

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. Movimientos controlados	7
2.1.1. Estudio preliminar	7
2.1.2. Circuitos Integrados Trinamic	8
2.1.3. Driver TMC5130	9
2.2. Interfaz de usuario	11
2.3. Equipo propuesto	12
2.3.1. Componentes electrónicos	12
2.3.2. Componentes mecánicos	12
3. Diseño e Implementación	15
3.1. Hardware	15
3.1.1. Diseño y fabricación	16
3.2. Firmware	16
3.2.1. Capas de abstracción	16
3.2.2. Framework de trabajo	16
3.2.3. Módulos principales	16
3.3. Estructura mecánica	16
3.3.1. Modelos 3D	16
3.3.2. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC	16
4. Ensayos y resultados	17
4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño	17
4.1.1. Comunicación con periféricos	17
4.1.2. Ensayo de funcionamiento continuo	17
4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño	17
4.2.1. Tiempo de ejecución de programas	17
4.3. Calibración mecánica del equipo	17
4.4. Pruebas de campo con personal capacitado	17
5. Conclusiones	19
5.1. Conclusiones generales	19

5.2. Próximos pasos	19
Bibliografía	21

Índice de figuras

1.1.	Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2.	Proceso completo desarrollado por el equipo.	2
1.3.	Films de dioxido de titanio TiO ₂ ¹	3
1.4.	Equipo de la empresa Kibron.	3
1.5.	Equipos de la empresa Biolin Scientific.	4
1.6.	Equipo de la empresa Bungard.	4
2.1.	Espesor vs extracción. Imagen tomada de publicación.	8
2.2.	Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130.	9
2.3.	Diagrama en bloque TMC5130.	10
2.4.	Función stallGuard2.	10
2.5.	Función coolStep.	11
2.6.	Display táctil Stone.	12
2.7.	Esquema propuesto.	13
2.8.	Guía Lineal IGUS.	13
3.1.	Modelo 3D Kicad.	15
3.2.	Placa fabricada MAYER SRL.	16

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	4
2.1. compatación 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 a 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 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.

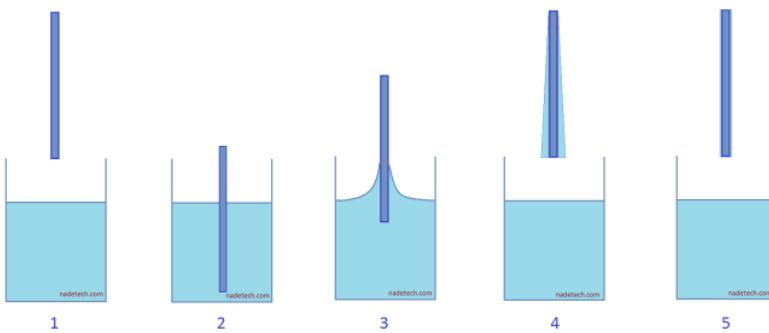
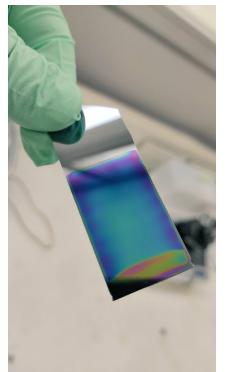


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo.

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 TiO₂¹.

Cabe destacar que los espesores logrados en este experimento fueron entre 180 nm a 200 nm y la velocidad de 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 [4].



FIGURA 1.4. Equipo de la empresa Kibron.

En la figura 1.5 podemos ver los equipos de la empresa Biolin Scientific [5], 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 automáticamente las soluciones donde se realizan las inmersiones. Ambos equipos necesitan estar conectados a una computadora corriendo un software para poder ser accionados.

¹Imagen tomada en los laboratorios del Instituto de Nanosistemas de la Unsam



(A) Equipo simple.



(B) Equipo avanzado.

FIGURA 1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.

Por último presentamos el equipo de la empresa Bungard [6], 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.

TABLA 1.1. Especificaciones técnicas de otros equipos

Equipo	Recorrido	Velocidad (mm/min)	Acel (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/botón
Ossila [7]	100 mm	0.6 - 3000	no	pc
Holmarc [8]	100 mm	1.08 - 540	no	pc

Podemos entonces extraer al menos dos conclusiones, ninguno de los equipos permite al usuario tener control sobre la aceleración en los movimientos de inmersión y extracción de muestra, y la mayoría dependen de una comunicación usb-serial con una computadora para poder ser ejecutados.

