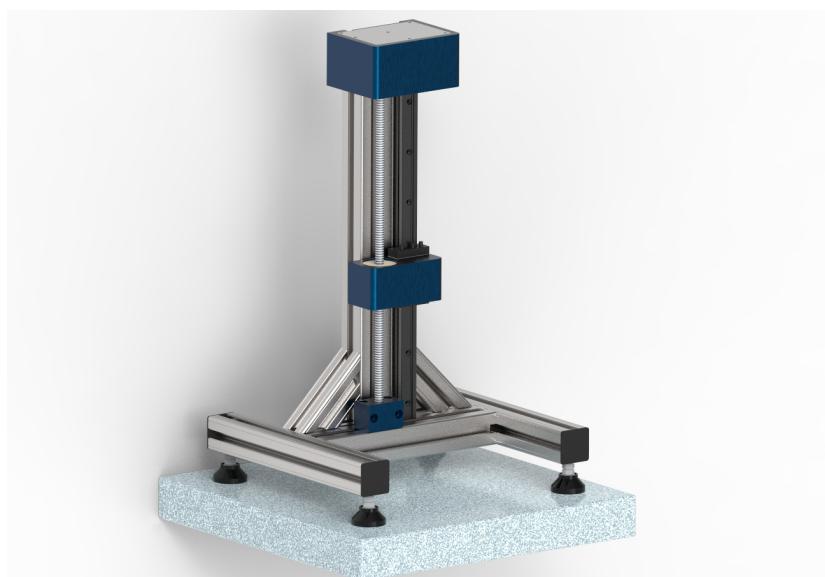


FIGURA 3.11. Modelo 3D.



FIGURA 3.12. Primer prototipo dip coater TECSCI.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.

4.1.1. Comunicación con periféricos

4.1.2. Ensayo de funcionamiento continuo

4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño

4.2.1. Tiempo de ejecución de programas

4.3. Calibración mecánica del equipo

4.4. Pruebas de campo con personal capacitado

Capítulo 5

Conclusiones

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

5.1. Resultados obtenidos

El principal hito del trabajo fue fabricar un MVP (producto mínimo viable) de equipo dip coater que cuente con las características suficientes para satisfacer las demandas de primeros usuarios. Podemos entonces señalar los siguientes logros en el desarrollo del presente trabajo:

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

Lamentablemente la planificación original no pudo ser sostenida, abarcar íntegramente la fabricación de un MVP fue demasiado trabajo para los tiempos y recursos establecidos. Existieron retrasos en tareas en las cuales el autor no contaba con los conocimientos necesarios para su correcta definición, principalmente en todo el diseño y fabricación mecánica. 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.
- En lo inmediato se incorporará un módulo de software para el registro de parámetros de humedad y temperatura, que será integrado con el desarrollo futuro de una cámara de humedad compatible con este equipo.

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

Bibliografía

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

- [24] NodeMCU. *Open Source Hardware*. Visitado el 24-03-2022. URL: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0>.
- [25] CERN. *Open Hardware Licence*. URL: <https://ohwr.org/cernohl>.
- [26] Ernesto Mayer S.A. *Fabricante de circuitos impresos*. URL: <https://www.igus.com.ar/>.
- [27] Asembli. *Montaje de Componentes*. URL: <https://www.asembli.com/>.