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:

- Desarrollo de firmware que contemple la comunicación con driver TMC5130 [9].
- Diseño del hardware con software de diseño KICAD [10].
- Fabricación del PCB y montaje de componentes electrónicos.
- Diseño y fabricación de partes mecánicas soporte del equipo a través de mecanizado CNC.
- Incorporación de pantalla táctil *HMI* (*human machine interface*) 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 este capítulo se presentarán los módulos principales del equipo dip coater fabricado y las tecnologías asociadas a cada uno ellos.

2.1. Movimientos controlados

2.1.1. Estudio preliminar

De la experiencia de uso del cliente con diferentes equipos dip coater se desprenden a continuación una serie de requerimientos funcionales respecto a los movimientos que se tienen en cuenta para la elección de las tecnologías:

1. El sistema debe permitir que el usuario pueda configurar en un programa variables de desplazamiento y tiempos de espera.
2. El sistema debe contar con un rango de velocidades de desplazamiento de muestra entre [1- 1000 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$].
3. El sistema debe contar con un rango de aceleraciones de desplazamiento de muestra entre [1000 - 15000 $\frac{\text{m}}{\text{min}^2}$].

Como se describió en el sección 1.2 para lograr *films* sin daños estructurales en su conformación es importante controlar con exactitud las variables de movimiento. Para entender el impacto de un control correcto se tuvo en cuenta la publicación [11] en donde se describe la técnica dip coating como un proceso dinámico complejo difícil de modelar, debido a los gradientes de concentración y viscosidad inducidos por la evaporación de la solución. Sin embargo, es una técnica muy difundida porque es simple y proporciona una excelente reproducibilidad.

Existen entonces modelos matemáticos basados en la mecánica newtoniana que no tienen en cuenta la evaporación de las soluciones y requieren varias suposiciones y simplificaciones. En estos modelos llegar a la predicción del espesor depende de la densidad, la tensión superficial y la viscosidad del fluido. El problema con este modelo es que la mayoría de las soluciones utilizadas son fluidos no-newtonianos, es decir en donde el solvente de la solución se va evaparonado en simultáneo con la extracción de la muestra induciendo una modificación en la densidad, tensión superficial y viscosidad del fluido.

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.

Se observa en la figura 2.1 la variación de los espesores fabricados respecto a la velocidad utilizada, también se puede observar como se relacionan los diferentes modelos.

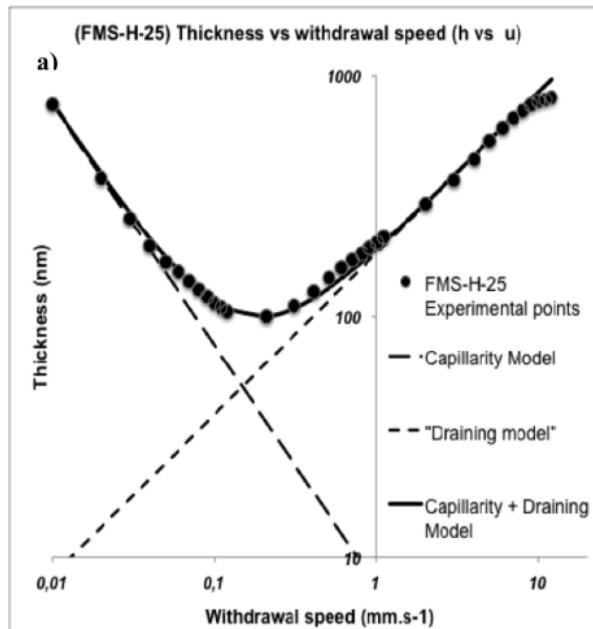


FIGURA 2.1. Espesor vs extracción. Imagen tomada de publicación.

Los resultados del experimento concluyen en que existe linealidad en la relación de espesos respecto la velocidad de extracción entre $60 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ y $600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. En donde el fenómeno se puede explicar por el modelo de evaporación.

La importancia de estos resultados es que el rango de velocidades quedó incluido dentro de los requerimientos de nuestro equipo. Cabe destacar que todos los experimentos en la publicación fueron 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 nuestro equipo de todos los equipos comerciales relevados.

2.1.2. Circuitos Integrados Trinamic

Del estudio del proceso dip coating y teniendo en cuenta la importancia del control preciso necesario para el desarrollo del experimento se propone entonces trabajar con el fabricante de circuitos integrados *TRINAMIC Motion Control*[12]. Como su nombre lo indica Trinamic se dedica a fabricar circuitos integrados para el control de diferentes tipos de motores, su lema se basa en convertir señales digitales de control en movimientos precisos. Tiene una trayectoria de veinte años en la industria y actualmente fue adquirida por la compañía Analog Devices. De las reuniones con el cliente y el estudio se definen entonces los siguientes requerimientos:

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

Cabe destacar que los integrados fabricados por la empresa Trinamic se utilizan en diversas aplicaciones en donde la precisión importa, como por ejemplo impresión 3D, automatización industrial, robótica, equipos de laboratorio médico entre otras. Cuenta con una amplia gama de productos que se diferencian en general por el tipo de motor que se quiera accionar. En nuestro caso como ya tenemos definido la utilización del motor paso a paso vamos a trabajar con el integrado diseñado para dicho fin, el mismo será el TMC5130.

Todos los integrados requieren ser configurados para su correcta utilización, es por eso que la empresa a demás de proveer los circuitos integrados, ofrecen placas de desarrollo que permiten dar los primeros pasos respecto a la configuración del los CI. La placa de desarrollo para este integrado es la *TMC5130-Eval Evaluation Board*, la misma esta conectada a otra placa general compatible con diferentes placas de evaluación con la cual a través de un software provisto por el fabricante podemos realizar trabajos de configuración en el circuito integrado y encontrar los parámetros que mejor se adaptan al motor que utilizaremos y a la carga que el mismo tenga aplicado. A continuación en la figura 2.2 podemos observar a izquierda la placa Startrampe que se conecta entre la computadora y la placa de evaluación del circuito integrado TMC5130 que se observa a derecha.

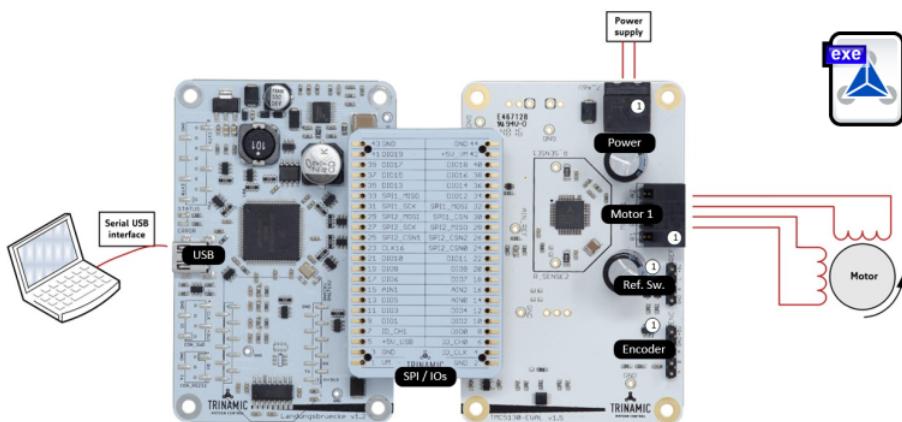


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130.

2.1.3. Driver TMC5130

El driver TMC5130 es un driver que permite operar motores bipolares de dos fases, comúnmente conocidos como motores paso a paso. El circuito integrado incorpora la respectiva etapa de potencia a través de tecnología *MOSFET* (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) que le permite manejar corrientes de hasta 2 amperios por fase. A continuación describiremos los módulos principales del CI y en el capítulo 3 se darán mas detalles de la configuración de los módulos implementados en nuestro equipo.

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 muy importante a destacar es la posibilidad de programar micropasos. Los pasos están relacionados con las fases y con la cantidad de dientes que tiene el rotor y estator

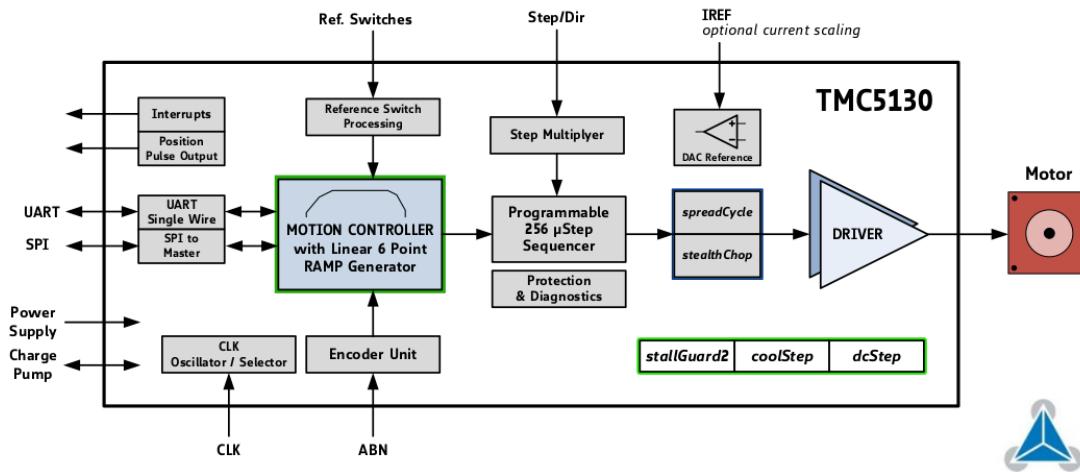


FIGURA 2.3. Diagrama en bloque TMC5130.

del motor. Un paso es el mínimo movimiento 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 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 micro pasos, y se pueden llegar a 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.

Otra funcionalidad que se utilizará es *Stallguard2*, una función de alta presión que mide la fuerza contraelectromotriz generada en las bobinas del motor por cambios en la carga en el eje del motor. Como se observa en la figura 2.4 el valor de stallguard se decremente linealmente a medida que la carga en el eje del motor aumenta. En nuestro caso se utilizará esta funcionalidad para realizar un *homing* inicial en el equipo, es decir para encontrar una posición inicial que sirva como referencia para todos los desplazamientos posteriores.

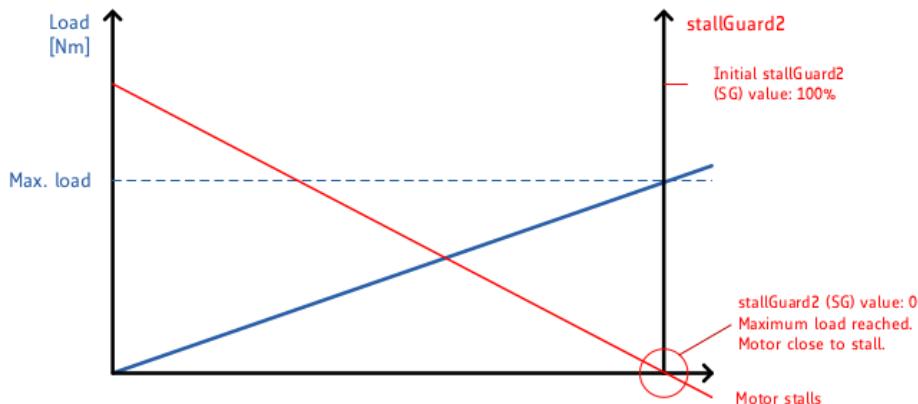


FIGURA 2.4. Función stallGuard2.

También se utilizará *coolStep*, una función que a través de mediciones de carga en el eje del motor adapta automáticamente la corriente suministrada en las bobinas,

cuyo efecto reduce la energía según hojas de datos hasta un 75 % como puede observarse en la figura 2.5. Incluso en aplicaciones en donde la carga es constante como es el caso de nuestro equipo el efecto de ahorro energético es considerable.

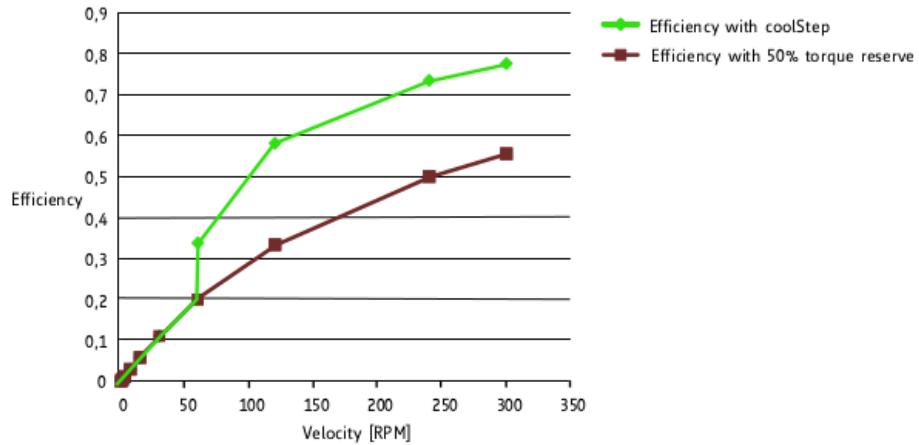


FIGURA 2.5. Función coolStep.

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

En el capítulo 3 se darán mas detalles de las configuraciones particulares con las que cuenta el equipo.

2.2. Interfaz de usuario

Respecto a la interfaz usuario-máquina surgió de reuniones con el cliente que se esperaba contar con una interfaz moderna de configuración. También se esperaba poder configurar el equipo a pie de máquina evitando estar conectado con una computadora como única opción. Dando así lugar al siguiente requerimiento:

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

Luego de una investigación de mercado sobre los diferentes fabricantes de pantallas táctiles y teniendo en cuenta la relación costo-calidad se eligió una pantalla del fabricante STONE [13]. La pantalla seleccionada es la STWI043WT/N-01 de 4.3 pulgadas cuyas especificaciones se detallan en la siguiente tabla 2.1 y se compararán con su modelo predecesor:

TABLA 2.1. comparación de pantallas touch stone 4.3 inch

	STWI043WT	STVI043WT	NX4827P043
CPU	Cortex A8	CortexM4	
Refresh Rate	1G Hz	200 MHz	200 MHz
Image format	png,bmp,jpg,svg,gif	bmp,jpg	jpg,bmp,png,gif
Resolution	480×272 pixel	480×272 pixel	480×272
Flash	256MB	128MB	120 MB
Color	262 K	65 K	65 K
PCB	2.0mm black, ROHS	1.6mm green	1.6mm green
Touch Type	Resistive	Resistive	Resistive
Interface	RS232/RS422/RS485/TTL	RS232/RS485/TTL	RS232/TTL

Como se observa en la figura 2.6, la pantalla elegida ...

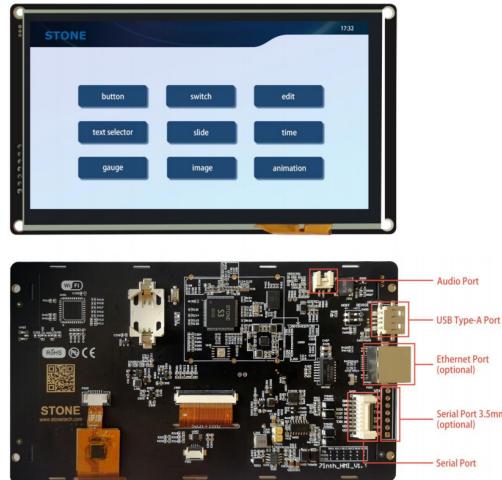


FIGURA 2.6. Display táctil Stone.

2.3. Equipo propuesto

2.3.1. Componentes electrónicos

Como se observa en la figura 2.7, el equipo dip coater esta compuesto por los siguientes módulos:

- Microcontrolador ESP32.
- Periféricos principales (UART SPI I2C).
- Driver de motor paso a paso TRINAMIC TMC5130.
- Pantalla táctil STONE 4.3 inch.

2.3.2. Componentes mecánicos

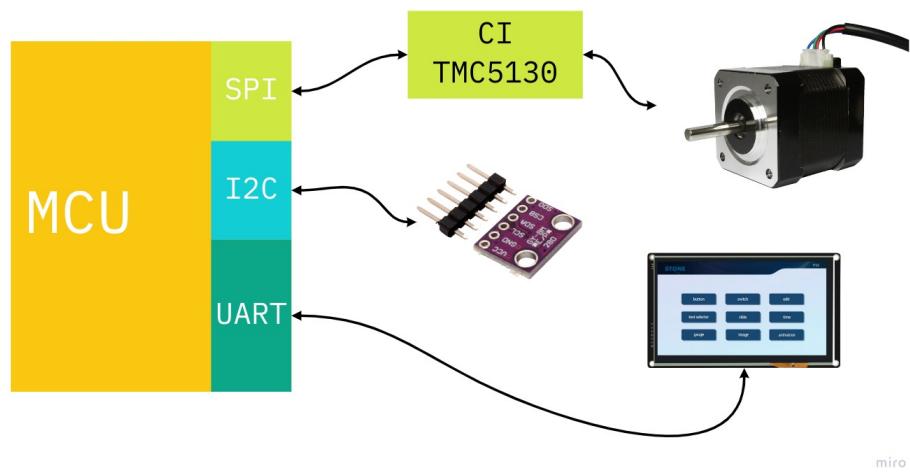


FIGURA 2.7. Esquema propuesto.



FIGURA 2.8. Guía Lineal IGUS.

Capítulo 3

Diseño e Implementación

3.1. Hardware

Como se detallo en el capítulo 2 las primeras pruebas fueron realizadas con la placa experimental TMC5130-EVAL, en la web de la empresa [12] se pueden encontrar los diseños de todas las placas de evaluación que la misma comercializa. También se analizaron varios esquemáticos de los módulos de desarrollo **NODE-MCU** del microcontrolador ESP32, este último al ser un producto de venta masiva cuanta con gran cantidad de información y ejemplos de implementaciones. Por lo tanto el diseño de nuestra placa surge del análisis de las implementaciones anteriores.

Para el diseño del *hardware* utilizamos el software libre de diseño de circuitos impresos **KICAD**, cabe destacar que este software a avanzado y mejorado en cuanto a sus capacidades técnicas en los últimos años, es posible que el apoyo del **CERN** haya influenciado de manera positiva tal como se comenta en la siguiente nota [14].

3.1.3.2

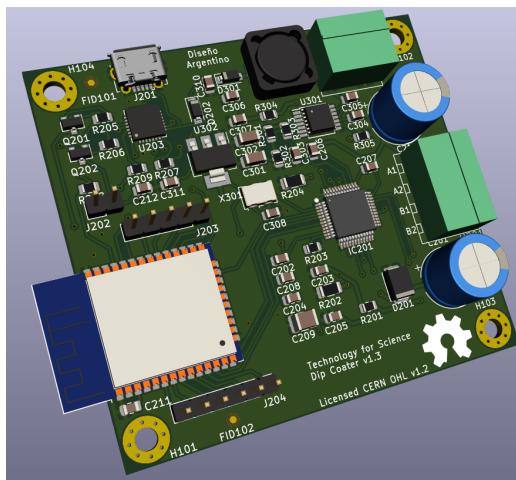


FIGURA 3.1. Modelo 3D Kicad.



FIGURA 3.2. Placa fabricada MAYER SRL.

3.1.1. Diseño y fabricación

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. Modelos 3D

3.3.2. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC

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

5.1. Conclusiones generales

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

Algunas preguntas que pueden servir para completar este capítulo:

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

5.2. Próximos pasos

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.

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] Kibron. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.kibron.com/layerx-134>.
- [5] Biolin Scientific. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.biolinscientific.com/ksvnima/fabrication-and-deposition-of-thin-films/dip-coaters>.
- [6] Bungard. *Dip coater machine*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.bungard.de/en/machines/dip-coaters/rdc-15>.
- [7] Ossila. *Dip coater machine*. Visitado el 08-03-2022. URL: <https://www.ossila.com/products/dip-coater>.
- [8] Holmarc. *Dip coater machine*. Visitado el 10-03-2022. URL: https://www.holmarc.com/dip_coating_unit.php.
- [9] Trinamic Motion Control. *TMC5130*. URL: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc5130a-ta/>.
- [10] Kicad. *Open Source Electronics Design*. URL: <https://www.kicad.org/>.
- [11] 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>.
- [12] Trinamic. *Motion Control*. URL: <https://www.trinamic.com/>.
- [13] Stoneitech. *HMI Stone Display*. URL: <https://www.stoneitech.com/>.
- [14] Antonella Del Rosso. *KiCad software gets the CERN treatment*. 2015. URL: <https://home.cern/news/news/computing/kicad-software-gets-cern-treatment>.